

Mc  
Graw  
Hill

Education

# Making Things Move



互动电子创意设计与制作

# Maker

## 机械电子创意实现 与项目制作

[美] Dustyn Roberts 著

郭洪红 译

资源知识  
分享

PDG



科学出版社

(TN-1221.0101)

责任编辑 喻永光 杨 凯

责任制作 董立颖 魏 谨

封面制作 孙德峰

# Get Your Move On!



**McGraw-Hill**  
**全球智慧中文化**

<http://www.mheducation.com>

科学出版社 东方科龙公司

联系电话: 010-82840399

E-mail: [boktp@mail.sciencep.com](mailto:boktp@mail.sciencep.com)

有关网址: <http://www.okbook.com.cn>

销售分类建议: 工业技术/电子技术

[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

ISBN 978-7-03-035714-4



9 787030 357144 >



定 价: 42.00元

互动电子创意设计与制作

# Maker机械电子 创意实现与项目制作

[美] Dustyn Roberts 著

郭洪红 译

科学出版社

北京



图字：01-2011-5264号

## 内 容 简 介

本书用生动形象的手绘插图、活泼而简练的语言、身临其境的现场实物图片，通过 Maker 将各种奇思妙想变成实作项目的过程，教授机械电子学的关键知识，并向大家传达了 Maker 的核心价值观——创意—转化—制作—集成—分享。

本书以项目为导向，主要内容涉及机构与机械设计基础知识、选材、零件连接方法、力学计算、电机控制、基本传动部件的使用及选型、简单机械的组合及转换、Arduino 编程与控制。

本书可作为高等院校师生、工程技术人员、科研人员的参考书，也可以作为没有工程技术背景的艺术家和 Maker 的入门参考书。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

Maker 机械电子创意实现与项目制作 / (美) Dustyn Roberts 著; 郭洪红译.  
—北京: 科学出版社, 2012

(互动电子创意设计与制作)

ISBN 978-7-03-035714-4

I. M… II. ① D…② 郭… III. 机电一体化—微控制器 IV. TH-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 238796 号

责任编辑: 喻永光 杨 凯 / 责任制作: 董立颖 魏 谨

责任印制: 赵德静 / 封面制作: 孙德峰

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京市四季青双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2013年1月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2013年1月第一次印刷 印张: 16 1/2

印数: 1—4 000 字数: 311 000

定价: 42.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



**Dustyn Roberts**

**Making Things Move: DIY Mechanisms for Inventors, Hobbyists, and Artists**

**0-07-174167-4**

Copyright © 2011 by McGraw-Hill Companies, Inc.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including without limitation photocopying, recording, taping, or any database, information or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

This authorized Chinese translation edition is jointly published by McGraw-Hill Education (Asia) and Science Press Ltd. This edition is authorized for sale in the People's Republic of China only, excluding Hong Kong, Macao SAR and Taiwan.

Copyright © 2013 by McGraw-Hill Education (Asia), a division of the Singapore Branch of the McGraw-Hill Companies, Inc. and Science Press.

版权所有。未经出版人事先书面许可，对本出版物的任何部分不得以任何方式或途径复制或传播，包括但不限于复印、录制、录音，或通过任何数据库、信息或可检索的系统。

本授权中文简体字翻译版由麦格劳-希尔（亚洲）教育出版公司和科学出版社有限责任公司合作出版。此版本经授权仅限在中华人民共和国境内（不包括香港特别行政区、澳门特别行政区和台湾）销售。

版权© 2013 由麦格劳-希尔（亚洲）教育出版公司与科学出版社有限责任公司所有。

本书封面贴有McGraw-Hill公司防伪标签，无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记号：01-2011-5264

## 著者简介

Dustyn Roberts接受的是传统的工程教育，却有非传统的教授工程知识的方法。她最初是作为一名工程师在NASA（美国国家航空航天局）火星科学实验室样品采集处理系统的蜜蜂机器人（Honeybee Robotics）项目组工作，这款机器人定于2011年发射。在这个项目组工作期间，她还设计了一种机械钻；她曾经带领机器卡车在澳大利亚的矿区进行现场工作；并且给DARPA（美国国防部高级研究计划局）、NIH（美国国家卫生研究所）、NASA和DOD（美国国防部）写过提案；还曾经与Goddard太空飞行中心一起主持过一个项目，开发一种用于月球上的便携式样品采集处理系统。在与纽约的Eyebeam艺术与科技中心的两位艺术家进行交流后，她创建了Dustyn Robots（[www.dustynrobots.com](http://www.dustynrobots.com)）网站，并且一直致力于做咨询工作，这些工作包括如何进行步态分析、如何设计降落伞引导系统等。2007年，她为纽约大学的互动远程通信项目（ITP）开发了一门Mechanisms and Things That Move（运动的机构与物体）的课程，并把这门课程的内容编成了这本书。

Dustyn在卡内基梅隆大学获得了机械与生物工程专业的理学学士学位，在此期间还辅修了机器人学与贸易学，并获得了特拉华州大学的生物力学与运动学的硕士学位，现在正攻读纽约大学理工学院的机械工程博士学位。她还受到了Time Out New York, PSFK, IEEE Spectrum以及其他一些地方性组织的关注。她现在与她的伴侣Lorena，以及她的猫Simba一起在纽约生活。

# 致谢

首先，我要感谢我所有的家人和朋友，是他们容忍了我太多“我不行，我不得不去写”这类借口；感谢我的父亲，他是一名工程师，即使他并没有什么商业头脑，也一直鼓励我有奇思妙想；感谢我的母亲，她甚至根本不知道我在说什么，但依然相信我的能力。

感谢纽约大学的交互远程通信项目（ITP），特别是 Red Burns 和 Tom Lgoe，请了我这样一名工程师来给艺术家们授课。很快 Tom 就不仅仅是我班里的领导了，因为从第一天开始，他就支持并鼓励大家，现在已经成了大家的良师益友。开始教课的时候，我仅仅是一名工程师，不过现在我也是一个 Maker。感谢你们给我的挑战，使我从事的领域能被其他人了解，并且可以通过制作提高其他人的能力。通过这个过程，毫无疑问，我所学的东西比我教的还要多。还要感谢 ITP 招收的学生，他们让我的教学过程特别愉快，我有机会与每一个学生互动交流，是他们帮我完成了这本书的撰写。

感谢 Eyebeam 艺术与科技中心，感谢该中心让参加实习期项目的艺术家来支持我的工作，也感谢它吸引了出色的实习生。没有团队中实习生的帮助，我完成这本书不仅会花费更长的时间，而且工作中会少很多乐趣。这些实习生不是为了免费的午餐和某些名利在工作。感谢 Sean Comeaux 制作插图，帮我找到了一种解释事物的新方法。感谢热情的 Sam Galison 和 Stina Marie Hasse Jorgensen 为网站的项目策划、摄影以及视频编辑所付出的热情及出色的工作。

我可以肯定他们任何时候都不会忘记第 6 章或者那位“不懒惰的苏珊”。感谢其他人，朋友及员工，是他们让我们的工作场所更有朝气。

感谢每一位远程帮助我编辑 Book&Bribe 的人（以及 Tom 帮我出的主意），我私下里仅通过提供点食物和饮料，就说服我的朋友和同事通读我的初稿。他们分别



# 前言

## 这本书写了什么

在一次我与 MakerBot 实业公司 (www.makerbot.com) CupCake CNC 发明人 Bre Pettis 的谈话中，我问他是否每个发明家都是经过培训的机械工程师，他的回答是“不对，如果我们说的话，不可能做成东西”。CupCake CNC 是一个微型的 3D 打印机，可以通过计算机建模的方法，用熔化的塑料制作与纸托蛋糕一样大小的 3D 实物。MakerBot 团队成员有能力用他们手上的工具和现有材料做出这样一个实物。在没有适当资源或资金的情况下，受过培训的工程师可能会知道任务的难易性而放弃尝试。但是 MakerBot 团队成员对他们要做的事情没有任何经验。他们只会坚持目标，并想办法完成任务。这本书是为所有想让自己做的机构动起来，却仅接受过一点或完全没有接受过正规工程培训的人写的。实际上，就像 Bre 说的一样，没有经过工程培训反而会对你更有帮助。

通过学习本书中所写的非专业的手段、实例以及 DIY 项目，你会成功地制作出能动的机构。也许你是一位想让自己的艺术品有生命的雕刻家，也许是一位探索机械原理的计算机科学家，或者是一位想给产品增加功能的产品设计师。或许之前你也做过一些项目，但是它们很容易出现问题。或者你之前没自己做过能动的机构，现在想学习如何做。在纽约大学 Tisch 艺术学院的互动远程通信项目班里，我的学生都是这种情况，是他们让我有了写这本书的想法。

该课程的名称叫做“运动的机构与物体”，这门课程的开展填补了在本项目的开展过程中，学生已经学习了怎么做（电子基础、交互设计和物联网）和他们想做什么（自动爬楼梯的婴儿推车、木质机械玩具及可以为电视机供电的固定自行车）之间的空白。我们的目标是从一个看似不可能的项目概念入手，注入一些基本的工程知识，最后出人意料地完成一个与最初的概念相似的作品。你会看到这些项目，也



可以在课程主页 <http://itp.nyu.edu/mechanisms> 上了解更多内容。在我教这门课的第一年中，我意识到我在工程设计工作中获得的实践经验可以用在一个完全没有工程基础知识的人上。有一个学生对我说：“你的课让我重新认识了世界”，另一个对我说：“设计和制作能够工作的东西让我非常有满足感”。本书旨在把这种满足感带给所有想学习机械知识却不知如何下手的人。

如果要控制的机械太小，不能完成任务，那么在机电设备上搭电路就没有意义了。你可以用你的力学和材料的基础知识，来避免高成本的过度设计。为了说明如何解决这类问题，我书中写的主题很广泛，内容从如何将联轴器和轴与电机连接，到如何实现旋转运动与直线运动的转换。通过与项目有关组件与系统的照片、图纸、图表和三维图像，来引导你学习每一章的内容。为了减小对那些听起来就很难的概念及图表的恐惧感，所有的插图都是由插图画家（不是工程师）手绘的，所以对概念的解释是以一种轻松的、引人眼球的、十分友好的方式来实现的。

我要强调尽可能使用现成的零部件，大部分的项目将会使用现成的金属、塑料、木材和纸板，也会用到一些能学会的加工技术。整本书设计了一些简单的项目，可以运用手头的材料来完成。在本书的最后，有一些更复杂的项目，运用了前面多个章节中用过的材料。学习本书能让你避免在机械设计过程中产生失误而导致挫折感，保证你能够在省时、省力、少受挫折的前提下，掌握有关机构的一般知识。而且即使从来没去过五金店，也可以自己做出机构。

## 这本书没写什么

本书不是工程学的教材。阅读本书不需要有电子或机器人的背景知识，你也不需要知道微控制器是什么或者如何给微控制器编程。我写这本书的时候，是假定你家车库里没有五金件，假定你不知道车床为何物，或你并不能仅通过看电机的旋转轴就可以估算它的转矩。

每一章的知识都可以扩充为一本书，在很多书上都可以找到更详细的技术说明。这本书是写如何做东西的，只包括了做一个东西必须掌握的知识。也有少量的理论与背景知识，来帮助你理解机构的工作原理，方便你构思与制作自己的作品。如果这些内容对你来说太难，或者你已经掌握了这些背景知识，那么直接动手做吧。

## 如何使用本书

就如《爱丽丝梦游仙境》中国王对白兔说的那样：“从头开始做起，一直继续到

最后，然后停止。”如果你真的没有一点儿做东西的经历，那么就最好读一下这本书。如果你没有看第4章中有关转矩的知识，学习第6章的转矩估算时就会感到沮丧。在一些小项目中，别怕把手弄脏，要习惯做东西。所有章节内容的安排都是先从零件开始，到最后完成一个运动机构，所以读到本书末尾的时候，你的工具袋里已经有了所有的工具，可以挑战第10章中的项目了。

本书的每一个项目设计都包括两部分：材料清单与操作方法。我曾经听说过烘焙是一门科学，烹饪是一门艺术。刚开始时，使机构运动起来有一点点儿像烘焙食物，你必须确保原料的比例恰当，按照书上的要求一步步地完成每一个步骤。但是一旦你习惯了做运动的机构，这件事看起来就像是烹饪了。除了掌握基本的配方外，你还可以添加自己的调料，自己开始做实验。

也可以把本书当作一本参考书，尤其是你本来就有一些机构运动的理论知识，而只需要一些实际操作方面的指导时，这本书作为参考书就更合适了。我读完工程学本科后，就是这种情况。我会计算让机构动起来的力或转矩，但不知如何选择电机、如何在电机轴上连接零件。因为学校里不会教你这些知识（至少我读的学校没有教），所以你需要通过经验来掌握。我希望这本书能让你实践操作的起点比我高。

## 创意便是最大的财富

虽然本书是在假定你没有任何有关机械背景知识的前提下写的，但是你做的任何事都会对你有帮助。我强调：任何事！

你能提供的最重要的东西是你的创意。我见过很多出色的项目，都出自完全没有工程经验的人之手，当然他们更没有工程方面的学位。如果你是一个充满激情的音乐家，有让吉他自动弹奏的想法，相对于你是一个知道吉他的工作原理却从没有弹过吉他的工程师来说，你更能做出一个好吉他。本书所列的工具会帮你将激情融入项目，将创意变成现实。书中列出了这些工具，也提供了如何使用这些工具的例子，但如何去运用它们的创意只能来源于你自己。

我并不是强调一定要成为一名艺术家。与大多数跟我一起工作过的学生和设计师们相比，我的右脑还不是最发达的。不过我知道如何通过做这些能运动的物体来与那些不是工程师的人交流。你可以通过阅读本书来消磨周六晚上的时间。但是我希望通过这本书中所提到的工具和方法，帮你把做人工饮料搅拌机的想法变为现实。

本书包括大量你可以自己做的项目，概念和技巧是有限的，而你的想象力却是无限的。刚开始做的时候会有点难，不过一旦将一个很复杂的项目分解，你就会觉得一点也不复杂。本书能够帮助你，学到的知识越多，你以后做项目的灵感也就越丰富。

## 你需要知道什么

虽然不要求有工程和生产方面的经验，但为了能从本书中学到更多知识，仍需要掌握几点知识。最重要的就是如何使用互联网，至于为什么这么说，有三个原因。

(1) 在学习机械及相关的知识时，我们其实是站在巨人的肩膀上的。从 Instructables 网站 ([www.instructables.com](http://www.instructables.com)) 到达·芬奇的第一张机械图纸，可以在网上找到很多灵感，来帮助我们形成项目设计的思路，或者从类似的东西中学到知识。本书的目的是帮助完成项目，不是让你学会书中所有的内容，所以在开始前要先看看主题。你想把旋转运动转换成直线运动吗？可以想想，你不是第一个做这件事的人。利用本书中的基础知识，以及几十个专门研究把旋转运动转换为直线运动例子的网站，以激发你设计出自己需要的机构。借鉴这些经验，把它们用在自己的项目中，该用的时候就得用。正像 Aiden Lawrence Onn 和 Alexander 在 *Cabaret Mechanical Movement: Understanding Movement and Making Automata* (London: G&B Litho Limited, 1998) 一书中说的那样，“如果你想使物体运动起来，一定花点时间去学习其他物体是如何运动起来的”。

(2) 做东西需要工具和零件。你很可能需要在网上订购这些东西。虽然很多东西都可以用纸板和吸管来做，但你做“不懒惰的苏珊”(第10章项目10.1)时，你家附近不一定有卖这个项目中用到的直流减速电机的大商店。你也可以在网上淘到你家附近五金商店更多的便宜东西，从手钻到曲别针。书中列出了每一个项目所用到的网址，我常用的有 McMaster-Carr ([www.mcmaster.com](http://www.mcmaster.com))，SparkFun ([www.sparkfun.com](http://www.sparkfun.com)) 和 All Electronics ([www.allelectronics.com](http://www.allelectronics.com))。

(3) 本书有一个配套的网站：[www.makingthingsmove.com](http://www.makingthingsmove.com)。没办法写在书中的一些内容，如彩色图片及视频，都会发布在这个网站上。也可以去看博客和其他一些资源。拥有这本书，你就会成为 Maker 文化的一分子，这种文化比你所了解的内涵要丰富得多。通过 [makingthingsmove.com](http://makingthingsmove.com) 网站，你可以与其他志趣相投的人交流经验。可以下载、加工和购买的电子文档的链接也会发布在网上，可以在 Thingiverse ([www.thingiverse.com](http://www.thingiverse.com))，Ponoko ([www.ponoko.com](http://www.ponoko.com)) 或 Shapeways ([www.shapeways.com](http://www.shapeways.com)) 上查找“dustyrobots”。

除了知道如何使用互联网，我还希望你有一点关于几何学、三角学、基础代数的知识。如果你能解出公式  $2 \times ? = 6$  中的“？”，知道什么是正弦、余弦及正切，那就不用担心了，这本书中最复杂的内容也不过如此。你也需要知道直径、周长、切线及垂直的定义。如果你对这些知识有些生疏，那就赶快通过网络来巩固一下。

## 你需要准备什么

书中每个项目里都有一个材料和工具清单，方便你选择自己所需要的材料与工具。不过，如果你想有一个良好的开端，就先准备以下这些常用的工具（图 0.1）吧，会对你非常有用的。



图0.1 基本工具和材料

### 1. 手 钻

做项目时，若要在木材或薄金属板上装螺钉和木销，就需要手动钻孔。随便一个手钻都可以钻孔，不过我还是更喜欢那种像 Dewal 模型一样的可充电无线手钻。要确保手钻可以装小钻头 [ 钻头直径小至  $\frac{1}{16}$  in (1 in=2.54cm) ]。Dremel 电磨也可以加工小型的工件，可用来切割和打磨小零件。

### 2. 万用表

只要你需要干一些电工活，如看看电池的电量、检查电路连接是否正确，就会用到万用表。确保万用表可以测量电压、电阻、电流及连通性。为了用起来方便，最好用一款量程可自动调节的万用表。有了这种万用表，你在测量前就不用估算被测值的大致范围了。量程可自动调节的万用表的价格可能会有点高，不过如果你不太精通电子学知识的话，它会帮你节省时间，减少你工作中的挫败感。自动关机是一种不错的节电方法。图 0.1 所示万用表是 SparkFun 的 TOL-08657，其量程可自动调节。相比那些低价的万用表来说，它测量的电流范围更大，测量电机电流时会很方便。

### 3. 测量工具

测量工具包括测量大件物体的卷尺、测量小件物体的金属尺，这种尺子在切

割东西时，也可用作基准边。还包括测量更小尺寸的卡尺，我推荐使用数码卡尺（SparkFun TOL-00067）。

### 4. 改 锥

改锥有 Phillips 平头改锥。最好准备几种不同尺寸的改锥。Jameco Electronics 公司（[www.jameco.com](http://www.jameco.com)）有一种手持式双面微型改锥（零件号为 127271），售价约为 2 美金。还有一种大的多功能改锥，是 Craftsman 的 4-IN-1（型号为 41161）。价格便宜的改锥用的材料可能是软金属，改锥头易弯曲变形，所以最好别用太便宜的改锥。

### 5. 多刃刀具

最常见的多刃刀具是瑞士军刀或 Leatherman 工具。多刃刀具是一个概括性的名称，方便携带，而且有了这种工具，在干一些小活时，就不用再买一大堆工具刀了。多刃刀具的形状、大小和价格各不相同，我推荐使用一个至少具有改锥、剪刀、锉、刀及锯的多刃刀具。我用 Leatherman 工具很多年了，当时的价格大概是 45 美金，在我工具箱里，它是最重要的工具。在 [www.leatherman.com/multi-tools](http://www.leatherman.com/multi-tools) 上可以查到 Leatherman 工具。Maker Shed（[www.makershed.com](http://www.makershed.com)）有几种激光蚀刻多刃刀具，可能名叫“waranty voider”和“bomb defuser”。要买瑞士军刀，可以到 [www.swissarmy.com/multitools](http://www.swissarmy.com/multitools) 网站的“Do-It-Yourself”目录下去找。若要做特别复杂的项目，就需要准备带螺丝锥或开瓶器的工具。

### 6. 胶带和 WD-40

“如果一个物体不应该动却动了，那么你需要使用胶带；如果应该动却动不了，就需要使用 WD-40。”我不记得我第一次听到这句话是在什么地方了，可能是在我第一次生产实习的公司，老板放在办公桌上的一本一日翻一页的日历上看到的，这本日历叫“胶带的 365 天”。大多数读者都习惯使用标准宽度的银色胶带。WD-40 用起来也很方便，可以用在吱吱作响的合页上，也可以用来润滑齿轮以及其他运动件。

拥有工具不是最重要的，最重要的是使用工具时要保证安全。比如，安装电机时，若没有戴防护镜，就不能钻孔；也不要再在厨房桌子上给木材钻孔，因为木屑可能会弄伤你的眼睛，也可能钻到特意放在餐桌上的餐垫；在使用带尖的或边缘比较粗糙的东西时，要戴上手套，防止手被割破或刺伤。在每一个项目中，我都会强调安全问题。但是在干活之前，要养成先想一想操作过程的习惯，这样可以提前了解并消除可能会产生的安全隐患。伤口可以愈合，但是长时间听雷鸣般的钻孔声，你的听力可就很难恢复了；或使用 Dremel 切割轮时，如果操作方向不对，视力也难以恢复。所以，手头最少要有一幅防护眼镜、一对耳塞。总而言之，在做任何项目前，首先考虑的都是安全防护问题。

# 目录

<b>第1章 机构·机械</b> .....	1
1.1 6种简单的机构 .....	2
1.1.1 杠 杆 .....	2
1.1.2 滑 轮 .....	8
1.1.3 轮和轴 .....	12
1.1.4 斜面或楔 .....	12
1.1.5 螺 纹 .....	13
1.1.6 齿 轮 .....	14
1.2 约束与自由度的设计 .....	18
1.2.1 自由度 .....	18
1.2.2 最小约束 .....	20
项目1.1 Rube Goldberg的早餐机 .....	21
<b>第2章 如何选材</b> .....	25
2.1 材料的参数 .....	26
2.1.1 材料特性 .....	26
2.1.2 材料失效：应力、弯曲与疲劳 .....	26
2.1.3 如何设计公差 .....	27
2.2 材料种类 .....	29
2.2.1 金属材料 .....	29
2.2.2 陶 瓷 .....	31
2.2.3 高分子材料（塑料） .....	32

2.2.4	复合材料	33
2.2.5	半导体材料	35
2.2.6	生物材料	35
项目2.1	另类跳水板	35
<b>第3章</b>	<b>固定与连接的方法</b>	<b>37</b>
3.1	非永久性连接：紧固件	38
3.1.1	螺钉、螺栓和螺纹孔	39
项目3.1	钻螺纹孔	42
3.1.2	螺    母	46
3.1.3	垫    圈	46
3.1.4	钉子和U形钉	47
3.1.5	销    钉	47
3.1.6	弹簧卡环	47
3.2	永久性连接：黏合剂、铆钉或焊接	48
3.2.1	黏合剂	48
3.2.2	铆    钉	50
3.2.3	熔焊、铜焊和锡焊	51
<b>第4章</b>	<b>力·摩擦·转矩</b>	<b>53</b>
4.1	转矩的计算	54
4.2	摩    擦	57
项目4.1	估算摩擦系数	60
如何减小摩擦		61
4.3	受力分析图与涂鸦机器人	62
4.4	力与转矩的测量	65
4.4.1	力的测量	65
4.4.2	转矩的测量	67
项目4.2	测量电机的转矩	67

<b>第5章 功率·功·能量</b> .....	69
5.1 机械能.....	70
5.2 电能.....	71
5.3 为你的项目提供能量.....	75
5.3.1 原型机电源：可调台式电源.....	76
5.3.2 移动项目的选择：电池.....	77
5.3.3 可插接电源.....	79
5.3.4 可替代能源.....	81
5.3.5 弹簧及弹性能量的存储.....	85
项目5.1 捕鼠器小车.....	86
<b>第6章 电机：产生和控制运动的执行器</b> .....	89
6.1 电机的工作原理.....	90
项目 6.1：用磁铁DIY 电机.....	90
6.2 旋转执行器.....	92
6.2.1 直流电机.....	93
6.2.2 交流电机.....	100
6.2.3 旋转螺线管.....	101
6.3 线性执行器.....	102
6.3.1 直线电机.....	102
6.3.2 螺线管.....	103
6.4 电机控制.....	104
6.4.1 直流电机控制基础.....	104
项目6.2 最简单的直流电机控制电路.....	104
项目6.3 焊接电路.....	105
项目6.4 用面包板搭电路.....	108
项目6.5 电机反转.....	110
6.4.2 用PWM信号控制速度.....	112
项目6.6 用硬件PWM控制电机速度.....	113
6.4.3 更高级的直流电机控制方法.....	116



项目 6.7 用软件产生PWM信号控制电机速度 .....	116
6.4.4 模型舵机的控制 .....	120
项目6.8 控制一个普通舵机 .....	121
6.4.5 步进电机控制 .....	124
项目6.9 双极步进电机的控制 .....	125
6.4.6 直线电机控制 .....	128
6.4.7 电机控制提示及技巧 .....	128
6.5 无电机驱动 .....	131
6.5.1 流体压力 .....	131
6.5.2 人造肌肉 .....	132
<b>第7章 传动件：轴承·联轴器·齿轮·丝杠·弹簧 .....</b>	<b>135</b>
7.1 轴承与轴套 .....	136
7.1.1 径向轴承 .....	137
7.1.2 推力轴承 .....	140
7.1.3 线性轴承与滑轨 .....	141
7.1.4 混合轴承与特殊轴承 .....	142
7.1.5 轴承安装提示与技巧 .....	143
7.2 联轴器 .....	145
7.2.1 舵机 .....	145
7.2.2 其他电机 .....	146
7.2.3 使用离合器 .....	151
7.3 轴环 .....	152
7.4 齿轮 .....	152
项目 7.1 自己动手做齿轮 .....	154
7.4.1 惰轮 .....	161
7.4.2 组合齿轮 .....	162
7.5 皮带轮与链轮、皮带与链条 .....	162
7.5.1 普通皮带轮与皮带 .....	163
7.5.2 同步轮与同步带 .....	164
7.5.3 链轮与链条 .....	164

7.6	丝杠传动	164
7.7	弹 簧	165
7.7.1	压 簧	166
7.7.2	拉 簧	167
7.7.3	扭 簧	168
7.7.4	弹簧垫圈	169
7.7.5	板 簧	169
7.7.6	盘 簧	169
<b>第8章 组合简单机械的乐趣</b>		171
8.1	运动形式的转换机构	172
8.1.1	曲 柄	172
8.1.2	凸轮与从动件	173
8.1.3	连 杆	176
	项目8.1 缩放仪	177
8.1.4	棘轮和掣爪	178
8.1.5	运动转换	178
8.2	自动机械玩具	182
	项目8.2 DIY一个玩偶：点头羊	184
<b>第9章 创意实现与分享</b>		187
9.1	CTFIP循环	188
9.2	创意阶段	189
9.2.1	模拟化构思	189
9.2.2	数字化构思	189
	项目9.1 下载并打开一个零件的3D图	193
9.3	转化阶段	194
9.3.1	模拟转化	195
9.3.2	数字转化	195
9.4	制作阶段	195

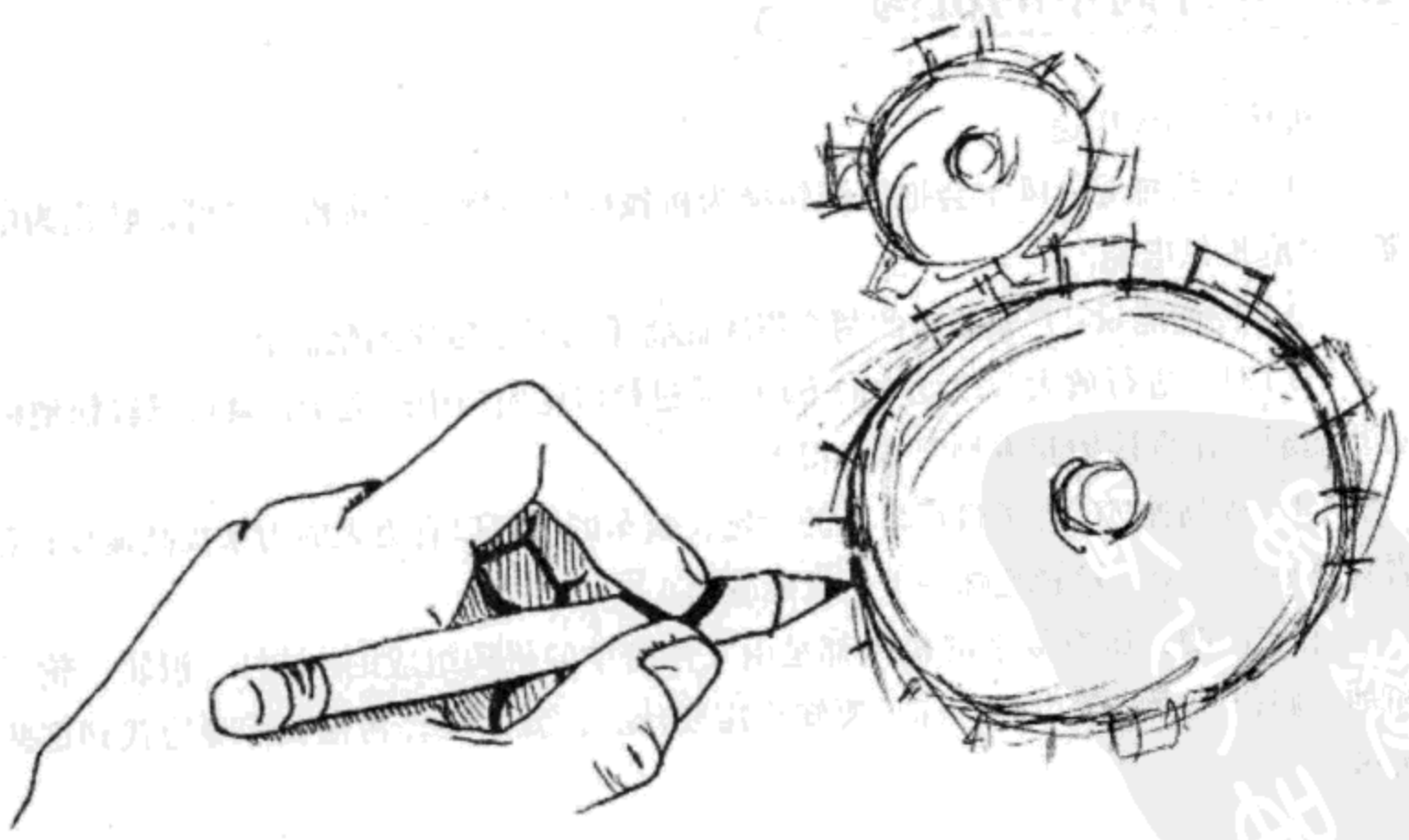
9.4.1	模拟制作	196
项目9.2	不用车床的钻孔方法	197
9.4.2	数字制作	201
9.5	集成阶段	202
9.5.1	模拟集成	202
9.5.2	数字集成	203
9.6	分享阶段	203
9.6.1	模拟分享	204
9.6.2	数字分享	204
<b>第10章</b>	<b>项    目</b>	<b>205</b>
项目10.1	不懒惰的苏珊	206
项目10.2	风    灯	214
项目10.3	SADbot: 受季节控制的机器人	220
<b>附录</b>	<b>面包板电源与Arduino入门</b>	<b>239</b>
面包板电源		240
Arduino入门		241
如何让Arduino更好地与计算机配合		241
现在让Arduino工作		243
让Arduino发挥更多的功能		244



机械工业出版社

# 第1章

# 机构·机械



机械工业出版社  
PDG

机械系统有很多外形与结构，定义也各不相同。开始制作机械之前，先看看我们要学习什么。

(1) 机构是由运动部件装配而成的。

(2) 机械是任何能工作的设备，可以是一把锤子，也可以是一辆自行车。

锤子之所以能称为机械是因为它可以把你的胳膊变“长”，让你可以做更多的功。

本书中，我们为功下的机械定义为

$$\text{功} = \text{力} \times \text{距离}$$

力 ( $F$ ) 等于质量 ( $m$ ) 乘以加速度 ( $a$ )，即牛顿的第二定律公式  $F=ma$ 。

比如，做红酒时要踩一束葡萄。你静止不动时，葡萄所受到的力等于你的体重，但实际上当你踩踏的时候，葡萄所受到的力等于你的体重加上你的肌肉施加于你脚上的加速度。但是，如果你在月球上踩葡萄，葡萄所受到的力会小一些，仅为在地球上所受力的  $1/6$ 。质量指的是组成你身体的物质的多少，它的大小不会改变。重力与加速度取决于你所在的位置和你做的动作。所以，质量是指物质的多少，而重量是质量施加的力。

## 1.1 6种简单的机构

机械有四大用途。

(1) 转换能量：风车会把风能转换为机械能把谷物轧成面粉，也可以转化为电能给家庭提供电能。

(2) 传递能量：开瓶器中的两个齿轮能将手的能量传递到瓶盖上。

(3) 对力进行放大、改变力的方向：通过拉滑轮组当中的绳子，就可以轻松地将重物抬起，比直接抬起重物要省力得多。

(4) 提高速度：有了自行车上的齿轮，骑车的人可以有更大的力来提高速度；或者只往后坐一坐，轻轻地踩一下，就能减速。

事实证明，所有复杂的机械都是由6种简单的机构组成的：杠杆、滑轮、轮子和轴、斜面、螺纹和齿轮。你只要知道需要什么，就能很轻易在我们身边找到这些机械。

### 1.1.1 杠 杆

你可以把杠杆看做一种单机构机械。根据我们之前下的定义，杠杆是一种机构，因为它有运动的部件；说它是一个机械，因为它可以帮我们工作。

杠杆是一种带支点或者支柱的刚体，用来放大施加在物体上的机械力。实际上有3类不同的杠杆，每种杠杆都有3种组件，只不过组件的布局不同而已。

- (1) 杠杆支柱（或支点）。
- (2) 输入（动力或力）。
- (3) 输出（载荷或反作用力）。

### 1. 第1类杠杆

第1类杠杆中，支点在输入和输出之间。听到“杠杆”这个词的时候，多数人都都会想到常见的跷跷板，如图1.1所示。

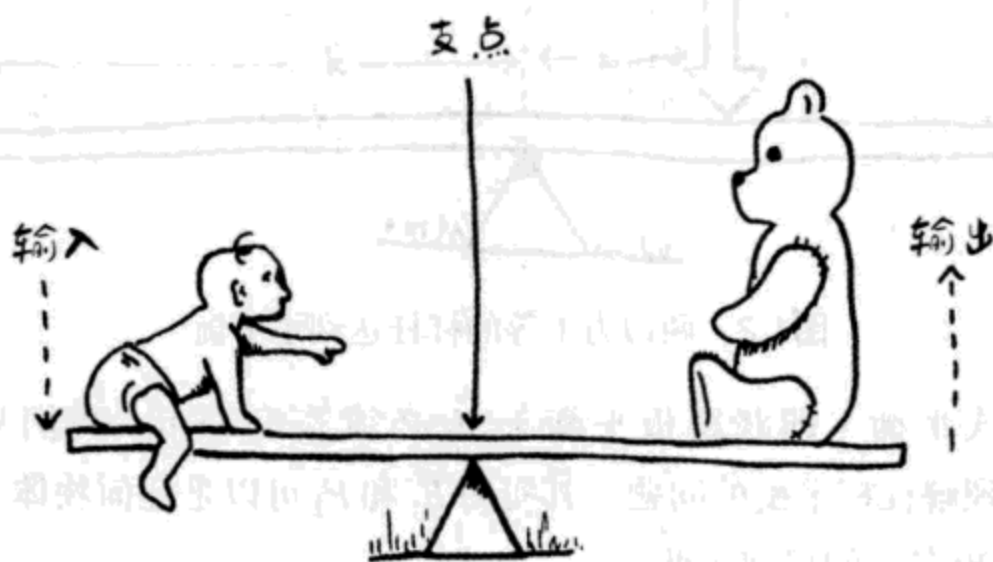


图1.1 跷跷板就是第1类杠杆

物体在跷跷板上有3种平衡方式。

- (1) 两个物体的重量完全相等，与支点的距离也完全相等。

(2) 可以在一边施加一个与另一边重量相当的力。小时候玩跷跷板时，父母可能都这么跟我们玩过。

(3) 两个物体的重量可以不同，为了保持平衡，较轻的那个物体必须离支点更远。如果与比你重的人玩过跷跷板，你可能不假思索就会离支点远一些。如果你重量轻，你就会退到跷跷板的边缘，而那位较重的朋友可能会向着支点的方向移动。

为了把这些平衡理论应用于机器上，让我们把“物体”这个词替换成“力”。首先，让我们来认识一下 Fido 和 Fluffy 吧。

Fido 是一只大狗，Fluffy 是一只小猫。因为它们的名字都以 F 开头，所以用  $F_1$  代表 Fido，用  $F_2$  代表 Fluffy。Fido 较重，所以在图 1.2 中左半边，表示它的重量的箭头 ( $F_1$ ) 比较长，它距离支点的距离表示为  $d_1$ ；右边的 Fluffy ( $F_2$ ) 距离支点的距离为  $d_2$ 。为了使跷跷板平衡， $F_1$  乘以  $d_1$  的积必须等于  $F_2$  乘以  $d_2$  的积。

$$F_1 \times d_1 = F_2 \times d_2$$

从图 1.2 及上边的等式可以看出，如果  $F_1 = F_2$ ，则  $d_1 = d_2$ ，跷跷板看起来就会像

图 1.1 一样达到平衡。但是 Fido ( $F_1$ ) 是一个重 50 lbf (1 lbf=4.448 22 N) 的狗, Fluffy ( $F_2$ ) 是一个重 10 lbf 的猫, 它们必须要调整各自与支点的距离来保持平衡。如果 Fido 距离支点 3 ft ( $d_1=3$  ft, 1 ft=0.3048 m), 那么 Fluffy 应该距离支点多远呢? 现在的等式应该是这样的:

$$50 \text{ lbf} \times 3 \text{ ft} = 10 \text{ lbf} \times d_2$$

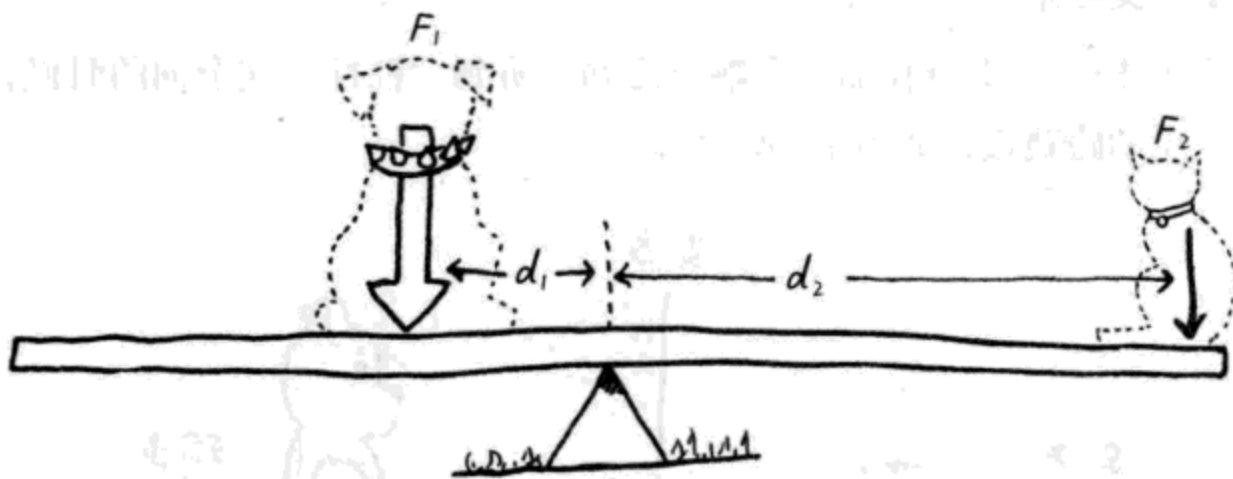


图1.2 两边力不等的杠杆达到了平衡

为了使等式平衡 (即跷跷板平衡),  $d_2$  必须等于 15 ft。我们只是用 Fido 和 Fluffy 来帮我们理解杠杆平衡的问题, 其实力  $F_1$  和  $F_2$  可以是任何物体——箱子、鸟、建筑物等你能叫出名字的任何东西。

所以, 如果猫离支点远一些, 重量较轻的猫完全可以与一只只是它 5 倍重的狗达到平衡。你也许会注意到, Fido 和 Fluffy 开始玩跷跷板时, 因为 Fluffy 离支点远, 所以位置会高一些。我把地面到 Fluffy 的最高点的距离称为“轨迹”, 如图 1.3 所示。

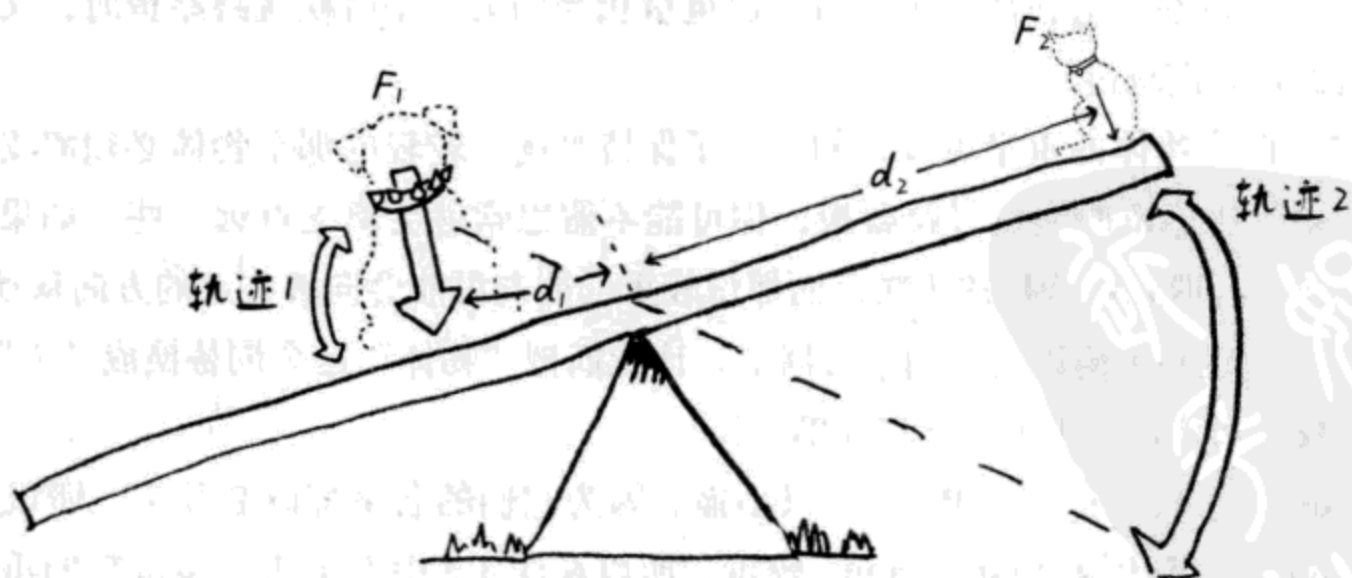


图1.3 杠杆利用机械增益达到力平衡

因此重量较轻的猫可以抬起重量较重的狗, 但是它需要更长的运动轨迹。这就是杠杆为什么能产生“机械增益”的原因: 较小的力通过较长的运动轨迹可以平衡一个短轨迹的较大的力。我们也可以说重量较轻的猫用 5 : 1 的机械增益, 通过 5 倍的

距离来平衡一个重量较重的狗。在这个例子中，重量较轻的猫 ( $F_2$ ) 的运动轨迹是重量较重的狗 ( $F_1$ ) 运动轨迹的 5 倍。

我们每天在很多地方都会看到杠杆。从板子上撬钉子时所用的羊角锤其实就是第 1 类杠杆，如图 1.4 所示。在锤子把手的最末端施加很小的一点力，就可以在距离锤头很短的距离的羊角处产生一个较大的力，这个力就可以把钉子拔出来。锤头的作用就相当于一个支点。

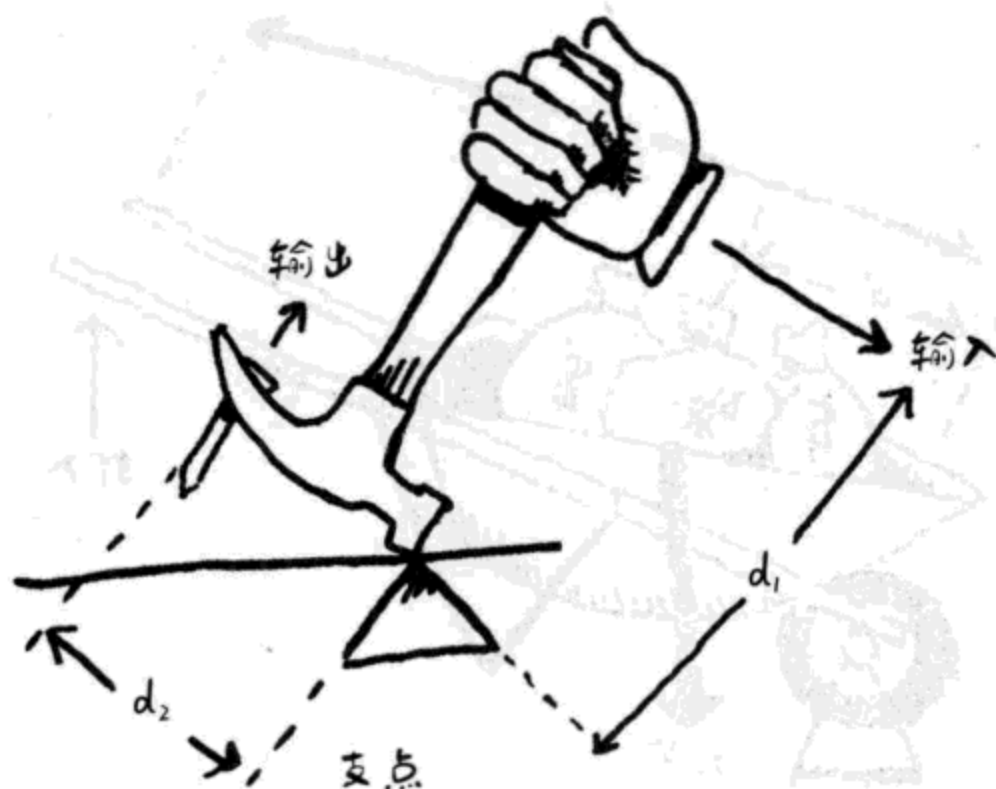


图1.4 羊角锤是第1类杠杆

还有一些其他的杠杆。

(1) 撬棍的工作原理与羊角锤相同，属于第 1 类杠杆。

(2) 船桨也是第 1 类杠杆。

(3) 用改锥撬开油漆桶盖子时，就是把改锥当成第 1 类杠杆来用。

(4) 剪刀就像是一对背靠背的第 1 类杠杆。用来剪纸的剪刀并不会产生太大的机械增益，不过长手柄的园艺剪刀和断线钳就不同了，它们的长手柄可以大大增大剪切的力度——这就是机械增益的作用！

你还能想到其他的属于第 1 类杠杆的例子吗？

## 2. 第 2 类杠杆

在第 2 类杠杆中，输出力作用于输入力和支点之间。这类杠杆典型的例子就是独轮手推车。从图 1.5 可以看出，独轮手推车中的物品就是输出力或载荷，把手相当于输入力。

可以用与第 1 类杠杆相同的等式来计算力的平衡。如果我们在独轮手推车上载有 50 lbf 装有黄金的袋子 ( $F_2$ )，袋子与车轮的距离是 1 ft ( $d_2$ )，把手上的手柄距离



车轮的距离为 5 ft ( $d_1$ ), 那么我们需要多大的力才能把装有黄金的袋子提起来呢? 把已知量先写入等式:

$$F_1 \times 5 \text{ ft} = 50 \text{ lbf} \times 1 \text{ ft}$$

所以要提起袋子, 在把手上施加的力至少为 10 lbf ( $F_1$ )。结果就是, 我们可以只用 10 lbf 的力来提起重 50 lbf 的装有黄金的袋子。这是另一个机械增益为 5:1 的例子, 与我们之前举的 Fido 和 Fluffy 玩跷跷板的例子一样。

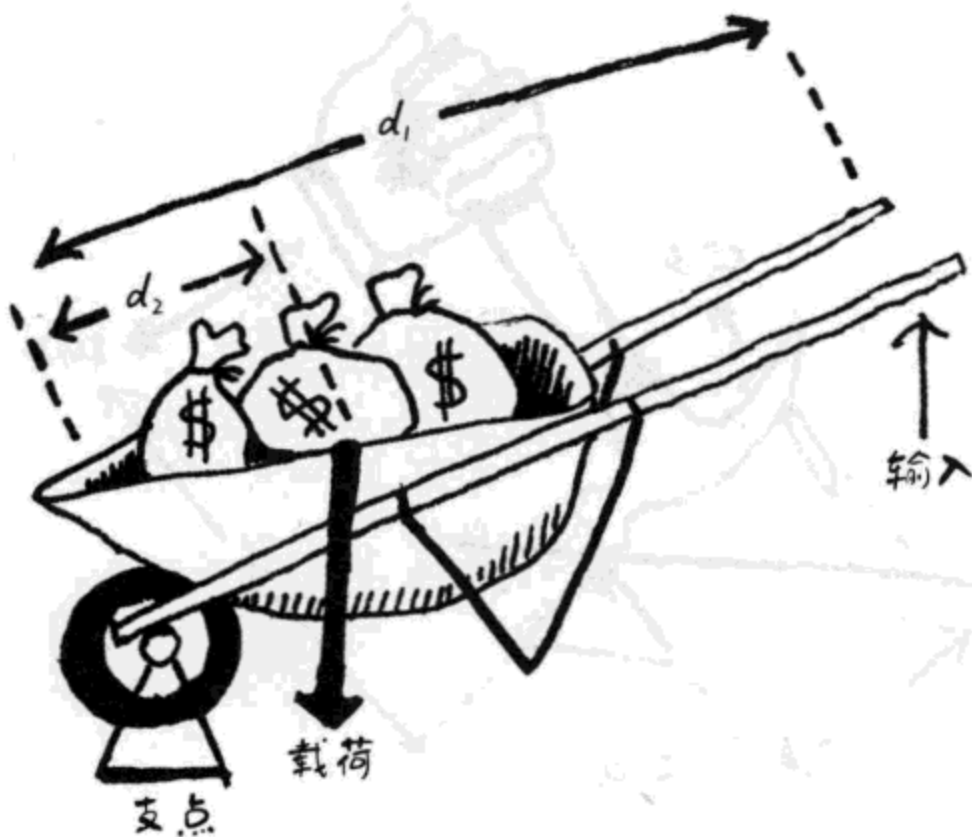


图1.5 独轮手推车属于第2类杠杆

另外一个在家里用到的第 2 类杠杆就是开瓶器。图 1.6 中标出了输入力、支点, 以及输出力。要把瓶盖打开, 开瓶器的把手运动的轨迹要长得多, 但作用在瓶盖沿上的力相比要大。坚果钳也属于第 2 类杠杆。你还能举出其他属于第 2 类杠杆的例子吗?

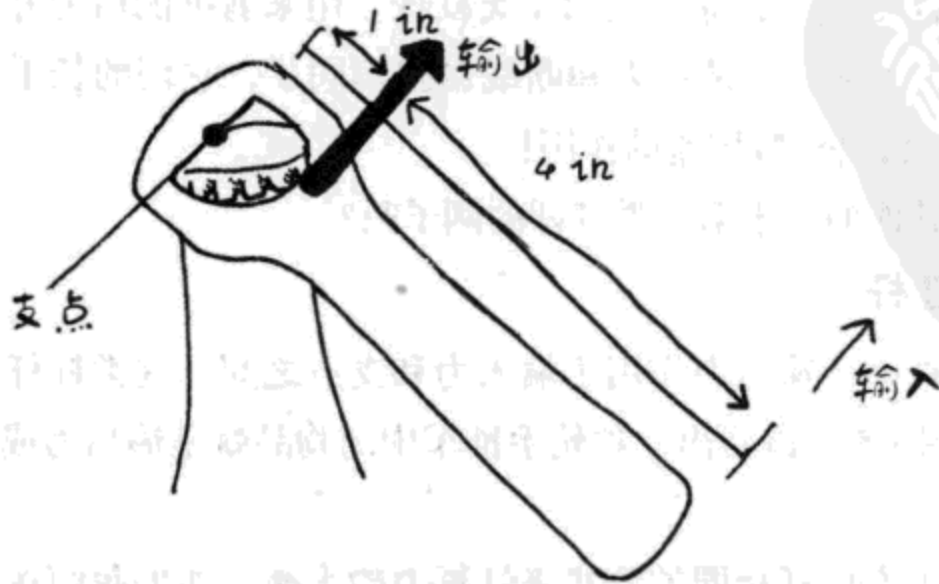


图1.6 开瓶器属于第2类杠杆

第1类和第2类杠杆都是力的放大器，它们的机械增益很高。只不过在这两种杠杆当中，输入力比输出力或载荷运动的轨迹要长。

### 3. 第3类杠杆

在第3类杠杆中，输入力作用在输出力与支点之间（图1.7），也就是我们所说的减力器。

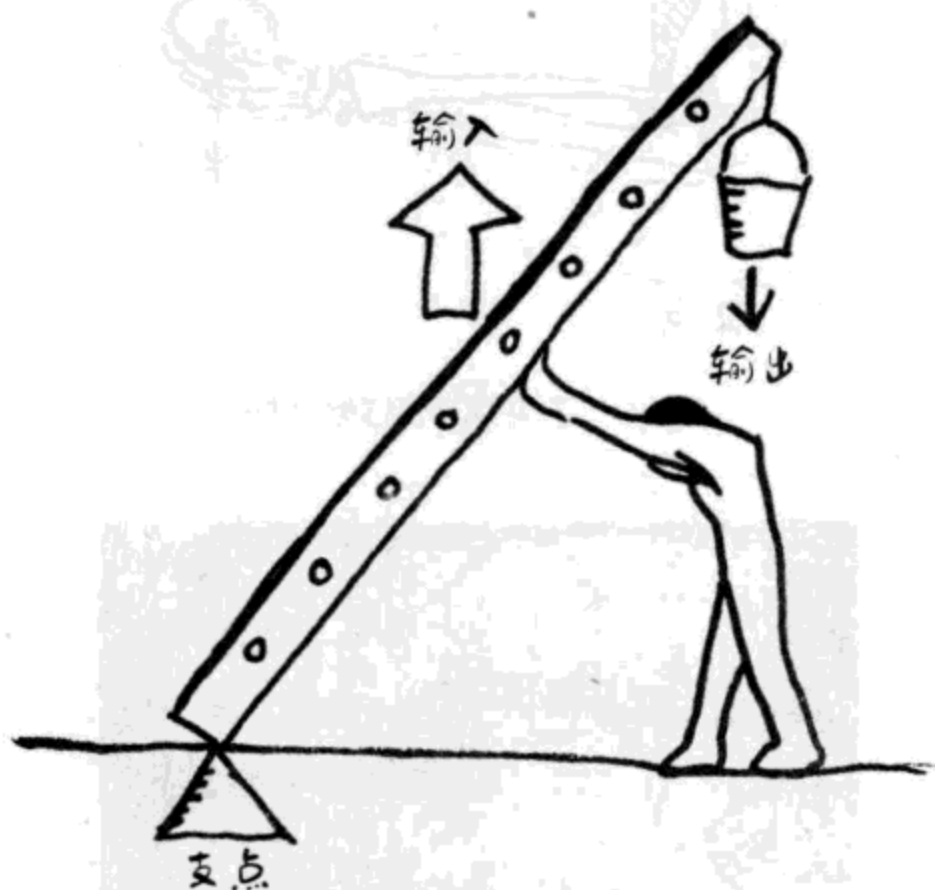


图1.7 用梯子来做第3类杠杆

为什么需要减力的机械呢？很多时候，要抬起或移动重物时，因为受到空间或其他条件的限制，只能采用这种设计。这种情况下，虽然需要的输入力较大，不过也不是没有好处，因为此时输出端比输入端的运动速度要更快，运动的距离也更远。

人的手臂就是一种很好的第3类杠杆。如图1.8所示，肱二头肌在距肩膀比较近的上臂和肘后的前臂之间。你的肱二头肌必须用力才可以把你手上很轻的物体提起。不过由于重物离手肘处的支点较远，所以重物移动的距离长。

由于离你手肘支点较远，所以这个很轻的物体需要经过一个较长的轨迹。将肱二头肌连在手腕附近的三角臂后工作效率会更高，但是这个运动范围却非常有限。另外，鱼竿和镊子也属于第3类杠杆。

也可以把杠杆组合起来形成联动装置，这方面的内容将会在第8章中介绍。现在，让我们看看我之前的学生做的一个项目，如图1.9所示。图中，两个重物在第1类、第2类和第3类杠杆的同时作用下达到平衡，其中所有的支点都用圆圈标出来了。你能说出它们分别属于哪一类杠杆吗？（在网站 [http://itp.nyu.edu/~laf333/itp\\_blog/2007/03/lever\\_madness.html](http://itp.nyu.edu/~laf333/itp_blog/2007/03/lever_madness.html) 上可以找到答案。）

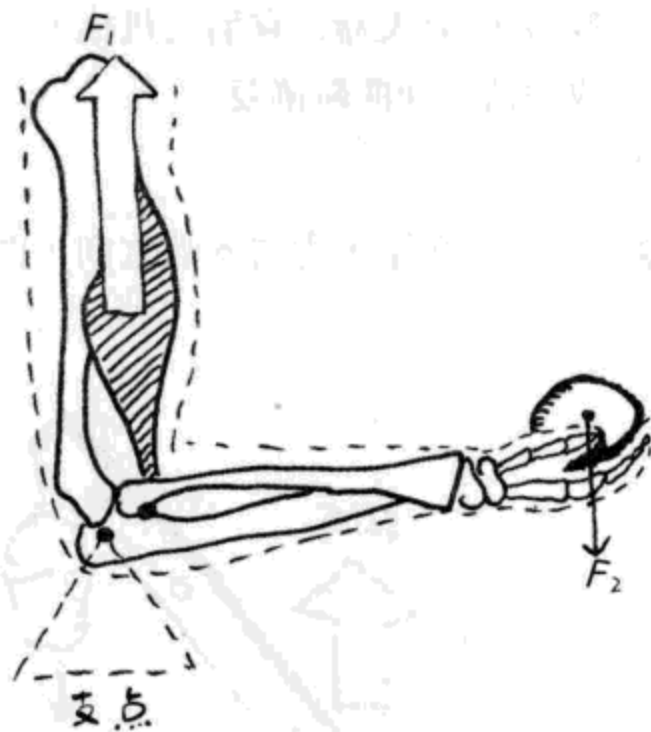


图1.8 手臂属于第3类杠杆

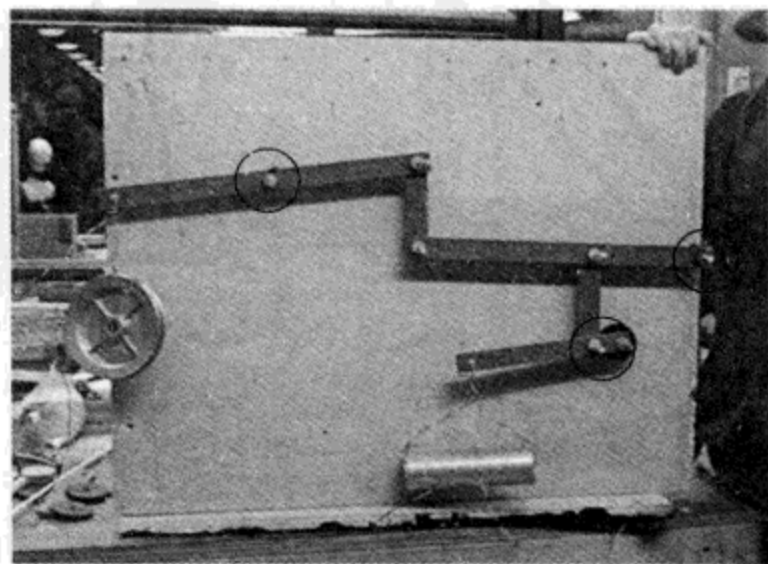


图1.9 杠杆的组合（所有权：Lesley Flanigan和Rob Faludi）

## 1.1.2 滑 轮

滑轮，也叫槽轮、皮带轮。沿着滑轮的边加工有槽，用来穿绳子或皮带。滑轮是另外一种在机械系统中用来提高机械增益的简单机构。滑轮的形式有开式与闭式两种。

### 1. 闭式滑轮系统

在滑轮组中，如果绳子或皮带的长度不变，松紧度也不变，就称这种滑轮系统为闭式系统。最常见的一个例子就是汽车中的同步带，如图 1.10 所示。同步带中的滑轮上有齿，可以与皮带上的齿啮合。这样电机驱动皮带工作时就不会打滑，因为皮带与滑轮上的齿啮合，所以称这种传动为正传动。

在 35mm 胶片的相机中，同样也用到了闭式滑轮系统。在这种相机中，胶片边缘的孔实际上是与缠着胶片的滑轮上的齿进行啮合的。

闭式滑轮系统中有时也使用光滑的皮带与滑轮，这种滑轮系统中，滑轮之间需分开特定的距离，这样皮带才能足够紧，不致于打滑。这种传动形式叫摩擦传动，因为皮带与滑轮的配合得非常紧，所以滑轮与皮带之间的摩擦就可以防止皮带在滑轮上打滑。LEGO 系统用了滑轮与皮带，皮带还根据长度用颜色进行了编码，如图 1.11 所示。

闭式滑轮系统用于传递轴与轴之间的旋转运动。如果驱动滑轮时输入轮比输出轮小，会产生一定的机构增益，如图 1.11 所示。

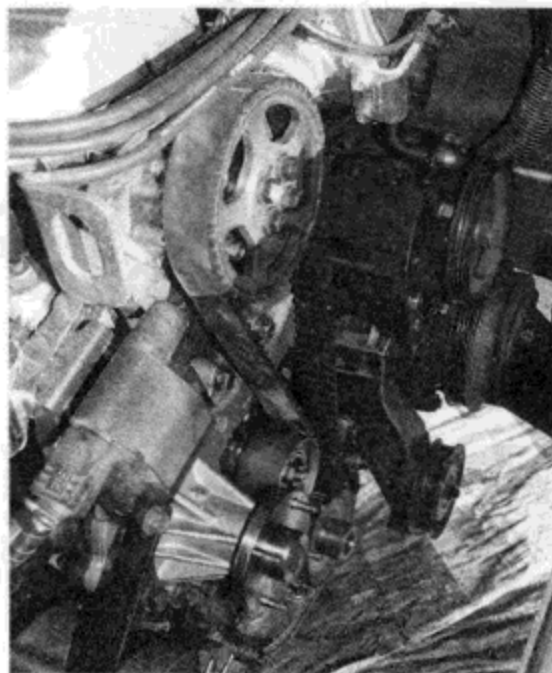


图1.10 汽车发动机上的同步带是一种闭式的滑轮系统

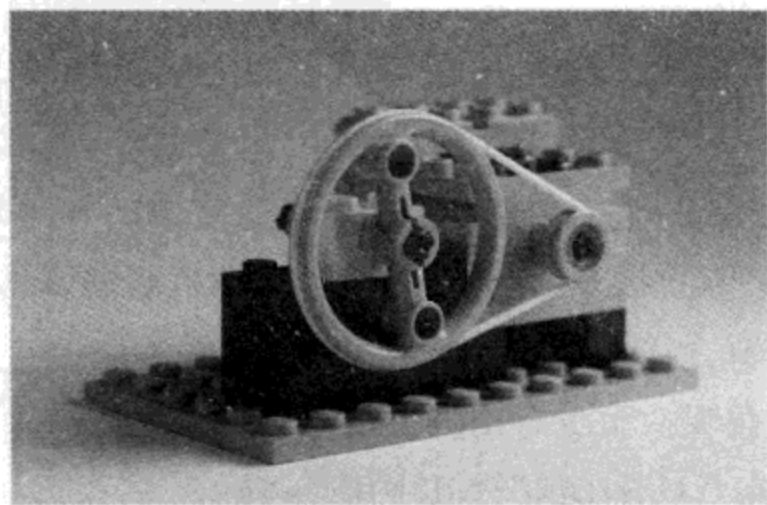


图1.11 LEGO电机传动系统中利用摩擦传动的滑轮（大滑轮的直径是 $1\frac{7}{8}$  in，小滑轮的直径是 $\frac{3}{8}$  in，机械增益为5:1）

所有在输出轮与输出轮之间的滑轮都称为惰轮，因为它们只能用于改变传动方向。有时会用弹簧支撑惰轮，惰轮的位置就可以调整，所以皮带的松紧度也可以调整。

闭式滑轮系统的机构增益计算起来比杠杆容易，是滑轮直径的比值。如果电机滑轮的直径为 1 in，带动直径为 3 in 的滑轮转动，则机械增益为 3:1。这样，系统能带动的载荷大小就是电机本身能带动的载荷大小的 3 倍。

## 2. 开式滑轮系统

提到滑轮的时候，多数人首先想到的可能是开式滑轮系统。不过，在做本书项目的过程中，几乎用不到开式滑轮系统。在开式滑轮系统中，绳子或皮带的一端是断开或松的。升旗装置中用的就是这种滑轮系统。在升旗装置中，一个滑轮装在旗杆顶部，滑轮上绕着绳子，这样人站在地面上拉绳子就可升旗。像这样“固定”的

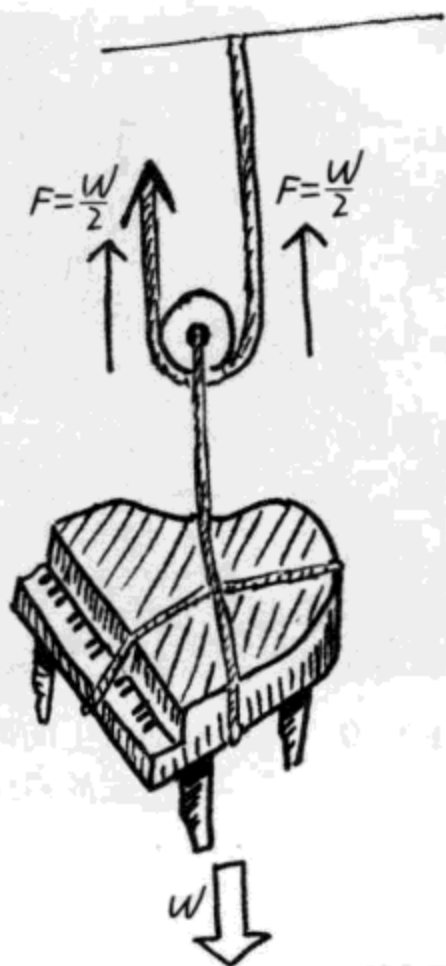


图1.12 一个“非固定”滑轮或动滑轮可产生一定的机械增益

滑轮不会对力进行放大，或得到机构增益，而且绳子与旗子移动的距离相等。不过，这种系统可以改变物体运动的方向。

另外，一个“非固定”滑轮可以对力进行放大。不过，就像杠杆系统一样，力与距离不可兼得。为了减小输入力，绳子或皮带的拉动距离就要加长。如图 1.12 所示，不固定的、移动的滑轮也叫动滑轮，产生的机构增益为 2 : 1。因为每一段绳子承载一半的重量，所以用了这样一个动滑轮后，比仅用一根绳子的难度就降了一倍。付出的代价就是，因为省了一半的力，所以拉动绳子的距离是用单条绳时的两倍。

最后一种滑轮的组合形式不是非常方便。

在地面上向上拉重物时，多数人更愿意向下拉，而不是向上拉。可以通过在系统中增加另外一个滑轮，前提是保证 2 : 1 的机械增益不变，这样力的方向改变起来就容易多了。图 1.13 所示滑轮组叫“起重滑车”，其中有一个滑轮就起到了这种作用<sup>[1]</sup>。

按照这种发展逻辑，我们就应该想：如何才能得到 3 : 1 的机械增益呢？至少有两种方法可以达到这个目的。一种叫“大滑车组”，其中用了一种复合滑轮（同一个外壳下安装两个独立的滑轮）。注意图 1.14 左边的图，重量由 1 条绳子分成 3 段来承载，绳子从底部的单个动滑轮伸出来。每段绳子承担物体重量的  $\frac{1}{3}$ ，我们拉绳子时能感受到这种机械传动的好处：比自己单独拿起重物要省  $\frac{2}{3}$  的力，即机械增益为 3 : 1。

**提示** 根据出入动滑轮的绳的数量就可以计算出机械增益。如果有 3 段绳出入动滑轮，则机械增益为 3 : 1。

另一种得到 3 : 1 机械增益的方法是用 3 个单独的滑轮，而不是用 1 个单滑轮、1 个复合滑轮。图 1.14 右侧就是这种配置。系统中的滑轮越多，

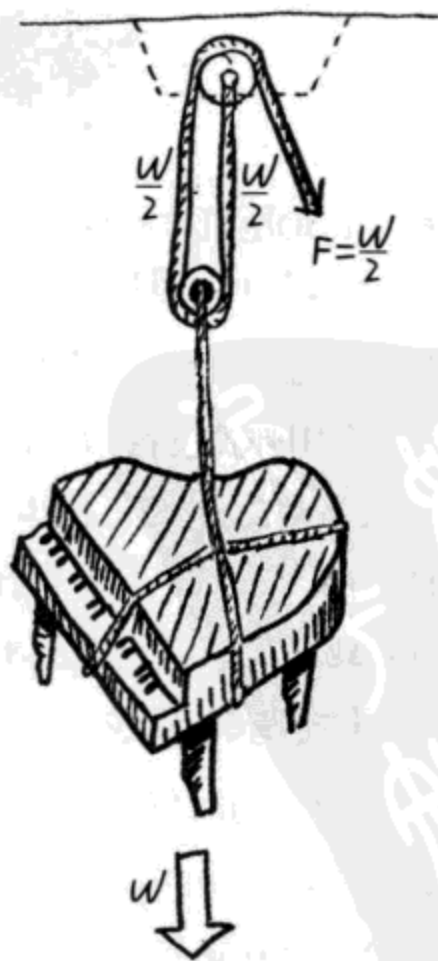


图1.13 一个起重滑车（机械增益为2: 1，拉动起来方便）

得到的机械增益越大。

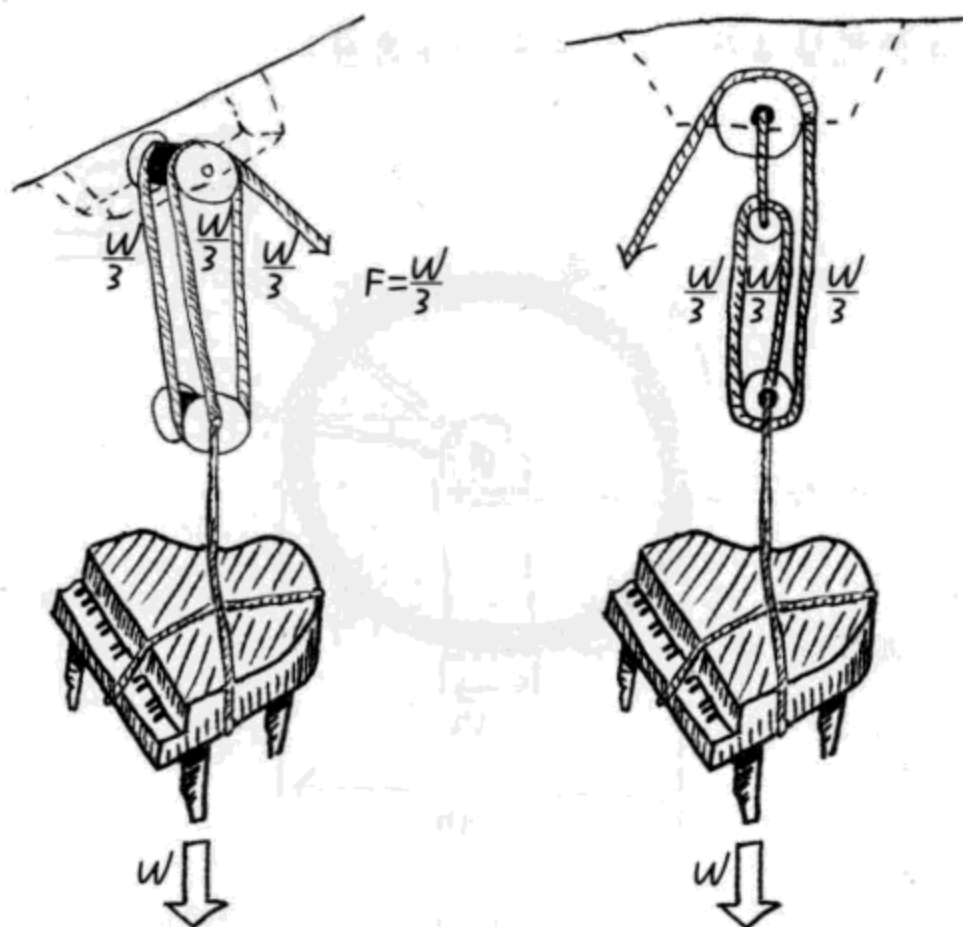


图1.14 机械增益为3:1的滑轮组

也可以设计非常复杂的滑轮系统，来用极小的力将钢琴抬到二层的窗户中去(不过拉绳的时间会非常长)

## 速度与速率

速度是物体运动的快慢，用距离除以时间就可得到速度。速度与速率其实是同一种东西，只不过速度有方向。速度的单位一般为 m/h 或 ft/s。如果你告诉某个人向北运动 60 m/h，实际上表述的是速度。旋转速度（也叫角速度），顾名思义表示的是物体转动的快慢。通常用 r/s 或 r/min 来表示，为了区别于直线速度的表示符号，通常用希腊字母  $\omega$  表示。切向速度表示沿圆的切向方向的速度。如图 1.15 所示，如果把自行车的转动速度看作后轮的速度，切向速度就是自行车沿地面行进的速度。

骑车时，自行车上的链轮带动后轴转，后轴的直径为 8 in，轮胎的直径为 32 in。周长等于  $\pi$  乘以直径，所以链轮的周长与轮子的周长分别为 25 in 和 100 in。也就是说，如果脚踩脚踏的速度为 1 r/s，则链轮上齿的运动速度为 25 in/s，同时轮子上对应的点的移动速度为 100 in/s。所以即使轮子与链轮的转速相同，轮子的切向速度也是链轮的 4 倍。如果将轮子的直径缩小成

与链轮的相同，我们脚踩的速度需要非常快（这样看起来肯定会非常可笑）。所以，用 1:4 的机械增益，我们能骑的距离会更长。

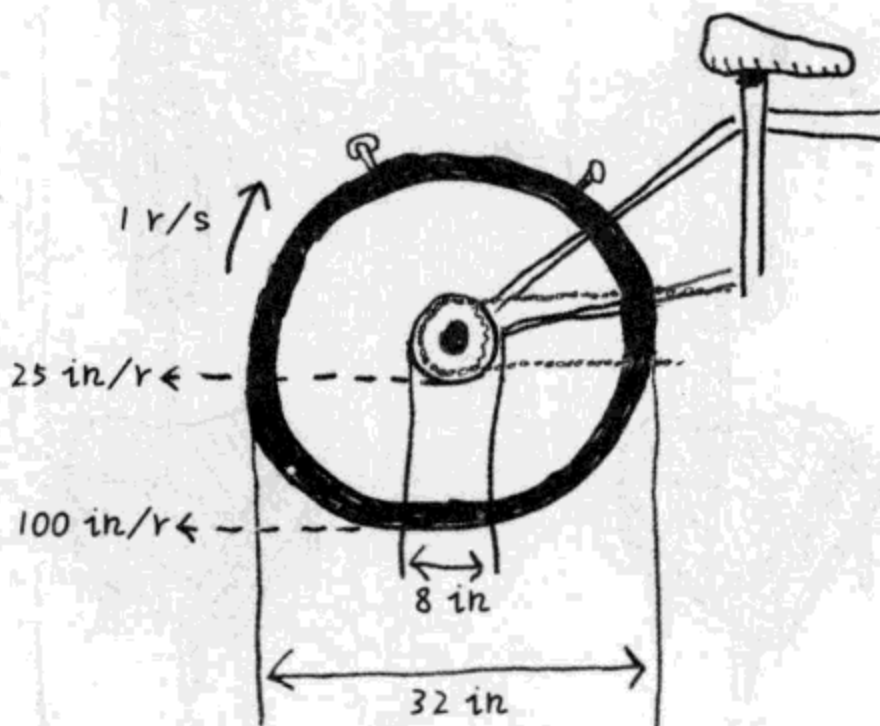


图1.15 自行车后部的链轮放大了轮子的速度

### 1.1.3 轮和轴

你可能从来不把汽车方向盘当成一种机械，不过它的确是一种机械。大直径的方向盘固定在一个轴上，这个轴作用于转向系统，以改变车轮的转向。如果方向盘的直径为 15 in，与之连接的轴的直径为 1 in，则输入轮与输出轮的直径之比为 15:1，这就是方向盘的机械增益（若要学习更多有关方向盘工作原理的知识，可登录 [www.howstuffworks.com/steering.htm](http://www.howstuffworks.com/steering.htm)）。同样，粗把手的改锥比铅笔那么细的把手的改锥用起来要省力得多。

和方向盘的工作原理一样，可以用轮和轴来对力进行放大。也可以像自行车的轮子那样，对速度进行放大。自行车的后链轮固定在后轮上，用脚踏时，链条会带动后链轮转，后链轮会带动车轮转。这种系统的工作原理与方向盘相反。在方向盘中，为了转动一个小轮时更省劲（方向盘轴），人转动的是一个大的轮（方向盘）。而在自行车中，为了转动一个大轮（后轮），我们转的是一个小的轮（后链轮）。所以在自行车中，得不到正的机械增益，不过可以得到更快的速度。

### 1.1.4 斜面或楔

如果你搬过家，可能会用过卡车后面的斜板，这种斜面会帮我们在车斗中挪箱

子。这种斜板，也叫滑板，也是一种简单的机构。

假设有一箱子 100 lbf 重的书需要搬到卡车上，如果自己抬，很明显需要将整个 100 lbf 重的箱子搬到卡车里。不过，如果用一块与地面距离为 3 ft 的 9 ft 长的斜板，就可以将书放在手推车里，把书推上斜板。由于移动了 9 ft，才将箱子抬高了 3 ft，而不是直接将箱子抬高 3 ft，所以斜板的机械增益为 3 : 1。也就是说，有了斜板，用的力仅是直接抬高时的 1/3，斜板的机械增益为施加力的总距离除以载荷抬高的垂直距离。

你可能曾经也用斜板来支撑过某些东西。比如，踢几下门下面的三角形门塞，斜面产生的垂直力就可以将门打开或关闭。

将两块斜板的两个基面合在一起，就做成了一块楔。刀、轴、凿子中都用到了楔。如图 1.16 所示，斧头砍进了木材，机械增益就是斧身的长度除以基座的宽度。在这个例子中，机械增益为 6 : 1。也就是说，如果你挥动斧头，产生的向下的力为 100 lbf，在斧头两侧产生的作用于木头的力则各为 600 lbf。

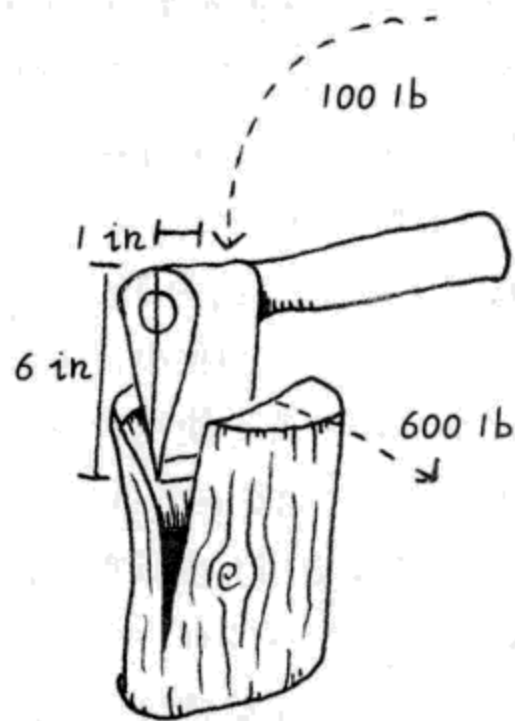


图1.16 利用机械增益砍木头的斧头

## 1.1.5 螺 纹

螺纹其实是改进了的斜面，主要有两种类型。

(1) 用来将零件固定在一起的螺纹，利用机械增益将两块或多块物料挤压在一起。

(2) 用来抬东西或产生直线运动的螺纹（叫螺旋传动丝杠）。螺旋传动丝杠的螺纹几何尺寸与普通螺纹略有不同，物体在螺纹上滑动，就会被举起或推移，就像图 1.17 中的螺旋千斤顶一样。

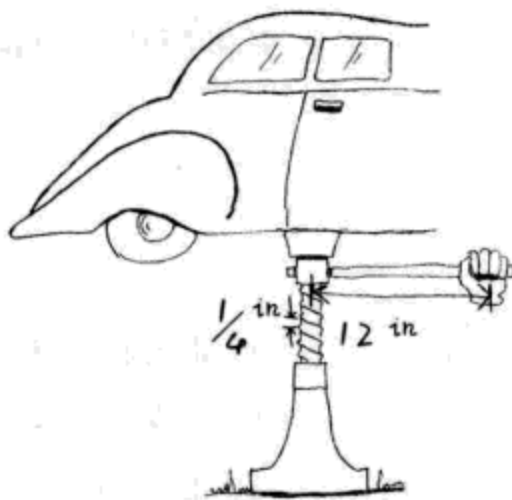


图1.17 举重物的螺旋千斤顶



**试一试** 沿着 11 in 的边，将一张  $8\frac{1}{2}$  in  $\times$  11 in 的纸一分为二，取其中半张纸，沿着对角线再将纸一分为二。然后，用铅笔对齐这个三角形的短边，把这张三角纸卷在铅笔上。注意到螺旋线的形状了吗？这个实验表明了斜面，即三角形是怎样进化为螺纹的。

对所有简单的机械来说，机械增益都是输入力与输出力的比值。螺旋千斤顶中就应用了螺纹，在换轮胎前，这种千斤顶可将车抬起来。图 1.17 中螺旋千斤顶的把手长度为 12 in，螺纹的节距是螺纹间的距离，是螺纹转动一整圈上下移动的距离。若要让千斤顶抬高  $\frac{1}{4}$  in，我们需要将长 12 in 的把手转一整圈。手的运动轨迹为一个半径为 12 in 的圆，周长等于  $2\pi$  乘以半径 ( $C=2\pi R$ )，所以机械增益为输入 ( $2\pi \times 12$  in) 除以输出 ( $\frac{1}{4}$  in)，约为 300！

如果操作空间狭小，用螺旋千斤顶这样的螺纹机构可以得到非常高的机械增益，所以举重物时若不能用滑轮系统，就可以用螺旋千斤顶。很多机械增益都因为摩擦而损失掉了，这个内容我们会在第 4 章中讨论。

松紧螺旋扣上也有螺纹，螺纹用来拉紧已固定好的绳和线。如图 1.18 所示，松紧螺旋扣的左右各有一个螺栓。我们看到的螺纹多是右旋螺纹，顺时针或向右拧螺纹时会变紧。左旋螺纹则是向左拧或逆时针方向拧时会变紧。通过拧松紧螺旋扣，就能够使两端立刻同时拉紧或松开。这种原理也可用在调平机构中。另外，C 型夹和老虎钳中也用了螺纹。

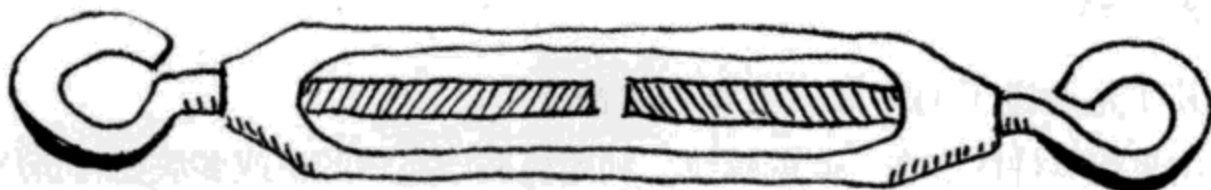


图1.18 用松紧螺旋扣来拉紧或松开电缆

如果只要求精确的定位，对机械增益要求不高，也可以用螺纹。这类装置中用电机驱动一个螺纹，用于对工作台或其他机构进行水平或垂直定位。在 3D 打印机和精密实验设备上能用到这种螺纹。（要看更多应用螺纹的例子，可登陆 [www.velmex.com/motor\\_examples.html](http://www.velmex.com/motor_examples.html)。）

## 1.1.6 齿 轮

齿轮用来对力进行放大或减小，改变转动的轴或方向，可提高或减小转动速度。输入轴与输出轴之间的两个或多个齿轮就是所谓的“传动链”。密封在外壳内的传动链称为变速箱或传动装置。齿轮旋转时，齿是一直啮合的，所以齿轮传动链是一种正传动。

## 1. 齿轮的类型

齿轮有很多种类型，使用方法也各不相同，第7章中会详细说明。现在，我们先了解一下5种基本的齿轮类型：圆柱-齿轮、齿轮-齿条、锥齿轮、蜗轮-蜗杆以及行星齿轮<sup>[2]</sup>。

## 2. 圆柱齿轮

最常用的齿轮是圆柱齿轮。圆柱齿轮用于平行轴之间传递运动，如图1.19所示。单个圆柱齿轮的参数主要有3个：

- (1) 齿数 (N)；
- (2) 节径 (D)；
- (3) 径节 (P)。

后面两个参数的名称相似，容易让人混淆，不过它们代表的意义却完全不同。节径是两个齿轮有效啮合的圆，约在齿的中间位置。如果两个齿轮的间距合适，那么两个齿轮的节径是相切的，即第一个齿轮节径的一半加上第二个齿轮节径的一半等于两个齿轮的间距。要使齿轮能够正确传动，齿轮的间距很重要。

齿轮的径节指的是每英寸节径圆上的齿数。可以把这个参数看成齿的密度，值越大，每英寸齿轮缘上的齿就越多。业余爱好者常用的径节有24、32和48。

**注意** 相互啮合的齿轮的节径与齿数可以不同，但每英寸节径圆上的齿数或径节必须相同，齿轮才能正确传动。

## 3. 齿轮-齿条

齿轮-齿条中的齿轮就是一般的圆柱齿轮，齿条是一种直线齿轮。齿条实际上是一个没有卷起来的圆柱齿轮，所以齿是平放的，如图1.20所示。这种组合常用在转向系统中，是一种将旋转运动转化为直线运动的好方法。因为齿条的长度有限，齿轮不可能让齿条永远向一个方向运动，所以这种机构的直线运动通常是往复的。

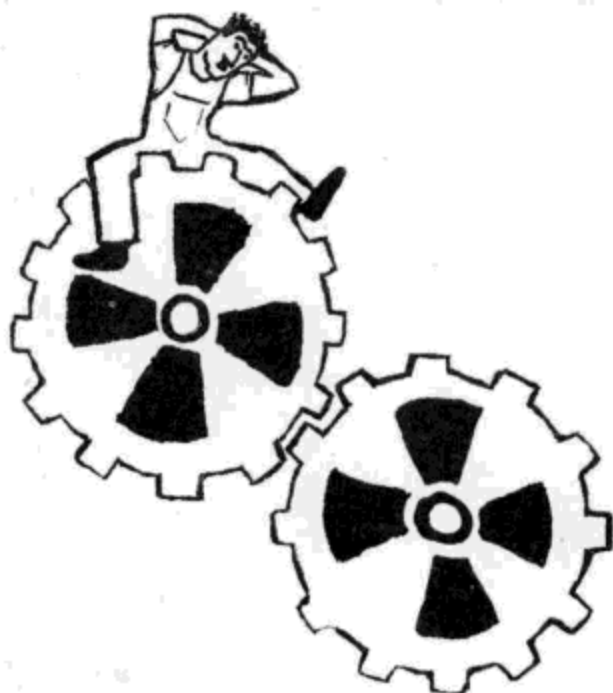


图1.19 传动链中的圆柱齿轮

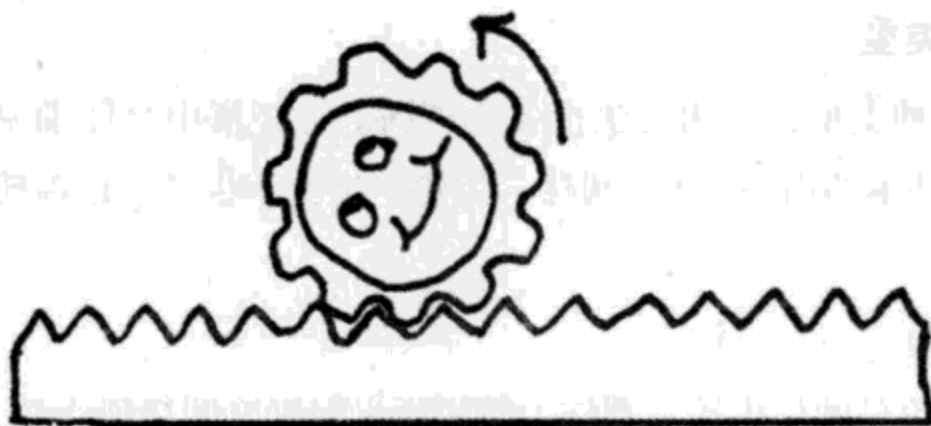


图1.20 齿轮-齿条机构

开瓶器中就用了齿轮-齿条机构，如图 1.21 所示。其中的齿条是圆柱形的，加工在轴上，轴上连着螺丝锥。手柄是一对第 1 类杠杆，杠杆的另一端是齿轮，为了取出软木塞，通过压手柄达到需要的机械增益，这样齿轮就会带动齿条上下移动，从而取出软木塞。

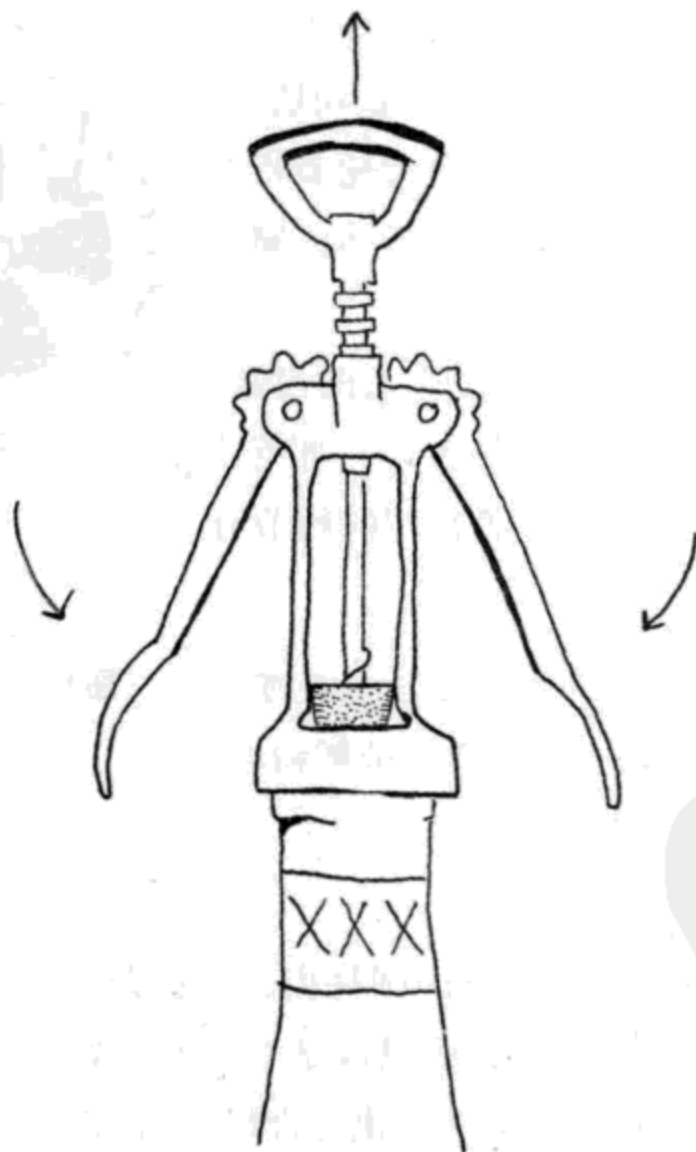


图1.21 开瓶器中所用的齿轮-齿条机构

#### 4. 锥齿轮

锥齿轮以一定的角度啮合，可以改变转动的方向。斜方齿轮是一种特殊的锥齿轮，齿轮的角度为  $45^\circ$ ，通过斜方齿轮啮合的轴的夹角就为  $90^\circ$ ，如图 1.22 所示。

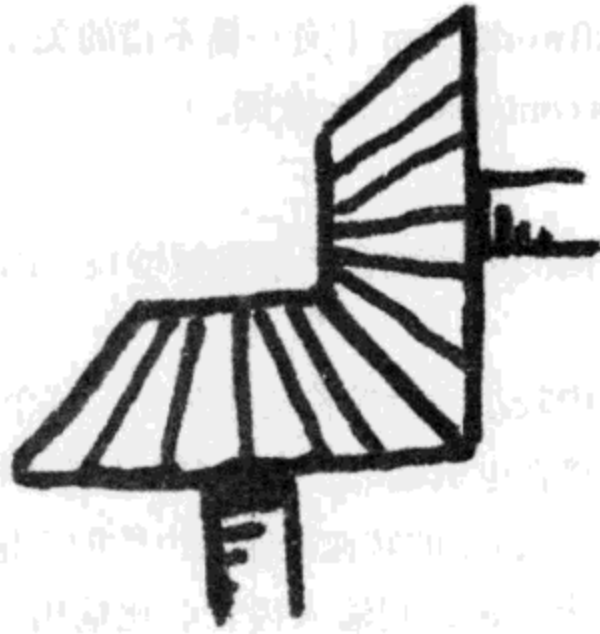


图1.22 锥齿轮

### 5. 蜗轮 - 蜗杆

蜗杆实际上看起来不像齿轮，更像一根螺杆，如图 1.23 所示。它用来与圆柱齿轮的齿啮合。蜗轮 - 蜗杆的一个最大的特点是它提供的机械增益大。当蜗杆转一整圈时，与之啮合的齿轮（有时称蜗轮）只转一个齿的角度。如果齿轮有 24 个齿，则传动链的机械增益可达到 24 : 1（这个仅适用于单导程蜗轮；对于双导程蜗轮，齿轮转一个齿，蜗杆需要转两圈）。当然，齿轮转得非常慢，不过多数情况下，需要这么做。

蜗轮 - 蜗杆的另外一个优点是：多数情况下，它们不会产生反驱动。也就是说蜗杆可以驱动蜗轮转，但蜗轮不能驱动蜗杆转。因为蜗轮 - 蜗杆的几何尺寸与摩擦不会使蜗轮去驱动蜗杆。所以，在定位与提升机构中，要求机构到达特定位置后不能产生滑动时，使用蜗轮 - 蜗杆就是一种理想的选择。

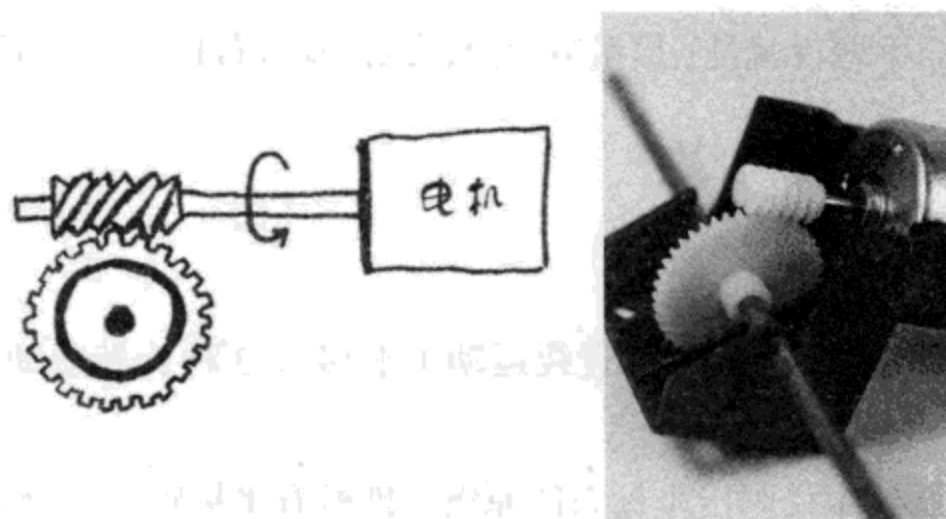


图1.23 蜗轮-蜗杆

### 6. 行星齿轮

行星齿轮，又称周转齿轮，是圆柱齿轮与内齿及外齿啮合的一种组合齿轮形式。通常用在机械增益大，空间小的场合，如电动螺丝刀或钻床中。可以用行星齿轮组

来提高机械增益。(howstuffworks.com 上有一篇不错的关于行星齿轮的文章,可登录 [www.science.howstuffworks.com/gear7.htm](http://www.science.howstuffworks.com/gear7.htm) 查阅。)

## 7. 机械增益

与滑轮类似,尺寸不同的齿轮就会产生机械增益。同样,机械增益是输入与输出之比。

两个相互啮合的齿轮中较小的齿轮称为小齿轮,这个齿轮通常被直接驱动。比如,一个20齿的小齿轮连接在电机轴上,一个100齿的圆柱齿轮通过与小齿轮啮合,来带动与之相连的轴转动,小齿轮的转速是输出齿轮的5倍,则机械增益为5:1。

如果要用齿轮系来放大转矩,则输入齿轮会比输出齿轮小。如果有一个电机,需要对它的输出转矩进行放大,或减小它的转速,就可以用这种齿轮系。

如果要用齿轮系放大速度,就将大齿轮作为输入齿轮。这种齿轮系的机械增益小于1,不过由于输入齿轮转1圈,输出齿轮转5圈,所以速度被放大了5倍。

其实在你周围就有很多机构中都用了齿轮。比如老式的钟表、搅拌器,还有开罐器等。在厨房也可以找到各种各样的有用的齿轮机构。

## 1.2 约束与自由度的设计

我教学生做设计时,“最小约束”<sup>[3, 4]</sup>是我所教的最重要的原则。虽然这个原则在100多年前就提出来了,但学生们在学校几乎不学习这种原则的使用。多数设计师和工程师都是经过自己尝试和犯错才知道这个原则的重要性。这个过程当然需要花时间,不过如果你在读这本书,可能就不需要再经过多年的稀里糊涂的设计来获得这种经验了。简单地说就是:尽量减少设计或运动部件的约束。下面我们再深入学习一下这个概念。

### 1.2.1 自由度

物体的运动形式有6种:3种直线运动(平移),3种旋转运动。这个概念通常用坐标系来说明,如图1.24所示。

站直后,在肚脐眼处画出坐标系的原点(即所有坐标轴的交点),就很容易理解物体的6种运动形式了。你可以上下跳动(沿Z轴平移),左右移动(沿Y轴平移),或前后走(沿X轴平移)。每一种直线运动都是由沿X、Y、Z轴的平移合成的。

比如,向斜前方运动时,就是沿着X、Y轴的运动。还记得“神奇画板”吗?它有两个旋钮:一个控制水平方向的运动,或X轴的运动;另外一个控制垂直方向的运动,或Y轴的运动。若要画一条斜线,需要同时转动两个旋钮。你也可以说是在

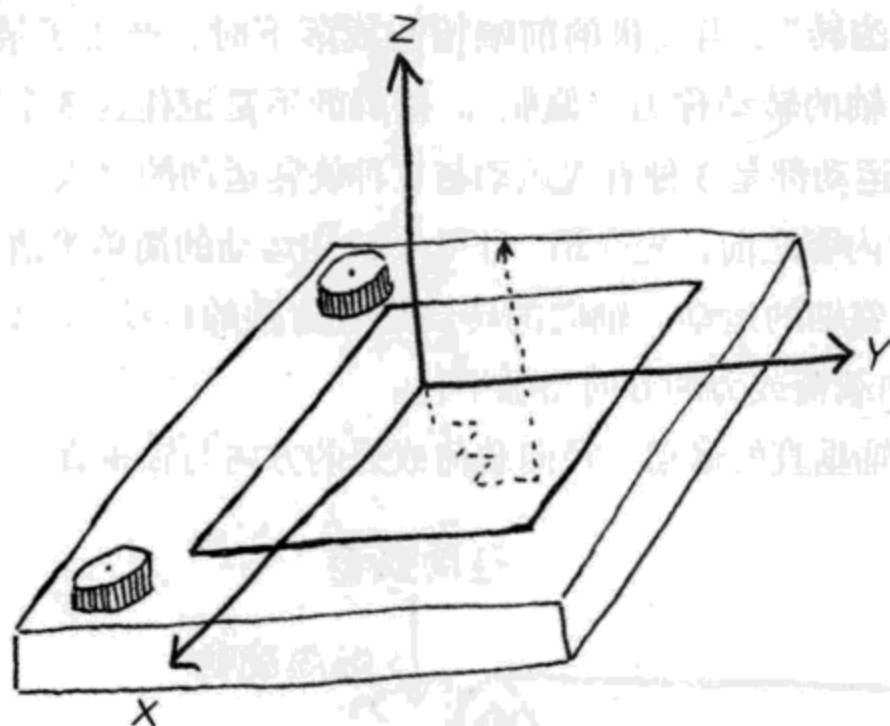


图1.24 坐标系的坐标轴与平面

$XY$ 平面上画图，因为产生的运动有 $X$ 轴的分量，也有 $Y$ 轴的分量。如果身体向右前方运动，产生的也就是 $XY$ 平面上的运动。图1.24中的轴定义了3个平面： $XY$ 平面、 $YZ$ 平面、 $XZ$ 平面。知道在 $XZ$ 平面上的运动是什么样的吗？

除了3个平移运动外，物体也可以绕3个轴中的任何一个轴转动。如果原地转圈，就是绕 $Z$ 轴转动。弯腰、伸腰时，身体就是绕 $Y$ 轴转动。如果向侧面弯身，就是绕 $X$ 轴的转动。

用飞机为例，就能更简单地说明旋转运动的形式了。在描述飞机的运动时，这些旋转运动都有其特定的名称，如图1.25所示。飞机翅膀相对水平面倾斜时，是绕

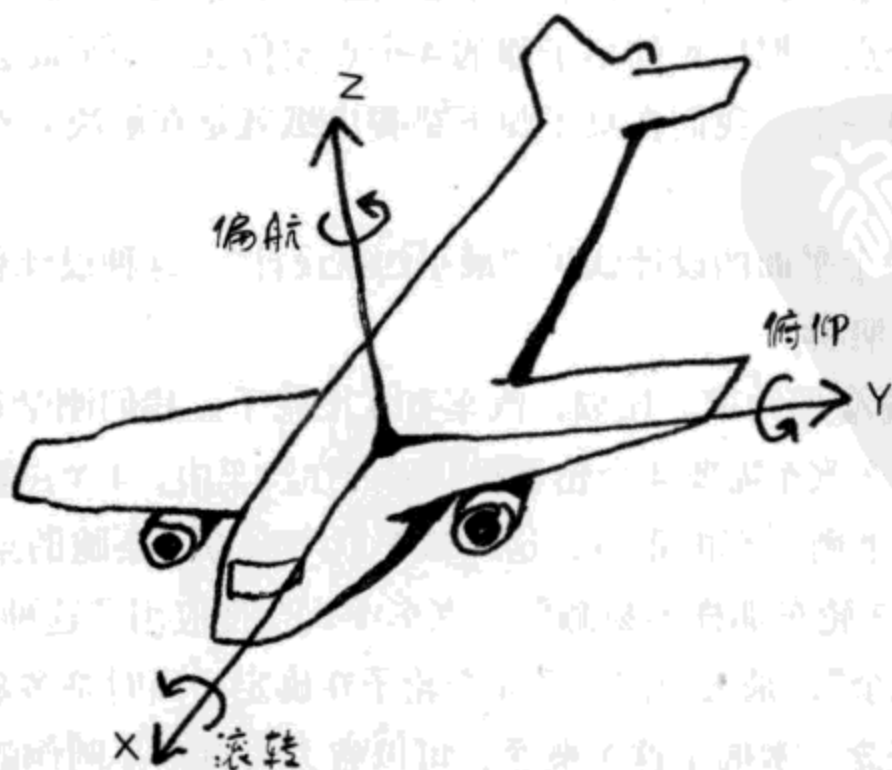


图1.25 飞机上各转动运动的特殊定义

X轴的旋转，叫“滚转”；当飞机的前端抬起或落下时，产生了绕Y轴的转动，叫“俯仰”；飞机绕Z轴的转动称为“偏航”。重要的不是记住这3个旋转运动的名称，而是要知道所有的运动都是3种直线运动与3种旋转运动的合成。

在学习后面的内容之前，先介绍一下2个描述运动的简单术语，如图1.26所示。

(1) 轴向：沿着轴的运动。轴向的转动是绕着轴的转动（可以是顺时针，也可以是逆时针）。轴向载荷或力的方向与轴平行。

(2) 径向：与轴垂直的运动。径向载荷或力的方向与轴垂直。

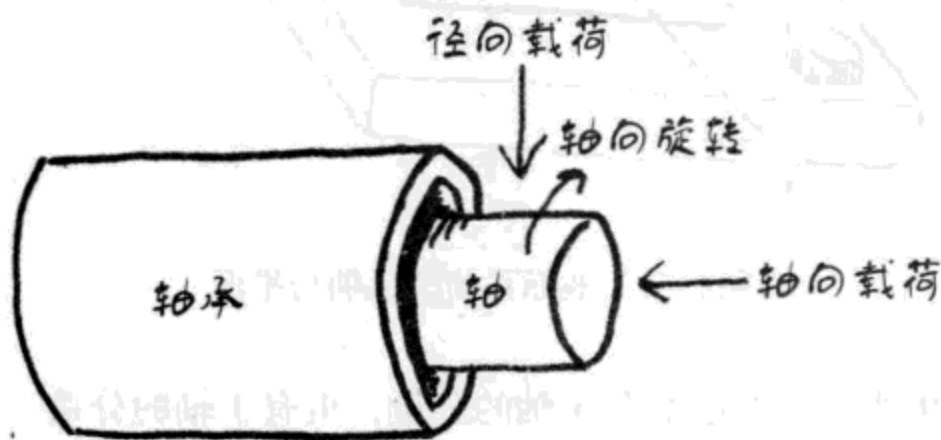


图1.26 轴向与径向的运动和力

## 1.2.2 最小约束

可能我们都有过这样的经历，手肘只要放到桌子上，桌子就可始摇晃。多数情况下，我们会把餐巾纸或杯垫放在摇晃的桌子腿下面。此时你可能没有意识到，大多数桌子都有4条腿。而且你会发现，3条腿的桌子不会摇晃。不过3条腿的桌子也会倒，但它却不会像4条腿的桌子那样摇晃。这是因为3点能确定1个平面，若有4个点就多出了1个点。把摇晃的桌子腿的4个点定位在1个平面会比较难，因为至少有1条腿需要垫一下。我们在桌子腿下垫餐巾纸就是在解决4点确定1个平面的问题。

用3点确定一个平面的设计就叫“最小约束设计”。这种设计思想就用在了儿童自行车和照相机支架中。

有时，也需要增加约束。比如，汽车有4个轮子。我们刚学过，3个点就能确定一个平面，为什么汽车需要4个轮子呢？因为在汽车中，4个点都是充气轮胎，这4个充气轮胎可以平衡汽车的重量，这样汽车就不会像4条腿的桌子那样晃动。另外，4轮车不会像3轮车那样容易翻倒。汽车中就合理应用了这种“冗余约束设计”的思想，说它“冗余”，是因为汽车第4个轮子在确定平面时是多余的。在制作过程中，要记住这个概念。掌握了这个概念，可以省去大量重复制作的时间，在本书的项目中，我会解释“最小约束设计”的思想。

若想了解如何较好地应用“最小约束设计”思想，可以看看LEGO套件是怎么做的。这些套件设计都非常好，零件的数量刚好够完成任务，零件本身的制作精度也很高，可以互相连接，也可以有合适的间隙使零件互相产生滑动。若想看看不太好的过约束的例子，就试着组装从IKEA或其他零售商那里买的组装式家具吧。你会发现总有些桌腿上的孔无法对齐，或木钉太紧无法穿过去，或有些零件的冗余约束太多，所有这些情况都会让人头疼。自己做项目时一定要额外做些工作，避免这种情况发生。

## 项目 1.1 Rube Goldberg 的早餐机

Rube Goldberg 是一位工程师，他画了一些漫画，这些漫画的内容都是用特别复杂的方法完成特别简单的任务，Rube Goldberg 因此而成名。所以，形容词“Rube Goldbergian”用来形容“用复杂的方法完成看似简单的任务”<sup>[5]</sup>。

Omega Engineering (www.omega.com) 是一家专门生产自动化设备的公司，在它的广告中用了 Rube Goldberg 的漫画，来说明它的产品比 Rube Goldbergian 能更有效地完成任务。这些漫画说明一种思想，即要完成一个任务，会有不止一种方法（图 1.27）。在制作机构时，这种思想也同样适用，不过首先想到的方法却不一定是最简单或最好的。

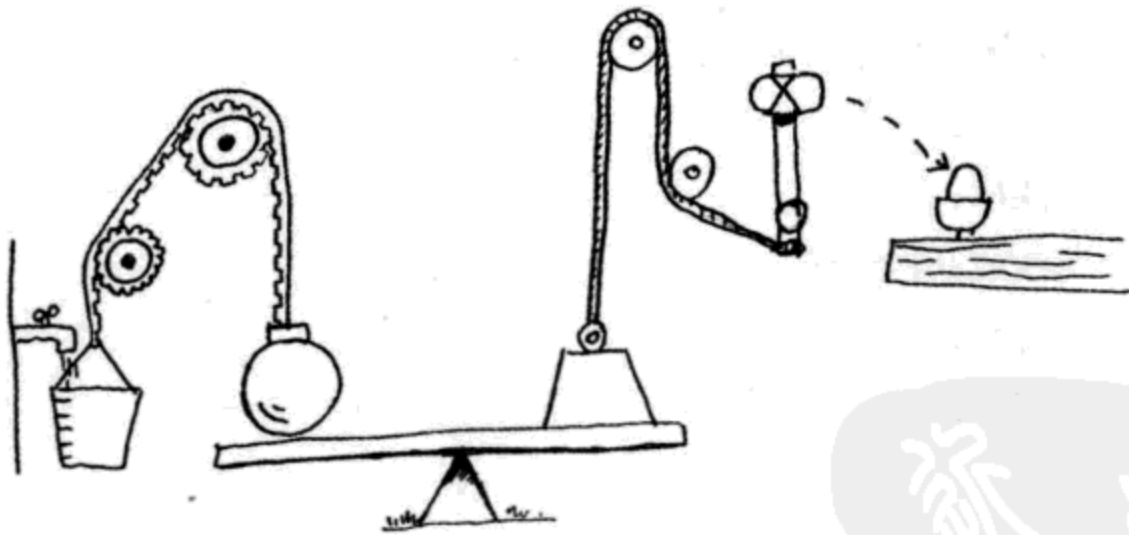


图1.27 Rube Goldberg 机器

本项目要做的是一台 Rube Goldberg 机器，用来打碎一个鸡蛋，过程不能少于 5 步。这个项目可用家里现成的材料来做，花钱少，做起来还快，只有你的想象力与预算会限制你实现的方法。为了帮你完成任务，我列举了一种方法，不过我还是希望你不要采用这种方法，争取能自己做一个项目。

### 1. 项目规则

- (1) 多数鸡蛋的蛋液应该留在最终的容器中，容器中的蛋壳不能超过鸡蛋总



数量的一半。

(2) 整个机器的占地面积不超过  $3\text{ ft} \times 3\text{ ft}$ 。

(3) 操作时只能启动机器 1 次。可以是按下 1 个按钮，或在架子上推 1 辆玩具车，也可以是取下 1 个塞子。

(4) 一旦启动，必须在 5 min 之内打碎鸡蛋。

(5) 每一步能量转换的方法必须是唯一的，而且有助于达到最后的目标。比如，不能让高尔夫球滚下一个斜坡，转动 5 个风车，然后触动一把刀切鸡蛋。这个过程很麻烦，而且风车转动对最后打破鸡蛋并没什么作用。

前几年，我曾经每次在上第 1 课时就把这项任务布置给纽约大学的学生，一直非常成功。我最喜欢的一个成功的 Rube Goldberg 机器是用一个大注射器把蛋液吸出蛋壳（可查看 [www.flickr.com/photos/fxy/3260972797/](http://www.flickr.com/photos/fxy/3260972797/) 的视频，此视频经 Xiaoyang Feng、Mike Rosenthal 和 Ithai Benjamin 允许使用）。也可以在 <http://itp.nyu.edu/mechanisms> 上浏览 2008 年以来的学生主页，还有本网页上的其他链接，在这些网页上都可以找到其他 Rube Goldberg 机器。在本书中，我仅举一个简单的例子，帮你开个头。现在开始工作吧！

## 2. 材料清单

(1) 1 块  $1/4\text{ in}$  厚的透明有机玻璃，尺寸约为  $15\text{ in} \times 31\text{ in}$  ([ponoko.com](http://ponoko.com))；

(2) 直径为  $1/4\text{ in}$ 、长  $36\text{ in}$  的长木销；

(3) 带锉和刀的多刃刀具；

(4) 捕鼠器；

(5) 搅漆棒；

(6) 鱼线或其他细线；

(7) 橡皮筋；

(8) 胶带卷；

(9) 小碗；

(10) 勺子或叉子；

(11) 鸡蛋若干。

## 3. 操作方法：

(1) 浏览 [www.makingthingsmove.com](http://www.makingthingsmove.com) 网页，从 Thingiverse 上下载模板。这个模板由 [ponoko.com](http://ponoko.com) 供货，它用  $1/4\text{ in}$  厚的透明有机玻璃，采用激光切割的方法加工，与 P3 模板配合使用。先在 [ponoko.com](http://ponoko.com) 上注册，可以选择在这个网上定做，也可以用木纸板或泡沫塑料按模板自己做。

(2) 用多刃刀具上的刀将木销按间隔  $2\frac{1}{2}\text{ in}$  刻 11 个标记。沿刻度线折断木销，

把每段木销的端部锉平。把余下的长木销收起来。

(3) 把所有 $2\frac{1}{2}$  in 长的木销都插进模板的背面(参见图 1.29)。

(4) 如图 1.28 所示, 将橡皮筋缠在左上角木销下面的那根木销上。

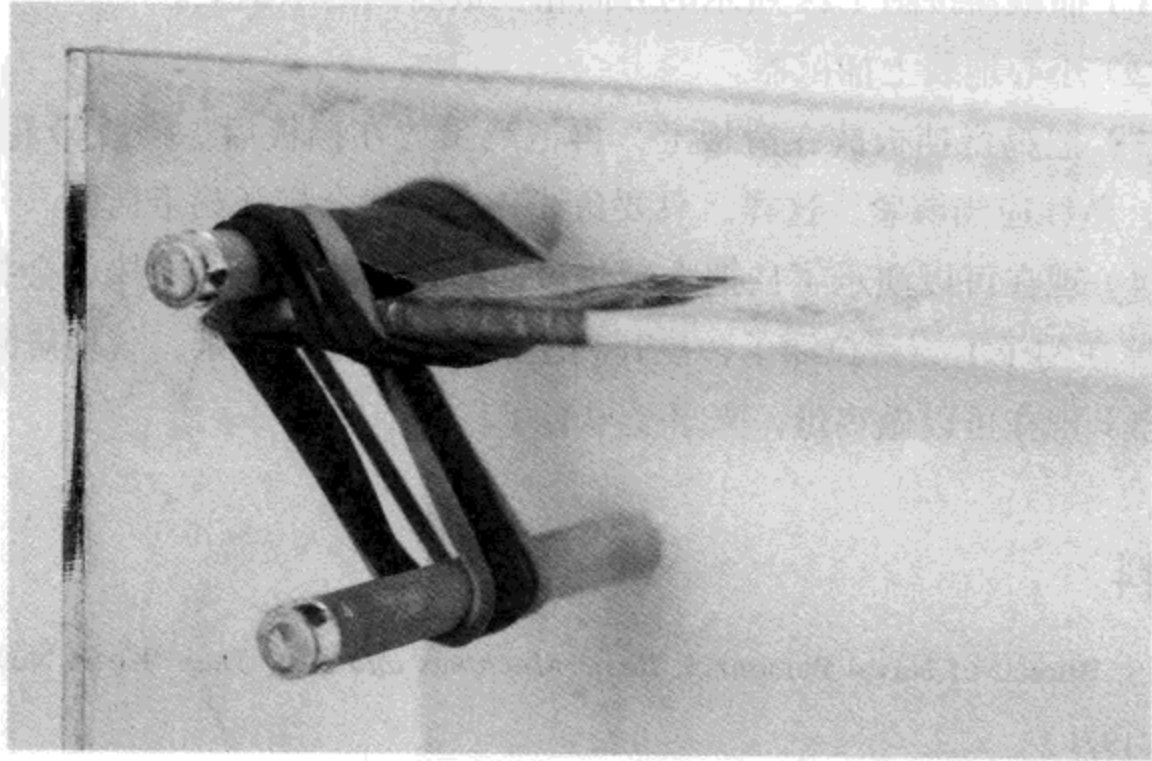


图1.28 用橡皮筋固定搅漆棒

(5) 把勺子或叉子粘在底部中间的木销上, 当胶带卷滚下来碰到它的时候, 勺子或叉子能绕着木销转。

(6) 在勺子或叉子的柄上, 用双面胶粘上一段 2 ft 长的鱼线。

(7) 把前面的模板固定在这 11 根销钉上, 同时将导线板夹在前、后模板的中间。

(8) 按图 1.29 箭头所指方向缠上鱼线。把鱼线系在鸡蛋挡板上的孔中。

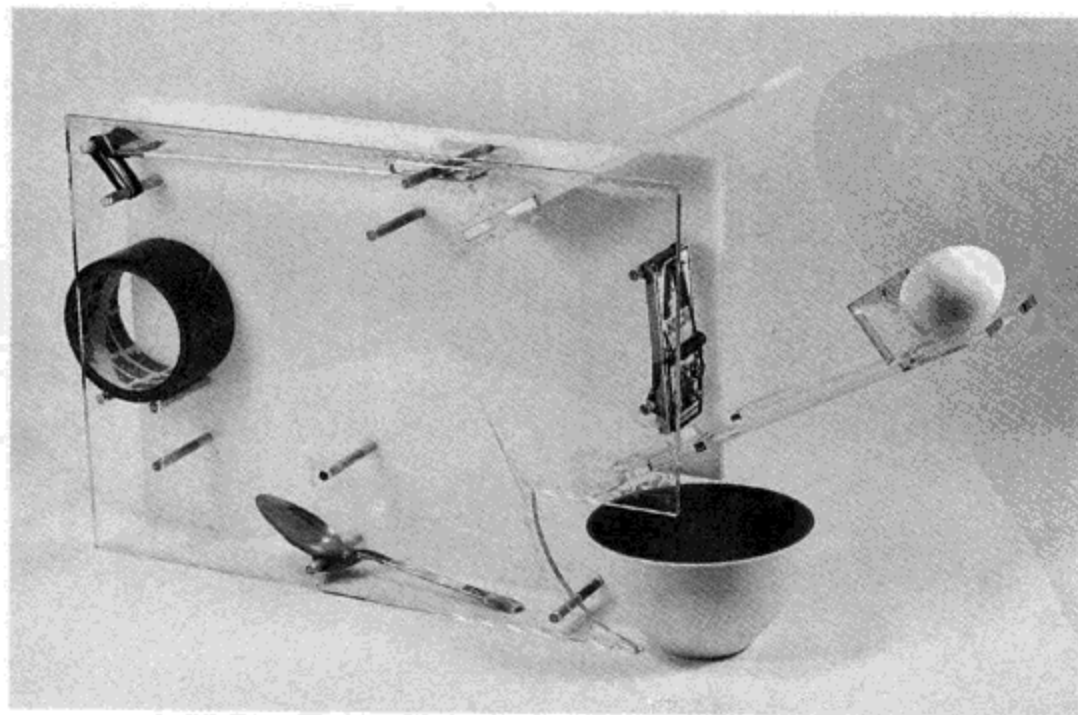


图1.29 装好的 Rube Goldberg 打蛋机

(9) 把鸡蛋滑板插入前后模板的槽中，必要时用胶带固定。

(10) 用橡皮筋将搅漆棒的末端缠起来，并用胶带固定（图 1.28）。在槽里滑移剩余的一根木销，并保持在一个位置（图 1.29）。

(11) 捕鼠器按图 1.29 所示的方向粘在最右侧的木销上。

(12) 小心地装上捕鼠器。

(13) 把鸡蛋挡板放在滑板上，再把鸡蛋放在挡板后。当胶带卷碰到勺子或叉子时，鱼线应当够紧。这样，只要鱼线一动，就会打开鸡蛋挡板。

(14) 现在可以演示了！把木销从顶部的槽中拔出，搅漆棒就会拍到胶带卷，胶带卷掉在勺子上，猛拉绳子，拉开鸡蛋挡板，鸡蛋掉下来，就地碰到捕鼠器。

(15) 现在可以做鸡蛋，来享受早餐了！

## 参考资料

[1] U.S. Bureau of Naval Personnel, *Basic Machines and How They Work* (New York: Dover Publications, 1971) .

[2] David Macaulay, *The Way Things Work* (Boston: Houghton Mifflin, 1988) .

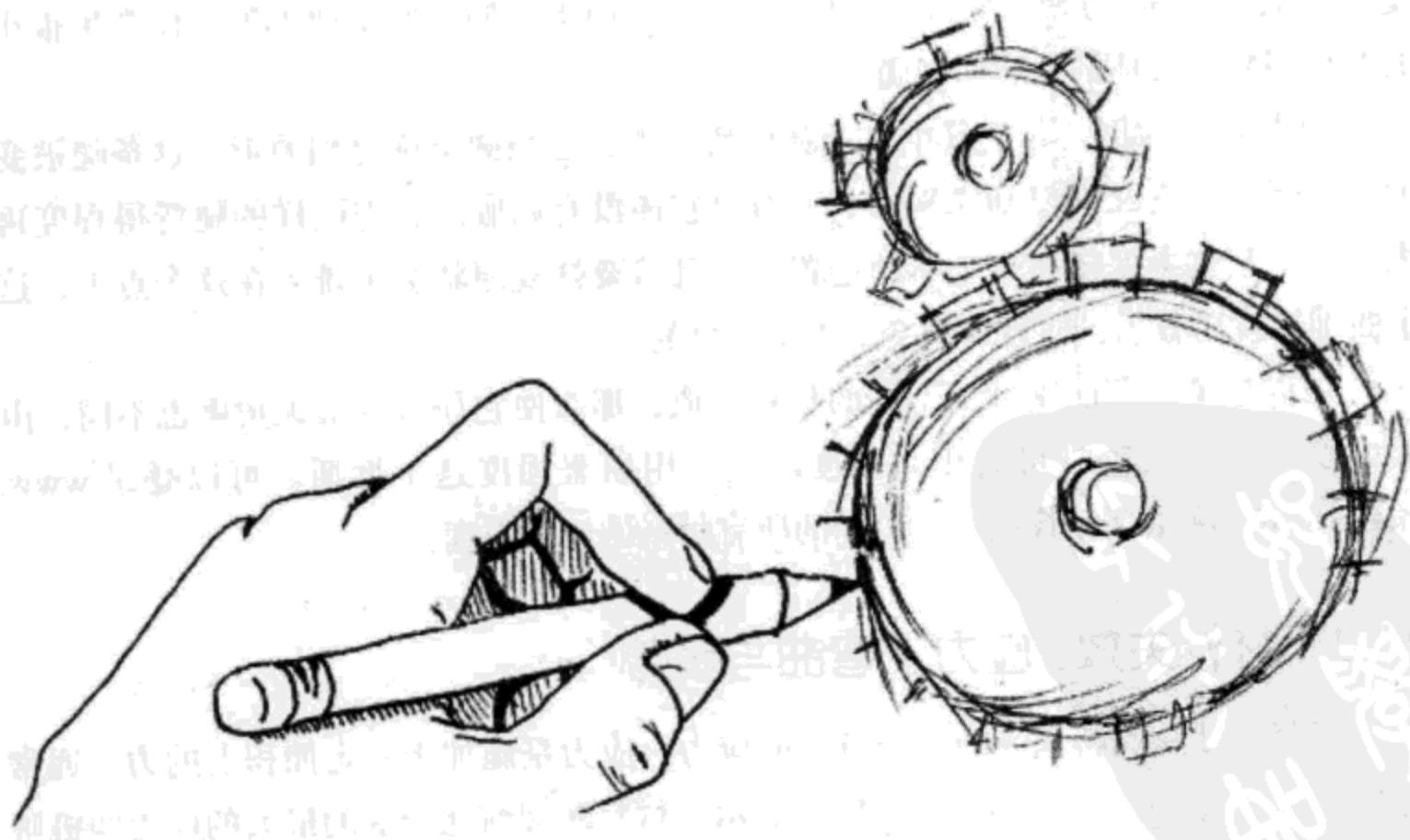
[3] Lawrence J. Kamm, *Designing Cost-Efficient Mechanisms: Minimum Constraint Design, Designing with Commercial Components, and Topics in Design Engineering* (New York: McGraw-Hill, 1990) . Also published in paperback by the Society of Automotive Engineers, Inc., 1993.

[4] James G. Skakoon, "Exact Constraint," *Mechanical Engineering magazine* ([http://memagazine.asme.org/Articles/2009/September/Exact\\_Construction.cfm](http://memagazine.asme.org/Articles/2009/September/Exact_Construction.cfm)) .

[5] Merriam-Webster Online Dictionary, "Rube Goldberg" ([www.merriam-webster.com/dictionary/rube%20goldberg](http://www.merriam-webster.com/dictionary/rube%20goldberg)) .

## 第 2 章

# 如何选材



只要想做东西，就需要零件和材料。我们先不考虑能不能买到这些零件和材料，也不要考虑预算，只想想如何为要做的项目选材料？知道各类木材、各类铝材之间有什么不同吗？可不可以选择其他材料？

在本章中，我们将会学习各类不同的材料的特性及用途，还有怎么去找这些材料。不过，首先要学习描述材料的参数。

## 2.1 材料的参数

选择材料时，必须知道材料的参数意义及它们的强度。材料是按特性进行分类的。

### 2.1.1 材料特性

材料的特性就是在不考虑尺寸和形状的前提下，材料表现出来的特点。比如，密度就是材料的一种特性，而重量却不是。因为密度等于质量除以体积，所以，不管有多少材料，质量与体积的比值是不变的。而重量则不同，因为材料越多，它就越重，所以重量不是材料的特性。

材料的另外一个有用的性质是屈服强度。材料在受力而产生破裂之前，其塑性变形的能力，称为它的延展性。材料在外力作用下（如拉伸、冲击等）仅产生很小的变形即断裂破坏的性质叫做脆性。

以曲别针为例，若把其中一条腿仅弯一点，这条腿会恢复到原形。这条腿被变形过，但因为它又恢复到原来形状，所以它还没有屈服。若把同样的腿弯得程度再大一点，它就会保持在一个新的位置，而且若要恢复原状会很难。在这个点上，这个曲别针就屈服了，而且这个变形不是暂时的。

可以想象，若曲别针用不同的材料制成，那么使它屈服的最大角度也不同，由此可以看出，比较材料的相对强度时，可用屈服强度这个性质。可以登录 [www.matweb.com](http://www.matweb.com) 网站查看我们可能用到的所有材料的屈服强度。

### 2.1.2 材料失效：应力、弯曲与疲劳

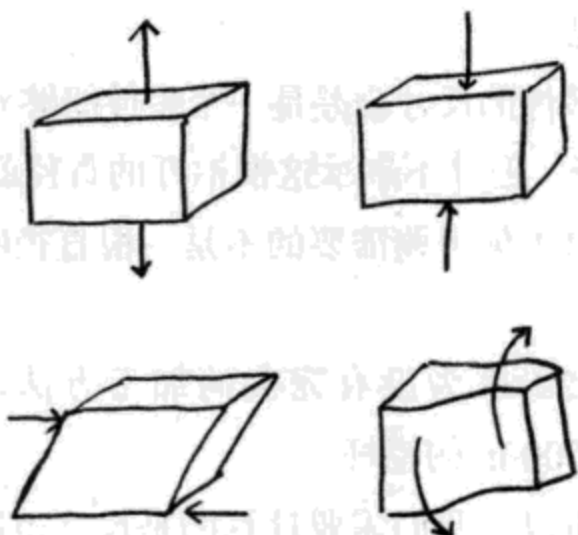
屈服强度是材料承受的一个特定的应力。应力是施加于一定面积上的力，通常用  $\text{lbf/in}^2$  ( $1 \text{ lbf/in}^2 = 6.89476 \times 10^3 \text{ Pa}$ ) 表示。材料断裂前能承受的最大的应力叫极限应力。

实际情况中有 4 种不同的应力，所以材料因应力失效的形式也有 4 种（图 2.1）。

#### 1. 拉应力

拉应力是一个表示材料拉伸特性的术语。比如，操场上孩子们玩链条式秋千，

当有人坐在秋千上时，链条会受到拉力。如果一个特别重的人坐在一个为两岁孩子设计的秋千上，链条会因为受到过大的拉力而断裂。人的重量除以链条的横截面就是链条所受的拉应力。



## 2. 压应力

压应力是表示受挤压程度的一个术语。在 [www.matweb.com](http://www.matweb.com) 上查材料特性时，有时会看到同一种材料的拉伸强度值与受压强度值不同。在设计机构的支撑结构，尤其是这种支撑结构若断裂会损伤他人时，必须考虑受压强度。这就是为什么建筑物的基础不能用奶酪的原因：因为奶酪的受压强度不够大，建筑物的重力除以基础的面积即是奶酪所受的所有压应力。

## 3. 剪切应力

剪切应力如图 2.1 所示，力作用于方块的侧边上，而不是平面上，在设计时要避免这种情况。如金属螺栓，它的剪切应力仅是其极限压应力的一半。

## 4. 扭转应力

扭转应力是表示受扭力作用的程度的一个术语。如图 2.2 所示六角螺丝刀，当用它拧一个装得特别紧的螺栓时，它会因为受到过大的扭转应力而失效。拧开螺栓之前，六角螺丝刀已经产生了扭转变形。

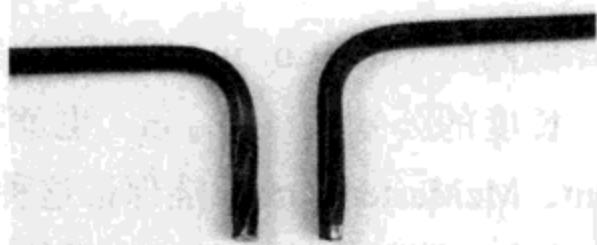


图2.2 六角螺丝刀受扭失效

材料失效的特殊形式还有弯曲失效和疲劳失效。弯曲失效常发生于又长又细的圆柱形材料上。比如，我们可以把咖啡杯放在卫生纸的卷轴上，但不可能把它放在吸管上。

### 2.1.3 如何设计公差

多数零件的参数会包括长度、宽度、直径或其他尺寸的公差。那么，公差是

什么呢？

零件的尺寸公差是一个零件能够允许的尺寸范围。比如，我们需要一个直径 $\frac{1}{2}$  in 的铝杆，但并不表示这根铝杆的直径就一定是 0.5 in。此时，有两个问题需要考虑。

(1) 你可能需要的不是一根直径刚好为 $\frac{1}{2}$  in 的铝杆，直径可以比 $\frac{1}{2}$  in 略小或略大。

(2) 因为没有完美的加工方法，因此不可能有机器能够加工出直径正好是 0.500 000 in 的铝杆。

所以，我们需要计算的是尺寸范围。假定你需要将这个直径 $\frac{1}{2}$  in 的铝杆装在一个木块的孔中，用千分尺量得这个孔的直径是 0.517 in，若我们要求这个铝杆能在这个孔中流畅地滑动，孔的直径比杆的直径就要大一点（图 2.3）。

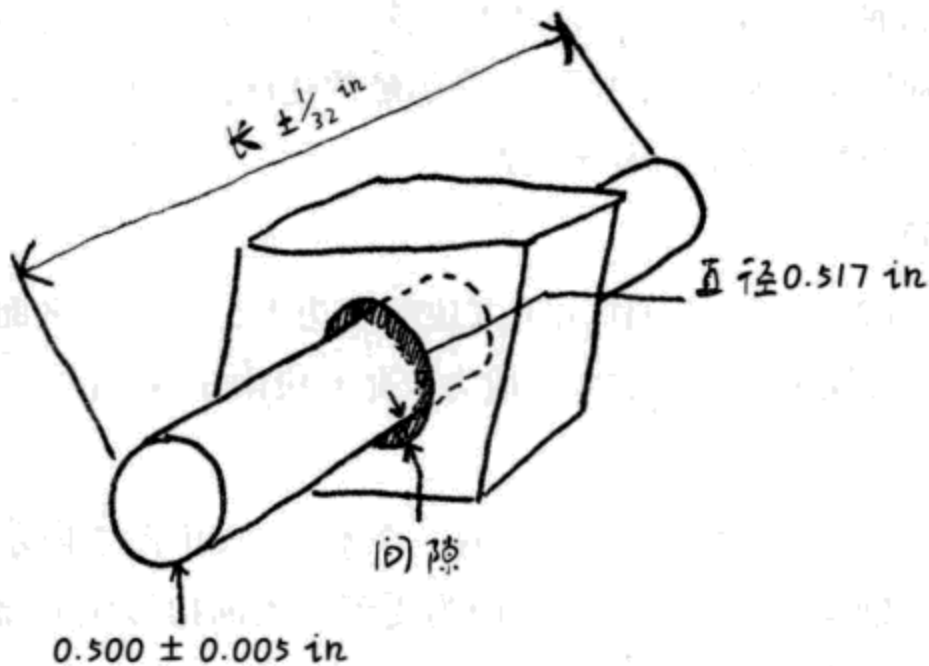


图2.3 轴和孔的配合公差

可以上 McMaster-Carr 的网站 ([www.mcmaster.com](http://www.mcmaster.com)) 查找一个 $\frac{1}{2}$  in 的杆件，杆直径的公差是  $\pm 0.005$  in，长度的公差是  $\pm \frac{1}{32}$  in。也就是说，杆的直径最大可为 0.505 in，最小可为 0.495 in，McMaster-Carr 只能保证这种杆有这样的精度。不过还好，你可以用其中任何一个杆件，因为所有杆件的直径都比 0.517 in 的孔小。长度的公差要大一些，但相比直径而言，实际应用时对长度的精确度要求不那么严格，所以你可以选择公差在  $\pm \frac{1}{32}$  in 的任何长度的杆件。

**提示** 如果需要原材料、零件和组件时，可以上 McMaster-Carr ([www.mcmaster.com](http://www.mcmaster.com)) 网站上购买。这个公司是一个特别大的网上硬件供应商，提供零件与材料，还有特别好的用户界面。网页上还会有材料的特性描述与用途，而且多数产品都配有详细的照片。在这本书中，我会频繁地提到这个公司，并简称它为 McMaster。

我们会发现，公差要求严格的精密的材料价格会更高。因为制作尺寸为  $0.5 \pm 0.001$  in 的杆件要比加工的  $0.5 \pm 0.010$  in 的杆件花的功夫更多。如果你的要求不高，就不用选择精度太高的材料。因为你选择了这种材料，就意味着你得多花钱。

## 2.2 材料种类

固体材料主要有3类：金属、陶瓷和高分子材料（塑料）。另外三种材料也很有用：复合材料、半导体材料和生物材料。

### 2.2.1 金属材料

金属材料有纯金属，如纯铝或纯铁；也有合金，如钢。合金是由两种或多种金属材料合成的。金属的导热性与导电性通常都很好，强度较高，延展性也很好，所以形状、尺寸都很丰富。

当然最好在本地的商店买材料，也可以根据所需的尺寸、形状及材料类型寻找更专业的金属材料供应商。除稳定的供应商 McMaster 外，还有其他几个公司可供参考。

(1) Metalliferous ([www.metalliferous.com](http://www.metalliferous.com)) 上有发烧友常用的金属材料，种类、形状和尺寸都很丰富。

(2) Metal Supermarkets ([www.metalsupermarkets.com](http://www.metalsupermarkets.com)) 上可以根据需要定制数量和大小不同的金属件，同时也可以学习一些有用的材料知识。

(3) 另外一个大的供应商的网站是 [onlinemetals.com](http://onlinemetals.com)，如果通过链接 Maker Shed 网站 ([www.makershed.com/v/metals/](http://www.makershed.com/v/metals/)) 访问该店，可以享受 5% 的折扣。

(4) Speedy Metals ([www.speedymetals.com](http://www.speedymetals.com)) 提供的材料品种也不少，价格也公道，但对于新手来说，在这个网站上搜索比前边几个网站要麻烦一些。

虽然我们谈到了各种类型的金属并且学习如何找材料，当然也不能忽略像 Set and VEX Robotics Design System 这样提供易组装的金属结构件的公司。80/20 Inc ([www.8020.net](http://www.8020.net)) 和 Item ([www.itemamerica.com](http://www.itemamerica.com)) 也提供越来越多的可组装结构，MakerBeam ([www.makerbeam.com](http://www.makerbeam.com)) 也是一个同类型的新硬件提供平台。

#### 1. 钢

钢的强度很高，这是因为它的密度大。在所有我们提到的材料中，钢是比较难加工的，因为在钢材料中钻孔、对钢材料成型都比较困难。不过，钢特别适合做螺丝、轴、轴承及板材。

钢是主要由铁元素与碳元素混合而成的合金，有时为了制成强度和其他性质都



不相同的钢，也会添加其他元素，如铬、硫和锰。钢的导电及导热性都很好。

不锈钢不会生锈，而且一般不导磁，但成型困难。普通碳素钢会生锈，而成型却容易，所以常用来做切削刀具。

在 McMaster 网站上的搜索框中输入“steel”，会出现一个屏幕，显示许多形状不同的钢材料、几十种合金材料，十几种表面加工形式及规格说明。那么，你应该如何选择呢？

首先，要知道你需要的不是最好的材料，而是符合要求的材料。一般的经验是，在 McMaster 上，先输入最重要的规格参数，然后逐步缩小选择范围，直到找到的材料数量够用为止。

假如你已经构思好了一种自动的机电控制的卫生纸分发机，需要找一种能够折弯和钻孔的钢板，就首先选择“ Sheets”、“ Bars”、“ Strips”。因为你要的并不是稀有品种，所以在“ Type”下选择“ Plain”。如果你对其他尺寸要求也不高，只要求长度大约为 12 in，在长度选项中选择“ 12 in”即可。

此时就可以浏览材料的一些特性了。第 1 种是通用的低碳钢，这种钢容易折弯。如果你设计的卫生纸分发机的宽度约为 2 in，就选择这个尺寸。不巧的是，这个宽度的钢材的最小厚度为  $\frac{1}{8}$  in，无法手动切割或折弯。所以你只能返回上一个界面。这时，先选择一个能够手工加工的厚度，如 0.020 in。此时因为只有一种板材可选，所以就比较简单了，这种厚度的钢材尺寸为 12 in × 8 in，每包有 5 片。

**注意** 有时板材的厚度单位是 gage，与十进制的厚度表示方法（如 0.020 in）不同。gage 的数越高，材料就越薄。如 0.030 in 厚度的板表示为 22 gage，0.060 in 厚度表示为 16 gage。若想在两种单位之间转换，可借助于 eFunda 在线计算器，网址为 [www.efunda.com/designstandards/gages/sheet\\_forward.cfm](http://www.efunda.com/designstandards/gages/sheet_forward.cfm)。

最好在本地的五金店买材料，不过他们可能没有便捷的网店。打电话询问你的项目最适合采用的钢材的尺寸、厚度、合金类型，多数供应会愿意帮你的，因为他们最感兴趣的还是又有了一个知道自己的客户。如果需要钢管，也可以找一些自来水管、安装件、电线管，这些管件比高精度的压制件花的钱要少得多。

## 2. 铝

相比钢而言，铝的密度小，但强度 / 重量比值大，折弯和钻孔更容易，而且不像普通钢那样容易生锈。

一种好的多用途铝合金的型号是 6061。如果你需要高强度的轻质材料，相同密度的合金 7075 的强度是 6061 的 2 倍，这种合金实际上比几种合金钢的强度还要高，用在飞机与飞行器机构中。这当然就意味着，它的价格也更高，因此要选择的是最适合你的项目的合金。

**提示** 多数金属合金的型号（如铝 6061 和 7075，303 号不锈钢等）容易混淆，没必要去理解或记住这些型号。我会提到最常用的合金的名称，不是你可以使用重要的参数来缩小材料的选择范围。McMaster 网站上经常会有这样的建议，如“适合做板材”、“用于做齿轮”或“用于轻质结构”，参考这些建议，或打电话给公司，请他们帮你做选择。

就像我们小时候玩的彩泥一样，将热铝坯压进一个特定形状的孔，这种加工方法就是铝的挤压成型。只有将金属加热到特别高的温度才可能成型。铝可以挤压成普通的杆件，L 型或 C 型件。

在建材商店很容易就能找到搭架子用的型材（将这些型材钉在墙上，做成托型材的架子），可以用这些型材做结构件。角铝的架子可用来安装电机，也可用来连接零件。

铝的导热性很好，但相比铜而言，导电性要差得多。

### 3. 铜

铜的导电性很好，而且价格便宜，因此在电线、印刷电路板及其他电子设备中用得比较多，在管路中用得特别广泛。铜管可以用铜焊的方式（见第 3 章）加工成小的艺术品、雕像或架子。铜相对比较软，因此很少用它做结构件或高强度零件。雕像和装饰中经常会用到铜。长时间暴露在空气中后，像自由女神雕像一样，铜的表面会形成一层浅色的表层，即绿锈。

常见的铜合金有两种。

(1) 黄铜：由铜与锌合成的。相比纯铜而言，黄铜的强度更高，而且更耐用，还可以防止空气和水（包括海水）的腐蚀。通常不用做结构件，常用在家具和建筑设计中。

(2) 青铜：由铜与锡合成的。这种铜合金比纯铜的硬度更大，强度更高。相比黄铜而言，其抗腐蚀性更好，而且更软。同时因为这种材料的摩擦系数小，所以也用于做衬套（如果你不知道衬套是什么，不用担心，将会在第 7 章中学习）。

### 4. 银

银的导电性比铜好，不过价格更高，因此常用在高端电子产品中。银也很软，容易加工成型，所以深得珠宝制造商的喜爱。

给银中添加一点铜，就可以得到标准纯银，这是一种更容易加工的合金。因为又软又贵，通常不用银来做结构件。

## 2.2.2 陶 瓷

陶瓷化合物介于金属与非金属（氧气、二氧化碳、氮化物）之间，如陶土、玻璃、

钻石、宝石、紫水晶。还有，你喜欢的咖啡杯都是用陶瓷化合物制成的。

陶瓷硬度高，但是如果你掉过咖啡杯，你会发现它很容易就碎了，所以我们都知这种材料很脆。陶瓷不像金属那样，在断之前还可能进行拉伸与弯曲变形，陶瓷直接就会碎。这种材料是良好的热和电的绝缘体，能够抗高温和耐腐蚀。在本书的项目中，我们通常仅用它作为绝缘装置来保证电器的安全。

### 2.2.3 高分子材料（塑料）

塑料与橡胶都是高分子材料。泡沫材料，如氯丁（二烯）橡胶就是一种高分子材料。这种材料密度小，所以质量相对较轻。

热塑性塑料加热后可以进行模塑和再模塑，还能回到最初的形态。正是因为这种特点，所以一些由热塑性塑料制作的产品，如汽水瓶，可以再回收。

热固性塑料不能再模塑，所以不能回收，如保龄球、橄榄球头盔和环氧树脂。

和所有的材料一样，塑料的外形与尺寸也多种多样，以下是一些常用的塑料类型和用途（取自 Peter Menderson 和他放在 <http://itp.nyu.edu/materials/> 的有关材料方面的资料）。

（1）ABS：硬度大，抗冲击性能好。许多小电气产品用的材料都是 ABS。它比丙烯酸塑料软，加工更容易。LEGO 产品及 Makerbot 的 3D 打印机最早用的材料都是 ABS。

（2）丙烯酸塑料（商品名：树脂玻璃）：一种透明的高硬度材料，常用在激光切割机和模型制作中。用一把普通的小刀在这种材料上划线，然后把它沿线掰开，就可以把它加工成薄片。

（3）聚甲醛树脂：硬度大，易于加工，摩擦系数小（但不如聚四氟乙烯小），常用于制造齿轮和轴承。

（4）尼龙：与聚甲醛树脂类似，用来做一般的耐磨材料。

（5）PETG：容易折弯，是聚碳酸酯的廉价替代品。

（6）聚碳酸酯（商品名：热塑聚碳酸酯）：一种不易碎的材料，透明度很好，且有很高的抗冲击强度。这种材料有渗透性，因此可以吸收空气中的水分。

（7）聚乙烯：品级多，性质也各不相同。真空成型的聚乙烯性能好（见第 9 章有关真空成型的内容）。

（8）PVC 塑料：一种白色的材料，通常用于管道及其配件。虽然锯、切和钻孔都很容易，但因为其在加工和处理过程中会产生毒素，所以对环境有危害。这种塑料不能用激光切割，在切割或钻孔时必须使用安全用具（面罩、护目镜）。

（9）苯乙烯：容易加工、成本低、柔韧性好，通常为薄板形，容易用锋利的刀

割断。

(10) 聚四氟乙烯：比较光滑，因此用这种材料制成的薄板和管件常用于做轴承及滑行面。

(11) 橡胶：用于吸收震动，也可用来做瓶塞，还有 O 形环及垫圈等，来用于密封一些装置。

知道需要的塑料种类和数量有助于我们寻找合适的材料。同样，在 McMaster 网站上购买会非常方便。不过塑料很常见，所以如果你要的是一般形状和尺寸的塑料，如薄板与棒，可以在 Pearl ([www.pearlpaint.com](http://www.pearlpaint.com)) 这样的本地工艺品店去购买。

泡沫橡胶、橡胶、用于铸型的塑料，还有浇注成型的零件都属于塑料。

绝缘泡沫（材质较硬的粉色和蓝色类的）及硬质泡棉经常用于做原型机。Smooth-On ([www.smooth-on.com](http://www.smooth-on.com)) 公司就提供几十种这种材料，可以用来做原型机、雕刻及模型。Compleat Sculptor ([www.sculpt.com](http://www.sculpt.com)) 公司，总部在纽约，是 Smooth-On 的一个分销商，而且还是购买可成型和铸造类零件的一站式商店。在第 9 章中我们会详细说明。

如果想自己 DIY 塑料零件，可看看 ShapeLock Design Plastic 和 Sugru。这两家的产品都是可以手工成型的，在室温下就能硬化，主要取决于你要将零件用在何处。另外，在找结构件和外壳时当然不要忘了 Tupperware 或 LEGO 和 K'NEX 这样的玩具套件。

## 2.2.4 复合材料

复合材料与合金类似，是由两种或多种材料合成的，所以融合了每种材料的良好特性。但是，金属合金仅由几种金属合成，而复合材料可以由不同类的材料合成，如玻璃纤维与碳纤维。复合材料在新型收音机上也用得越来越多，如 Airbus A380 和 Boeing 787 等。复合材料虽然重量轻，不过强度却比较大，因此，在飞行同样距离的前提下，用这种材料的飞机可以消耗更少的燃料。我们在第 9 章中会提到的快速成型公司，如 Solid Concepts ([www.solidconcepts.com](http://www.solidconcepts.com))，它就可以用铝、尼龙和玻璃的合成物做成各种功能件。

### 1. 木材

木材实际上是一种天然的复合材料，由一种叫做木质素的硬质材料与高强度的纤维素结合而成（可以把纤维素看作麦秆，木质素看成粘在麦秆上的胶水）<sup>[1]</sup>。木材相对容易加工，而且一般来说成本较低。

通常，硬木材强度大。对于木材来说，越硬加工起来就越难。软木材，如菠萝木，非常轻，而且容易加工，但同时也不耐用、容易裂口。木材通常会沿纹理方向

裂开，这就是为什么可拆解的筷子如此容易分开的原因。

合成木如纤维胶合板、中密度纤维板、硬纸板、定向结构刨花板、碎木板和绝缘纤维板等，因为它们价格低，而且很实用，所以用途广泛。其实所有这些合成木都是由木屑或木头颗粒与黏合剂合成的。

(1) 纤维胶合板是由单板胶合而成的多层板，相邻层单板的纤维方向互相垂直，所以比仅用木材层叠而成的材料强度大，而且不像纯木材那样容易裂开。在一些业余爱好者商店里可买到航空用的胶合板，这种胶合板的质量比家用胶合板质量好。

(2) MDF（中密度纤维板）是一种以细小锯屑为原料，添加蜡和脲醛树脂，再经热压后制成的一种人造板材，密度比纤维胶合板高，强度也比纤维胶合板大，缺点是比重。

(3) 梅斯奈纤维板常用激光切割机来加工。由于是用天然的原料，所以不用甲醛类的黏合剂，因此这种材料比其他的复合木材更加环保。

(4) 竹子就更加环保了。因为长得快，所以更新容易。也有几家公司生产竹纤维胶合板（如 [www.plyboo.com](http://www.plyboo.com)），不过可能要等几年后这种材料的价格降下来，才会受到业余爱好者们的热捧。

天然木材的特性也各不相同，枫木、樱桃木和橡木的材质非常硬，杉木和菠萝轻木就特别软。而且木材的形状和尺寸也有很多种，有薄片，也有较常见的  $2 \times 4$  板。

在本地的家装店、工艺品店和业余爱好者店里都能找到木质材料。当然，要找一些几乎没有树结或裂纹的木材。沿木板长度方向检查一下是否弯曲，也尽量不要选择湿木材。你也可以在这些店外部找一些废料，有些废料可用在你的项目中。

用木材做结构件时，尽可能打通孔（穿过木头的孔），尽量不用螺纹或打钉的方法，而是直接用螺钉和螺母穿过木材，这样能防止木头的边裂开。孔离边缘越远，木材裂开的可能性越小，

木胶能把两块木头沿纹理牢固地粘在一起（不是首尾相连）。当沿着纹理粘木头时，木胶有机会渗进纹理，附着在像麦秆一样的纤维上，实际上起到了加固木头的的作用。首尾相连进行黏接时，木胶没有机会渗进木头，所以粘不住任何东西，结果就是一个非常不牢固的接头。记住：使用木胶时不能有污斑，因此如果要用木胶，就一定要小心不要在木材上留下任何木胶的污迹。天然木材比合成木材好一些，即使有一些污斑，也不会影响黏接的强度。当然，如果你特别重视美观的话，就需要特别注意。关于木用螺钉和木胶在第3章会有更多说明。

## 2. 纸和纸板

纸、纸板及有泡沫塑料衬里的木板都是由木材制成的。虽然多数人并不把纸看作是一种工程材料，不过一些厚的纸卡片却非常有用。你可以在 Flying Pig（[www.flyingpig.com](http://www.flyingpig.com)）

flying-pig.co.uk) 公司的网站上看看用纸做的一些动态组件。

为了验证你的创意,如做一种 LEGO 的产品,用纸或纸板快速地做样品是相当有用的,而且还容易裁剪。你可以首先剪下许多片纸或纸板,然后把它们粘在你最终要用的材料上来做样板。找一把美工刀、切割垫(从工艺品店而不是厨房用品店找),用一把钢尺来校直。也可以用旧杂志来替代切割垫,不过一般来说切割垫的工作面特别平,所以也是一个不错的投资。

可以先去本地的工艺品店,然后去一些办公用品店,去找纸和纸板。在多数杂货店也可找到海报和索引卡。

### 3. 泡沫板

在两块硬纸板间加入泡沫,就制成了泡沫板。这种板质量轻、容易切割和粘合,也容易找到,本地的工艺品店和随处可见的文具用品店都有。

## 2.2.5 半导体材料

半导体的导电性介于导体(如金属)与绝缘体(如陶瓷)之间。半导体材料已经用于做集成电路板。因为有了半导体材料,才有了我们常用的电子产品和计算机。在这本书中不会直接使用半导体材料,但会用到由半导体材料制成的元件(如三极管),有助于我们了解半导体究竟是什么。

## 2.2.6 生物材料

生物材料其实是一种没有生命的材料,用在与人体进行交互的一些元件中。生物适应性材料的一种特性,它指的是人体排斥材料的一种性质<sup>[2]</sup>。

一些常见的生物材料有钛、不锈钢、PMMA(一种略带桃色的透明塑料,常用于牙科设备中,如牙齿固定器)、聚四氟乙烯和硅树脂。在我们的项目中,这种材料仅用于需要长期使用的耐磨的材料。使用时,可能需要注意这种材料的生物适应性,防止皮肤过敏,并提高使用的舒适性。比如,要设计一个金属膝盖支架,这个架子在走路时会产生能量,要注意有多达  $\frac{1}{4}$  的女性会有金属接触过敏(少于男性的  $\frac{1}{2}$ ),此时就需要在架子接触皮肤的所有地方都加上不会引起过敏反应的氯丁橡胶垫(或类似的东西)。

## 项目 2.1 另类跳水板

在这个项目中,我们会在由 4 种不同材料制成的板的末端施加相同的重量块,来看看这些材料因为结构和几何形状不同,会有什么样的反应。

## 1. 材料清单

- (1) 4~12种由不同材料做成的长条，图2.4所示的几种材料分别为木质的搅拌筷、横截面为 $\frac{1}{16}$  in  $\times$   $\frac{1}{4}$  in 的黄铜条、横截面为 $\frac{1}{32}$  in  $\times$   $\frac{1}{2}$  in 的黄铜条、横截面为 $\frac{1}{50}$  in  $\times$   $\frac{1}{2}$  in 的钢条；
- (2) 3个C型夹；
- (3) 1  $\times$  3 小木板或硬皮书；
- (4) 4个黏土块（或其他小的重量不变的物体）；
- (5) 胶带。

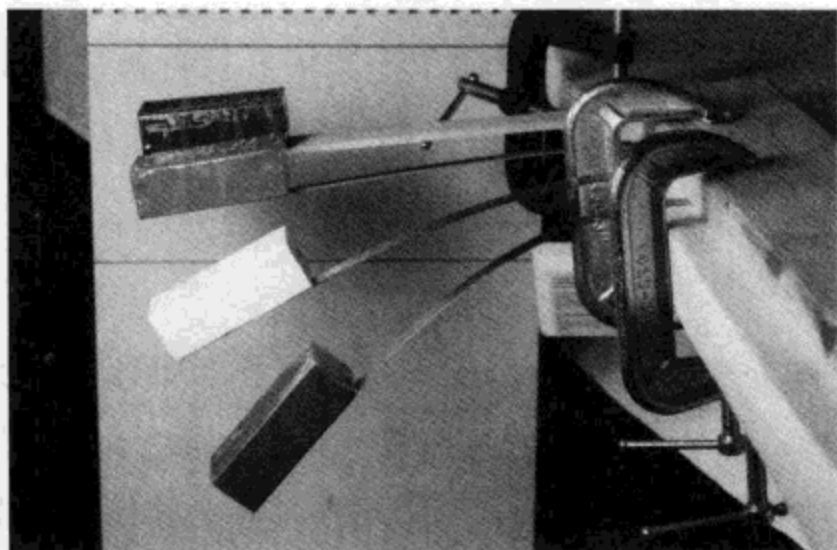


图2.4 材料测试

## 2. 操作方法

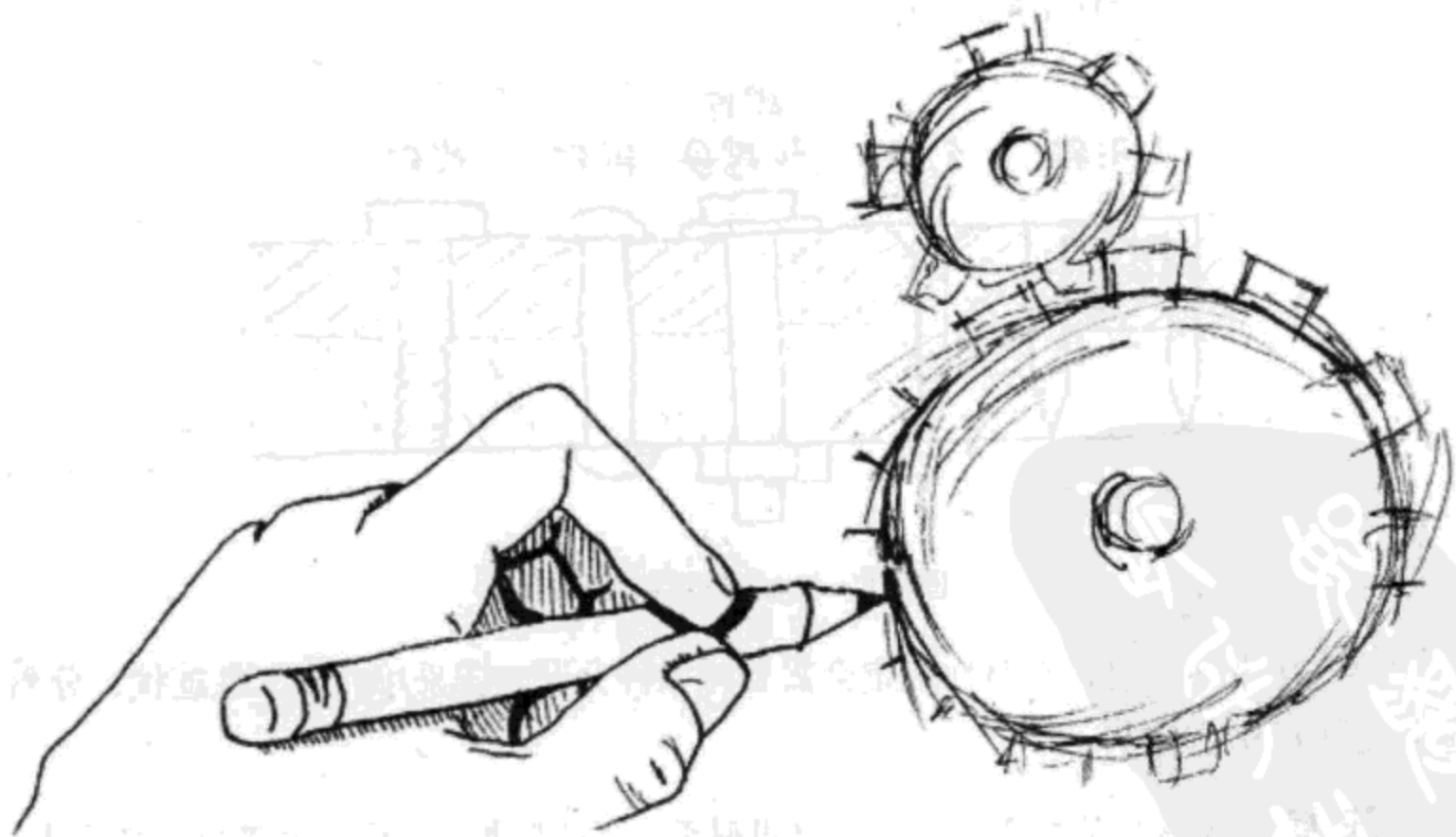
- (1) 每种材料都有 10 in 的长度悬挂在桌子的边缘外，用木质的搅拌棒夹在桌子边缘。
- (2) 把其余 3 种材料压在书或木板下。
- (3) 用胶带把黏土块粘在每种材料的末端。
- (4) 注意每种材料的几何形状的变化大小，以及黏土块在各种板的末端的垂度。在做项目过程中，设计结构件时，一定记住这些材料及特性。

## 参考资料

- [1] Michael R. Lindeburg, *Mechanical Engineering Reference Manual for the PE Exam, 12th Edition* (Belmont, CA: Professional Publications, 2006) .
- [2] Buddy Ratner, Allan Hoffman, Frederick Schoen, and Jack Lemons, eds., *Biomaterials Science: An Introduction to Materials in Medicine* (San Diego, CA: Academic Press, 1996) .

# 第3章

# 固定与连接的方法





第一次做项目，可以是为家里做一个东西，或是组装一件艺术品，也可以做一个机器人竞赛的项目，肯定会出错。有时是因为电池坏了，或者连接件断了，或者狗把你做的东西当咀嚼棒咬了。不过，我认为最常见的原因是使用的材料或紧固件不当，机构达不到预期的使用寿命。

机械装置通常会有一个基座、框架或其他一些主要结构件。如果知道如何有效地做这个主要结构件，就会减少后续工作的很多麻烦。把两个零件连接在一起的方法主要有两种：非永久性连接与永久性连接。我推荐尽可能采用非永久性连接的方式，因为这样在分离时不会损坏零件。不过，我会不时提到一些只能选择永久性连接的情况。

本章会让你了解不同的零件连接的方式的基本概念。在后续章节中，我会更详细地说明一些特定的连接方法，如将零件连接在电机轴上的方法。

### 3.1 非永久性连接：紧固件

非永久性连接快速、实用，被用于各种设计中。常见的紧固件有螺母、螺栓、钉子、垫圈，以及这些年开发的用于连接的其他组件。

图 3.1 说明了各种紧固件的形式。

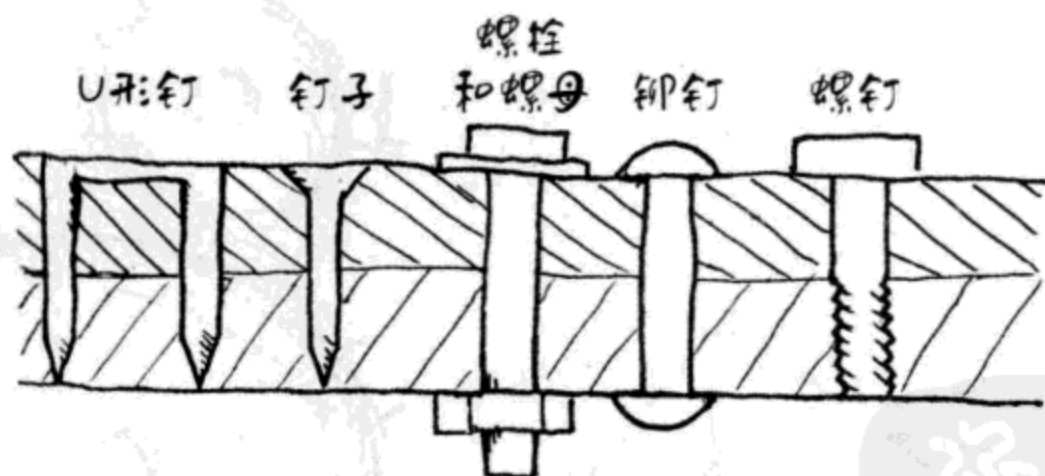


图3.1 机械紧固件的形式

第一次做项目时，有时你肯定会需要将零件分开。若采用非永久性连接，分离起来就简单多了。

**注意** 可以用尼龙搭扣，也可以用磁条；可以用电缆扎带，也可以用软管夹。总之，有许多种方法可将零件紧固在一起。不过像找合适的零件一样，要使机构达到预期的使用寿命，找到一种完美的连接方法也同样重要。市场上每天都会出现越来越多的紧固方法与组件，因此找到适用于你的项目的方法与组件的机会就多了。

### 3.1.1 螺钉、螺栓和螺纹孔

本书中的螺钉和螺栓是可以互换的。当组件需配螺母时，就用螺栓；而螺钉则用来直接拧进另外一个零件的螺纹孔，此时就不用螺母。不过，因为螺钉与螺栓的区别不明显，所以它们的区别也就不重要了（因此本书不予区分——编辑注）。

#### 1. 螺纹外径与每英寸的螺纹数

图 3.2 所示为一个螺钉的特征参数，最重要的是螺纹外径和每英寸长度上的螺纹数量。外径的单位可以是英寸或毫米，用英寸表示时，若外径大于或等于  $\frac{1}{4}$  in，则螺钉的第 1 个参数是直径值。比如， $\frac{1}{4}$ -20 螺钉的外径是  $\frac{1}{4}$  in，每英寸的螺纹数为 20 个。由于某些原因，螺钉的外径小于  $\frac{1}{4}$  in 时，会给出一个标号。比如，4-40 螺钉的外径是 0.112 in。若要将螺钉标号转换成外径，需要用下边的公式计算或参考表 3.1。

$$\text{外径 (in)} = (\text{螺纹数} \times 0.013) + 0.073$$

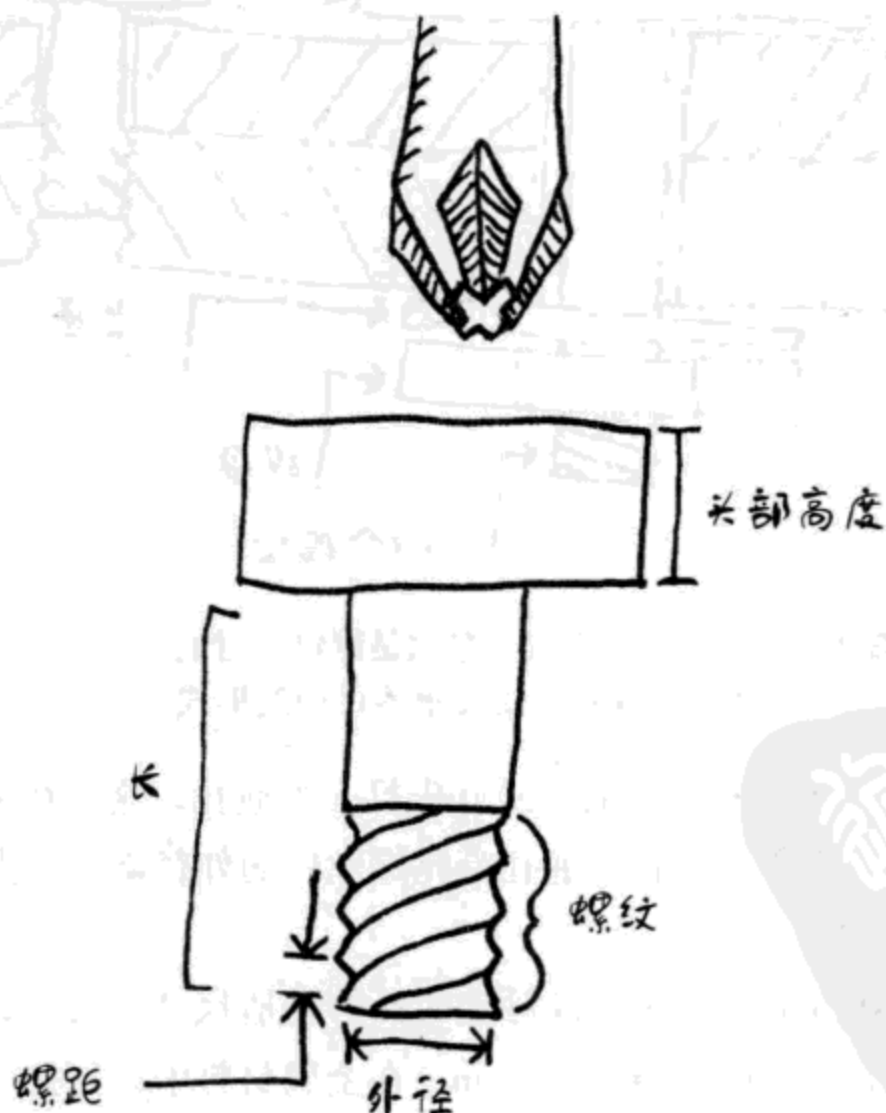


图3.2 螺钉结构图

多数螺钉都用标准螺距（大螺距）和小螺距（每英寸的螺纹数更多）来表示。螺距是螺纹的间距。在公制系统中，螺钉首先用外径标示，然后是螺距。因此，外径是 3 mm、标准螺距为 0.05 mm 的螺钉就表示为 M3 × 0.05。本书中主要用英制单

位，如果会用到公制单位标示的穿孔组件（如电机），就需要了解公制单位。

用螺钉连接两种材料时，最简单的方式是在两种材料上都钻通孔，穿入一个比两种材料叠起来的厚度要长一些的螺钉，然后在另外一面用螺母拧上，把两种材料夹住即可，如图 3.3 所示。一般的经验是，确保螺钉穿过螺母并且超出螺母至少 2~3 个螺纹。如果通孔大小合适，孔的大小就能够穿过螺钉，但也不能太容易，否则连接会太松。一般情况下都是用紧配合。不过，松配合的孔会略大一些，在连接排列不整齐的零件时，可以有更多的空间旋转螺钉。

有时因为空间或其他条件限制，不可能同时使用螺钉与螺母。此时，可以将螺钉直接拧进零件中。

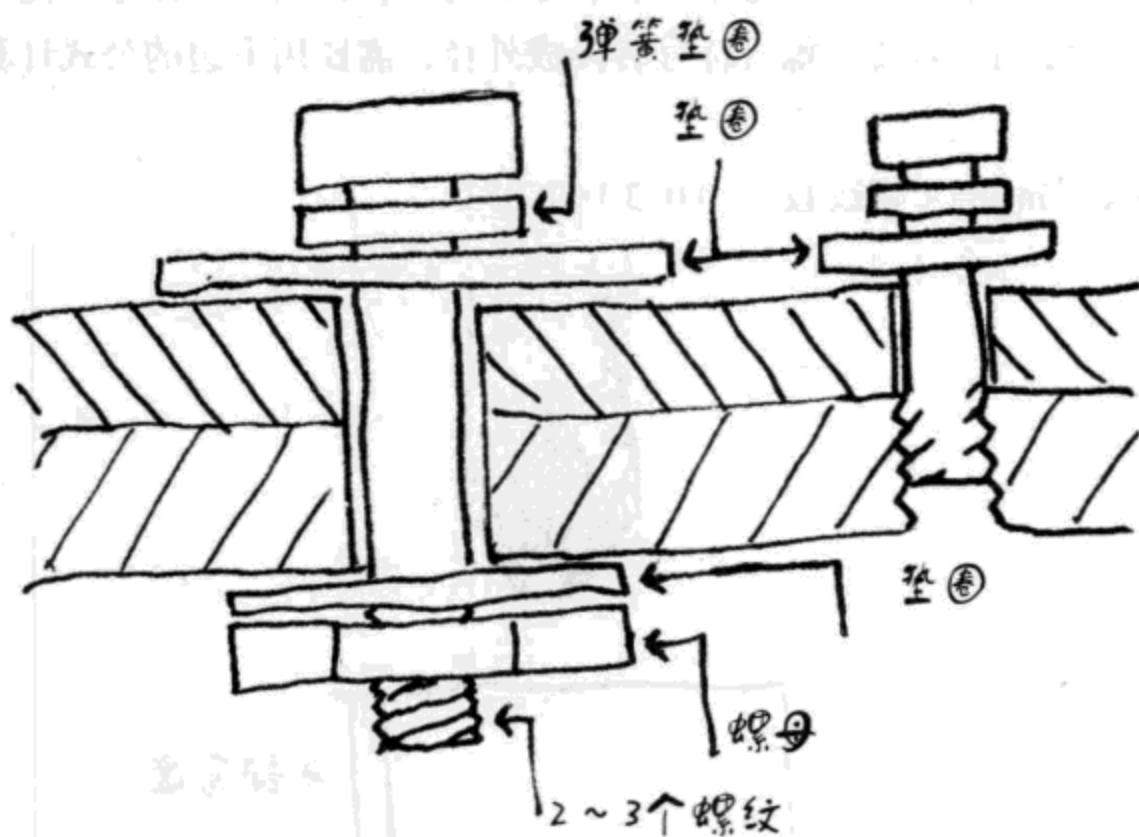


图3.3 螺钉连接示意图：左边是螺钉穿过通孔的形式，右边是将螺钉直接旋进零件中的形式

在连接木材或多数塑料零件时，最好先打一个通孔，这样在穿螺钉时，材料就不会裂开，而且也更容易穿螺钉。通孔是比螺丝钉的外径略小一点的孔，有了这个孔，螺钉拧起来就更容易了。

你可以在 McMaster 上查到螺钉对应的孔的合适尺寸。比如，零件 90031A153 是一个木螺钉，在软木材中的通孔为  $\frac{1}{16}$  in。在金属材料中，先打一个大小等于螺丝钉所配的丝锥的尺寸的通孔，然后用与所选螺钉的尺寸匹配的丝锥在零件中攻丝即可。其实这项工作并不像我们听到的那么复杂。

要确定一种比较好的连接方式，用表 3.1 所示的数据来确定与螺钉匹配的通孔的尺寸。这个表也列出了丝锥的尺寸。（此表的内容摘自 [www.stanford.edu/~jwodin/holes.html](http://www.stanford.edu/~jwodin/holes.html) 和 [www.efunda.com/DesignStandards/screws/tapdrill.cfm](http://www.efunda.com/DesignStandards/screws/tapdrill.cfm)。）

表 3.1 螺钉与丝锥的尺寸表

通孔钻								
螺钉尺寸			丝锥尺寸		紧配合		松配合	
标号	十进制 /in	每英寸螺 纹数	攻丝 尺寸	十进制 /in	攻丝 尺寸	十进制 /in	攻丝 尺寸	十进制 /in
#0	0.06	80	3/64	0.0469	52	0.0635	50	0.07
#1	0.073	64	53	0.0595	48	0.076	46	0.081
#1	0.073	72	53	0.0595	48	0.076	46	0.081
#2	0.086	56	50	0.07	43	0.089	41	0.096
#2	0.086	64	50	0.07	43	0.089	41	0.096
#3	0.099	48	47	0.0785	37	0.104	35	0.11
#3	0.099	56	45	0.082	37	0.104	35	0.11
#4	0.112	36	44	0.086	32	0.116	30	0.1285
#4	0.112	40	43	0.089	32	0.116	30	0.1285
#4	0.112	48	42	0.0935	32	0.116	30	0.1285
#5	0.125	40	38	0.1015	30	0.1285	29	0.136
#5	0.125	44	37	0.104	30	0.1285	29	0.136
#6	0.138	32	36	0.1065	27	0.144	25	0.1495
#6	0.138	40	33	0.113	27	0.144	25	0.1495
#8	0.164	32	29	0.136	18	0.1695	16	0.177
#8	0.164	36	29	0.136	18	0.1695	16	0.177
#10	0.19	24	25	0.1495	9	0.196	7	0.201
#10	0.19	32	21	0.159	9	0.196	7	0.201
#12	0.216	24	16	0.177	2	0.221	I	0.228
#12	0.216	28	14	0.182	2	0.221	I	0.228
#14	0.242	20	10	0.1935	D	0.246	F	0.257
#14	0.242	24	7	0.201	D	0.246	F	0.257

通孔钻								
螺钉尺寸			丝锥尺寸		紧配合		松配合	
标号	十进制 /in	每英寸螺 纹数	攻丝 尺寸	十进制 /in	攻丝 尺寸	十进制 /in	攻丝 尺寸	十进制 /in
1/4	0.25	20	7	0.201	F	0.257	H	0.266
1/4	0.25	28	3	0.213	F	0.257	H	0.266
5/16	0.3125	18	F	0.257	P	0.323	Q	0.332
5/16	0.3125	24	I	0.272	P	0.323	Q	0.332
3/8	0.375	16	5/16	0.3125	W	0.386	X	0.397
3/8	0.375	24	Q	0.332	W	0.386	X	0.397
7/16	0.4375	14	U	0.368	29/64	0.4531	15/32	0.4687
7/16	0.4375	20	25/64	0.3906	29/64	0.4531	15/32	0.4687
1/2	0.5	13	27/64	0.4219	33/64	0.5156	17/32	0.5312
1/2	0.5	20	29/64	0.4531	33/64	0.5156	17/32	0.5312

## 项目 3.1 钻螺纹孔

本例中要钻一个穿 4-40 螺钉的孔。

### 1. 材料清单

- (1) 小铝块。
- (2) 开口足够宽的夹具（如 McMaster 5031A6），把铝块与工作台夹在一起。
- (3) 冲子或其他又硬又锋利又尖的物体。
- (4) 4-40 螺钉（长度和头部形状随意）。
- (5) 小丝锥扳手（McMaster 25605A63）。
- (6) 4-40 丝锥（能与丝锥扳手配合）。

**提示** 丝锥前端的斜锥面有助于丝锥进入孔中。如果有可能，最好选择有锥形槽的丝锥（如 McMaster 的 25995A125），因为这种丝锥用起来方便。

(7) 攻丝液或 WD-40。

(8) 0.089 in 的钻头，也就是表 3.1 的 43 号（所有好的钻头套装中都有这个

尺寸，也可以单独买，尽可能选择标准的长度，如 McMaster 30585A57)。

(9) 钻床 (也可以用手钻，有线或无线的均可)。

(10) 小圆锉或打埋头孔的工具 (如 McMaster 2742A26)。

(11) 防护镜。

## 2. 操作方法

(1) 戴上防护镜，清理工作区。

(2) 用冲子在要钻孔的位置做个标记。也不一定非要这么做，不过这样做了，钻孔时钻头就不会飘移。

(3) 把铝块夹在工作台上。在钻床上装上 0.089 in 的钻头，钻一个部分穿过材料的孔 (盲孔) 或全部穿过材料的孔 (通孔，这种孔钻起来较容易)。根据铝块的大小，来夹紧铝块。

(4) 用锉刀或打埋头孔的工具清理金属屑或毛刺。

(5) 在孔中喷一些攻丝液或 WD-40。你也不一定非要这么做，不过这样攻丝时会容易些，而且会减小丝锥断裂的危险。

(6) 就像把钻头装在钻床上一样，在丝锥扳手上装上丝锥。

(7) 把丝锥头放入刚才钻的孔中，使丝锥与物料垂直 (图 3.4)。在攻丝过程中，丝锥必须始终与材料表面垂直，否则丝锥会断裂。仔细地顺时针旋转丝锥扳手 1~2 圈，直到感到丝锥的牙咬进了铝块。从这点开始，顺时针转  $1\frac{1}{2}$  圈，然后逆时针转  $\frac{1}{4}$  圈……这么做可以把铝材切成小碎屑，不至于造成碎屑堆积而堵住丝锥，防止丝锥断裂。

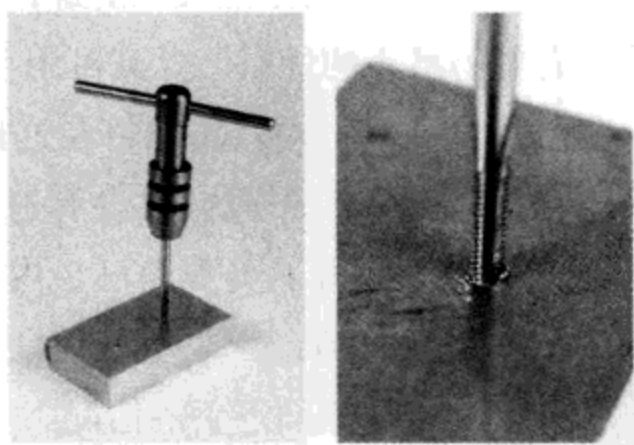


图3.4 攻丝过程

**注意** 丝锥材料强度大而且锋利，但特别脆。如果攻丝时太用力，丝锥会特别容易断裂。只要开始攻丝，就不能再校正偏差。

(8) 一旦攻丝到了孔底，就反方向旋转，把丝锥取出来。

(9) 擦掉或冲洗掉金属屑和多余的攻丝液。

(10) 试着把 4-40 螺钉拧进螺纹孔，应该很容易。

## 2. 螺钉头部形状

下一个关于螺钉与螺栓要考虑的重要问题，就是它们的头部形状。图 3.5 列出了一些常用的形状。

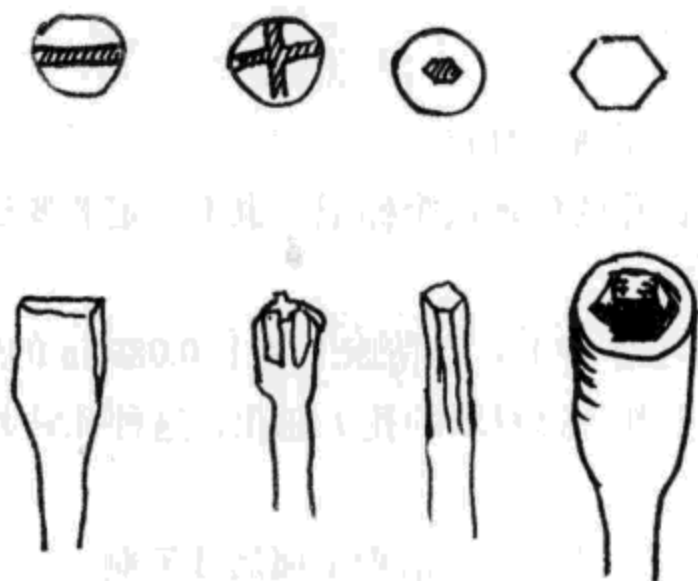


图3.5 常用螺钉的头部形状

你可能很熟悉平口或十字改锥。你甚至还滑方。这种事情通常发生在用十字改锥时，因为压得太狠，所以改锥就会滑出来，结果螺钉再也拧不动了。为了避免发生这种情况，用十字改锥时要特别小心，可改用圆柱头或六角头的螺钉和改锥。

**提示** 还有另外一种办法可处理滑方。用带切割轮的 Dremel 打磨机在螺钉的头部切一个槽，这样就可以用平口改锥了。用打磨机时要戴上护目镜，操作时速度要慢，因为切割轮特别脆、容易断裂。

内六角螺钉用起来有点不方便，因为不同尺寸的螺钉需要不同尺寸的六角扳手，如图 3.6 所示。但这种螺钉有不易滑方的优点，尤其可用在拆一个“粘”起来的螺钉



图3.6 六角扳手套装

时。内六角螺钉在连接点可以起到抗拉的作用，半圆头螺钉就没有这种功能——这种设计仅仅是为了美观而已。内六角螺钉常用于受力较大的场合，或用于无法用传统改锥，只能用扳手从侧面下手的情况。

根据应用场合与使用起来的方便性，螺钉的头部形状也不同。木螺钉通常是平口的，方便拧进木材。内六角螺钉和机械螺钉的形式也不尽相同。最常用的螺钉头部形状如图 3.7 所示。

**注意** 平口螺钉的长度从头部开始计算，其他所有螺钉的长度都是从头部以

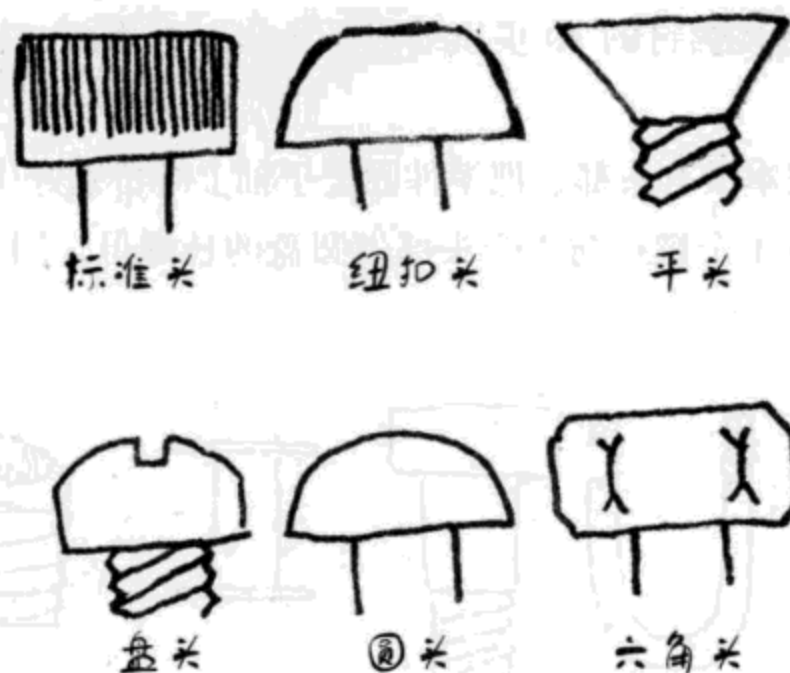


图3.7 普通螺钉的头部形式

下开始计算。

如果螺钉要低于材料顶面，需要一个埋头孔（图 3.8），McMaster 有专门打埋头孔的钻头。

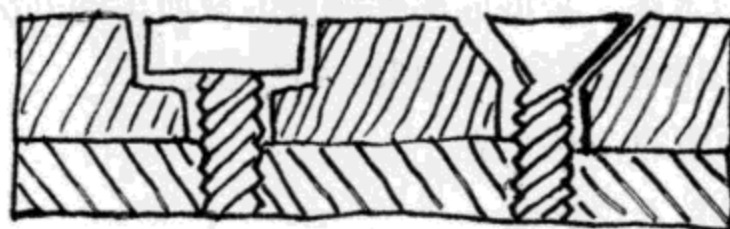


图3.8 埋头直孔（左）与埋头锥孔（右）

### 3. 材 料

最后要关心的就是螺钉的材料。最常用的螺钉是钢制的，如果需要防锈，可选择不锈钢。普通钢制成的螺钉都会镀一层锌或黑色氧化物，防止螺钉生锈，而且比不锈钢的成本要低。

### 4. 螺杆和特制螺钉

螺杆是没有头部的长螺栓，有的部分有螺纹，有的全部长度上有螺纹，有很多种尺寸与长度。螺杆可用作轴来连接多个零件，只要最后在两端装上螺母就可以了；也可用作推拉杆，产生短距离的运动，如用于飞机模型上方向舵机的控制。

螺丝钉的类型多得无法描述，不过以下几个值得简单地提一下（图 3.9）。

(1) 带肩螺钉上有一段是光滑的圆柱体，其余才是螺纹，可用做隔离器或轴。

(2) U形螺栓可用于在平面上形成一个环。

(3) 吊环螺栓的用途与U形螺栓相似，不同的是，只需要一个安装孔（U形螺栓需要2个）。



(4) 自攻螺钉将装螺钉的 10 步压缩成了 1 步，在木材、铁板与软塑料上特别有用。

(5) 紧定螺钉根本没有头部，把零件固定于轴上时特别好用。

(6) 筒体螺栓有 1 个螺钉与 1 个头部带圆盘的长螺母，用于连接可自由转动的零件。

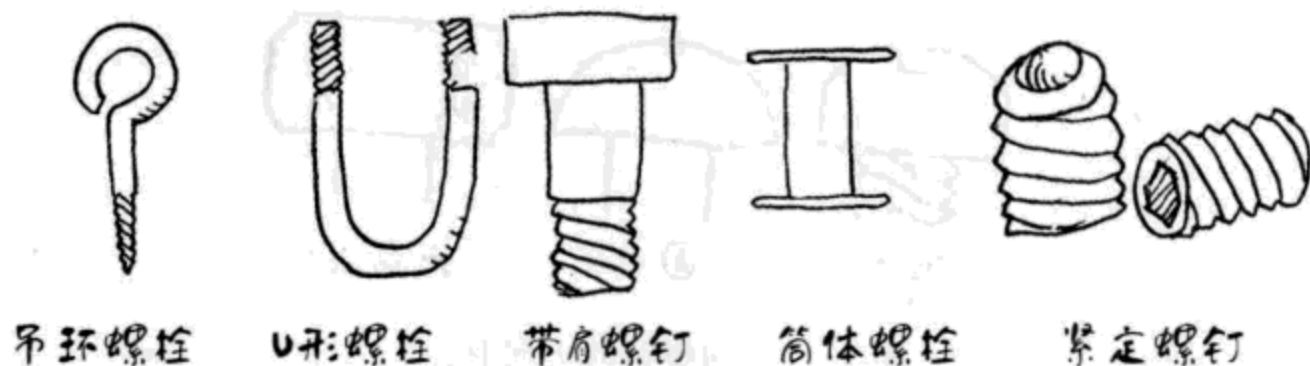


图3.9 特殊螺钉

### 3.1.2 螺 母

将螺母拧到螺栓的末端，是形成螺栓连接的最简单的办法。一定要选择一个与螺栓的螺纹尺寸及螺距相同的螺母，否则就无法配合。

下面是做项目时常用的一些类型。

- (1) 最常用的螺母是六角螺母。
- (2) 较常用的是防松螺母。防松螺母镶有尼龙片或不规则的花纹，这样可以防振动，而且非常牢固。但通常不可重复使用。
- (3) 蝶形螺母，在没有工具的情况下，拆装很方便。
- (4) 四爪螺母是一种精巧的组件，可以不费力地锤进木头与软塑料的孔中，完成内部连接。
- (5) 铆螺母在连接金属板材时与四爪螺母的作用相同，但需要专门的工具，而且一旦装上，便不易拆除。

### 3.1.3 垫 圈

垫圈至少有以下 4 种用途。

- (1) 安装时用来避免损坏底部材料。
- (2) 将紧固力分散到更大的面积上。
- (3) 作为隔离垫，避免微小曲面直接压在螺钉头部。
- (4) 来标示螺栓的紧固性，只要看不见垫圈而且垫圈也不转了，就不用再拧螺

栓了。

一个好的螺纹连接，除了用标准垫圈外（见图 3.3），还需用到弹簧垫圈，它的作用是保证即使螺钉因振动变松了，连接也是紧固的。压下弹簧垫圈时，它看起来就像一个中间有间隙的平垫圈或 C 形垫圈。但是，如果螺钉因为磨损或振动变松了，弹簧垫圈就会弹起来填满产生的间隙。

### 3.1.4 钉子和 U 形钉

钉子用起来比螺钉更持久，不过拆起来也相对容易。下面是 3 种常用的钉子。

（1）双头钉用于临时连接时还不错，而且拆起来比普通钉子容易。

（2）饰面钉的头比较小，可埋进材料中，因此若想取出钉子，就永远不要用这种钉子。

（3）大头钉，可把织物钉在框架上，用在家居设计中。

如果用钉枪，打钉就更快了。同样，用 U 形钉枪，或者一个普通的订书机，把材料临时钉起来也会快得多。

在设计非永久连接时，用普通钉与 U 形钉会比较简单易行。在做临时连接或早期的样品设计时，我推荐使用这种连接方式，但不能作为通用连接方式。装错后拆下的钉子通常就不能用了，而且基材也受到破坏，所以必须重新调整材料，浪费掉更多的钉子。这个过程重复枯燥，所以在设计项目过程中，从一开始就尽量使用螺母和螺栓，仅在没有其他选择时再使用钉子和 U 形钉。

### 3.1.5 销 钉

如果组装过宜家的家具，或在体育馆用过带配重片的健身器，你就会用销钉来固定与对齐零件。在任何工艺品店都可以找到木销钉，不过在对齐零件时一般会用金属销钉与弹簧销钉。

如果零件上的孔比销钉的直径小，可以用锤子将销钉锤进孔中，摩擦力会将它保持在一个位置。如果孔稍大一些，销钉就能够很容易插进去，也可以再取出来。

### 3.1.6 弹簧卡环

弹簧卡环用来防止销钉与轴沿孔的方向滑动，或构成枢轴连接时使用。图 3.10 所示为一个用于健身器材上的定位环。



图3.10 健身器材上的弹簧卡环（定位枢轴连接的轴）

在轴上刻一个槽，可以使弹簧卡环保持在一个位置。如果你会用车床，加工这个槽很容易。如果想知道更多车床的内容，请看第9章。

## 3.2 永久性连接：黏合剂、铆钉或焊接

永久连接用于连接永远不需分开的零件，有焊接、铆钉、黏合剂及环氧树脂连接。虽然胶水连接简单快捷，但如果零件坏了需要分开时会很麻烦。永久连接是最后的选择，应优先选择非永久连接。

### 3.2.1 黏合剂

黏合剂有很多种，我们在小学时都用过的白色胶水和双组分环氧树脂（俗称AB胶）都是黏合剂，干燥到足够强度需要的时间可能从几秒到一周不等，有的用来连接相似材料，有的用来连接不相似的材料（在 [www.thisisthat.com](http://www.thisisthat.com) 上有一些好的将不同材料黏接在一起的建议）。

最重要的是，要确保黏接面干净。若用砂纸或锉刀磨出一些纹理，这样黏合剂就有更多的接触面。

#### 1. 木胶

木胶用来连接木材。这种胶水的黏接面强度非常高，有时甚至比木头本身的强度还大。一般的白色万能胶也可用于黏接木头，不过多数场合，还是用黄色的木胶更好。若用黄色木胶，胶水从瓶子里倒出来到开始变干需要15min的时间。

有一种Titebond II木胶。需要防水时应该用这种木胶，其黏度高，干得快。

还有一种是聚氨酯泡沫胶，如Gorilla胶。这种胶吸水后会膨胀，填满空隙和裂缝，干燥后黏接力特别强。

## 2. 环氧树脂

5min 快干的环氧树脂特别受发烧友喜爱。环氧树脂是一种分成了两部分的胶，只有两部分混合在一起时才起作用。可以用冰棍棒把这两部分混合在一起，用涂药器与喷嘴式混合器来涂都很方便。

环氧树脂可用来黏接许多塑料、金属与复合材料。这种胶难干，可以用于涂抹。

只要是个五金店或家装店，就有环氧树脂（当然，也可以在 McMaster 网购）。在五金店的管道连接件区域，就可找到环氧灰泥，常用品牌有 Propoxy, FastSteel 和 QuikSteel（见图 3.11）。环氧灰泥也是同一种泥状黏合剂，由两部分构成，把这两部分压在一起，在空气中自然晾干，20min 后它的强度就会像钢铁一样硬。



图3.11 环氧灰泥——最好的救星

## 3. 塑料胶溶剂

有一种专门用于黏接塑料的胶水，用来黏接塑料时效果特别好，因为这种胶水可与塑料起化学反应，将黏接的两种塑料熔化，形成一个高强度连接。

Weld-On 是一种连接丙烯酸塑料的著名品牌，广泛用于建筑模型行业。其他胶水、环氧树脂和用于连接特定塑料的溶剂的效果也不错。

**注意** Weld-On 相当脏，如果使用时空气流动不好，就打开窗户，用风扇吹吹，并戴上面罩，以避免直接吸入人体；需要戴上手套，以防皮肤受到刺激；也请戴上防护镜，因为这种胶发出的难闻的气味会刺激你的眼睛。

## 4. 螺纹锁固剂

当螺钉受到振动、冲击或载荷变化时，要保证螺钉不动，经常需要用到螺纹锁固剂。这种胶用来把螺钉固定在螺母中。螺纹锁固剂对螺丝连接点也可起到密封作用，防止液体泄漏，避免腐蚀。

Loctite 牌的螺纹锁固剂就能起到这种作用。它有几十种，因此使用时要仔细阅读说明书，确保你选择的螺纹锁固剂最适合你的项目。

### 5. 万能胶

多数万能胶都装在小管中，在几秒钟之内就能速干。这种凝胶制成的胶水，因为比较稠，不容易滴落，所以用起来很简单。

一般而言，这种胶水的强度比环氧树脂小，因此只有在不得已或临时黏接时才选择这种胶水。在受力或受压的场合，不要使用这种胶水。万能胶更适合用来黏接眼镜，不适合来黏接运动的机械装置。

万能胶几乎在任何地方都能买到，如当地杂货店、McMaster。

### 6. 热熔胶

工具箱里应当准备一把热胶枪和一些胶棒。热熔胶可用来黏接所有的材料，如黏接纸盒、在电子元件上用来绝缘金属等。这种胶价格不贵，而且在任何工艺品店都能买到。

**注意** 用热胶枪时，一定要小心，不要烫着自己或桌子。

热熔胶的一个缺点是抗振性差。如果振动剧烈，或用力拉黏着的两种材料，热熔胶容易从基材上分离。另外，在黏接受热容易熔化的材料时，也尽量不要使用热熔胶。

### 7. 胶 带

一般的透明胶带或双面胶带都不适合用在咱们的项目中，不过在五金店能买到的双面泡沫胶用起来却很方便。可以用这种胶带固定没有安装孔的零件，如小电机，或在钻孔时将零件固定在一个位置上。

**注意** 双面泡沫胶的黏性非常大，一旦粘上就很难拆除，所以在使用前一定要确定黏接位置。如需要撕下来重新粘，先用小刀尽可能多刮一些胶，然后再用 Goo Gone 去掉余下的胶。

管道胶带撕下来容易，而且黏接强度也相对高。透明胶带与它类似，不过去除时不会留下黏性的物质。

## 3.2.2 铆 钉

空心铆钉由一个小的法兰片的金属管，内穿一个尾部带小“球”金属杆构成。用铆接工具将铆钉穿进预先钻好的孔，把金属杆拉入金属管，使球体向外变形。要在材料的背面形成另外一个法兰，需拉断金属杆。这些法兰将两层或多层金属板材或其他薄板叠在一起。你能够找到用在手钻上的铆接工具的配件。铆钉一旦装上就

无法取下，除非你再钻一个比铆接前还大的孔。

铆接方式原来用于只能在连接件的一面操作的场合，或没有装螺钉与螺母空间的场合；也用于对美观要求较高的情况，使表面看起来相对比较平整；还用于设计完成后，商品件的批量生产。在 McMaster 上可以找到各类铆钉与铆接工具。

相比其他永久连接方式，我建议尽量不要使用铆接的方式，除非万不得已。因为使用这种连接方式，就没办法再重复操作，也无法进行调整。

### 3.2.3 熔焊、铜焊和锡焊

熔焊、铜焊和锡焊都是通过加热的方式将金属材料连接在一起的方法。它们均是永久连接，若要再分开两种材料，就需要重新加热、切割。熔焊将两种相似的金属熔接在一起，有时也用类似金属作为填料。就像在两种材料间使用黏合剂一样，铜焊与锡焊可将两种不相似的金属熔接在一起。

#### 1. 熔 焊

在熔焊中，沿着焊缝或在一个点上熔化金属，把两种金属材料连接在一起，有时也使用相似的金属来填补空隙。两种主要的熔焊方式是气焊与弧焊。气焊用吹管将一种燃料（通常为乙炔）与氧气混合生成火焰，将两片金属熔化在一起。弧焊则将直流或交流电流转化为热能来熔化材料，有两种常用的弧焊方法。

(1) 钨气焊：用金属电极在要焊接的材料间生成电弧，焊接时也可以在电弧中填料。这种焊接方式要求操作者的协调性比较好。

(2) 惰性气体保护焊：在对焊接材料加热后，以均衡的速度送金属丝。掌握这种焊接方式需要多加实践，但比钨气焊容易些。

**注意** 如果想学习更多熔焊的知识，在当地的社区看看有无相关的课程。在纽约，就可以通过查看 Educational Alliance ([www.edalliance.org](http://www.edalliance.org)) 和 3rd Ward ([www.3rdward.com](http://www.3rdward.com)) 网站学习相关知识。

熔焊在重型机械焊接中很有用，不太适合用在小型机械中。相对其他连接方法，这种方法需要许多间接设备（如其他装置、安全装置等）。也就是说，如果掌握了熔焊的方法，你一定会感到更方便，因为如果不能用其他焊接方法时，你可以自如地采用熔焊的方法。比如，我以前的一个学生把一些旧自行车的零件焊在一起，做了一辆 Skybike——倒着骑的一种自行车（参见 <http://itp.nyu.edu/~md1660/skybike.html>）。如果用其他连接方式，做这个项目会难得多。

#### 2. 铜 焊

铜焊是用熔点为 800°F 的铜锌合金或银合金作为填料，将两种金属焊接在一起的方法。虽然填料的熔点比要焊接的金属低一些，但被焊接的材料还是会熔化，这

样有助于提高焊点强度。

### 3. 锡 焊

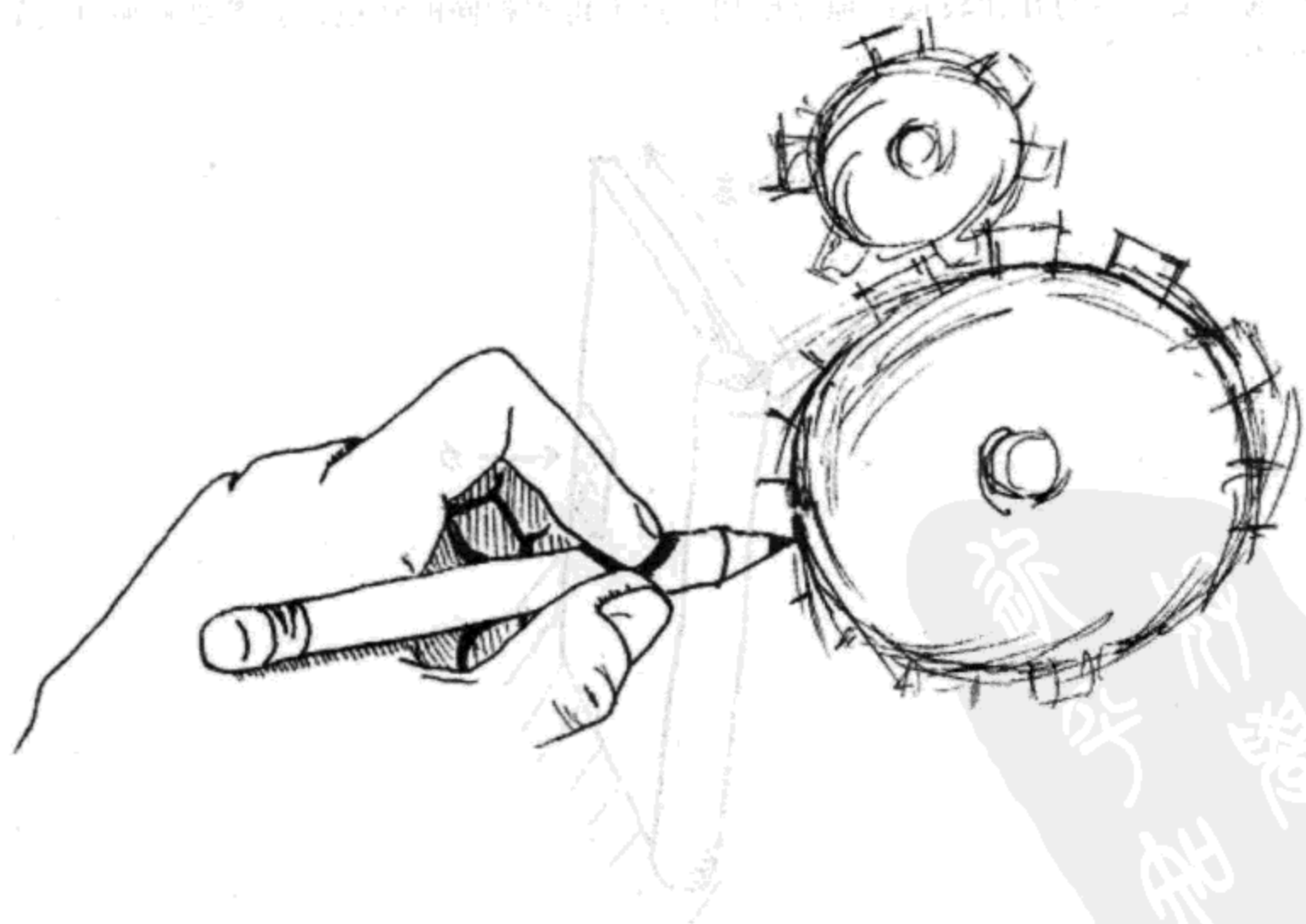
锡焊通常用熔点低于 800°F 的锡铅合金作填料。为了响应《关于限制在电子电器设备中使用某些有害成分的指令》(RoHS), 焊接时常用无铅焊料来减少电子垃圾。

因为在焊接过程中基材并不熔化, 所以锡焊并不是一种熔接过程, 因此焊点强度在目前来说是最低的, 所以这种方法一般用于连接电子元件和电线。不过即使要连接这些元件, 也只有在不得已时才选择锡焊。现在已经有了做原型的无焊面包板, 这种方法会在第 6 章中详细讨论。



## 第4章

# 力·摩擦·转矩



资源分享网  
PDG



你推过门吗？有没有注意到你推的地方不对的时候？你有没有发现手离合页越近，门就越难打开？这是因为打开门需要一定的转矩，如果你推的地方离合页太近，产生同样大小的转矩所用的力就比推把手时要大得多。我想，推门的中部也许会避免尴尬。

为了估计转矩的大小，为了知道在门的那个位置推省力，知道什么东西会断裂，也为了知道如何选择电机或选择材料，我们需要了解一些有关力与转矩的知识。在学习力、摩擦和转矩之前，需要复习一些数学知识。

## 4.1 转矩的计算

首先，要理解力和转矩（又称力矩）之间的关系。在第1章中我们学习过力。推力或拉力都是一种力，可以把转矩看做一种转动的强度。

转矩是物体转动的难易性。更具体一点说，转矩是力乘以力与旋转轴的垂直距离。这个距离也称为杠杆或力臂，即转矩 = 力 × 距离（ $\perp$ ）。

对于门来说，合页就是旋转轴。从图4.1看出，施加的力离合页越远，转矩就越大。此时的力就是你推门时产生的力。因此，当你偶尔在离合页特别近的地方推门时，要产生与在比较远的地方施加一点力得到相同的转矩，就需要施加更大的推力。

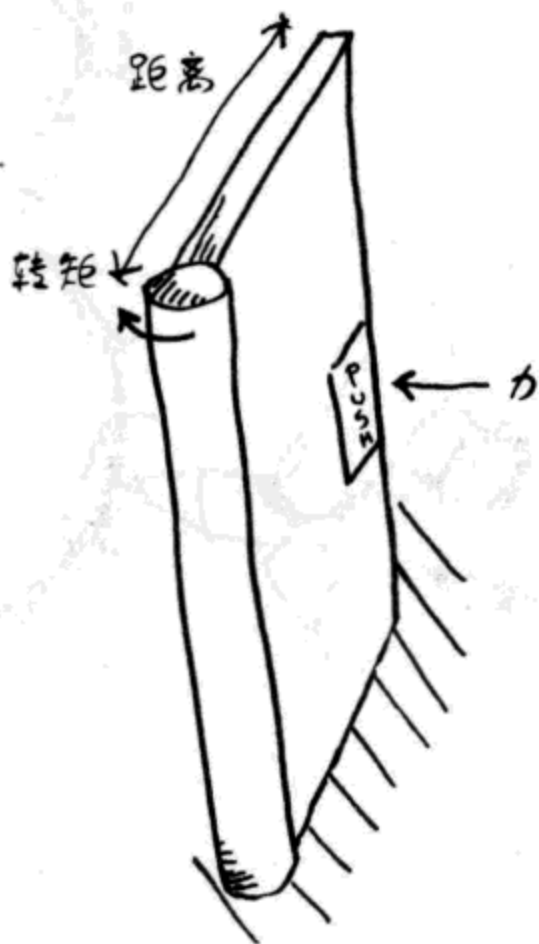


图4.1 转矩的概念

做个简单的练习就会感到转矩的存在。从食品柜上拿起一罐汤，把这罐汤拿在右手上，伸直胳膊并始终保持与地面平行。肩部感受到的力是你的肌肉为了产生足以支撑汤罐所产生的力，肩就是旋转轴，转矩就是汤罐的重量乘以汤罐离你的肩的距离（图 4.2）。如果汤罐的重量为 1 lbf，手臂长 2 ft ( $d_1$ )，则肩部所受转矩为

$$1 \text{ lbf} \times 2 \text{ ft} = 2 \text{ lbf} \cdot \text{ft} \quad (1 \text{ lbf} \cdot \text{ft} = 1.35582 \text{ N} \cdot \text{m})$$

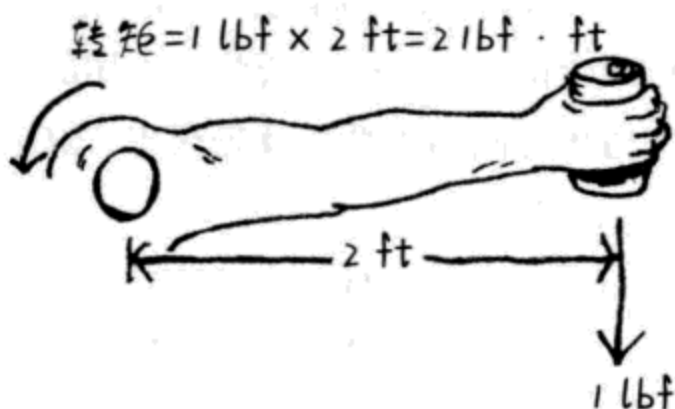


图4.2 手臂与地面平行时肩部受到的转矩

在这个位置保持一段时间后，你的肩就会感到酸痛，将汤罐的高度降低一半（图 4.3）。此时，即使手臂的长度及汤罐的重量不变，肩部所受的转矩却要小一些。为什么？因为汤罐施加的力依然是垂直向下的，而它与旋转轴（肩）的垂直距离却短了（ $d_2$ ）。

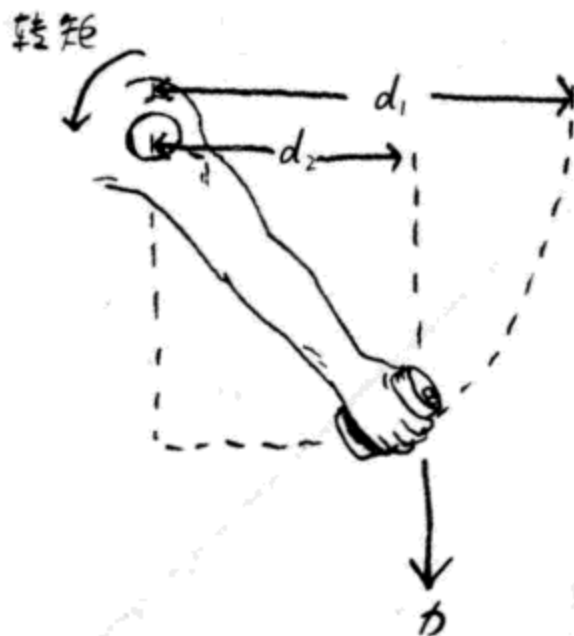


图4.3 手臂以一定角度拿汤罐时肩部所受的转矩

转矩的单位是距离  $\times$  力（有时为力  $\times$  距离）。不过，距离与力的单位有许多种，因此转矩的单位可能是 lbf  $\cdot$  ft、ozf  $\cdot$  ft、N  $\cdot$  m 等（1 ozf =  $6.25 \times 10^{-2}$  lbf =  $2.78014 \times 10^{-1}$  N）。你可以登陆 [www.onlineconversion.com/torque](http://www.onlineconversion.com/torque)，将你碰到的各种转矩单位转换为你喜欢的单位。也有一些小的手机应用程序可以帮你做这件事。比如，如果你碰到的电机的转矩单位是 N  $\cdot$  m，而你更习惯使用 lbf  $\cdot$  ft，你可以将电机的转矩转换为 lbf  $\cdot$  ft。

在做实际项目前，我们需要复习的最后一点数学知识就是在高中时学过的三角几何知识。记得正弦、余弦和正切（简称 sin、cos 和 tan）的概念吗？这 3 个三角函数有助于你计算转矩，力的方向与旋转轴的方向并不是方便计算的垂直方向（图 4.3）。

直角三角形中有一个  $90^\circ$  的直角（如图 4.4 所示，小方框对应的三角形的角）， $90^\circ$  直角的对边为三角形中最长的边，叫斜边。对于直角三角形来说，最酷的事是，只要知道边、角之中任意两个值，用正弦、余弦与正切的值，就可以算出其他的边长或角度值。要知道这些边角之间的关系，就先想想“SOHCAHTOA”吧，这是一种记住下面这些公式的方法。

$$\text{正弦 (S)} = \text{对边 (O)} / \text{斜边 (H)}$$

$$\text{余弦 (C)} = \text{邻边 (A)} / \text{斜边 (H)}$$

$$\text{正切 (T)} = \text{对边 (O)} / \text{邻边 (A)}$$

用这 3 个关系式可计算图 4.4 的边  $X$ 。我们都知道，如果直角三角形的一个角是  $45^\circ$ ，斜边长 2ft，要计算与  $45^\circ$  角相邻的边的长度，可以用余弦公式：

$$\cos 45^\circ = X / 2$$

整理得计算  $X$  的公式：

$$X = \cos 45^\circ \times 2$$

在计算器中，输入“cos45”，就会得到答案“0.707”，乘 2 后便可得  $X$  的长度约为 1.4 ft。

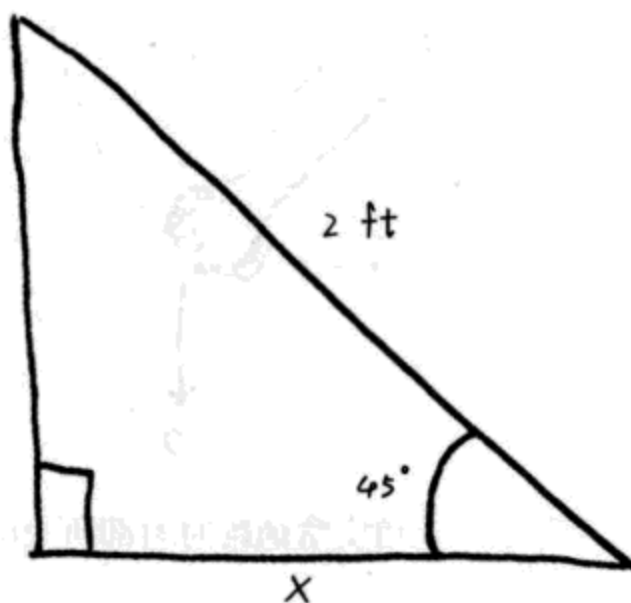


图4.4 直角三角形

现在，你应该知道如何计算图 4.3 中的  $d_2$  了吧？假设手臂与水平面的角度为  $45^\circ$ ，长度为 2 ft， $d_2$  的值就计算出来了。在图 4.2 中，手臂伸长拿住汤罐的转矩为  $2 \text{ lbf} \cdot \text{ft}$ 。

现在计算一下，图 4.3 中手臂以  $45^\circ$  角拿住汤罐所需要的转矩。计算出来的垂

直距离为 1.4 ft，乘上汤罐的重量 1 lbf，则可算出力矩为  $1.4 \text{ ft} \times 1 \text{ lbf} = 1.4 \text{ lbf} \cdot \text{ft}$ 。这就是为什么将汤罐拿低点比直接伸直手臂要容易的原因了。

进一步研究一下这个例子，假定你想让一个人形的木偶拿起或放下一汤罐。如果你在它的肩上安装一个电机，那么这个电机的转矩应该为多少呢？

为设计能够运动的机构，你首先需要了解机构不运动时是否会断。多数情况下，你可以单独计算一个静态的问题，这种问题只是动态问题的一种特例。

静态时，当汤罐离电机轴最远时，需要肩部提供的转矩最大。既然汤罐的重量不变，则汤罐离人偶的肩最远时，所需的转矩最大。也就是说，当人偶的手臂与地面平行（图 4.2）时，因为我们计算出的最大力矩为  $2 \text{ lbf} \cdot \text{ft}$ ，电机只有达到这个最小转矩，手臂才能以各种角度拿住汤罐。

## 4.2 摩 擦

相互接触的两个平面间会产生摩擦。摩擦使门的合页“吱吱”作响，也使机构工作时产生噪声。当机械与周围环境相互作用时，摩擦有时也会起到好的作用。比如，汽车与路面的摩擦使汽车能够抓地行驶。但在驱动物体运动时，摩擦对我们通常是不利的。因为摩擦会损耗机构的功率，减低工作效率，所以为使机构运动起来更流畅，我们必须努力降低机构内部的摩擦。就是因为摩擦力小了，不粘锅才会如此光滑，我们才能够在冰上滑冰。

那么摩擦究竟是什么呢？如何进行设计，如何选择材料才能把摩擦力减到最小呢？

就像重力一样，摩擦实质上也是一种力。实际上，摩擦力的大小是任何物体重力的一个百分比。假设在硬木地板上移动一个重 50 lbf 的箱子。箱子静止时，受到两个力的作用，如图 4.5 所示。

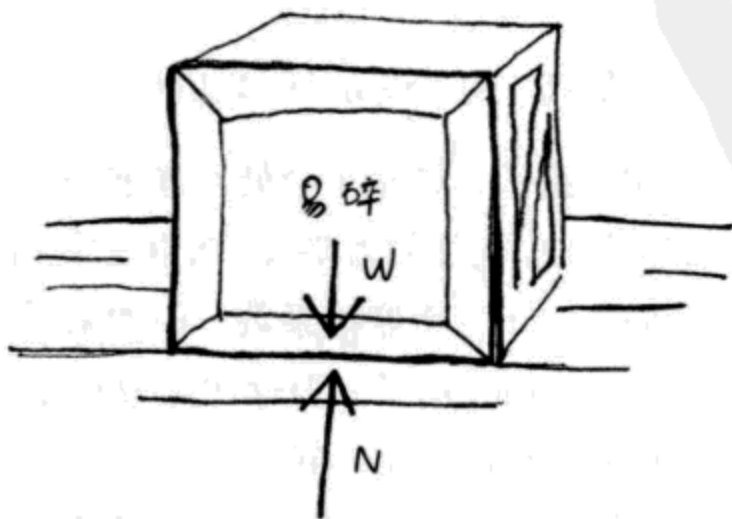


图4.5 静止的箱子所受的力

(1) 重力 ( $W$ ): 箱子的重力作用在箱子的中心, 方向与地垂直并且指向地面。

(2) 正压力: 地板会以与重力大小相同、方向相反的力支撑箱子。正压力看上去好像是人为编造出来的。但是想象一下, 如果你把箱子放在一床棉花上, 这些棉花将会受到挤压, 直到能够支撑起箱子为止。地板不会被压扁, 因为地板的强度已经足够大了 (如果地板需要被压扁才能支撑一个 50 lbf 重的箱子, 那就得换新地板了)。

当箱子静止时, 正压力与箱子的重力相等, 这种情况的专业术语叫“静态平衡”, 即所有施加在一个物体上的力可以相互抵消, 因此物体是静止的。

因为箱子很重, 你不打算抬它, 而决定坐在地上用脚推。你需要多大的力才能推得动呢? 你施加的推力必须大于箱子与坚硬的木板间的摩擦力, 箱子才会移动。此力是正压力的一个百分比, 可用如下的等式表示:

$$\text{摩擦力} (F_f) = \text{摩擦因子} (\mu) \times \text{正压力} (N)$$

摩擦因子, 也称摩擦系数, 通常用希腊字母  $\mu$  (读 miu) 表示, 它的值小于 1。也就是说, 推动箱子需要的力小于 50 lbf。

假定箱子与地板间的摩擦系数为 0.4, 则有如下等式:

$$F_f = 0.4 \times 50 \text{ lbf}$$

因此, 你需要克服的摩擦力仅有 20 lbf。将摩擦力与你施加的推力表示出来, 就是如图 4.6 所示的形式。可以看出, “摩擦力总是与运动的方向相反”。

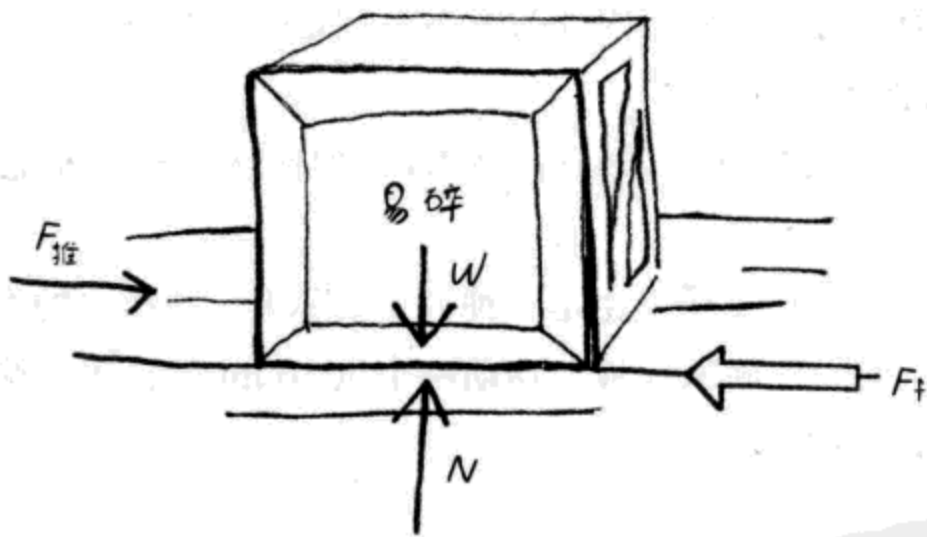


图4.6 箱子移动时的受力状态

如果所有的力都可以相互抵消, 则箱子会处于静态平衡, 不会移动。为了打破箱子的平衡状态, 使箱子移动, 你施加的力略大于摩擦力就可以了。

在上面的例子中, 我们给定了一个摩擦系数。但如果不知道摩擦系数的值, 又如何得到摩擦系数呢? 还是用 50 lbf 箱子, 但这次是放在复合板上, 把箱子放在复合板上中部, 然后慢慢抬起复合板的一端, 箱子开始滑动时就停下来。用一个量角器或其他角度测量仪测量复合板相对地面的角度  $\theta$ 。摩擦系数就是  $\theta$  的正切值。用公式表示如下:

$$\mu = \tan\theta$$

角度  $\theta$  如图 4.7 所示。如果当  $\theta$  约为  $22^\circ$  时箱子开始滑，那么求得的摩擦系数的值就与我们前面假定的值相等。

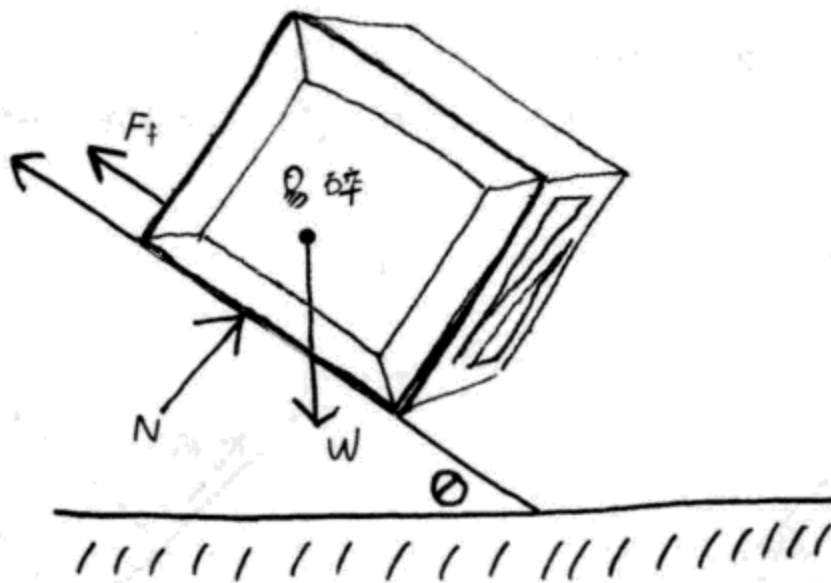


图4.7 倾斜的箱子所受的力

玩这些滑动的箱子倒是挺有趣的，但这对我们设计机构又有何帮助呢？摩擦力的方向总是与你施加的力的方向相反，所以在为项目选择电机或其他组件时，必须补偿掉。传递效率不可能达到 100%，即输出力永远不可能等于输入力，总会有损失，在多数情况下，这种损失都是由摩擦引起的。

前述的例子中，摩擦系数为 0.4，则会有 40% 的力会因为摩擦而损失。这个值似乎有点大，但这种情况下，这已经是最小的值了。摩擦总是相对的，箱子在复合板上滑动可能会受到许多种摩擦力，溜冰轮转动时的摩擦系数为 0.05，仅有 5% 的力损失。

## 摩擦系数

为了估算摩擦系数的大小，需要进行一些有趣的数学计算。如图 4.7 所示，力的方向不一定都像图 4.6 那样刚好与地面垂直。为了计算并抵消这些力，力的方向与这些力的方向应该平行。因此，将重力分解为两个分力，一个与复合板平行（方向与摩擦力相反），另外一个与正压力平行。

可以看出，力三角形的顶角大小与复合板和地面的夹角相等（图 4.8 左侧的  $\angle 1$ ）。因此利用三角学的知识可计算出与复合板平行的分力  $= W \times \sin\theta$ ，与正压力平行的分力  $= W \times \cos\theta$ 。把这两个分力表示在图上，如图 4.8 所示。然后就可以将力相互抵消了。可以计算出

$$N = W \times \cos\theta, \quad F_f = W \times \sin\theta$$

已知  $F_f = \mu \times N$ ，把这个公式代进右边的公式中，得

$$\mu \times N = W \times \sin\theta$$

把从上述公式推导出的  $N$  代入左边的公式并整理，得

$$\mu \times W \times \cos\theta = W \times \sin\theta$$

可以看出，公式两端的  $W$  可以抵消，并且已知  $\sin\theta/\cos\theta = \tan\theta$ ，因此可得到一个简单的计算公式：

$$\mu = \tan\theta$$

真的是太简单了！

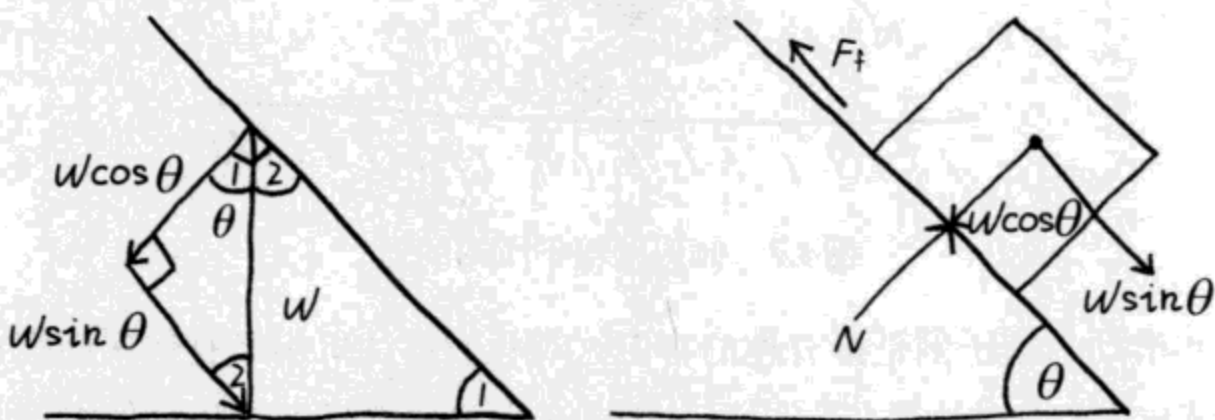


图4.8 重力分为两个分力（左）以及整理后的两个分量（右）

## 项目 4.1 估算摩擦系数

做一个简单的试验来感受一下不同材料之间的摩擦力，就可以知道 5% 损失与 40% 损失有什么区别了。

### 1. 材料清单

- (1) 两种材料不同的物体（此处用的是 1 块 4 ozf 重的水泥砖和 1 个铝壳的 iPhone 2G）。
- (2) 废木板。
- (3) 量角器。
- (4) 计算器。

### 2. 操作方法

- (1) 将量角器的中心与废木板的转轴重合，如图 4.9 所示。
- (2) 将第 1 种物体（水泥砖）放在木板下。
- (3) 增加木板与地面间的角度，当水泥砖滑动时停下来。
- (4) 读取角度值。

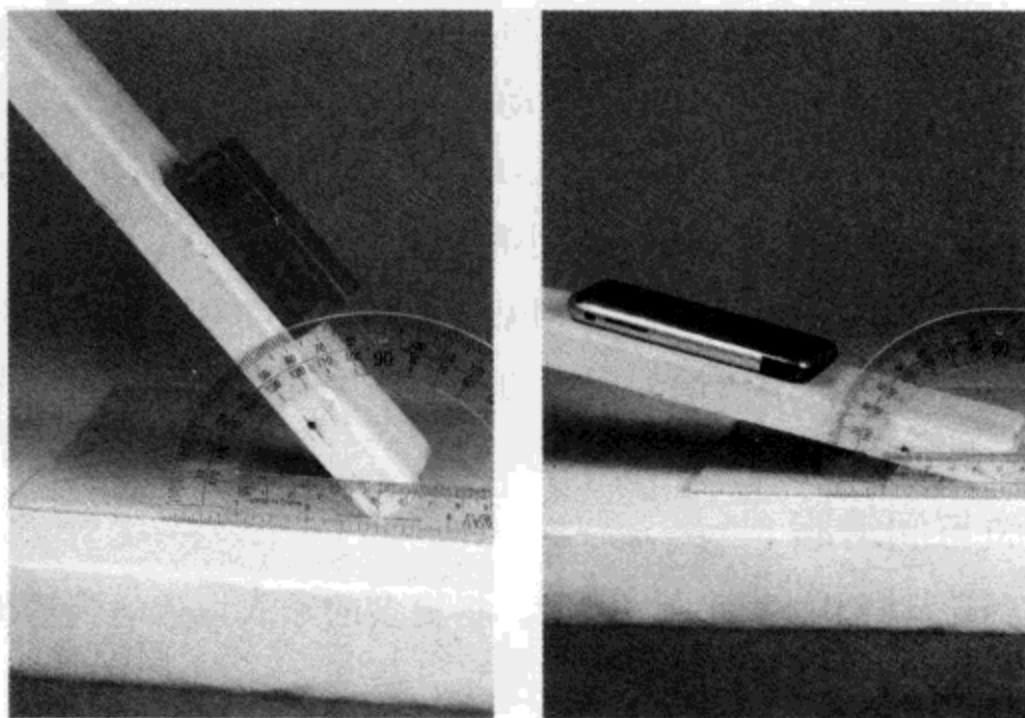


图4.9 摩擦力的测量

(5) 将第(2)、(3)步重复3次,取角度的平均值。在这个实验中,水泥砖在 $45^\circ$ 时开始滑动。

(6) 用第2种物体(iPhone),重复第(2)~(5)步,测得iPhone在 $12^\circ$ 时就开始滑动。

(7) 拿出计算器,计算 $45^\circ$ 的正切值(还记得 $\mu = \tan\theta$ 吧!)就可知摩擦系数为1。也就是说,如果你想在木板上推动一块水泥砖(就像之前讨论的箱子的例子一样),你所施加的力需要等于水泥砖的重量。

(8) 同样,计算 $12^\circ$ 的正切值得到的摩擦系数为0.21。由于iPhone表面比水泥砖滑,所以它滑动起来更容易。如果要在木板上推动iPhone,需要的力为iPhone重量的21%。

## 如何减小摩擦

我们都知道摩擦是不利因素了,那么就看看几种减小摩擦的方式:零件间预留间隙与润滑。

### 1. 预留间隙

第2章中,我们学习过材料与零件的公差。因此我们就知道为什么直径为0.50000 in的轴无法与相同尺寸的孔配合的原因了。在相互移动的零件间需要留一点空隙。

“间隙”是空隙的一个专业用语。为了让轴能够转动,在 $\frac{1}{2}$  in的轴的周围需要留一定的空隙,因此可能要钻一个直径约为0.515 in的孔,这样轴才有足够的空间转动。间隙的大小没有确切的值,它的值取决于零件的尺寸、表面光洁度,以及它



是转动还是静止不动。以 LEGO 为例来进行说明吧。有些零件，如轴会在其他零件的孔中滑动，而装在轴的上小灰色的止动块、齿轮及轮子很难滑动。而且，一旦滑动到一个合适的位置，这些零件就静止不动了。这就是为什么在 LEGO 拼装模型中，轴与齿轮间的间隙比轴与孔之间的间隙小的原因。

零件间的间隙的不同可以让你对 LEGO 零件的运动有不同的约束，但间隙作用不大。这个遵循在第 1 章中讨论的最小约束设计。适当的运动间隙可实现约束最小化的原则。

## 2. 润滑油与润滑脂

润滑可减小运动物体之间的摩擦力，将更多的输入力传递到输出上，从而提高传动效率。也有助于减小机构的噪声。

许多轴承、电机减速箱及其他组件内都有润滑脂。WD-40 就是一种快捷、多功能的轻质润滑剂，生产它的公司声称这种润滑剂有 2000 种用途。

另一个知名品牌的好润滑剂是 3-IN-ONE，可用在自行车链条上，也可用在到“吱吱”作响的剪刀连接轴上，只需一滴就可以解决问题。

现有几十种润滑油与润滑脂。润滑脂比润滑油要稠一些，能够保持在涂抹的地方。润滑油则容易流失。如果你选择的多功能润滑剂解决不了问题，试着在 McMaster 找找有无合适的选择，只要搜索“gear grease”，McMaster 就可推荐一种特定的润滑剂。另外，蜂蜡适合用在木制零件上。

## 4.3 受力分析图与涂鸦机器人

我的学生们碰到的最难的问题之一，是为一个特定的项目计算电机的转矩。在选择电机前，至少要分析一下你需要电机做什么，才可能选择电机的规格。你是想让电机快速驱动一个小的运动机器人？还是让电机举起一个重物或拉一条橡胶带呢？

在确定如何安装零件，如何确定电机的转矩或已知强度或转矩需要选择零件时，若会画受力分析图就比较方便了。受力分析图就像作用在一个组件上的所有力与力矩的一张快照，你可用这些图计算力和力矩。图中的物体指的是系统中的一个对象或组件。

一张受力分析图应该包括的内容如下。

- (1) 物体的草图，与其他物体相对独立，只画出必要的信息（多数情况下，只需要一个点）。
- (2) 物体所受的所有接触力。

摩擦力总是与运动方向相反。

力就是你加在物体上的力。可以是推力或拉力（或踢或猛拉等），也可以是其他物体施加在对象上的力，如链条施加在秋千上的力。

支撑力与接触面垂直，这种力让你或你的椅子不会穿过地板掉下去而穿过地心。

阻力是物体在空气、水或其他流体中运动时所受的力。物体运动速度加快时，阻力会增加。我们一般会忽略物体在空气中运动时所受的阻力。

(3) 物体所受的非接触力。

重力施加于地球上所有的物体，将物体拉向地心。在受力分析图中就是物体的重力。

(4) 物体所受的所有的力矩（转矩）。

物体处于静止平衡状态，需要满足 3 个条件：

- (1) 所有水平方向的力必须能互相抵消；
- (2) 所有垂直方向的力必须能互相抵消；
- (3) 所有的力矩必须能互相抵消。

如果这 3 个条件不都满足，物体就会运动。

用一个包含这 3 种力的例子来说明。我之前的一个学生画了一个自动机械草图，用两个电机带动的轴吊起一个喷漆罐，如图 4.10 所示。

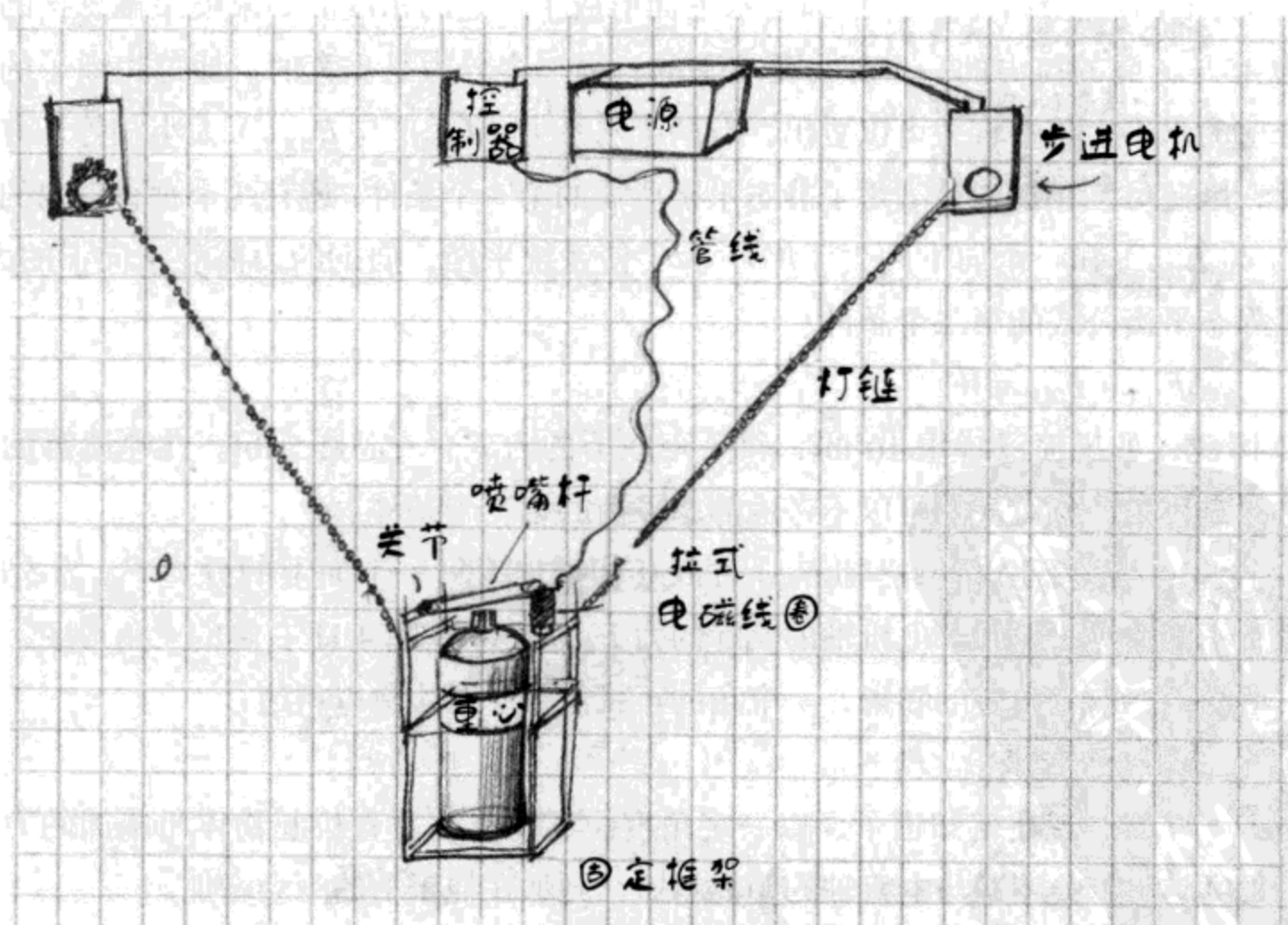


图4.10 自动机械的最初概念（所有权：Mike Kelberman）

用控制器和电机带动两个轴一起转动，这两个轴可以带动喷漆罐在下面的墙上沿任意路线运动。为了了解电机需要多大的转矩，画一张喷漆罐的受力分析图，如图 4.11 左图所示。

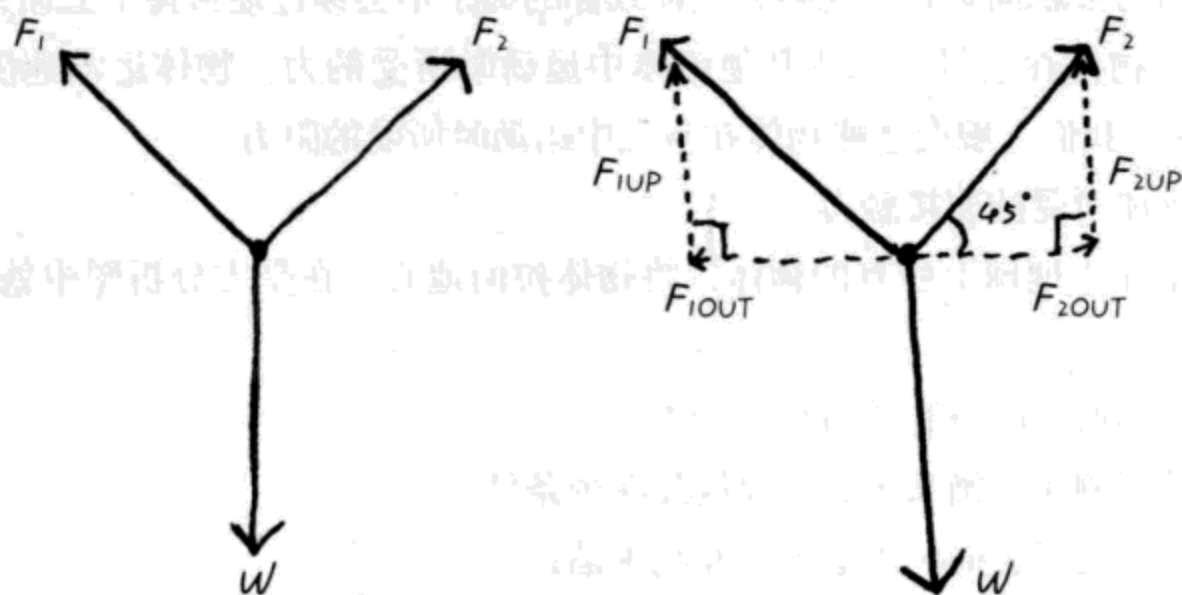


图4.11 Graffbot的受力图（左）和把绳子产生的力分解成分量后的图（右）

受力分析图中所有的力是喷漆罐的重力（ $W$ ）与每一根绳施加在电机轴上的拉力（ $F_1$  与  $F_2$ ）。我们可以用所学知识画出这些力，来选择电机的规格。这需要用“SOHCAHTOA”三角等式和直线画出所有的力。

在图 4.11 左图中，每一根绳与水平面形成了一定的角度。如果喷漆罐悬挂的角度为  $45^\circ$ ，绳的拉力的一个分力是水平的，另一个分力是垂直的。通过将绳子的拉力分解为水平力与垂直力可以看出，有两个水平力（ $F_{1OUT}$  与  $F_{2OUT}$ ）大小相等、方向相反，因此可互相抵消，满足了静态平衡所需的第一个条件；还有两个垂直方向的力（ $F_{1UP}$  与  $F_{2UP}$ ）和一个向下的力（ $W$ ）。为了使系统平衡，向上的力需等于向下的力，满足静态平衡公式的第二个条件：

$$F_{1UP} + F_{2UP} = W$$

因此，如果喷漆罐重 10 lbf，每一个向上的力  $F_{UP}$  一定是 5 lbf。在喷漆罐的例子中没有转矩，所以我们可以不考虑静态平衡的第三个条件。

再进一步进行分析。已知  $F_{OUT}$  可以互相抵消，每一个向上的分力  $F_{UP}$  为 5 lb，但依然不知道绳子施加于电机轴的实际的力  $F_1$  与  $F_2$ 。在图 4.11 右侧的三角形中，回想一下我们之前讨论过的知识，一个角的正弦值等于对边除以斜边：

$$\sin 45^\circ = F_{1UP} / F_1$$

得到  $F_1 = 7 \text{ lb}$ 。现在就知道了，以一定角度拉起物体比垂直拉起物体所施加的力要大。角度越小，喷漆罐与电机轴的距离越短，施加在绳子上的力会增加。

为了选择合适的电机，需要画电机轴的受力分析图，如图 4.12 所示。

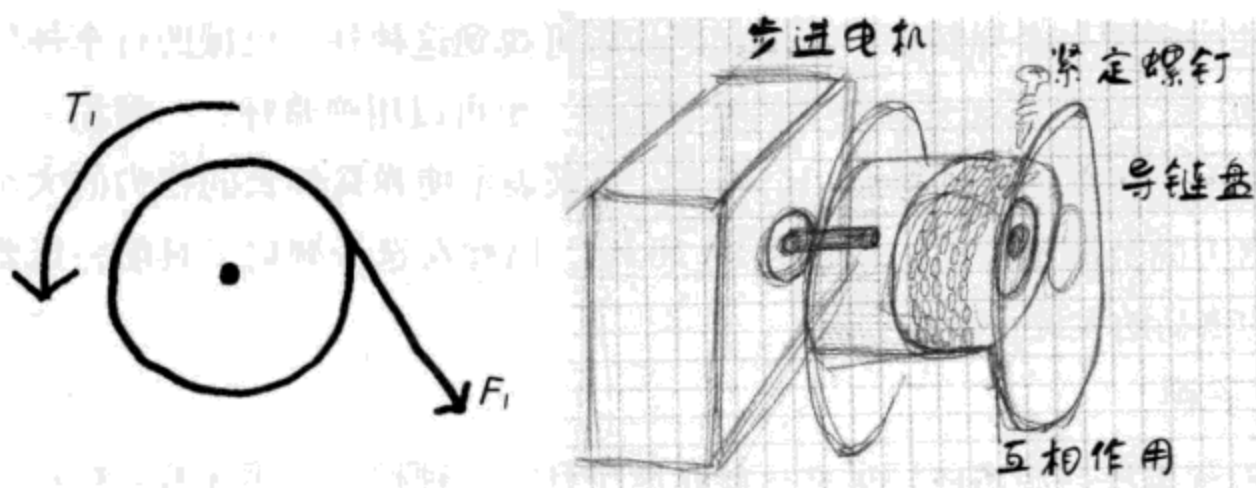


图4.12 旋转轴的受力分析图(左)及电机轴的原始图(右)(所有权: Mike Kelberman)

因为将电机与轴的重量与装在墙上的螺丝钉施加的力互相抵消了,所以可以不考虑轴及电机的重量。那么就只有绳子施加的力,以及与电机轴相切而不使轴反转的电机产生的转矩了。记住:转矩是力与距离的乘积,其中距离是电机轴的边缘相对轴中心的距离。如果电机轴的直径为4 in,那么半径就为2 in,就可以求出未知的电机的转矩:

$$\text{转矩}(T) = 7 \text{ lbf} \times 2 \text{ in} = 14 \text{ lbf} \cdot \text{in}$$

现在我们知道,至少需要14 lbf·in的转矩才能让喷漆罐动起来。每一个电机都需要这么大的转矩才能控制喷漆罐。

## 4.4 力与转矩的测量

只要站在一个浴室用的称重称上就可以称出你的重量(你施加于地面的力)。如果你需要称的物体不适合用称重称测量,或你要测的是绳子类的物体所施加的力,该如何测呢?还有,你如何测量转矩呢?

### 4.4.1 力的测量

测量一个物体重量最简单的方法是用秤。一些秤是机械秤,用砝码与弹簧转动刻度盘的指针。测力工具的形状、大小与价格各不相同。这本书中都是容易找到或买到的测量工具。

#### 1. 机械秤

最容易买到的是标准的浴室称重秤,是一种小版的医用秤。厨房的秤也是类似的,只是体积更小一些,用来称配方中用的调味料这样一些特别轻的物品,精度更高。这些机械秤使用起来都很简单,一般都由指针在刻度盘上标明重量。物品放于这些秤上就可以测量力的大小。

测量拉力需要一个弹簧秤。在体育用品店可找到这种秤。机械的行李秤价格不会高于 10 美元，而且看起来像杂货店称重的秤。也可以用弹簧秤，一般用一个弹簧挂在一个勾上。多数弹簧秤都有一个外壳，用来表示使弹簧伸长的拉力的大小。这种弹簧秤测力的范围比较小，一般为 5~ 20 lbf。因此在选择测量工具前一定要知道你要测量的物品的大致重量。

## 2. 电子秤

浴室的称重秤与厨房的秤也有可能是电子秤。这种秤不使用弹簧与杠杆，而使用传感器检测重量，在显示屏上用数字进行显示。如果需要把传感器集成在项目中，可以有如下的选择，但这些传感器不像机械秤那样是即插即用的。

(1) 应变片 (FSR): 用来测比较小的力，精度不高 (根据应用情况来选择精度，精度一般为  $\pm 5\% \sim 25\%$ )，所以在测量相对重量时更有用，或作为传感器来显示物品是不是受到挤压了。如 SparkFun 的 SEN-09375 ([www.sparkfun.com](http://www.sparkfun.com))，它测量的最大重量为 22 lbf。

(2) 可变压力传感器: 精度更高，约为  $\pm 2.5\%$ ，但价格约为 FSR 的两倍，大约 20 美元。对于力的测量，这个价格还算比较低，如 SparkFun SEN-08685 传感器。

(3) 行李秤: 也是一种电子传感器。Balanzza 公司生产常用的这种电子传感器，价格从 15 美元起不等。MakerBot 实业公司用数字行李秤来测量 CupCake CNC 机床上用的电机的拉力，如图 4.13 所示。我们通过项目 4.2 来学习这种传感器的用法及如何在自己的项目上使用这种传感器。



图4.13 MakerBot 实业公司用行李秤测量电机的拉力

还有一种价格比较高的力传感器，它的体积比较大。高端的力传感器为了达到精确测量的目的都需要电子学的知识，这种传感器一般有两类：一类是手持式的；一

类是可集成在项目中的纽扣式的。

(1) 数字力测量仪, 如 McMaster 的 1903T51, 价格从 370 美元起不等, 可以在测量仪的末端加上一个钩子或圆盘来测量拉力或推力。

(2) 重载情况下用的力传感器, 如 Transducer Techniques (www.transducertechniques.com) 的 MLP-100, 价格从 300 美元起不等。如果你是电子工程方面的天才, 你肯定需要一个 400 美元的显示屏来读取力的大小。不过, 若测量精度要求高, 而且你需要在项目中集成一个力传感器, 这种传感器还是比较理想的选择。

## 4.4.2 转矩的测量

直接测量一个未知的转矩的成本就比较高昂了。可以将扭矩扳手的扭矩值调到一定值, 将螺钉紧到合适的程度, 但扭矩扳手并不是用来测量转矩的。扭矩扳手的价格从 100 美元起, 价格呈直线攀升。

可以将转矩测量器扣在电机输出轴或螺钉头部, 来实时地读取转矩值。但 McMaster 的 83395A29 转矩测量器价格高达 580 美元, 并不是轻易买得起的。

不过还好, 我们可以用  $\text{转矩} = \text{力} \times \text{距离}$  来计算转矩。只需要测量力与施力点到轴承距离就可以测算转矩了。

## 项目 4.2 测量电机的转矩

买了电机后, 会有一个规格表告诉你想知道的所有参数, 但有时也会碰到没有参数的电机。现在, 我们就用 MakerBot 的 Rack (图 4.13) 方法, 通过测量电机输出力来测量转矩吧。

### 1. 材料清单

- (1) 直流电机 (Solarbotics 的 GM9)。
- (2) 内有螺纹的轴环、齿轮及其他与轴配合的零件, 用一般的长螺丝钉替代紧定螺钉。
- (3) 行李称或弹簧秤。
- (4) 两个 C 型夹, 用来固定电机和秤。
- (5) 量尺。
- (6) 还可以准备环氧灰泥和小吊钩 (类似挂画的那种)

### 2. 操作方法

- (1) 将螺钉和轴环或齿轮装在电机轴上。
- (2) 用 C 型夹将电机固定在桌缘上 (图 4.14)。
- (3) 如果有必要, 用环氧灰泥与小吊钩连接螺钉。

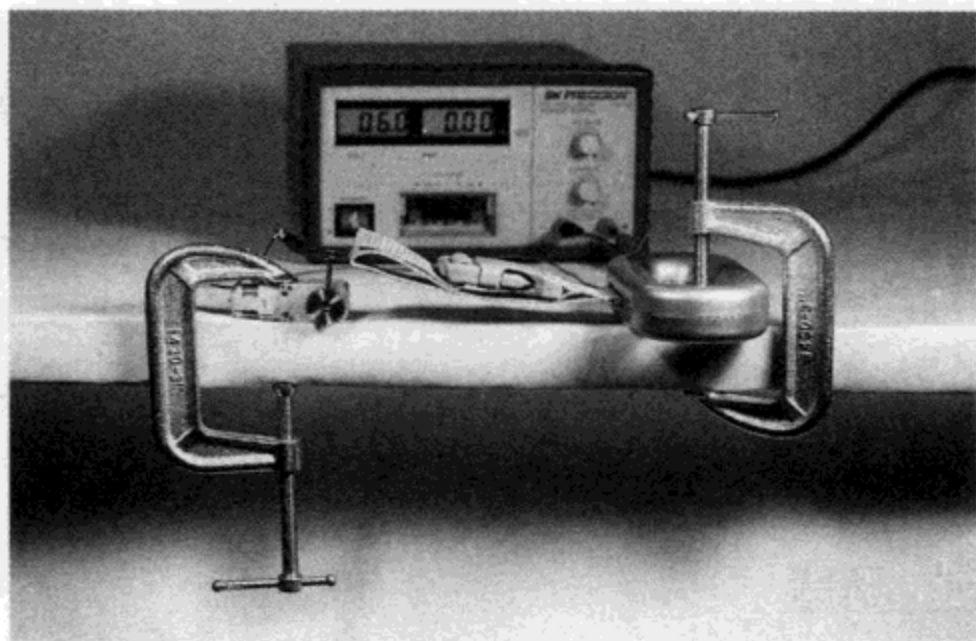


图4.14 转矩的测量

- (4) 将行李秤用C型夹固定在桌子上。
- (5) 如果行李秤是电子的，打开电源。
- (6) 将吊钩或皮带的末端连接在螺钉上，尽可能接近螺丝头部。
- (7) 给电机通电。

**注意** 测试一台没有参数表的电机时，最好用一个台式电源，这样可以找到电机的电压范围。也可用电池加到电机所需要的电压。多数小型直流电机的电压都为6V。

(8) 电机转动时，连接在行李秤上的连接件总是阻止它的旋转。当电机停转时，读数值并记录数据。这个动作要快，否则电机温度会升高，以致无法工作。

(9) 关掉电源。

(10) 测量电机输出轴的中心到连接行李秤的螺钉之间的距离。

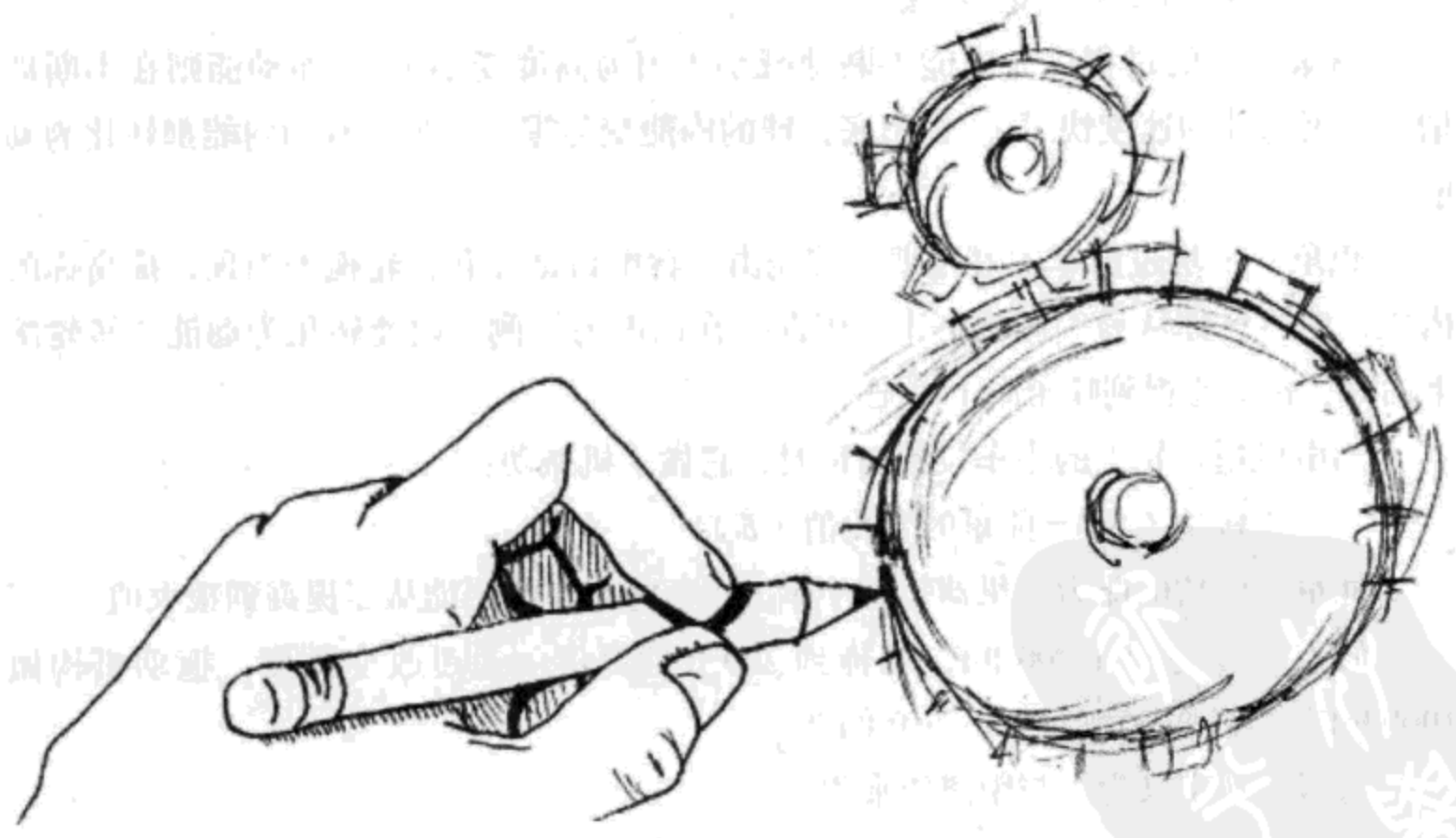
(11) 用第(8)步测得的力乘以第(10)步测得的距离，就得到在一定电压下，电机的输出转矩。



物理学是研究物质运动规律的一门科学。物理学的发展推动了人类文明的进步。物理学是自然科学的基础，也是现代技术发展的基础。物理学在能源、材料、信息、生物、医学等领域有着广泛的应用。物理学是探索自然奥秘的钥匙，也是人类认识世界的工具。物理学的发展需要实验和理论的结合。物理学是科学、技术和创新的源泉。物理学是人类智慧的结晶，也是人类文明的瑰宝。物理学的发展是人类进步的阶梯。物理学是探索宇宙奥秘的窗口，也是人类认识自我的镜子。物理学是人类文明的灯塔，也是人类进步的引擎。物理学是科学、技术和创新的源泉。物理学是人类智慧的结晶，也是人类文明的瑰宝。物理学的发展是人类进步的阶梯。物理学是探索宇宙奥秘的窗口，也是人类认识自我的镜子。物理学是人类文明的灯塔，也是人类进步的引擎。

# 第 5 章

# 功率 · 功 · 能量



科学出版社  
PDG



所有物体运动都需要能量。可以简单地用重力作为能量来产生运动（如重力使苹果从树上掉下来），也有像汽车内燃机那么复杂的能量。人可以通过摇动一个把手或踩踏自行车来提供能量。人的身体将我们吃的食物的化学能转化为机械能，所以人会行走、跑步、跳跃。电机可能将电能转化为机械能，因此可以使物体移动或旋转。

在本章中，我们将会学习功率、功与能量的关系，来认识电能，并重点介绍一些应用能源的实际例子。

## 5.1 机械能 ○

机械能是内能与动能的和。内能是静止物体内存储的能量。动能是因为物体运动而产生的能量。

例如，球静止在山顶所具有的内能等于它的重量乘以山的高度。

$$\text{内能} = \text{重量} \times \text{高度}$$

如果球的重量是 2 lbf，山的高度是 20 ft，则球的内能为 40 lbf·ft。如果推一下球，让它开始滚下山，则它的内能逐渐地转化为动能。

$$\text{动能} = 1/2 \times \text{质量} \times \text{速度}^2$$

球滚下山的过程中，内能不断地减小（因为高度变小了），而动能则在不断地增加（因为球的速度快了）。在山底，球的内能变为零，因为所有的内能都转化为动能了。

想象一下玩过山车的过程吧。首先由一台电机把你和转轮拖上山顶，提高你的内能，然后任你从另一侧滚下来。因此，在山的另一侧，内能转化为动能。转轮滚下山时，你的心提到嗓子眼上了吧。

当电机把转轮上的小车拉到山顶时，它做了机械功：

$$\text{机械功} (W) = \text{能量的变化值} (E)$$

能量是做功的能力。机器拉着小车上山，将小车的内能从零提高到很大值。

假定小车总重 1 000 lbf，被拖到 200 ft 的高度。通过改变高度，拖动机构做  $1000 \text{ lbf} \times 200 \text{ ft} = 200\,000 \text{ lbf} \cdot \text{ft}$  的功。

可以将功定义为力与距离的乘积。

$$\text{功} (W) = \text{力} (F) \times \text{距离} (d) = \text{能量}$$

这个定义在第 1 章中就应该熟悉了，在第 1 章中，我们学习了简单的机械。功是力通过一段距离转化的能量。如拖动机械载着 1000 lbf 的过山车上到了 200 ft 的高度，功等于  $1000 \text{ lbf} \times 200 \text{ ft} = 200\,000 \text{ lbf} \cdot \text{ft}$ ，与计算内能的方法所得的答案一样。

内能与机械功的方法是计算相同情况的两种方法。

功率是做功的速度（或能量消耗的速度）：

$$\text{功率}(P) = \text{功}(W) / \text{时间}(t) = \text{能量}(E) / \text{时间}(t)$$

功率在美国的单位通常为马力（hp）。这种奇怪的单位是从蒸汽机代替马的那个年代沿用过来的，它等于在 1s 内举起 550 lbf 的物品所做的功，即 1 匹马工作能力的估计值。1 hp 等于约 746 W，或 33 000 ft · lbf/min。经常会看到用马力来表示的电机或发动机功率。

到现在为止，我们讨论的都是直线运动时的功与功率，那么旋转电机的功率又是怎样的呢？还记得第 1 章中学习的自行车的例子吧，转动物体的速度叫旋转速度。功的单位是“力 × 距离”，巧合吧？在前边的章节中，扭矩的单位也是“力 × 距离”！因此，在这种情况下，你可以把扭矩当成圆中所做的功。下面就是扭矩方程：

$$\text{功率}(P) = \text{扭矩}(T) \times \text{旋转速度}(\omega)$$

## 5.2 电 能

如果你的项目不是用风或人直接驱动的话，可能会用到电。就像山顶的球会从高处滚到低处一样，电也是从势能高的地方流向势能低的地方。高势能就叫“电源”，低势能就叫“地”，此处的“地”并非一定是我们所站的“地”。不过有时也可以是，因为电学中的“地”来源于生活中的“地”。

闪电是一种强大的电荷源，它总是寻找势能低的地方来放电，因此，它会沿着最快的路径通向地面。你穿着袜子走过地毯，袜子会带正电；同样的原因，当你碰到门把手时，会被电击一下，因为你身体上的高电荷会向势能低的地方流动。你身上的电荷跳到了门把手上，就产生了一个像小闪电一样的电火花。

金属的导电性很好，因此电流在金属中流动很容易。由于门把手是金属材料制成的，而且可能装在有金属门框的门上，所以它使你身上的电荷有足够的空间流动。你也可以在你妹妹的身上放静电，这是因为人身体内有 60% 的水，水的导电性很强，所以你身上的电荷会通过她的身体流向地面（注意：你妹妹一定不喜欢这种接地实验中被电击的感觉噢！）。

书中所讲的“地”，不一定就是地面（或你妹妹），而是一块金属板，它与电源绝缘，电能较低。“地”有时是电池的负极。

高电势与低电势的差叫电压，单位是伏特（V）。将电能与水的流动相比较，电压就如来自水泵的水压，电线就如管道。知道电压或水压的大小，就可知电源能做多少功。对于电池来说，可在标签上读得电压的值。在一个标准的 AA 电池上，可

在电池的某个地方看到“1.5V”标示。

用一块 AA 电池和万用表（如 SparkFun 的 TOL-08657）来做实验。将黑色的探针插入“COM”孔，红色的探针插入“HzVΩ”孔，拨盘指向“V”，按下黄色按钮，打开电源。

如图 5.1 所示，用一个探针接触电池的“+”极，另一个探针接触“-”极。新电池的电压值可达 1.6 V。如为碱性电池，电能耗完后，电压值会接近 1.3 V。如果红色探针接到电池的“-”极，电压值会是一个负值（图 5.1）。反之亦然：如果红色探针接“+”极，读到的值会是正值。如果你从来没有用过万用表的话，那么现在你已经掌握了判断是否是废电池方法了。

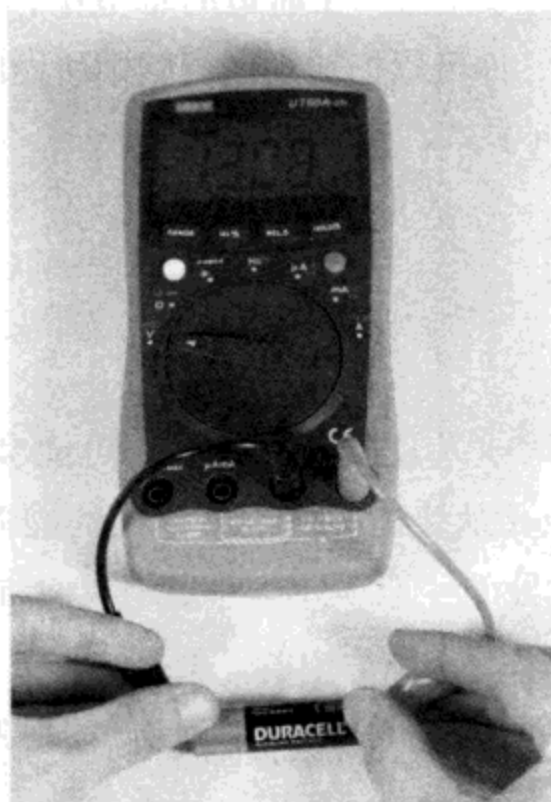


图5.1 使用万用表

电流( $I$ )是电在电路中流过某个点的大小，用安培(A)来表示。用水来做比方，电线上某点的电流就好比水管中流过某点的水的多少。本书中多数元件的电流都小于 1 A，因此用毫安(mA)表示， $1000\text{ mA} = 1\text{ A}$ 。

有的电池还标着可提供电流的大小，AA 电池的电流可能为  $3000\text{ mA} \cdot \text{h}$ （见网址 [www.ladyada.net/make/mintyboost/process.html](http://www.ladyada.net/make/mintyboost/process.html)）。“mA·h”表示毫安 × 小时，表示电流为 3000 mA 时，可持续 1 h，1500 mA 时可持续 2 h，750 mA 时可持续 4 h，明白了吗？

**提示** 这只是 mA·h 在技术上的定义，实际上电池内部的化学反应会限制电池放电的速度（见面本章后边 5.3 节）。

电机及其他元件通常会有一个额定电流值，告诉你它们工作需要的电流，这个值和电池或电源的电压一样重要。

如果将两块 AA 电池首尾相连,即“+”极的方向相同,得到的电压为 3 V。电池的这种首尾连接方式叫“串联”,即所得电压是所有电池电压值的和,也就是可得到更大的“水压”来工作。但是,若电池“并联”,电压不变,而电流则是流过所有电池电流的和。图 5.2 说明了这两个概念。

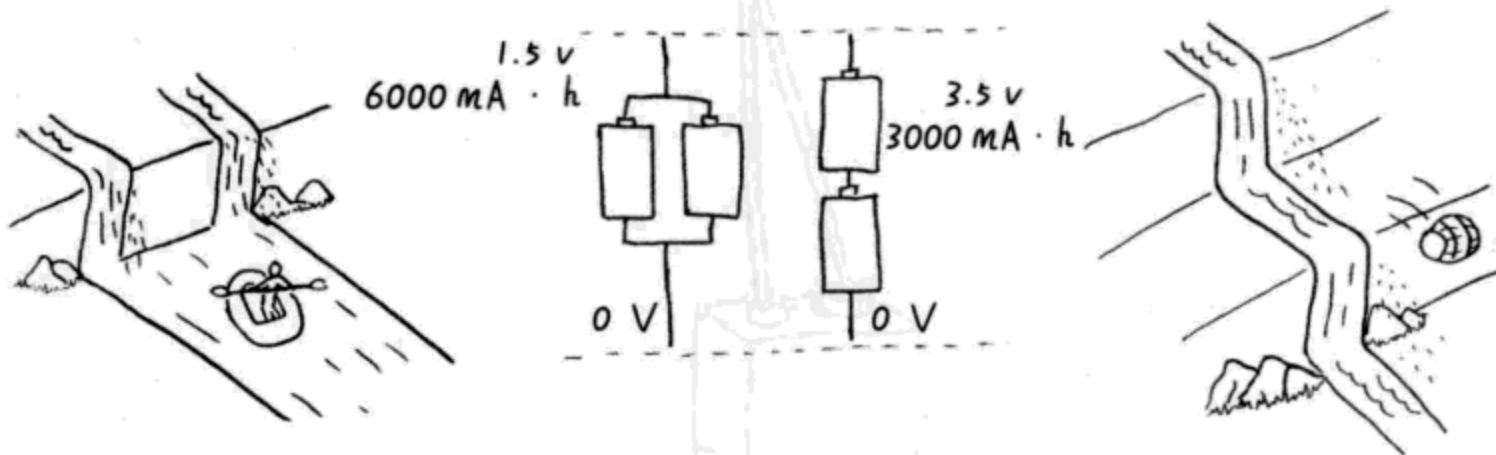


图5.2 电池的串联与并联

电流有两种类型。

(1) 直流电 (DC), 电流从高电压流向低电压, 方向不变。电池就提供直流电。

(2) 交流电 (AC), 在美国, 交流电就是从墙上的插座引出的电流。每秒针在 0~120 V 之间周期变化 60 次 (美国的情况)。

交流电在远距离传输中特别有用, 如从电厂到住房的传输。有一些设备, 如鼓风机与搅拌机, 可用交流电直接驱动交流电机转动。不过在我们所做的项目中, 常用到的是直流电。多数现代电子产品都配有交流到直流的转换器 (叫 AC 适配器或 DC 电源), 可将从墙上的插座引出的 120 V 的交流电转换为我们的电子产品所需要的 5~12 V 的直流电。我们用的笔记本电脑或手机充电器的黑盒子就有这种转换器。

电路是由电源 (如电池) 和负载 (如灯泡或电机) 构成的闭合的回路, 如图 5.3 所示。电流从电池的正极 (高电压), 经过灯泡或电机流向电池的负极 (低电压或地)。如果在电流流过的线路上接负载, 如 1 个灯泡或电机, 电流一定会流过灯泡或电机到达电池的负极。

负载的电阻单位为欧姆 ( $\Omega$ ), 图形符号用波折线表示, 如图 5.4 所示。可以把电阻看成是在电路中电流由粗管流向细管时需经过的一个过渡管, 所有的电流或水必须经过这个管, 所以它会阻止它们的流动。相比于这个管后部的点, 前部点的电压会比较高, 或水压比较高。需要记住, “电流总是沿电阻最小的路径流向地”。

负载 (如灯泡、电机等) 会通过将电能转化会其他形式能量的方式来阻止电流流动, 如灯泡, 将电能转化为光, 电机将电能转换为转动能。在理想电路中, 所有的电能会转化为其他形式的能量。不过实际应用中, 总会一些电能会被损失掉, 而且多数是以热能的形式损失掉的。



图5.3 简单电路



图 5.4 水系统组件与电路组件的类比

实际上，电能并没有消失。它只是转化为无用的能量形式而已。比如，热就是能量的另外一种形式，只不过是当多余的电能使电机发热时，产生的热能对我们来说并没有用，因此我们说能量损失掉了。当然也有一些设备需要应用热能来工作，如面包机中就用了一个大电阻，将电能转换成热能来烤面包。

电压、电流及电阻的关系用欧姆定律来表示：

$$\text{电压 } (V) = \text{电流 } (I) \times \text{电阻 } (R)$$

电池实际上是有内阻的，也就是说电池的效率并不是 100%，这种内阻会使电池发热。廉价电池的内阻一般会比较低，会直接造成电能的损失。

功率 ( $P$ )，单位为瓦特 ( $W$ )，是电流与电压的乘积：

$$\text{功率 } (P) = \text{电流 } (I) \times \text{电压 } (V)$$

例如，60 W 灯泡在 120 V 电压下工作时的电流为 0.5 A。做的功越多，需要的功率就越大，所以体积小巧的荧光灯（CFL）相比于普通的白炽灯，产生同样的光所需要的功率更小。13 W 的 CFL 与 60W 的白炽灯的亮度一样，不过 CFL 灯泡的能量转化效率较高，可以将更多的输入能转化为光能。

现在将前面所学的东西都联系起来。在本章的开头部分，我们知道机械能用马力来表示。而 746 W 等于 1 hp，功率等于转矩与旋转速度的乘积，功率也等于电流与电压的乘积，这说明什么问题呢？说明我们可以通过这几个公式计算一些重要的参数。比如，如果电机的功率用 W 来表示，就可以计算出给定速度下的电机输出转矩（或计算出给定转矩下的速度）。

如果现在你的眼睛开始累了，想着把这本书扔到柜子里，也不用担心。记住这些等式并不重要，重要的是知道功、能量、机械功、转矩、旋转速度及电能之间都有简单的数学关系，可以用这些关系来设法让物体运动起来。

### 5.3 为你的项目提供能量

记住：能量不会自己产生和消失，它只能从一种形式转化为另一种形式。“转换”就是能量的转化，任何一种可以转化能量的装置都叫做“转换器”，比如，电机就是一种将电能转化为动能的转换器，灯泡和发光二极管（LED）是将电能转化为光能和热能的转换器，我们的身体是将化学能转化为机械能的转换器。我的一些学生发明了通过转动电机的方式，用固定脚踏车给电视机供电，用摇摆的雕像产生电能。能量转换的方法就像你的创造力一样，多得数不胜数。

再回头看第 1 章，我提到过一个用移动零件组装成的机构。现在我们已经知道，移动的零件有动能，这个能量需要能源，对吧？幸运的是，有很多能源可以让物体运动。这些能源并不一定都适用于小型的任务，所以我们必须专门了解那些适用于小型任务的能源。从墙上的插座取得的电是通过煤的燃烧转换而来的（也可能是风能或水能），我们并不能直接用这种电，但我们此时必须知道的是墙上的插座给我们提供了一种交流电源。

要确定一个特定的项目最适合的电源，要考虑以下问题。

(1) 你的项目需要像机器人小车那样移动吗？如果的确需要移动，就需要选择电池或其他体积足够小能够插在项目中的电源。

(2) 如你的项目是运动的，只不过是在一个固定的位置运动，如墙上的旋转式喷头，就可以用墙上的插座，但可能需要把交流电转换为直流电，可以直接使用手机或笔记本电脑上的 AC 适配器。

我们也可以用风轮或脚踏自行车来发电。在本章的后半部分，我们会学习各种发电方式究竟能产生多大的电能。

### 5.3.1 原型机电源：可调台式电源

在做原型机时，即实现一个创意的开始阶段，用可调台式电源（图 5.5）再好不过了。可用 SparkFun（[www.sparkfun.com](http://www.sparkfun.com)）的 TOL-09292，Jones & Associates（[www.mpja.com](http://www.mpja.com)）也有一些不错的电源可供选择。



图5.5 可调台式电源（图片经SparkFun Electronics允许使用）

这些电源都插在墙上的插座中，是一种交流电到直流电的转换器。它们价格昂贵，体积相对较大，因此被叫做台式电源。但是，因为你使用的电子元件的功率大小不一，如有些电机需要 3 V 电压，而有一些却需要 24 V 电压，需要的电流也有高有低，因此这种台式电源用起来还是很方便的。

**提示** 谨慎使用这些电源，因为功率很大。

在做原型机测试时，可以用这些电源调节电压，获得需要的电流。一般的电源电压范围为 0~30 V，电流为 0~3 A。这种灵活性可以节省很多开发时间，所以即使你最终的项目是要移动的，也可以先用这种电源。一旦在测试和原型机制作阶段解决了所有的功率问题，就可以确定选择电池还是固定电源了。

尽量使用可调的台式电源，因为这种电源可保证电流增加时电压不会下降<sup>[1]</sup>。这个功能非常重要，可以让你少走好多弯路。这种电源上通常标着“开关电源”或“线性电源”。开关电源效率更高，所以价格通常也更高，不过还是很值得的。

**注意** 电压可以设置，但电流是随负载的变化而变化的。如一个 3 V 直流电机，参数表上可能标着“无负载电流：40 mA；堵转电流：450 mA”。下面的章节会详细说明这些电机参数的具体含义。现在，我们知道电机不带负载时，不需要做太多功，所以不需要太大的电流。一旦在电机轴上加上负载，它就需要较大的电流来

克服额外的转矩。如果增加的负载大得都让电机转不动了（用手指或老虎钳来试），电机将会特别需要电流，此时消耗的电流会最大。这个最大电流叫“堵转电流”。当为电机选择电池或其他电源时，应当确定电源的额定电流是否满足堵转电流的需要。实际上，电源的电流可以调到需要的大小，电机也只消耗额定电流。在制作原型机阶段使用台式电源，能帮助我们得到机构所需的最大电流，避免过渡损耗电池。

### 5.3.2 移动项目的选择：电池

若需要项目移动时，最好选择电池，但这种电池不适合用在原型机制作和测试阶段。修理不能正常工作或根本不工作的项目是最令人头疼的事了，有时你花费了九牛二虎之力后，才发现其实你只需要换一组新电池。所以在做原型机阶段，我推荐使用可调台式电源，如果到了要项目移动的时候，就只能用电池了。

但是，电池技术的发展并不如我们所愿。相比与我们之前学过的元件，电池的质量相对较大，价格也偏高。如果你的项目需要移动，一定要将电池的重量与大小考虑进去。

**注意** 避免电池短路，也就是避免偶尔短接电池的正负极，导致电池产生的所有功率都作用于电池本身！这样电池就废了，而且很可能产生火花甚至导致火灾，所以要确保你的工作空间远离电线与其他金属物体，如扳手或螺丝刀等，这些东西会作为导体使电池短路。另外，不能在 80 °F 环境下使用和保存电池，因为这样电池的性能会变差，而且高温会缩短电池的寿命。

将电池装在项目上最简单的方法就是使用现有的电池盒了，如图 5.6 所示。这些电池盒有的可装纽扣电池（如手表或计算器中的电池），有的可装 9 V 电池，有的可装多达 8 节的 AA、C、D 电池。All Electronics ([www.allelectronics.com](http://www.allelectronics.com)) 供应价格低于 1 美元的不同尺寸与组合的电池盒。很多电池盒都有安装孔。一般所有的圆柱形电池都是 1.5 V 的（可充电电池一般为 1.2 V），电池越大，价格越高，电池的充放电速度越快。

并不是所有电池的性能都相同。为了给你的项目选择最好的电池，需要学习一下接下来的内容。我们会学习包括充电电池在内的各种不同种类的电池，包括可充电电池，并重点说明它们的优缺点<sup>[2]</sup>。

#### 1. 锌电池

锌电池超级便宜，一般的规格都有（D、C、A、AA 与 AAA）。如果没有达到使用寿命，可用专门的充电器重复充几次电。但这种电池的内阻较大，所以工作时间不太长。



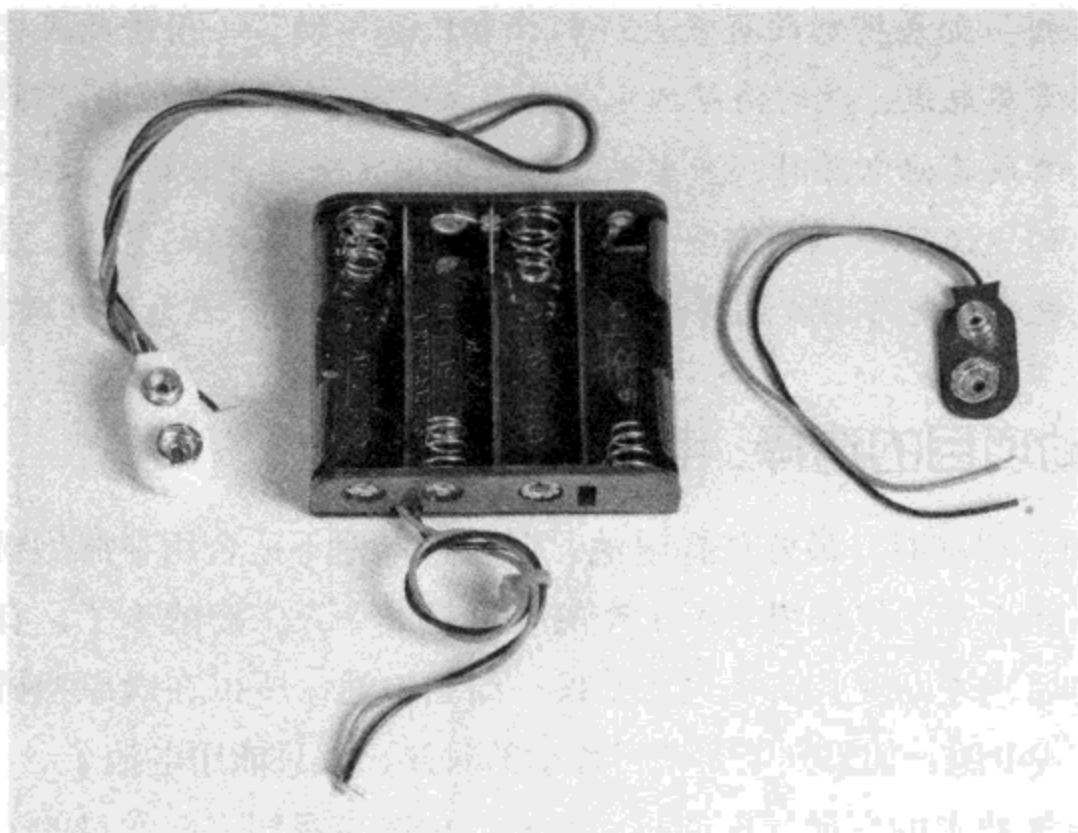


图5.6 现有的电池盒

## 2. 碱性电池

一般的碱性电池（如 Duracell CopperTop）工作时间比锌电池要长 3~8 倍，价格一般为锌电池的两倍，但标准的碱性电池是不能充电的。也有一些可充电的碱性电池，但需要一种专门用于碱性电池的低电流充电器。也有一些采用技术先进的碱性电池，工作时间比普通碱性电池长 2~3 倍，但价格也是相当的贵。

碱性电池不是用来驱动大电流电机的，因此这种电池的能量不够大。使用过程中，这种电池的电压会减小，所以如果你的项目所用的电机或其他组件的电压已经到了临界值，就会有出现问题了。

## 3. 镍氢电池

镍氢电池（NiMH）对本书中所涉及的项目来说是最好的充电电池，也是在商店里能买到的最常用的充电电池。这种电池内阻小，可反复充电 400 次以上；工作时间虽不像碱性电池那么长，但性能还在不断改进。镍氢电池的充电速度也快（1~2 h 即可）。

镍氢电池最大的缺点是电荷保持性不好。一块充满电的镍氢电池即使几周，甚至几天搁置不用，电荷就会自己跑光。为了防止这个原因带来的麻烦，在使用这种电池前，一定要用万用表先测量一下电压。

不像锌电池与碱性电池可以提供 1.5 V 的标准电压，镍氢电池只能提供 1.2 V 的电压。因此，它们并不能有效地替代非充电电池（虽然多数消费都这么用了）。

## 4. 镍镉电池

镍镉电池 (NiCad) 所用的充电技术比较老。有人说这种电池有记忆效果, 如果充电不满的话, 电池的容量会变小。关于这种电池的记忆效果虽然是有争议的, 但它提供的电压的确是会变低的。也就是说, 如果在充电前, 反复使用充电不足的电池, 它能提供的电压会越来越低。这种说法虽然对于这种电池来说是正确的, 但我们发现所有的充电电池都是如此。

只要充满电, 镍镉电池的电压值会一直保持稳定, 直到电能耗光 (不像碱性电池)。这种电池不会像镍氢电池那样, 搁置一段时间后, 这种电池也不会自己放电。不过它有一点与镍氢电池相同, 即它的电压也只有 1.2 V。

这种电池的缺点是, 镉是一种毒性很强的元素, 不能掩埋于土壤中。在许多国家, 将镍镉电池扔到垃圾堆中都是违法的, 因此需要专门的回收环节。基于这个原因, 通常只能选择镍氢电池了。

## 5. 铅酸电池

铅酸电池用在汽车里, 尺寸也比较小, 有 6 V、12 V、24 V 等规格, 可用在摩托车、计算机或小船上。因为尺寸较小, 所以这种电池特别有用。其缺点是特别重, 不过这种电池价格低廉, 工作时间长, 所以并没有因为重而影响它们的市场。多数铅酸电池都可用一种专门的大电流充电器重复充电。最好用那种密封性好的铅酸电池 (密封铅酸电池标为“SLA”, 可调电压铅酸电池标为“VRLA”), 以避免酸泄漏而带来事故。

凝胶电池就是用凝胶而不用液体酸作为填充物的铅酸电池。这种电池一般更安全、清洁, 可参考项目 10.3 中用于 SADbot 的 SLA 电池。

## 6. 锂、锂铁与锂铁聚合物电池

这类电池在笔记本电脑与便携式电子产品中用得最多。它们的价格相对较高, 但是相对于体积来说, 这种电池存储的能量很高, 而且电荷可保持几个月。有的手表及计算器中的纽扣电池也是锂电池, 只是不能充电而已。

SparkFun 的 PRT-00339 是一种锂铁聚合物电池 (简称 LiPo)。这种电池是当前技术最先进的电池, 它具有最大的能量密度 (能量密度 = 能量 / 体积)。

这种电池同样也需要专门的充电器。当然, 你可以在 SparkFun 找到一种最简单的充电器 (PRT-08293)。

### 5.3.3 可插接电源

开发一个不用移动的项目的最大好处是可以用一台体积大、能量高的电源, 或者直接从墙上的插座获得电能。下面是几种将家用交流电转换为可用直流电的

方法。

## 1. 计算机电源

如果你看过台式计算机的内部结构，可能会注意到里边有一个大的盒状的东西，如图 5.7 所示，这就是台式计算机产生噪声的来源。这个盒子实际上是计算机的电源，噪声是起冷却作用的风扇产生的。如果认为计算机电源来自于墙上的插座，你就有点错了。计算机需要的是直流电源，不是家用交流电，所以这个电源所起的作用是将交流电转换为计算机需要的直流电。而且，这个电源中内置了一些智能设计，会自动调节电源的电流来防止过热。

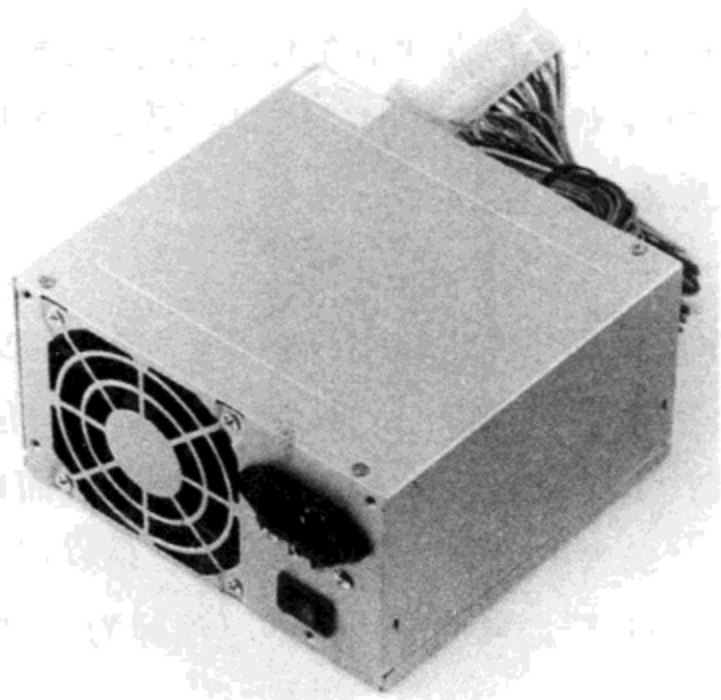


图5.7 计算机的ATX电源（图片经SparkFun允许使用）

SparkFun 也有计算机电源（TOL-09539），也有电源需要的 ATX 连接板（BOB-09558），用于将盒子中乱七八糟的电线引出来，这种电池可提供 3.3 V、5 V、12 V 的直流电来带动你的机构运动。电源与连接板的价格均不会超过 35 美元，所以如果你的项目不移动，且耗电量大，这种组合就非常实用了。

既然这种电源还是需要用墙上的插座，它就不是真正的可移动电源。MakerBot（[www.makerbot.com](http://www.makerbot.com)）的 CupCake CNC 就有这样一款电源，如果你愿意，可以带着它去参加聚会。

## 2. 电源转换器

交流适配器是一种将交流电转换为直流电的装置，通常都是由一根电源线接着一个插在墙上黑色的小盒子。你可能有一个给手机充电的适配器（图 5.8），它将墙上的交流电降为可以使用的不危险的直流电。墙上的危险的高电压和电流呆在塑料块中，我们用到的是另一端安全、稳定的直流电<sup>[4]</sup>。

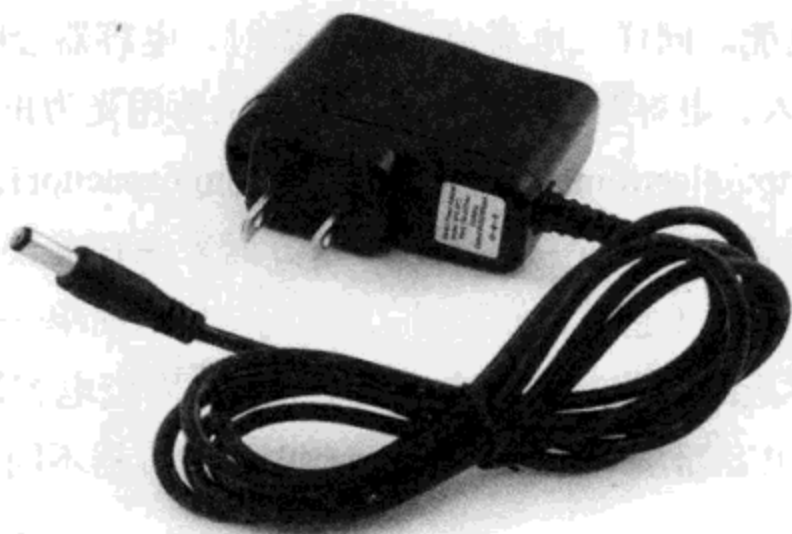


图5.8 交流适配器（图片经SparkFun允许使用）

所有电子产品的电源选择范围一般都比较宽，一般是5~12 V；电流种类也很多，从300 mA~3 A不等。你可以买到电压值可设置的电源，如Herbach and Rademan ([www.herbach.com](http://www.herbach.com))的TM03ADR4718，可以将这些电源插在面包板上驱动电路。如果你不知道怎么做或不知道什么是面包板的话，也没有问题，我会在第6章讨论有关面包板的内容。

### 5.3.4 可替代能源

发电时所面临的问题是，要么在发电时同时用电，要么把电存储起来。当然，用电池或墙上插座就不用担心这个问题了。我们的用电量越大，给家庭供电的电力公司收取的费用就越多，而电池则是通过化学反应产生电能的。

可替代能源可产生电能，不过必须立即使用这种电能或将它转换成之后能用的形式。即使立即使用电能，阴天时太阳能板或风轮机也都会产生不稳定电流，所以在使用前，必须先消除这种电流波动。

#### 1. 存储电能的电容器

存储能量的方式很多，但只有几种能用在我们的项目中。汽油与食物通过化学反应存储能量，水坝则通过提高水位来存储水能，惯性轮是将能量存储在旋转的飞轮中。不过，我们最感兴趣的还是如何存储电能，方便将电能用在我们所做的项目中。

我们已经学习过存储能量的一种方法：用电池。也可以使用可替代电源，如用太阳能直接给充电电池充电。另一个电子元件——电容器，也可用于存储电能，同时也可以消除电流的波动。

电容器就好比水系统当中的水塔（图5.4）。如果周围有足量的水，用泵把这些水送入水塔存起来；当缺水而且泵不工作时，水塔会立即放水。就像水塔能存水一

样，电容器能存储电能。同样，电流流向电容器时，电容器会吸收并存储所有的电能；一旦没有电流流入，电容器会立即放电，直到电荷用光为止（有关电容器工作原理的内容，可参考 <http://electronics.howstuffworks.com/capacitor1.htm>）。

电容器可存储电能，有两个接线端，从这方面来说它有点像电池。但电容器不像电池那样可以产生能量（它只存储能量），因此结构更简单——电容器由两块中间放有绝缘体的相互靠近的极板构成。电容器有两类：陶瓷电容器与电解电容器（图 5.9）。使用时，陶瓷电容器没有正负极之分；而电解电容器不同，工作时，负极一定要接地。

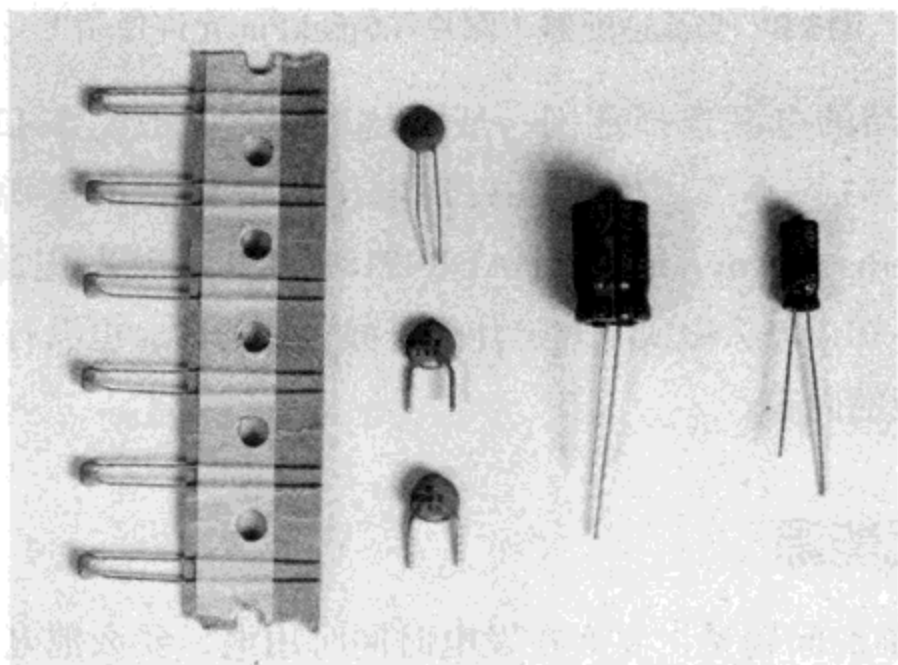


图5.9 陶瓷电容器（左）与电解电容器（右）

电容器存储电能的能力称为电容（C），单位是法拉（F）。常用电容器电容量都很小，所以用微法（ $\mu\text{F}$ ）来表示。与其他储能方式（如电池）相比，电容器的能量密度较低。

电容器的能量大小用如下公式计算：

$$\text{能量} = 1/2 \times \text{电容} (C) \times \text{电压} (V)$$

通过以上计算可得出一个本书中没有用过的能量单位——焦耳（J）。焦耳是一个标准单位，它等同于之前机械能的单位  $\text{lbf} \cdot \text{ft}$ 。

相比电池而言，电容器的优点是充电快、效率高，而且放电时，短时间内会产生较大的功率；缺点是在电能相当的情况下，电容器的体积比 AA 电池大，而且价格也高。比如，苏打罐大小的电容器仅能让一个普通手电筒亮几分钟。

那么，如何使用电容器呢？将它集成在有可替代能源项目中的最简单的方法是使用现成的模块，叫充电控制模块或电能采集模块。这些模块吸收的是来自诸如手电筒的太阳能板或手摇发电机的不稳定电能，用这些电能给电池或电容器充电，而电池或电容器会给电机提供稳定不变的电能。Mouser Electronics ([www.mouser.com](http://www.mouser.com))

公司的 585-EH300A 就是这样的模块，它可以滤掉输入的不稳定电流，放电电压为 1.8~3.6 V，且在非常短的时间内放电电流可达 1 A<sup>[5]</sup>。

如果有一个电机需要持续供电，你可能会想到搭建一个电路，这个电路可以使可替代电源通过图 5.10 所示充电器为电池充电，然后驱动电机工作。参见第 6 章有关解耦电容的部分，以及项目 10.2 的风灯，来学习有关电容器的使用方法。

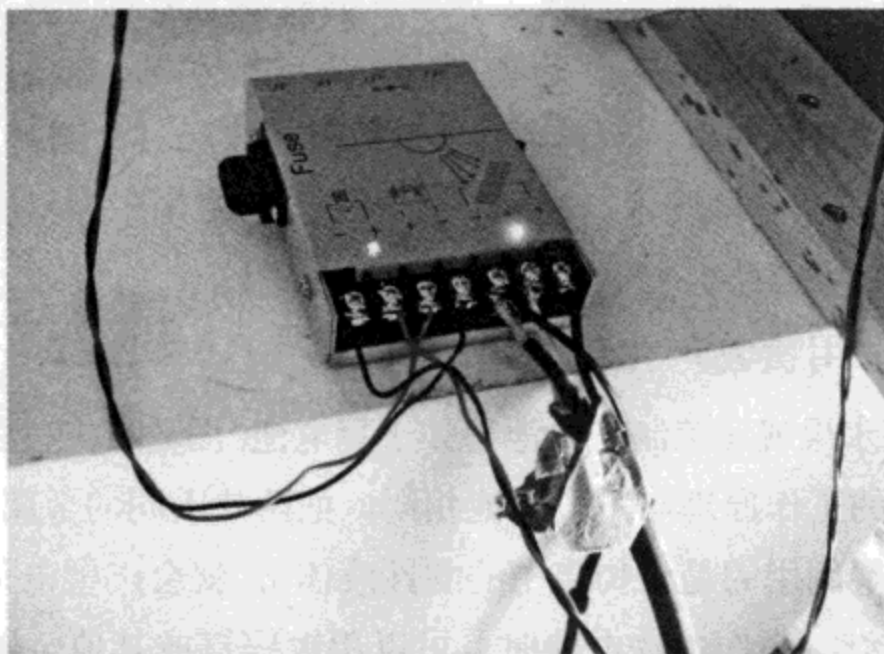


图5.10 太阳能充电控制器（可通过太阳能板给电池充电，这个模块用在了项目10.3的SADbot中）

## 2. 太阳能

太阳能电池将光能转换为电能。电量的大小取决于电池的表面积，因此若要带动本书中所用到的电机，则需要一块体积相当大的电池。SparkFun 的太阳能电池 TOL-09241 在阳光直射的情况下功率为 5.2 W (8 V, 650 mA)，可带动下面章节中用到的小电机。即使说它大，面积也不过约 7 in × 8.5 in，其实它比一张纸还小呢。用在项目 10.3 的 SADbot 的太阳能电池的大小为 13.5 in × 18 in，是 Silicon Solar (www.siliconsolar.com) 公司的产品。

## 3. 风能、水能及其他流体能

流体是能够流动的物体，可以是空气、水或枫糖浆。从前，通过水轮或风轮的转动产生的风能或水能直接来磨面粉或砍木材。现在，流体能主要代替矿物燃料发电。

可以试着自己做风轮，利用风能来发少量的电，像第 10 章中的风灯（项目 10.2）那样，可将小风轮接到电机上带动电机工作。给电机供电后，电机工作（如第 6 章中所学习的内容）。不过还可以通过转动轴产生电能的方式使电机工作。Duggal Energy Solutions 公司发明了一种叫 LUMI-SOLAIR (www.lumisolair.com) 的街灯，这种灯用一种小型的立式风轮及太阳能电池供电，是一种商业化产品。不

过，还是有相当多的发烧友利用风能自己发电（可参见 [www.gotwind.org](http://www.gotwind.org) 及 [www.windstuffnow.com](http://www.windstuffnow.com) 的有关内容）。

气动是利用流体（如空气和二氧化碳）来做功的方式。土豆枪与火箭瓶就是两种利用压缩空气产生运动的例子。气动技术是使用压力气体产生机械运动的一种技术，只不过通常气动设备仍需要电能驱动空气压缩机来工作（更多内容见第6章）。

如果你们家附近没有大坝或河流，水力发电对本书中的项目来说就没有什么用了。我曾经看到过有人用淋浴头和超小型水力发电机发电，带动电子显示屏工作。当然，这种方法用水量非常大，而且这种发电方式还没经过检测。

液压技术是用压缩流体产生运动的一种技术，通常用于像推土机还有打洞机这样的重型机械。在第6章中会有更多的内容讨论液压技术。

#### 4. 生物电池：用食物产生电能

可用任何酸性水果或蔬菜制作电池，如土豆电池(图 5.11)、番茄、洋葱、柠檬、橘子等。生物电池的工作原理与一般电池相同。把两片不同的金属（一般是铜或锌）插入酸性溶液中（本例用的是食物当中的酸性液体），就会产生电化学反应，两块金属板间就会产生电势。制作生物电池时，可以用镀锌钉或其他金属（任何镀锌的金属表面都有锌）作为锌电极，用硬币作为铜电极，这样一对电极插入土豆中会产生电流非常小的（仅有几毫安）1 V 电压。把单个的生物电池串联起来就会产生较高的电压，并联起来则会产生较大的电流<sup>[4]</sup>。

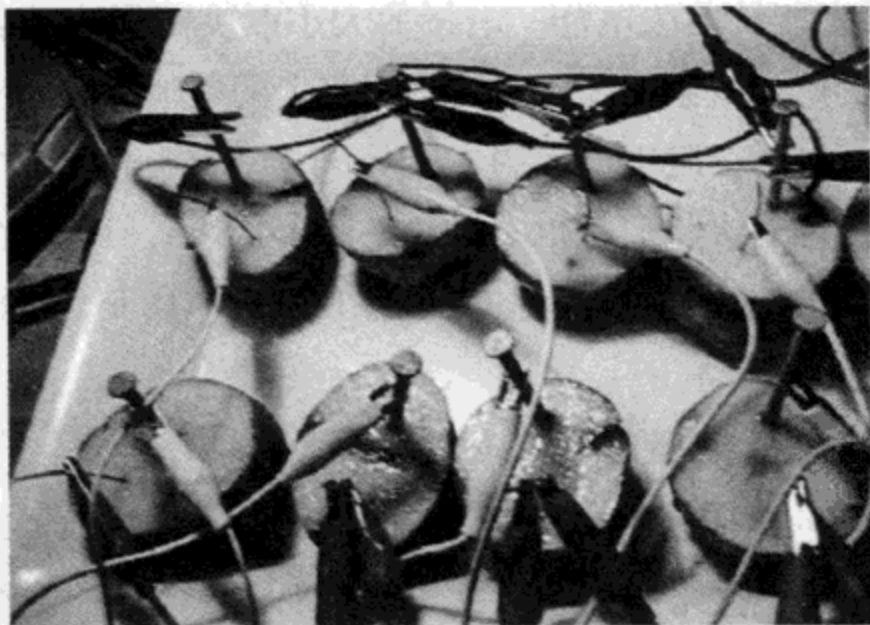


图5.11 土豆电池（所有权：Kaho Abe）

一般的 LED 灯需要 2 V、10 mA 的电流才能工作，因此要用一大盘子土豆电池才能点亮一个 LED 灯。要使物体运动，即使让寻呼机上的小电机工作也需要 20 mA 的电流，如果让这种电机做其他工作，那就需要更大的电流（参见 [www.solarbotics.com/products/rpm2](http://www.solarbotics.com/products/rpm2) 上的例子）。由此看来，要带动一个电机工作，可能需要一大袋

土豆，甚至一整园子土豆。

## 5. 人的能量

人类产生能量的最简单的方式是利用运动产生的机械能来做各种运动。比如，Cabaret Mechanical Theatre ([www.cabaret.co.uk](http://www.cabaret.co.uk)) 的手摇玩具，有跳舞羊、拍翅膀的猫头鹰等。这些玩具都是用手柄与木制机构内各种齿轮、弹簧及凸轮相互配合产生运动的。在第8章中会有更多内容来讨论机械玩具及动态雕像。

发条玩具已经出现几百年了。这种玩具用弹簧或弹簧片存储能量，带动昆虫或玩具车动作。现在也有一些公司，如 Kikkerland ([www.kikkerland.com](http://www.kikkerland.com)) 及 Z Wind Ups ([www.zwindups.com](http://www.zwindups.com))，它们的发条玩具也广受小孩及大人人们的喜欢。

也可以利用或存储人体机械能转化成的电能，将这种电能来用在充电电池中。手摇电筒和收音机已经出现好多年了，就是为了解决电池用光后，尤其是紧急情况 and 停电的情况下用电的问题。因为 LED 灯耗电量小，因此手摇 1 min 可让这种手电筒工作 1h。

手动发电机主要的缺点是产生的电能仅能点亮几个 LED 灯。还好，我们的腿比臂或手能转化的能量更多，毕竟我们天天都在用腿走路。比如，你会在 Fender Blender ([www.bikeblender.com](http://www.bikeblender.com)) 找到用脚踏车带动的搅拌机。其他公司也在开始研发这种产品，现在已经有几种这样的创新产品正在进行测试。Bionic Power ([www.bionic-power.com](http://www.bionic-power.com)) 制造了一种膝盖带，内装一个发电机，该公司声称，走路时每条腿能够产生 7 W 的电能。你的腿在空气中摆动时，就产生了这种电能，因此不需要耗费额外的能量。生产这种产品的目的是为登山者或士兵的手机或无线电设备充电，不过这些能量还能够带动我们上面章节中用到的小电机工作。还有一个小公司 Lightning Packs ([www.lightningpacks.com](http://www.lightningpacks.com)) 生产的一种背包，可以在人走路时利用上下运动来发电，电量可达 7.4 W。

### 5.3.5 弹簧及弹性能量的存储

由于弹簧有做功的能力，所以是一种能量存储元件<sup>[6]</sup>。弹簧的种类和大小繁多。最常见的是“压簧”，在自动铅笔或钢笔中就用到这种弹簧。在这种弹簧的一端施加一定的压力时，它会产生一定的挤压变形，产生的力与挤压变形的比值就是弹簧的刚度：

$$\text{刚度}(k) = \text{力}(F) / \text{挤压变形大小}(x)$$

McMaster 的弹簧可按刚度进行分类。我们可以用刚度这个参数了解弹簧储能能力的大小。存储能量的大小与刚度及弹簧变形的大小有关：

$$\text{能量}(E) = 1/2 \times \text{刚度}(k) \times \text{挤压变形大小}(x)^2$$



我们一般都觉得弹簧是由一圈一圈金属丝绕制而成的，其实弹性计算公式同样适用于跳水板这样的弹簧。这种弹簧的外形又长又扁，卡车的悬挂系统用的这是这种类似的板簧。

“扭簧”就是在捕鼠器和发夹中用的那种弹簧，这种弹簧用来使机构保持闭合。

只要是弹簧，就可以存储能量。所谓弹性，指的是一旦外力消失，弹簧会回到初始状态的能力。第7章中会介绍更多不同类型弹簧以及各类弹簧的使用方法。

## 项目 5.1 捕鼠器小车

这个项目中，会用扭簧产生的能量带动一个小车。按操作方法制作时，可边做边参考图 5.12。

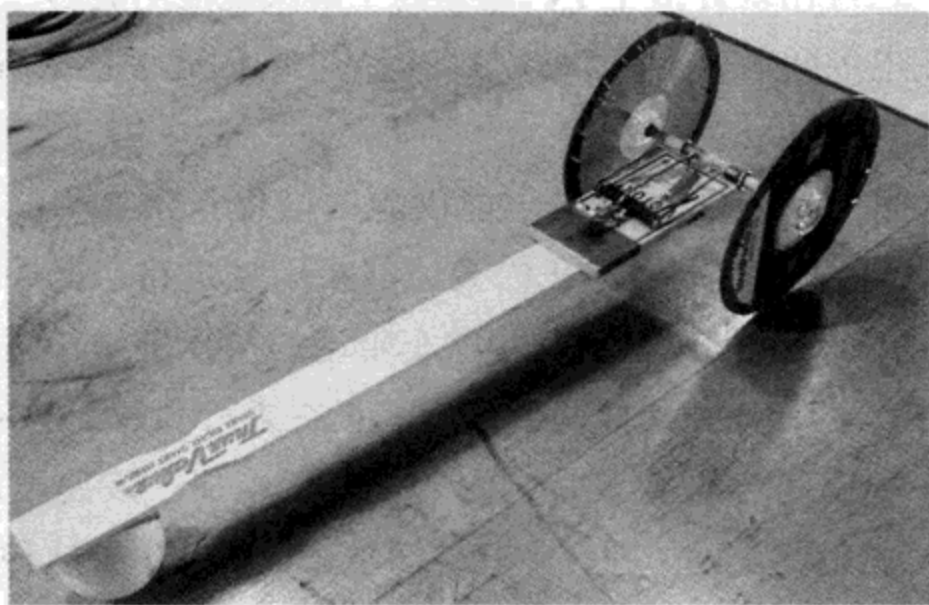


图 5.12 捕鼠器小车准备转动

### 1. 材料清单

- (1) 捕鼠器。
- (2)  $\frac{1}{4}$  in 直径的木销钉。
- (3) 带小刀与锉刀的多刃刀工具。
- (4) 双吊环螺钉。
- (5) 单股鱼线。
- (6) 两张废 CD 盘。
- (7) 激光切割的轮毂（在 [www.makingthingsmove.com](http://www.makingthingsmove.com) 找电子文件的链接 [thingiverse.com](http://thingiverse.com)，或者从 [ponoko.com](http://ponoko.com) 购买）或环氧灰泥。
- (8) 木制搅漆棒。
- (9) 乒乓球。
- (10) 胶带。

(11) 热熔胶。

## 2. 操作方法

(1) 用胶带把 CD 边裹起来, 以提高 CD 盘的抓地力。

(2) 用小刀做一根长度为 4 in 的木销, 并用锉刀将木销锉光滑。

(3) 用热熔胶将激光切割的轮毂与 CD 盘连接。用环氧灰泥填补木轴与 CD 盘之间的空隙。

(4) 将木销轻轻地插入轮毂中, 木销应能够滑动。如果太松, 缠上一点胶带后再插; 如果木销钉太粗, 用锉刀打磨一下, 直到尺寸合适为止, 如图 5.12 所示。

(5) 将吊环螺钉拧进捕鼠器上对着诱饵钩的一侧。在保证取出时木头不裂开的前提下, 应该使吊环螺钉尽量离边近一些。

(6) 用胶带把捕鼠器粘在搅漆棒的一端。

(7) 将连接轮子的木销钉穿过吊环螺钉, 把轮子连接在木销的另一端。

(8) 用胶带将乒乓球粘在搅漆棒的另一端, 此时小车应该平衡。

(9) 为防止木销来回滑动, 在绕着木销的吊环螺钉环内上缠一些胶带。不过销钉依然需要能流畅地转动。

(10) 割一段 2 ft 长的鱼线。一端绕着在木销上并系住, 一端系在捕鼠器夹子的中心。必要的话, 可用胶带固定一下。

(11) 反方向转动轮子 (图 5.12 中是顺时针方向), 把鱼线缠在木销上。在抬起捕鼠器夹子, 使小车跳起来的过程中, 木销应一直绕着鱼线。

(12) 为安装捕鼠器, 必须拿着捕鼠器夹子上的长钩, 用它钩住诱饵钩。这种操作要非常细致, 一定要小心别夹着手指啊!

(13) 装好捕鼠器后, 小车就可以跑了。把小车放在地上, 用铅笔或其他长点的东西去碰捕鼠器。接在捕鼠器夹子上的鱼线会解开缠在轴上的线。小车应该能走 10 ft 左右。你也可以做些改动, 看看你是否能让小车走得更远、更快。

## 参考资料

[1] Dan O' Sullivan and Tom Igoe, *Physical Computing: Sensing and Controlling the Physical World with Computers* (Boston: Thomson, 2004) .

[2] Gordon McComb, *The Robot Builder's Bonanza*, ed. Michael Predko (New York: McGraw-Hill, 2006) .

[3] US Environmental Protection Agency and US Department of Energy, ENERGY STAR site, "How Much Light?" ([www.energystar.gov/index.cfm?c=cfls.pr\\_cfls\\_lumens](http://www.energystar.gov/index.cfm?c=cfls.pr_cfls_lumens)) .

[4] Nicolas Collins, *Handmade Electronic Music: The Art of Hardware Hacking, Second Edition*

( Routledge, New York: 2009 ) .

[5] Jeff LeBlanc, “ALDEH 300 Energy Harvesting Modules” ( <http://itp.nyu.edu/physcomp/Notes/ALDEH300EnergyHarvestingModules> ) .

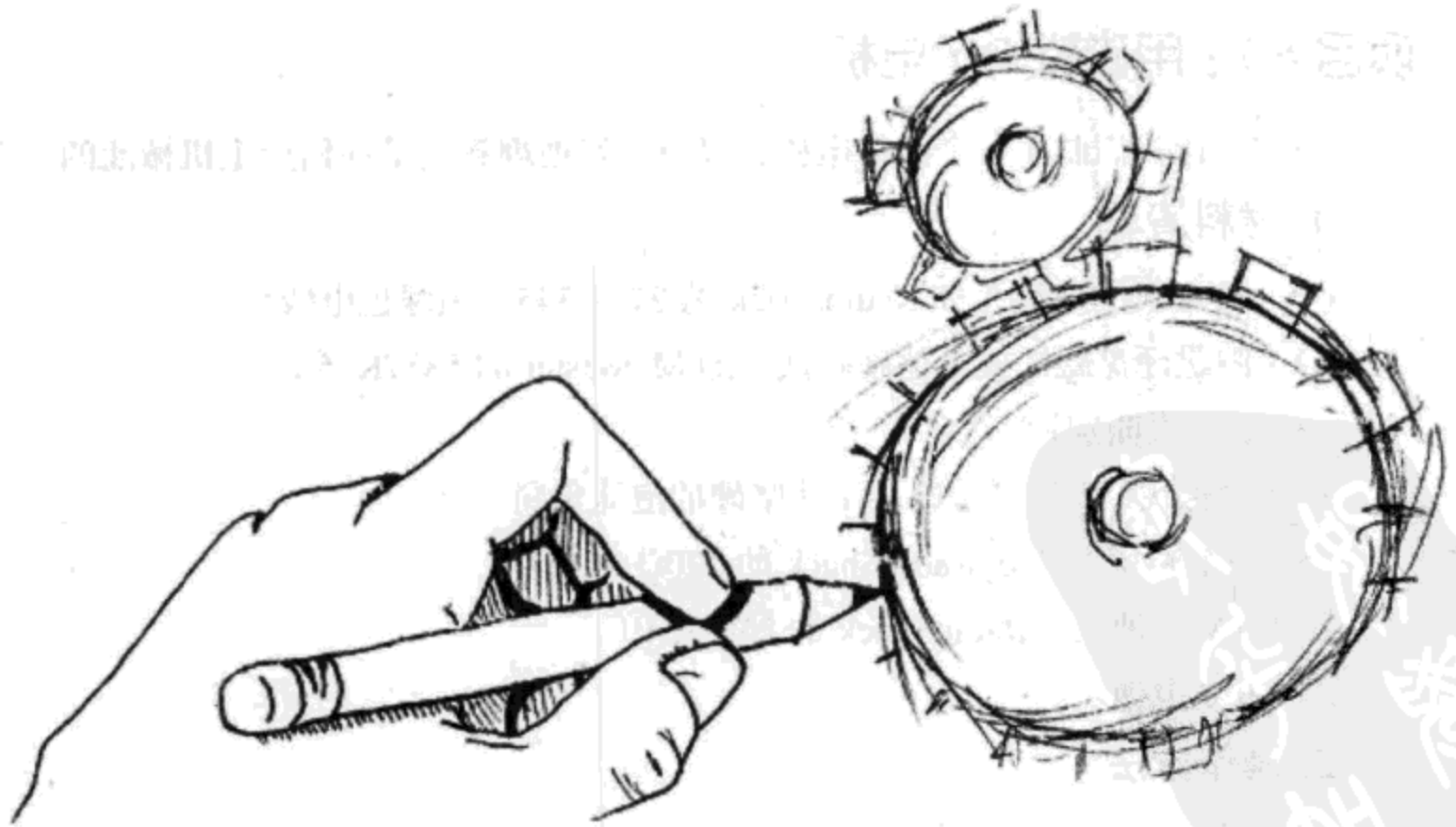
[6] Michael Lindeburg, *Mechanical Engineering Reference Manual for the PE Exam, Twel ft h Edition* ( Professional Publications, Belmont, CA: 2006 ) .



电机是产生和控制运动的执行器。它通过电能转换为机械能，驱动各种机械运动。电机广泛应用于工业、农业、交通运输、国防、航空航天等领域。随着科学技术的进步，电机的性能不断提高，应用范围不断扩大。电机的发展对人类社会的发展产生了深远的影响。

## 第6章

# 电机：产生和控制运动的执行器



知  
道  
PDG

只要是运动系统，最重要的元件都是“执行器”，执行器能够使机械系统产生运动。电机是最常见的执行器，在本章中我们会学习电机。做项目时有许多种方式可以选择，所以本书也谈了其他几种产生运动的方法。

在前面的章节中，我们已经学习了力、转矩及功率的概念，所以现在你应该有办法为特定的项目确定执行器的参数了。我们可以利用之前学习的知识，还有一些项目的要求来帮我们缩小选择的范围。本章的内容很多，需要慢慢领会，而且在第一次学习时，也不要期盼掌握书中所有的内容。先给你一个下马威，然后再学习电机的工作原理吧。

## 6.1 电机的工作原理

电机利用线圈与磁铁将电能转化为机械能。当电流流经线圈时，会在线圈周围产生一个磁场。这个磁场会排斥或吸引永久磁铁。

通过在电机轴上套上线圈产生磁场，电机就可以工作。当磁铁排斥线圈时，电机轴就会转动。为了使电机轴能够连续旋转，需要保证磁场能够连续旋转，对电机轴产生连续的排斥、吸引作用。不同类型的电机产生这种作用的方式不同。

### 项目 6.1：用磁铁 DIY 电机

现在，让我们制作一个简易电机，以便更好地理解它是如何产生机械能的<sup>[1]</sup>。

#### 1. 材料清单

- (1) 10 ft 长的电线（如 RadioShack 的 278-1345，用绿色电线）。
- (2) 陶磁硬盘磁铁或其他硬磁铁（如 McMaster 的 5857K15）。
- (3) 2 个大曲别针。
- (4) 大橡皮，1 块黏土砖或 1 块坚硬的泡沫塑料。
- (5) 2 个鳄鱼夹（如 RadioShack 的 270-1540）。
- (6) 9 V 电池夹（RadioShack 的 270-324）。
- (7) 9 V 电池。

#### 2. 操作方法

- (1) 割 10 ft 长的绿电线。
- (2) 将绿电线绕着磁铁缠几十圈，绕成一个线圈。电线的每一端留出 1.5 in 长度的余量。
- (3) 从磁铁上取下线圈，电线每一端都在线圈内缠几圈，绑住线圈，不让电

线松开，确保绕完的线圈是对称的。

(4) 以  $45^\circ$  角，用小刀剥掉电线两端一面的绝缘层（图 6.1）。

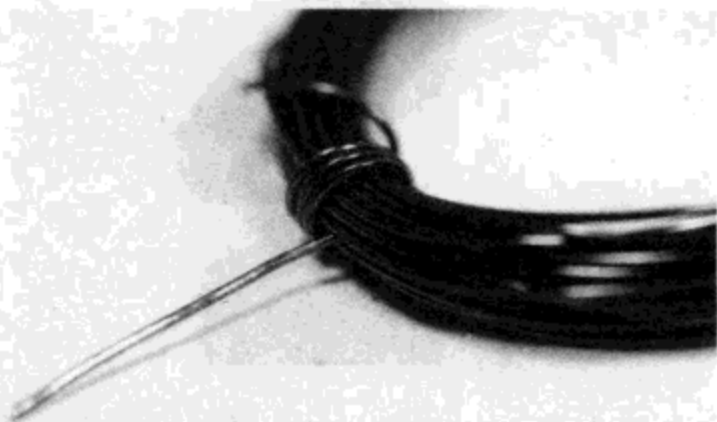


图6.1 两端被刮掉绝缘层的电线

(5) 用曲别针和橡皮作一个间距为 1.5 in 的支架（图 6.2）。

(6) 将线圈放入用曲别针做的支架。确保你推一下时，它能够转动。调整线圈，使线圈既对称又平衡。

(7) 将磁铁放在线圈下面的橡皮上。如有必要，细调一下相互之间的间距，不要让磁铁碰到线圈或曲别针。

(8) 用鳄鱼夹将电池的接头分别接在每一个曲别针上。

(9) 做完的结构应当如图 6.2 所示。轻推线圈，通过线圈的电流与磁铁相互作用，电机就转起来了。

在这个装置中，线圈置于导电的曲别针上。当线圈刮掉绝缘层的一面接触曲别针时，电池电流流向曲别针，然后流过线圈到另一个曲别针，再返回电池。

电流流过电线时，在电线周围会产生一个磁场（图 6.3）。这个磁场会吸引线圈下面的磁铁。因为线圈另一侧流过的电流方向相反，所以一侧会排斥磁铁，另一侧会吸引磁铁。为了使线圈保持连续旋转，当一侧先靠近磁铁时，需要切断电流，否则它就会停下来。因此我们只刮了电线一面的绝缘层，这样线圈就会不停地通电、断电，如此循环，最终线圈依靠惯性能够连续旋转。

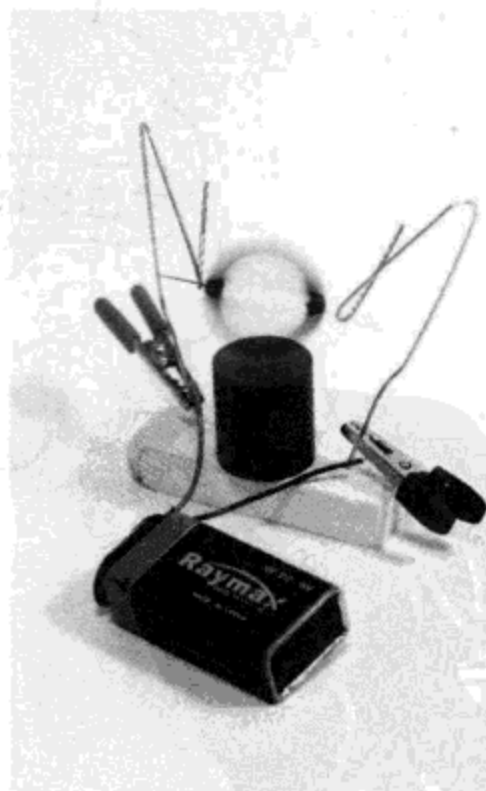


图6.2 DIY的电机原型

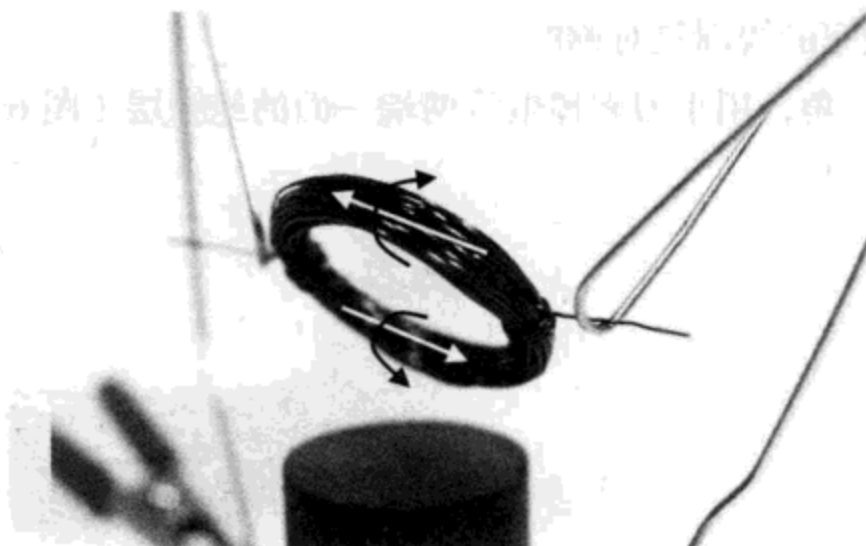


图6.3 白色箭头表示电流的方向，黑色箭头表示线圈产生磁场的方向

## 6.2 旋转执行器

所有电机的工作原理都与我们DIY的电机一样，不过不同类别电机的实现方式不同。每一种电机都有它的优缺点，而且控制方式各不相同，应用场合也不同。

最常见的旋转执行器是产生旋转运动的电机。图6.4为旋转电机的谱系树。还有一些类似的电机没有表示在这棵树上，不过这张图中有本书中提到的所有电机。

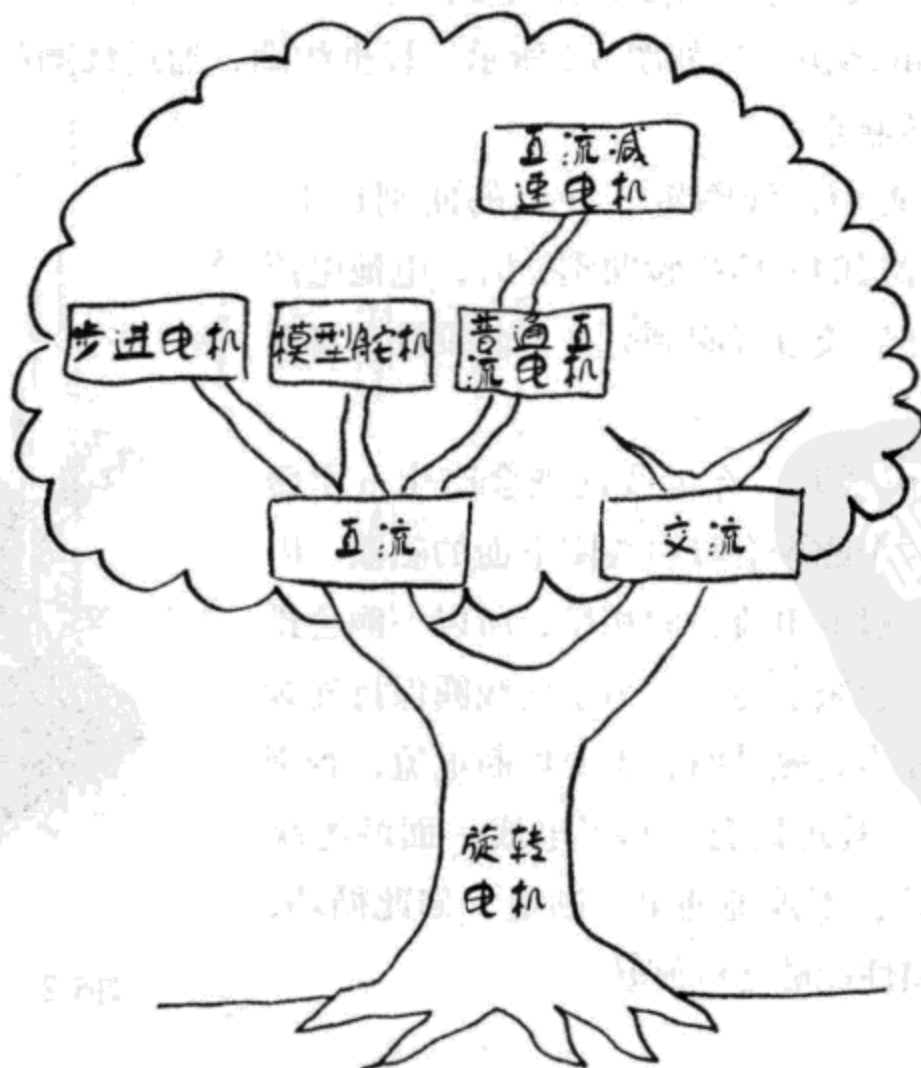


图6.4 旋转电机谱系树

我们通过说明每类电机的参数来学习各种电机的性能。

## 6.2.1 直流电机

在第5章已经学过，直流电是从电池流出来的方向不变的电流。手机用的就是直流电，所以充电器会有一个黑盒子，将墙上插座中的交流电转化为手机可用的直流电。

图6.5列出了所有直流电机的类型：普通直流电机、直流减速电机、舵机（伺服电机）及步进电机。

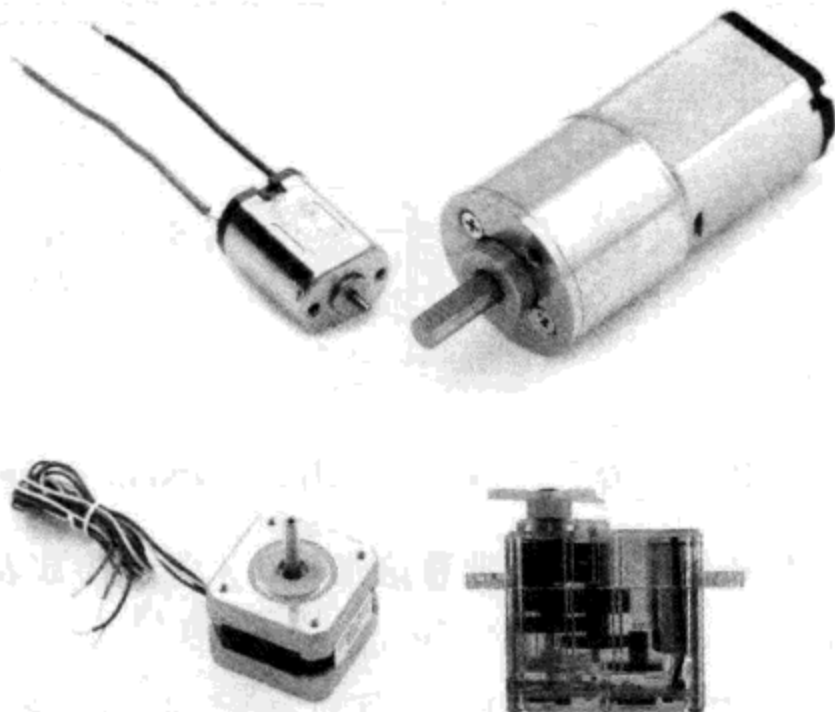


图6.5 直流电机：从左上角顺时针方向看，依次为直流电机、直流减速电机、舵机及步进电机（图片经SparkFun Electronics 和 ServoCity允许使用）

### 1. 普通直流电机

我们用的最基本的电机叫普通直流电机，也叫直流玩具电机。在玩具汽车及电动螺丝刀中都有这种电机。这种电机的内部看起来就像我们DIY的电机原型，装在一个电机壳中。线圈固定在中间的轴上，磁铁装在电机壳内部。这种电机比刚才我们DIY的电机原型稍微复杂一点（利用换向器代替刮过绝缘层的电线，用电刷代替曲别针），正因为这样，它也比项目6.1中的电机功率高。

电机有两个接线端子，因此要使9V的直流电机工作，只要把它接在9V的电池上就可以了。只要把电机的两个接线端换一下，电机的旋转方向就会改变。如果电压降低了，电机还能继续工作，但旋转速度会变慢；电压升高，电机转动的速度会提高<sup>[2]</sup>。

直流玩具电机需要的电压范围通常为1.5~12V。速度从1000~20000 r/min不等，可能还会更高。比如，SparkFun的ROB-09608电机，其参数表如图6.6所示



( [www.sparkfun.com/datasheets/Robotics/ROB-09608.jpg](http://www.sparkfun.com/datasheets/Robotics/ROB-09608.jpg) )。

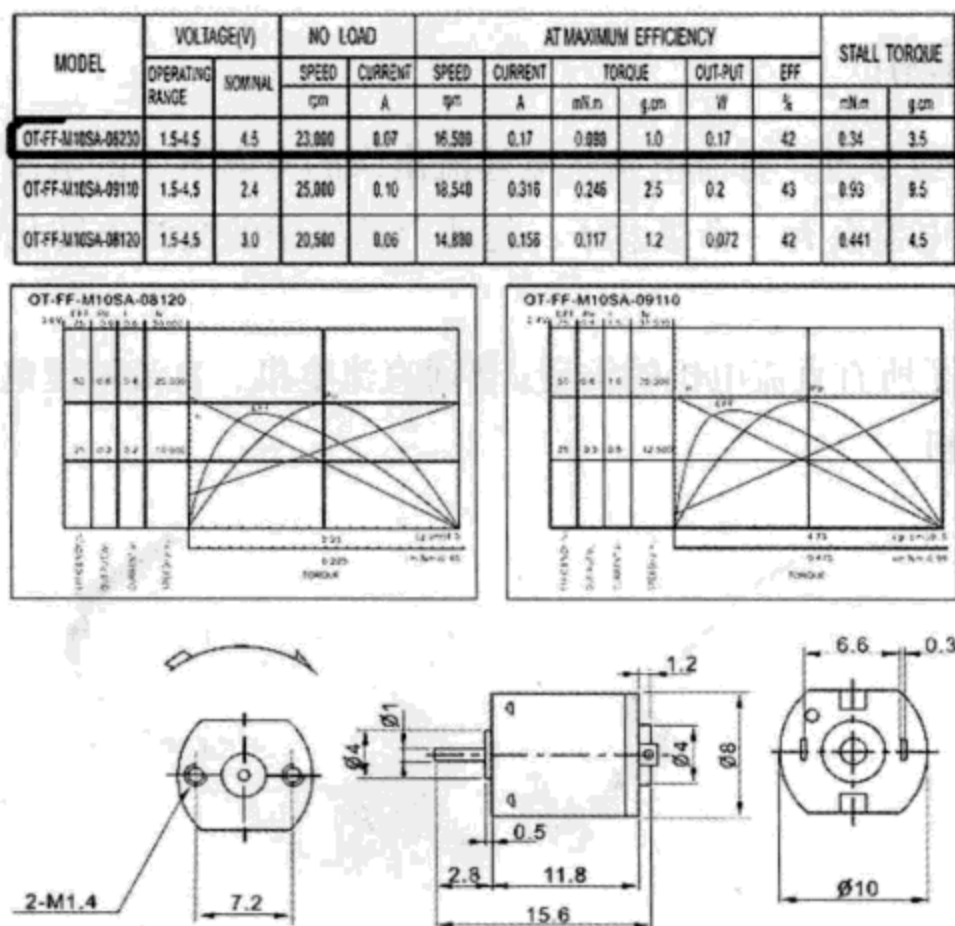


图6.6 直流玩具电机ROB-09608的参数表（图片经SparkFun Electronics允许使用）

哇，这么多数字！我们一步一步地看这张表，来学习参数表的内容，学习如何选择这个重要的元件。

(1) 电压：第1列为电机的工作电压，范围为1.5~4.5 V，额定电压为4.5 V。表示只要电压在1.5~4.5 V范围内，电机都会转，不过电压为4.5 V时，工作状态最好。一般的AA电池电压为1.5 V，所以只要有1节这样的电池，电机就会工作。不过，将3节1.5 V的AA电池串联在一起给电池供电时性能最好。

(2) 空载：后边分别为速度与电流列，空载指的是电机轴上不接任何负载时电机的工作能力。在空载情况下，这个电机的转速为23 000r/min！速度相当的快呀，此时的电流仅为0.07 A。

**注意** 电机速度的单位可能为转/秒 (r/s) 或弧度/秒 (rad/s)。1转为2弧度，1 min有60 s。要将单位从rad/s转化为r/min，乘以60/2即可。或在 [www.onlineconversion.com/frequency](http://www.onlineconversion.com/frequency) 进行转换，这样你就不用记转换公式了。

(3) 堵转扭矩：直接去看一下最后列参数的意义吧。这个参数表明，当给电机0.34 mN·m的反向转矩时，电机将停止转动。这就是电机的最大转矩。转矩的单位是“力×距离”，不过如果习惯用英制的单位，可上 [www.onlineconversion.com/torque](http://www.onlineconversion.com/torque) 换算。0.34 mN·m等于0.05 ozf·in。这个转矩值非常小，因此这个小电机用一根1 in的轴，仅能带动0.05 ozf的重量。用手指反方向扳电机轴，就可感觉到这个转

矩有多小了。你只要轻轻一扳，电机就会立即停下来。所以，既然堵转转矩如此小，用手指就可以让电机停下来。

(4) 最大效率：这列有很多数值应该了解。效率表示机械功与消耗电功率之间的关系。转矩为堵转转矩的一个特定的比例时，直流电机工作的效率最高（在这种特殊的情况下，最大效率大约在堵转转矩的 $\frac{1}{4}$ 处）。这个转矩值对应图 6.6 中部的峰值。在这个转矩点上，电机的工作效率最高。电机的工作转矩也可以与这个堵转转矩接近，但效率会低一点，此时转化为机械能的电能会少一点，用电池带动电机工作特别费电。

## 2. 直流减速电机

再复杂点的直流电机就是直流减速电机了。这种电机是在普通的直流电机输出轴上加了一个齿轮减速箱。齿轮减速箱接电机的输出轴，通过齿轮减速后用另一个轴输出更大的转矩、更小的速度。速度减少的大小取决于齿轮的传动比。传动比在前边讲机械传动的优点时已经说过，所以对这个概念感到熟悉了。齿轮减速箱的作用是减小速度，提高转矩：带减速比为 100 : 1 减速箱的输出转矩是不带减速箱的 100 倍，而输出的速度却是不带减速箱的 $\frac{1}{100}$ 。直流减速电机的电压范围通常为 3 ~ 30 V，速度从小于 1 r/min 到几百转 / 分不等。

Solarbotics 公司的 GM14a 就是一种小型的直流减速电机，我们甚至可以看到它里面的齿轮。在 Solarbotics 网站 ([www.solarbotics.com/products/gm14a/specs](http://www.solarbotics.com/products/gm14a/specs)) 找到的参数表如图 6.7 所示。可以看出，多数直流减速电机的齿轮箱都接输出轴（通常与电机轴同心，有时也不同心），电机接电源。

Description	Specs	Resources
Description: Metal Gearhead		
Gear Ratio: 256:00:1		
Unloaded RPM (1V): 35		
Unloaded RPM (5V): 75		
Unloaded Current (1V): 40 mA		
Unloaded Current (5V): 50 mA		
Stall Current (1V): 450 mA		
Stall Current (5V): 650 mA		
Stall Torque (1V): 22.70 mNm		
Stall Torque (5V): 44.90 mNm		
Length (mm): 33.10 mm		
Width (mm): 12.00 mm		
Height (mm): 10.00 mm		
Weight: 10.00 g		

图6.7 Solarbotics公司GM14a直流减速电机的参数表

每种电机的参数表基本都不同，术语也有变化，不过也不用感到恐惧。我们先

看看图 6.7 中的参数表吧。

(1) 减速比：这个参数并不能说明什么，因为即使我们知道它将输出转矩提高到了 298 倍，也不能说完全了解了这个电机。

(2) 空载转速：这个参数的意义与图 6.6 中的空载速度相同。此处表示电压为 3 V 时，转速只有 33 r/min，比直流玩具电机的 23 000 r/min 慢多了！下一行为电压为 6 V 时的空载速度。这两个值说明电机在电压为 3~6 V 时，性能较好，参数表中只给出两个极值。

(3) 空载电流：与图 6.6 中的空载电流的概念也相同。这里用的是毫安，而不是安培。40 mA 等于 0.040 A，比直流玩具电机需要的 0.070 A 还要小。

(4) 堵转电流：电机转矩为堵转转矩时所需要的电流。

(5) 堵转转矩：工作电压为 6 V 时，堵转转矩为 44.90 ozf·in，是直流玩具电机的 900 倍！所以说，直流减速电机的强度更大！

所有直流电机速度、功率、效率、电流及转矩之间的关系都类似。我们已经知道，普通直流玩具电机在实际转矩为堵转转矩的  $\frac{1}{4}$  时效率最高。在图 6.8 中，实际转矩为堵转转矩的  $\frac{1}{2}$  时，功率最大。

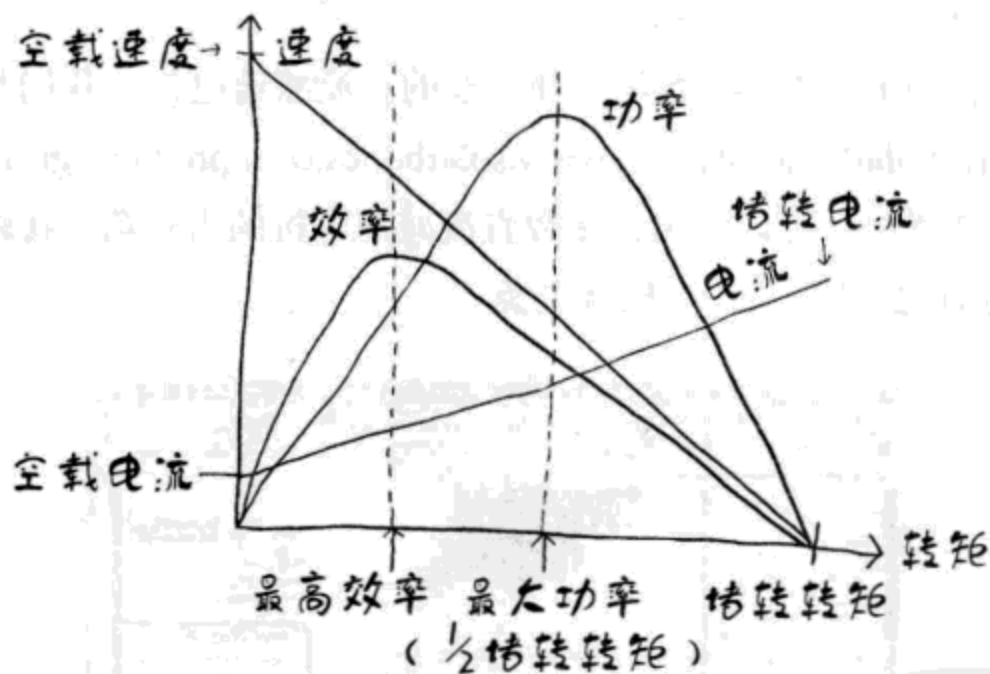


图6.8 直流电机速度、功率、效率、电流及转矩之间的关系

### 3. 普通模型舵机

有两种类型的模型舵机：普通的舵机与  $360^\circ$  舵机。到现在为止，还是普通舵机用得更广泛。在无线电控制的模型，如飞机、和轮船模型中，就用到了这种舵机。

**注意** 在工业术语中，伺服电机指的是所有内置反馈装置的电机。所谓反馈，指的是用一方法检测电机输出轴的转动角度。我在本书中称伺服电机为模型舵机，是为了将这种伺服电机与工业伺服电机相区分。

普通模型舵机就是内有智能电路的小型直流减速电机，如图 6.9 所示。给这个智能电路一个特定的脉冲时，一般是特定占空比的脉冲信号，这种信号会告诉电机应该转多少度。

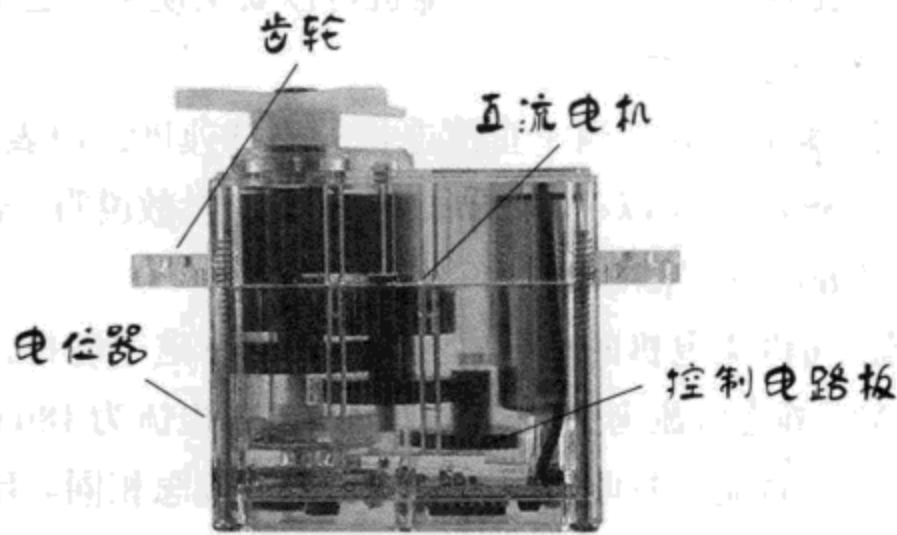


图6.9 模型舵机的内部结构 (图片经ServoCity允许使用)

不像前面所讲的直流电机只需要两根线，舵机上有三根线，是由脉冲信号控制的。普通舵机的旋转角度范围为  $60^{\circ} \sim 270^{\circ}$  (一般为  $180^{\circ}$ )，因此在定向与定位任务中特别有用。这种电机的工作电压一般为  $4.8 \sim 6V$ 。

Hitec 与 Futaba 是两家生产舵机的知名品牌，可以在 ServoCity 和其他一些网站找到这些舵机。图 6.10 所示为 Hitec HS-311 的特征表说明。

**HS-311 Standard**

Software & Accessories  
Batteries & Accessories  
Wires/Connectors & Access.  
Web Specials  
Questions and Comments

1050usec 45°  
1050usec 45°  
600usec 90° 1500usec Neutral 2400usec 90°

**1500usec Neutral**  
This servo can operate 180° when given a pulse signal ranging from 600usec to 2400usec. Since most H/C controllers cannot generate this wide of signal range, you will need to use our [servo stretcher](#) for 180° operation.

Price: \$8.99  
Part: 313115  
Status:  In-Stock  
Rotation: 90° Rotation (Stock)  
Direction: Clockwise (Stock)  
Qty: 1

**Detailed Specifications**  
Control System: +Pulse Width Control 1500usec Neutral  
Required Pulse: 2-5 Vpk Peak to Peak Square Wave  
Operating Voltage: 4.8-6.0 Volts  
Operating Temperature Range: -20 to +60 Degree C  
Operating Speed (4.8V): 6.15sec/60° at no load  
Operating Speed (6.0V): 6.15sec/60° at no load  
Stall Torque (4.8V): 42 oz-in (3.0 kg/cm)  
Stall Torque (6.0V): 49 oz-in (3.5 kg/cm)  
Current Drain (4.8V): 7.4mA Idle, 160mA no load operating  
Current Drain (6.0V): 7.7mA Idle, 180mA no load operating  
Dead Band Width: 5usec  
Operating Angle: 45° one side pulse traveling 450usec  
Direction: Multi-directional  
Motor Type: Cored Metal Brush  
Potentiometer Drive: 4 Slider Direct Drive  
Bearing Type: Top: Resin Bushing  
Gear Type: Nylon  
308 Modifiable: Yes  
Connector Wire Length: 11.81" (300mm)  
Weight: 1.52oz (43g)

Servo Hardware & Accessories

图6.10 Hitec HS-311普通模型舵机的特征表

我们看看特征表中这些有趣的内容吧。先不看“控制系统”与“信号要求”（我们会在本章的后半部分讨论舵机的控制）。

(1) 工作电压：只要在 4.8~6 V 范围内，电机就会工作。

(2) 工作温度范围：在这种环境下，电机可以安全使用。这是因为电机壳中的印刷电路板上敏感的电子元件。

(3) 工作速度：这个参数相当于直流电机的空载速度，但表示方法略有不同。因为舵机的转角不到  $360^\circ$ ，所以不用 r/min 表示。这个参数说明，若空载电压为 6 V，电机在 0.15 s 内可转  $60^\circ$  ( $\frac{1}{6}$  圈)。

(4) 空载电流：与直流电机的空载电流类似。对于这个舵机，我们看到了两个值，工作电压为 6 V，静态电流为 7.7 mA，空载旋转时电流为 180 mA。

(5) 堵转转矩：与直流玩具电机及减速电机中的概念相同。堵转转矩是电机的最大转矩，只有在用外力强迫停止时，转矩才最大。在工作电压为 6 V 时，电机的堵转转矩为 49 ozf·in，约为 3 lbf·in。

(6) 工作角度与方向：这个参数说明电机在每个方向上都能转  $45^\circ$ ，总的旋转角度为  $90^\circ$ 。在这个基础上，如果你多付 10 美元，旋转角度可达  $180^\circ$ 。

(7) 齿轮类型：这是其他参数中最最重要的一个，它说明了电机的零件材质。小转矩的舵机一般用尼龙塑料齿轮，大转矩的舵机一般用金属齿轮。

#### 4. $360^\circ$ 模型舵机

$360^\circ$  舵机是普通舵机的一种改进模式。脉冲信号决定的电机的转速。你不知道舵机力臂的位置，但可以控制速度及  $360^\circ$  的运动。如果需要连续旋转及简单的速度控制，可以选择  $360^\circ$  舵机。比如，将这种舵机装在电动鼠上追你家的猫。

你可以直接买现成的  $360^\circ$  舵机，如 Hitec HSR-1425CR，或用普通舵机自己做一些改进。如果不知道如何将普通舵机改为  $360^\circ$  舵机，可以看看 ServoCity's Rotation Modification Difficulty List ([www.servocity.com/html/rotation\\_modification\\_difficul.html](http://www.servocity.com/html/rotation_modification_difficul.html))。

#### 5. 步进电机

步进电机集普通舵机的精确位置控制及直流电机直流减速电机的  $360^\circ$  控制的优点于一身。步进电机的轴上有一系列齿轮形磁铁，沿电机外壳内部周围绕着几个线圈。直流电机的线圈绕在轴上，磁铁装在外壳上，所以步进电机好像把直流电机里外颠倒一样。

步进电机按增量角度一步一步转动，这个增量角度叫步距角。如果每一步都很快，看起来就是连续的旋转。其中，每个线圈通 1 次电，就会带动轴上的 1 个齿向前走一个步距角。若步进电机每 1 步转  $1.8^\circ$ ，200 步就可以转  $360^\circ$ 。

要通过脉冲控制步进电机轴连续旋转，需要4到8个根线，因此步进电机的控制比前述的电机要复杂。其外形比其他直流电机要短粗，但相对它的体积大小而言，转矩比我们想象的要小一些。不过，如果在项目中既要控制速度又要控制位置，使用步进电机是最方便的。

打印机与扫描仪都用步进电机来控制带墨盒的打印头的位置与速度，或带动纸张转动。在收垃圾的日子里，如果你在路边看到一台被丢弃的打印机，里边一般会有至少2个步进电机。

SparkFun的ROB-09238就是一种简单的步进电机。图6.11所示为从([www.sparkfun.com/commerce/product\\_info.php?products\\_id=9238](http://www.sparkfun.com/commerce/product_info.php?products_id=9238))下载的步进电机特征表，表上的参数有如下几个。

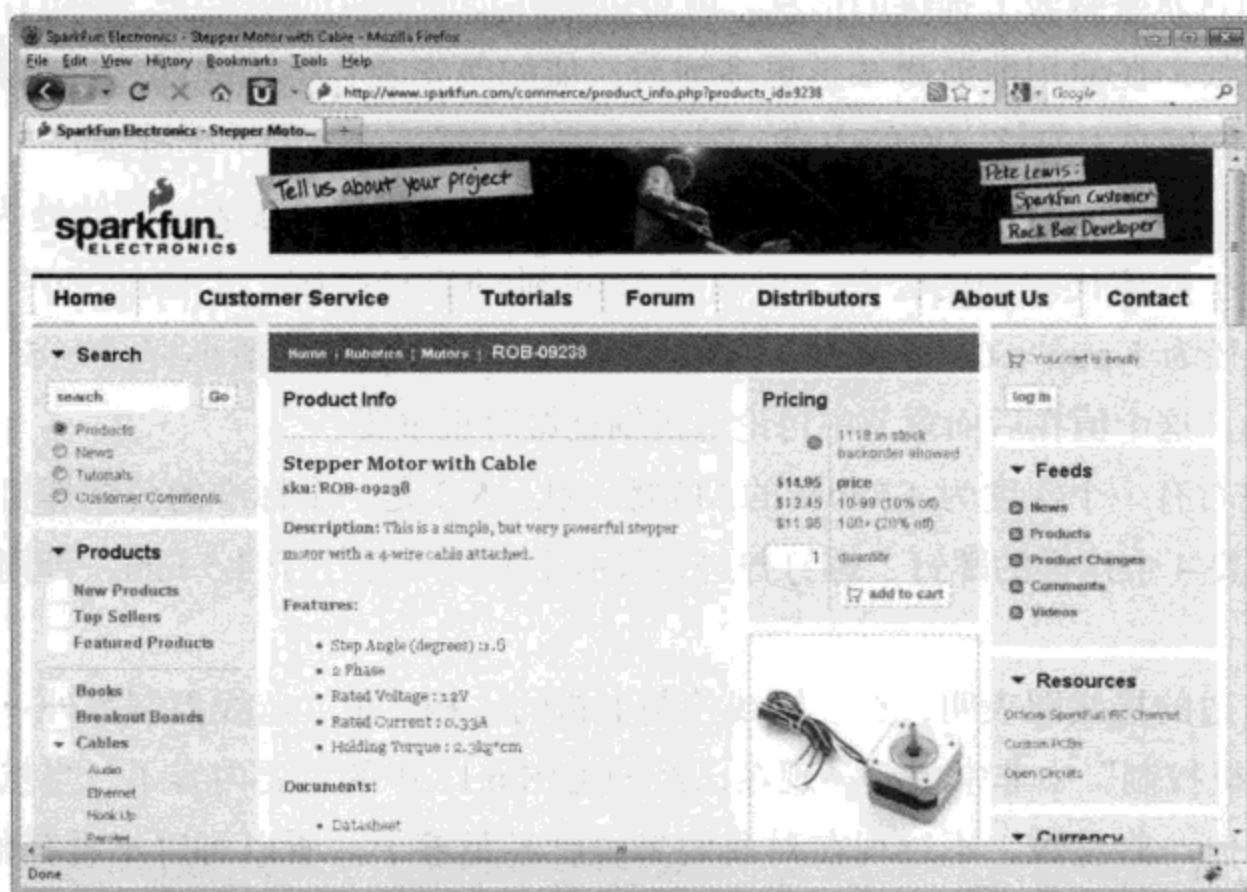


图6.11 SparkFun ROB-09238步进电机的特征表

(1) 步距角：图中所示为  $1.8^\circ$ ，如果用360除以18，则转1圈需要200步。本章后面的“电机控制”部分中会讨论如何让电机转1个步距角。

(2) 2相：这个步进电机是双极电机（4相就是单极）。在“电机控制”中也会谈到这个参数。

(3) 额定电压：此处为12V，这是步进电机的设计电压。如果电压高于此值，可能会烧坏电机；电压低于此值，电机可能根本就不会转。

(4) 额定电流：0.33A，指的是步进电机达到额定转矩时所消耗的电流。电源能提供的最大电流应该比此值高，所以步进电机电流在达到电源电流极限值前已经达到了自己的极限电流值。

(5) 保持转矩: 这个参数与前面所述的堵转转矩类似。区别是, 因为步进电机中有几个线圈按顺序通电, 所以步进电机能有效地保持转矩。这个步进电机的保持转矩为  $2.3 \text{ kgf} \cdot \text{cm}$  (约  $2 \text{ lbf} \cdot \text{in}$ ), 这是步进电机通电时的转矩, 而且在每一步中都保持在相应的位置。如果需驱动比步进电机额定转矩大的负载, 电机就会丢步, 就达不到精确的位置控制目的了。步进电机本身不知道自己的转角, 只会告诉你转的步数。如果负载转矩大于保持转矩, 电机丢步了, 位置就不能得到精确控制。

步进电机的参数还有“启动转矩”与“动态转矩”。启动转矩是电机从一步转向下一步时产生的转矩, 因为轴在两个保持位置之间, 所以这个值比保持转矩小。动态转矩是启动转矩与保持转矩的平均值, 大约为保持转矩的  $65\%$ <sup>[3]</sup>。一般来说, 步进电机在带负载转动时的转矩总是会小于保持转矩的  $65\%$ 。

利用这张参数表上提供的信息, 就可以选择步进电机的型号了。不过, 即使有了这些参数, 在使用前还得知道更多细节, 如如何安装、每根线的接法等。还好, SparkFun 的网页上有这方面的内容, 图 6.12 中就是特征表上的一个链接。

从左向右看, 看到的第一个数是轴的直径。直径用符号  $\phi$  表示, 此处为  $5\text{mm}$ 。右边两个小数值代表轴的公差, 标明了  $5\text{mm}$  轴的直径范围, 上面的“0”表示轴的最大直径为  $5 \text{ mm} + 0 = 5 \text{ mm}$ , 下面的“-0.013”表示轴的最小直径为  $5 - 0.013 = 4.987 \text{ mm}$ 。这个值在后面章节中讨论电机轴连接时很重要。

再往右有一个深度为  $4.5 \text{ mm}$  的 M3 螺钉孔。M3 是一个标准的公制螺钉, 安装电机时需要 4 个这样的螺钉。螺钉拧进螺纹孔的长度一定小于  $4.5 \text{ mm}$ , 否则就不能使用。

最右边的接线图表明, 红、绿线控制电机的一相, 黄、蓝线控制另外一相。这一点在“电机控制”中非常重要。现在已经知道图 6.12 中的重要内容了。当然, 最好再学习其他一些参数, 不过现在对我们来说已经足够了。所以可以不看其他参数, 否则你会被搞得晕头转向。

## 6.2.2 交流电机

好多家电中都有交流电机, 如搅拌机、电风扇, 因为它们靠墙上的交流电工作。如果你做的项目是静止不动, 而且仅需要一台连续旋转的即插即用而且功率相当高的电机, 就可以用交流电机。不过控制交流电机比较危险, 因为你用的是  $120 \text{ V}$  的电, 这个电压比直流电机的电压高得多。

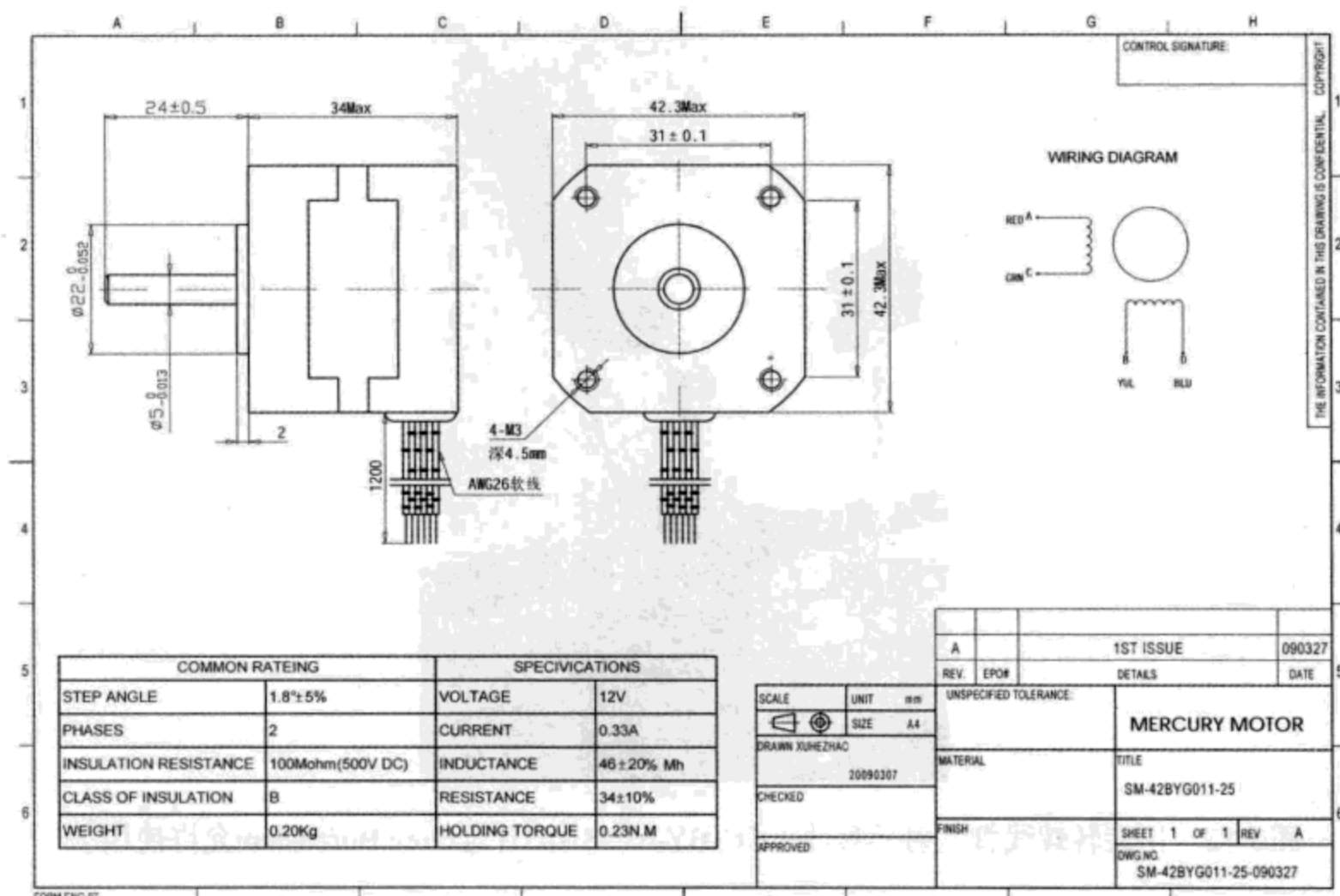


图 6.12 SparkFun ROB-09238步进电机的数据表（图片经SparkFun Electronics允许使用）

交流电机的电流可能会很大，高达 15 A 时才会切断断路器。所以，如果出现故障了，这种高电压与高电流足以对你造成严重的直接经济损失，甚至伤害。另外，逻辑电路附近的电机可能会导致电路不能正常工作。

我认为在一般的项目中不要使用交流电机。不过，如果不用对它进行控制，交流电机还是很好用的。SparkFun 有一种 PowerSwitch Tail (COM-09842)，它能把致命的交流电隔离起来，这样用户就可以控制任何接在这个开关上的电机了。如果你想应用更多的交流电机控制，花点时间学习交流电机的相关知识吧，这样才能安全有效地使用交流电机。

### 6.2.3 旋转螺线管

旋转螺线管适合用于小角度快速转动的场合。其实只是将线性螺线管（参见后面“螺线管”部分）中的推杆装入一个导轨，让推杆旋转而已。

旋转螺线管因为应用较少，所以价格相当高。不过，用于把乒乓球扔进小球框是再合适不过了（图 6.13）。Ledex (www.ledex.com) 有多种旋转螺线管可供选择。



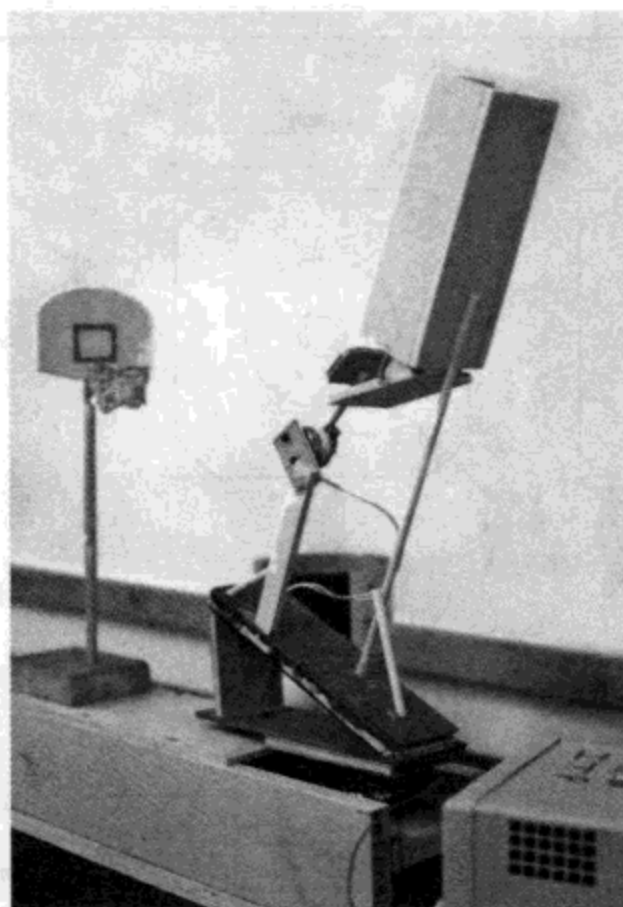


图6.13 用旋转螺线管发射乒乓球（CC-BY-NC-SA图片经Greg Borenstein允许使用）

## 6.3 线性执行器

直线电机用得比旋转电机少多了。有好多种方法可将旋转运动转化为直线运动（第7章中有更多相关内容）。不过，在有些特殊情况下，直线电机用起来更方便。图6.14为两种主要的线性执行器：直线电机和线性螺线管。

### 6.3.1 直线电机

如图6.14所示，ServoCity直线电机其实是一种直流减速电机，它用电机与滚珠丝杆配合，使推杆伸缩。下一章会有更多内容讨论各种丝杆。



图6.14 直线电机（左）（所有权：ServoCity）与线性螺线管（右）

直线电机的用处很多，不过因为它很方便，所以你就得多付一些钱（起价约为130美元）。我以前的一个学生用这种电机做了一种升降鞋，强度很大，能支撑她的重量（图6.15）。

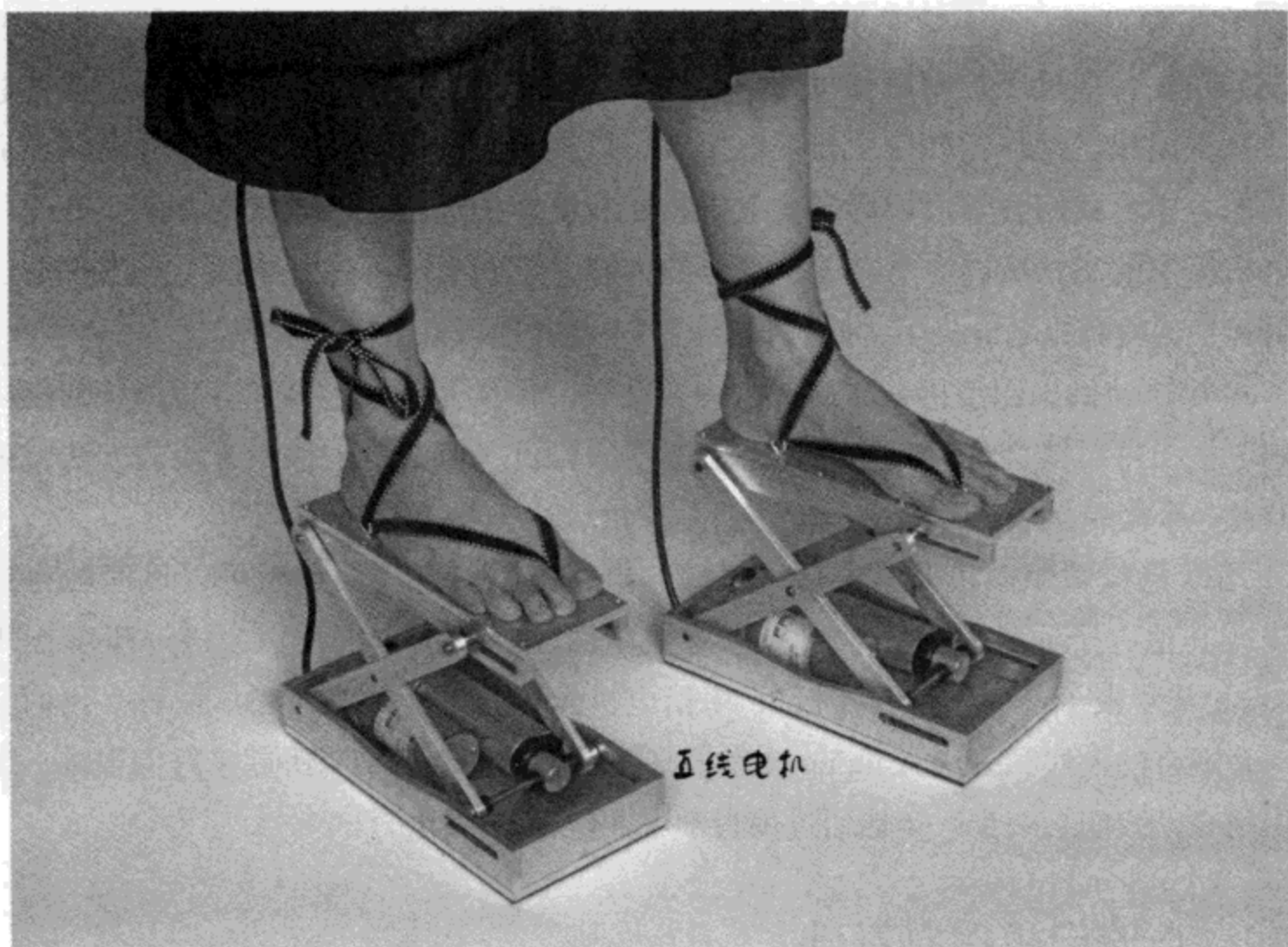


图6.15 直线电机控制鞋的升降（所有权：Adi Marom）

在这种电机的数据表上，可以看到应当熟悉的一些参数：如额定电压、空载电流等。由于产生的是直线运动，所以速度的单位不是 r/min，而是 in/s（1 in/s=0.254 m/s）；还有“静态载荷”与“动态载荷”。静态载荷是推杆上可以承受的重量，动态载荷是电机工作时能承受的最大重量。如果你重 150 lbf，图 6.14 所示 ServoCity 的 25 lbf 执行器（最小的一种）就将你举不起来，但可以保证你的高度不变。

### 6.3.2 螺线管

螺线管就如一个不做旋转运动而做直线运动的电机。它由外壳、推杆构成，有时还有一个弹簧，弹簧会使推杆在断电时回到初始位置。推杆上绕着线圈，当电流流过线圈时，它会吸引或排斥推杆，从而产生一个又短又快的直线冲击，适合用来按按钮和做自动设备。

房门的门铃上很可能就有一个螺线管。按下按钮，电路会闭合，螺线管通电，推杆就会敲钟。

## 6.4 电机控制

在做项目时，很多情况下不仅仅需要控制电机的开或关，可能还需要控制电机转动的角度，如反复控制照相机的角度或升降百叶窗。也可以让电机根据一些传感器或开关的状态动作，如使用光敏电阻就可以在太亮的时候自动拉下百叶窗。在后面的内容中，我们会学习如何启动电机，还有更多先进的控制电机的方法。有专门写电机控制的书籍，所以本书有关这部分的内容并不全面。不过，掌握了本书中的这些内容，你就会控制电机了，而且我会提供一些其他可供参考的资源。

要尽快地做出原型机，应该减少焊接次数，尽量多用面包板和容易搭接的模块控制电机。这可能会很耗时，而且需要专门的设备，但却是一种很方便的方法，现在通过一个简单例子来学习一下。

用面包板做原型机非常方便、快捷。搭接电路时，用面包板可以迅速地连接电线或其他电子元件。通过学习本书中使用面包板的例子，我们会进一步掌握用 Arduino 开发板（一种微控制器板），来给电机做一些更复杂的控制。最后，我们会用一个现有的模块和一块 Arduino 开发板来控制步进电机。如果听起来好像很难，也不用担心，我们会一步一步地通过项目学习面包板的使用方法。

### 6.4.1 直流电机控制基础

要让普通的直流电机或直流减速电机工作，只要将它接到能提供所需电压值的电源上即可。

**注意** 下例中的红线、黑线、与黄线分别接电源、地与信号，图片中可能会显示为灰、黑白。

## 项目 6.2 最简单的直流电机控制电路

将 9 V 的直流电机接到 9 V 电池上，电机就会转。把两根线换接一下，电机就会反转。用两个零件——电池与电机——搭一个简单的电路吧。

### 1. 材料清单

- (1) 普通直流电机。
- (2) 相应的电池（此处为 9 V）。
- (3) 带接线头的电池扣（如 RadioShack 的 270-324）。

有一种小电机（SparkFun 的 ROB-09608，已有接线头）用 1 节 AA 电池就可

以工作，因为它只需要 1.5 V 的电压。图 6.16 所示为一个 9 V 电池与电池扣，6 V 的电机在电压范围为 3~9 V 时都会转。在 All Electronics ([www.allelectronics.com](http://www.allelectronics.com)) 上可找到各种尺寸的电池扣。

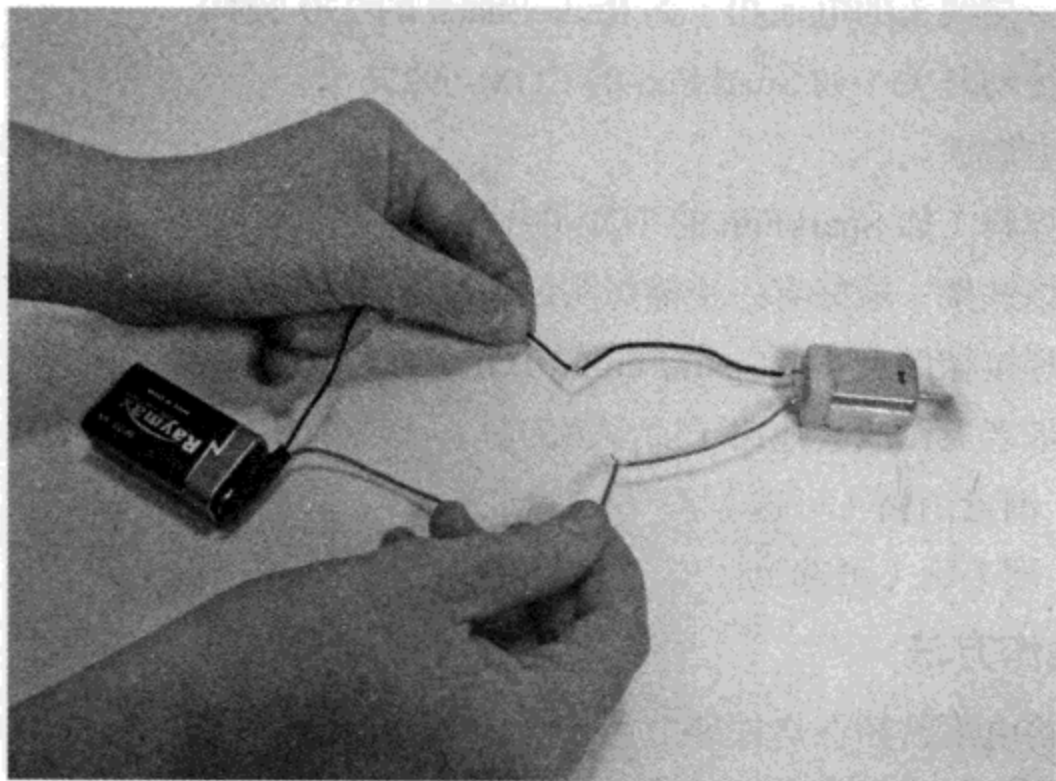


图6.16 直流电机与电池的简单电路

## 2. 操作方法

- (1) 将电机的黑线接到电池的黑线上。
- (2) 电机的红线接到电池的红线上，电机应该转了。
- (3) 把两根线换接一下，电机就会反转。图 6.16 的电机轴上缠了一片胶带，这样转动时我们看得就清楚些。

## 项目 6.3 焊接电路

焊料就像导电的热熔胶，将金属粘在一起使相互之间通电。在本项目中，需要一个电烙铁，这个工具就像一支端部会发热的钢笔。RadioShack 的 64-2802 电烙铁价格不高，买的时候会送一个小烙铁架和一些焊料，这样就有了本项目需要的 3 种东西了。如果打算在电子学上花很多功夫，可能会想买一款更好的有可换焊头及温控旋钮的电烙铁，如 Jameco Electronics ([www.jameco.com](http://www.jameco.com)) 的 46595。还需要一些焊料，无铅焊料在欧洲是一种标准焊料。初学者用起来会有点难，不过对后面一系列的工作会很有帮助。

还需要一个单极拨动开关 (SPST)。这种开关有两根引脚，会接通或断开。开关接通时，里边的两个金属片会接通，就像项目 6.2 中接在一起的电线一样。开关断开时，两个金属片会分开，电流就无法流过开关了。

## 1. 材料清单

- (1) 普通直流电机。
- (2) 配套的电池（此处为9V）。
- (3) 带接线头的电池扣（如RadioShack的270-324）。
- (4) 拨动开关（如SparkFun的COM-09276）。
- (5) 电烙铁。
- (6) 焊料（如SparkFun的TOL-09162）。
- (7) 烙铁架，最好有一块擦焊头的海绵（如SparkFun的TOL-09477）。
- (8) 焊接辅助夹（如SparkFun的TOL-09317）。
- (9) 带老虎钳或其他钳子的多刃刀具。
- (10) 消毒酒精（可选）。
- (11) 硬毛刷（可选）。

## 2. 操作方法

- (1) 将电烙铁插在烙铁架上。

**注意** 电烙铁温度会非常高。

(2) 用酒精和硬毛刷清理一下电机与开关的接线端。不一定非要这么做，不过这样焊接起来会更容易，焊接效果也会更好。

(3) 电机的红线接在开关的一个引脚上。用钳子轻轻压一下，电线就不会晃了。关断开关。

(4) 用焊接辅助夹夹住开关，这样就不用手扶了。

(5) 用电烙铁粘一点焊料。如果电烙铁的温度合适，焊料会迅速熔化，粘在烙铁头上。这个操作过程叫镀锡，这样焊起来就容易多了。

(6) 把烙铁头放在电机与开关的接头一侧。几秒后，电机接线头与开关的管脚都会发热。

(7) 用烙铁头去碰电机与开关接线头的另一侧，如图6.17所示。如果用电烙铁直接在接触焊料，则焊点强度不大。最好是先预热要连接的零件，用零件去加热焊料。如果操作正确，会在电机与开关接线头处看到一个发亮的锡珠。锡珠不好看也没关系。

(8) 对电池扣上红线的操作方法也相同。不过现在还不能接电池。操作时，用焊接辅助夹保持接线头不动。一手拿焊锡，一手拿电烙铁。焊接时，最好用焊接辅助夹或其他工具把要焊接的东西固定（胶带、夹子、扎线带等均可）。

(9) 将电池的黑线焊到电机的黑线上。用钳子把两个接线头拧在一起，用焊接辅助夹夹住，这样焊接时电线就不会动了。焊好的电路应当如图6.18所示。

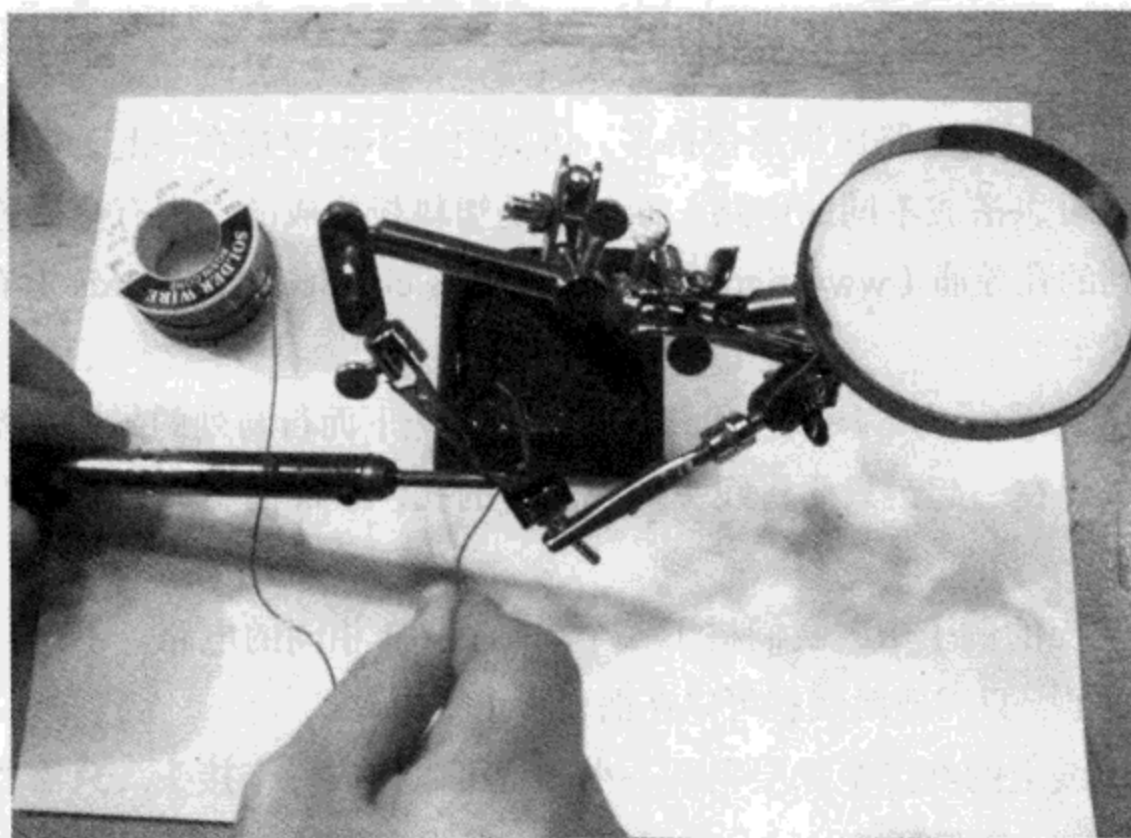


图6.17 焊接开关

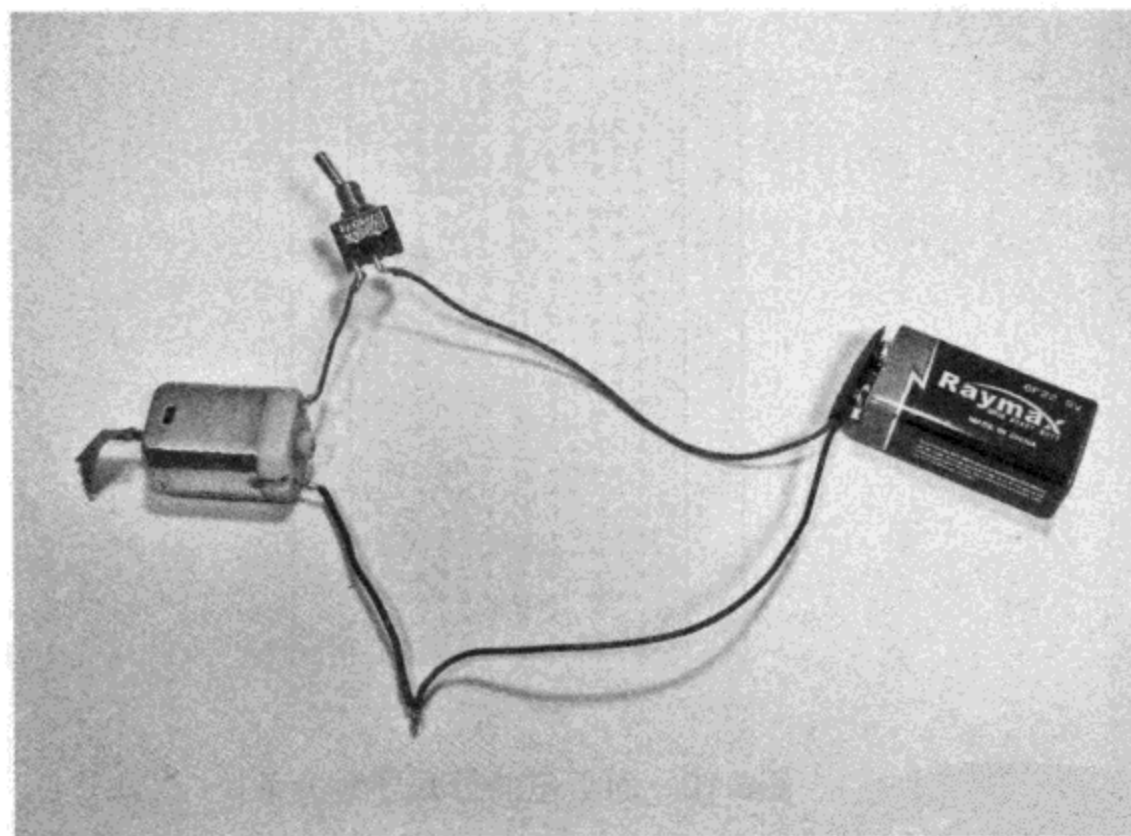


图6.18 焊完的电路

(10) 此时最好不要让电线再受力，这样焊接头才不会断，这种操作叫“应力消除”。理论上，焊接头不能当机械接头使用，也不能让导电部分裸露在外边，以防碰到桌子上的扳手造成短路，所以必要时需要用至热塑管、热熔胶、绝缘胶带或电线结。

(11) 接上电池，打开开关，看看电机的转动吧！打开开关后，电流会经焊点流入电机。

## 项目 6.4 用面包板搭电路

用面包板搭电路比焊接快得多。因为电线不需要接在一起，所以不用反复焊接焊点就可以搭成不同的电路。面包板是塑料板构成的，内有金属连接件将表面上能看到的孔导通（[www.tigoe.net/pcomp/code/circuits/breadboards](http://www.tigoe.net/pcomp/code/circuits/breadboards) 上有面包板更详细的描述）。

图 6.19 所示为一块面包板，显示了塑料壳下面行与列的导通关系。不用将两个接线头焊在一起，只要将线头插入同行的孔，下面的金属条就会自动地将线头导通。

在下面的例子中，我们搭了一个与项目 6.3 相同的电路。不过，用面包板就不用焊线了，只需要跳线就可以在面包板上搭电路。

把电线上的红黑绝缘层剥下一小段就可以作成接头。只需要一把剥线钳（如 SparkFun 的 TOL-08696）就可以了。电线有两种，一种是实心线，一种是绞线。绞线就是把细如头发的一把线拧在一起，然后在外层裹上塑料进行绝缘。

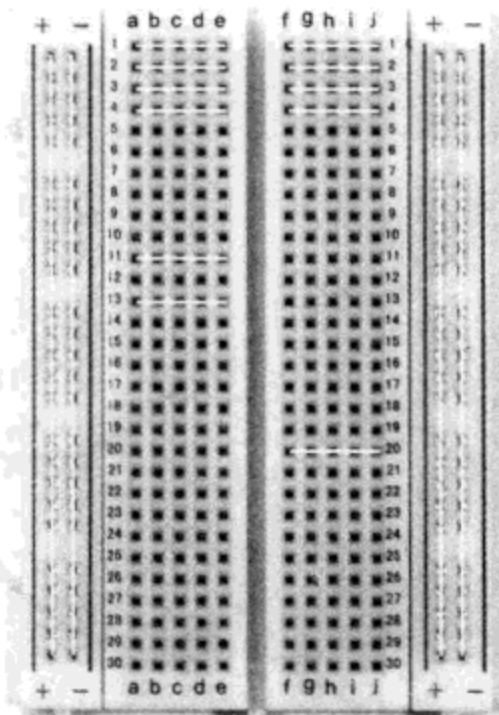


图6.19 面包板的行列导通关系

实心线是一层外层用塑料绝缘的电线。实心线比绞线更硬，更容易插到面包板上。电线的单位用 gauge，上面的线就是 22 gauge，这种线用在面包板上特别合适（gauge 越高，线越细）。

用剥线钳时，要先找到剥线钳上与电线尺寸对应的槽口。把电线放在这个槽中，外部大约留  $\frac{1}{4}$  in 长度。然后边转线，边压剥线钳。这样就会把绝缘层剥下来，而不伤着里边的金属丝。在一圈都能看到金属丝后，用手把绝缘层取下来。用同样的操作方法剥另一端的线，跳线就做好了。

## 1. 材料清单

- (1) 普通直流电机。
- (2) 配套的电池（此处用9 V），带接线头的电池扣（如 RadioShack 270-324）。
- (3) 拨动开关（如 SparkFun 的 COM-09276）。
- (4) 面包板（如 All Electronics 的 PB-400）。
- (5) 跳线（如 SparkFun 的 PRT-00124）或自制线。

## 2. 操作方法

- (1) 把跳线焊到开关与电机的引脚上（如果不带接线头）。不用关心直流电机的正负极。
- (2) 将开关的一个引脚插到面包板上标有“+”的列中，另外一个管脚插到面包板的行，关断开关。
- (3) 把电机的红线插入与开关引脚相同的行，黑线插入标有“-”的列。
- (4) 将电池的红线插入标着“+”的一列，就可以给面包板供电。现在把电池的黑线插在标着“-”的一列。这样，面包板上有一整列接“+”极，一整列接“-”极，电路就搭完了（可参考附录中其他给面包板供电的方法）。接好的电路应如图 6.20 所示。

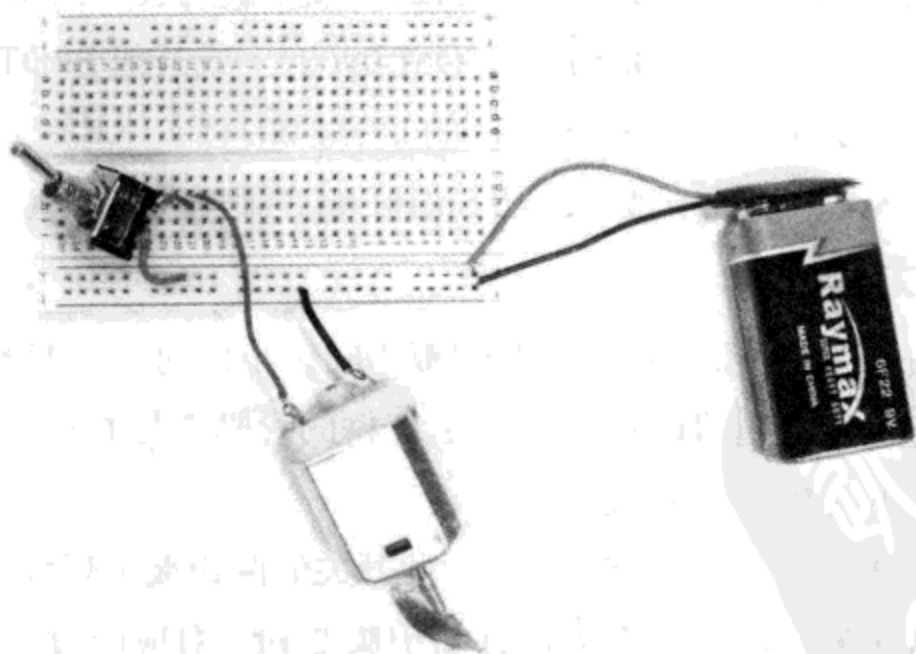


图6.20 面包板上与项目6.13相同的电路

**注意** 一般来说，在面包板上（和在一般的电路中），红代表“+”，黑（有时是蓝或绿）代表“-”。利用接好的“+”和“-”，搭电路就容易多了。由于是黑白照片，所以红色就显示成了灰色。

- (5) 打开开关，电机就转了。



## 项目 6.5 电机反转

在项目 6.2 中，通过手动换接红线和黑线可改变电机旋转方向。要改变电机的旋转方向，只要改变电流的流动方向就可以了，但如何在不拆接线的前提下改变电流方向呢？

最简单的转换方向的方法是用叫 H 桥 IC 与 SPDT（单刀双掷）开关。SPDT 开关不只有 2 个状态（开或关），而是有 3 个位置（开、关、开）。当开关打到其中一个位置时，开关内的两片金属会接触。但不同于前面例子中所讲的开关，这些金属片是相互独立的，因此开关能控制不同的电路。当开关打到中间位置时，金属片之间相互就不导通了，开关中就不会有电流流过。

H 桥 IC 中有一系列逻辑门。在这个项目中，当开关打到一端时，芯片中的逻辑门会让电流在电机中向一个方向流动；当开关打到另一端时，这些逻辑门会让电机中流过反方向的电流<sup>[4]</sup>。

### 1. 材料清单

- (1) 带接线头的普通直流电机。
- (2) 配套的电池（此处为 9 V），带接线头的电池扣（如 RadioShack 的 270-324）。
- (3) 面包板（如 All Electronics 的 PB-400）。
- (4) 跳线（如 SparkFun 的 PRT-00124）或自制跳线（见项目 6.4）。
- (5) 拨动开关（如 SparkFun 的 COM-09609）或其他 SPDT 开关。
- (6) H 桥电机驱动 IC（SparkFun 的 COM-00315）。
- (7) 4 节 AA 电池或电池扣（如 SparkFun 的 PRT-00552）。

### 2. 操作方法

- (1) 把 H 桥电机驱动 IC 插在面包板中间，小口向上，如图 6.21 所示。
- (2) 把普通直流电机的接线头接在 H 桥的管脚 3 与 6 对应的行。参考图 6.21 顶部的图片就知道 IC 引脚的定义了。
- (3) 将跳线焊到 SPDT 上。本例中此开关的两边端子焊红线，中间焊黑线。
- (4) 将 SPDT 的两根红线接到 H 桥引脚 2 和 7 对应的行。中间的黑线接到面包板标“-”的那列。接好的电路如图 6.22 所示。确保 SPDT 在面包板中间位置。
- (5) 用跳线将引脚 4、5、12 和 13 接到“-”列。
- (6) H 桥需 5 V 的电压。如果用图示的碱性 AA 电池，如电压达 6 V 也可以用（如果是 4 节充电电池，电压为 4.8 V，同样可以用）。将电池组的黑线接面包板右侧的地，红线接右边的电源。

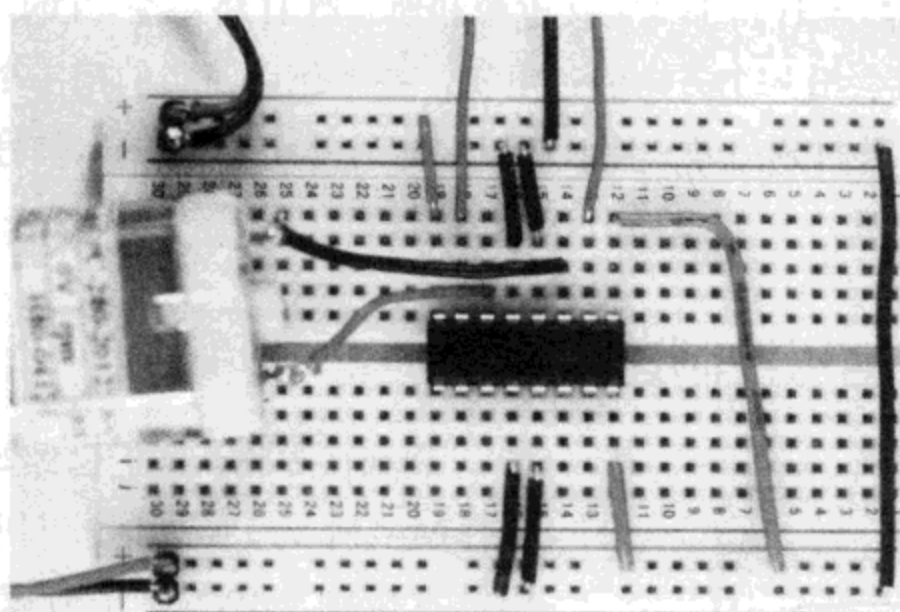
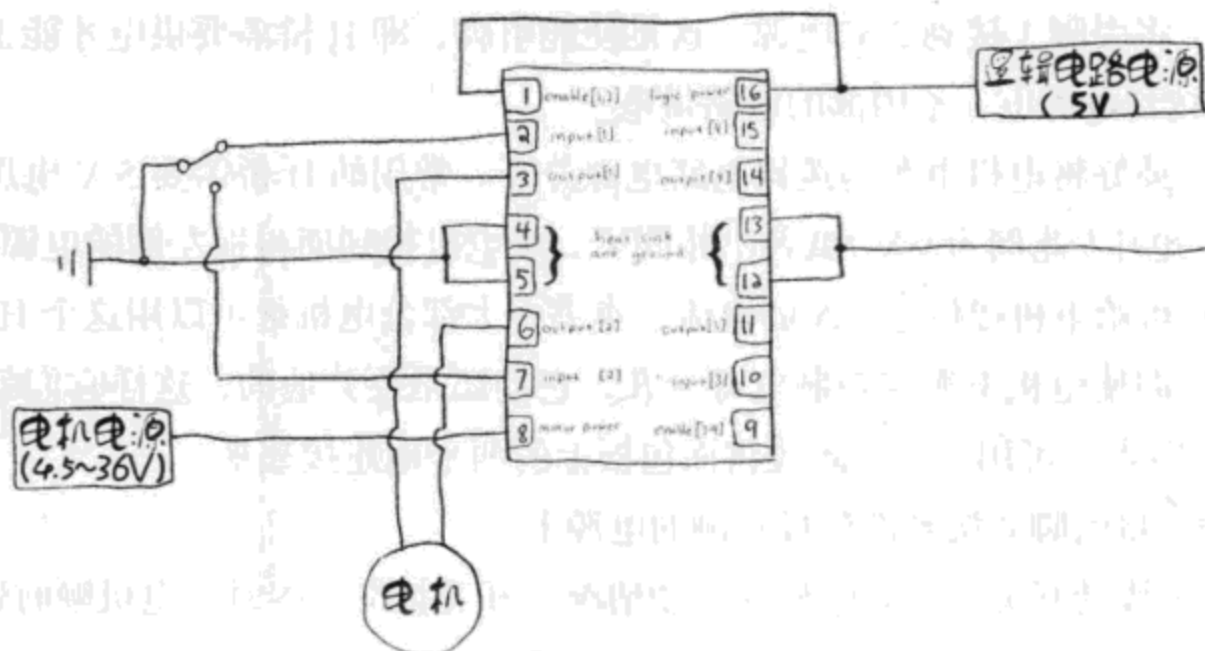


图6.21 H桥的引脚定义（顶部）及接好的面包板（底部）

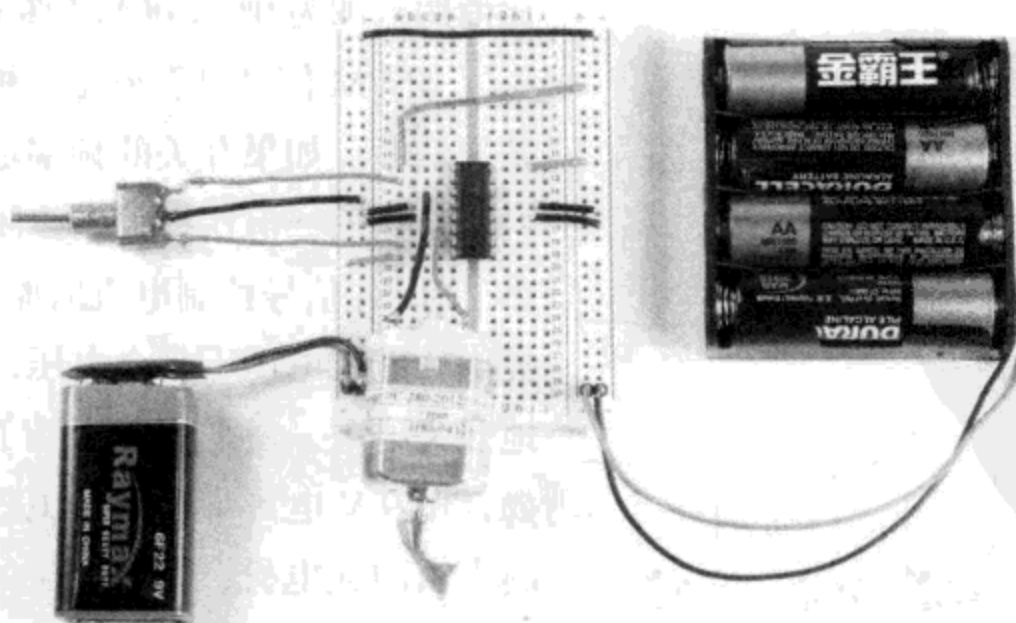


图6.22 用SPDT和H桥控制电机的方向

(7) 将引脚 1 接到 5 V 电源。这是使能引脚，即 H 桥需要供电才能工作。将引脚 16 接到电源上，给内部的电路供电。

(8) 最好将电机电源与逻辑电路电源分开。常用的 H 桥需要 5 V 电压，而电机需要的电压(此例为 9 V)就各不相同了。将电机接到面包板左侧的电源及地上。这种 H 桥可给电机提供达 1 A 的电流，本书中大部分电机都可以用这个 H 桥。

(9) 即使电机电源与控制电源分开，它们还是要共地的，这样它们就会有一个共同的零点。可用一根长跳线将面包板上的两个地连接起来。

(10) 将引脚 8 接到面包板左侧的电源上。

(11) 拨动开关，看看电机的转动情况。开关打在一端时，电机顺时针转；打到中间位置，电机停转；打到另一端，电机逆时针转。

多数 IC 芯片都像 H 桥那样需接电源和地。给 H 桥一个“ON”数字信号(高电平或 5V)，电流会沿一个方向流过电机。在本例中，我们用一个开关提供这个“ON”信号。把开关打到另外一侧时，就会有另外一个“ON”信号驱动 H 桥，使反方向电流流过电机。

## 6.4.2 用 PWM 信号控制速度

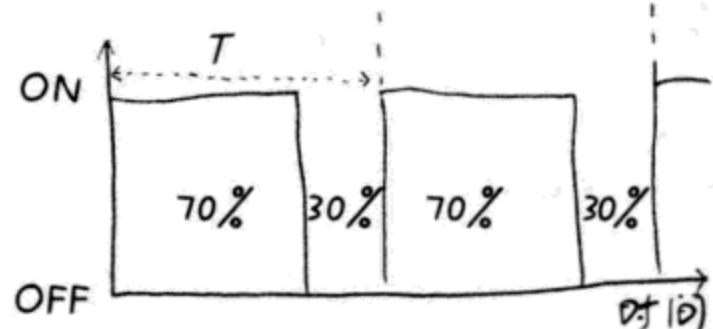
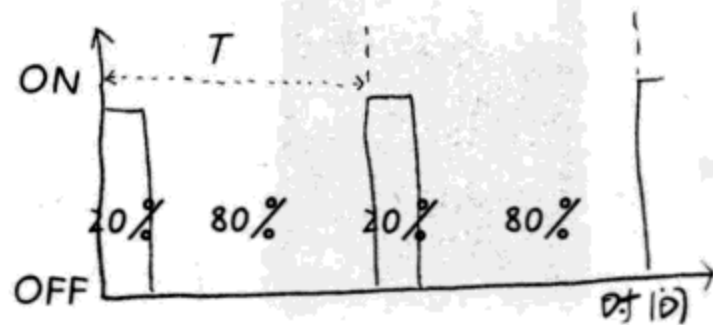
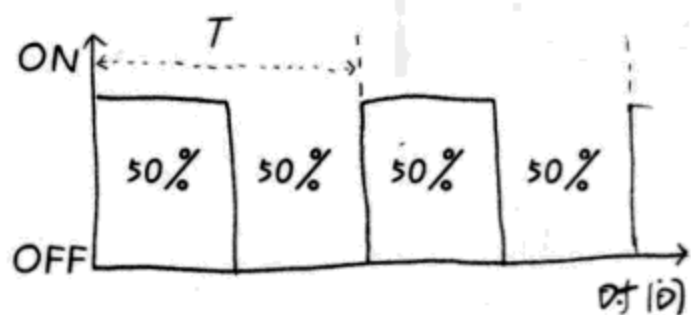


图6.23 PWM信号

到现在为止，我们已经知道如何用开关来控制电机了，但如何控制电机的速度呢？用脉宽调制(PWM)信号就可以控制电机速度。PWM信号是一个有一定占空比(为“ON”的时间与为“OFF”的时间比值)的开关信号，在一个给定的周期内，这个时间比值的范围为0%~100%(图6.23)。

PWM信号可看成是一种控制灯闪烁的开关信号。如果开关的频率足够高，灯好像一直是亮的，但比开关始终闭合时的亮度要小。PWM信号控制电机的原理也是这样的。提供的电机电压不是全电压，而是通过快速地开关电源，使平均电压低于电源电压。比如，用9V电源带动一个电压范围为3~6V的直流减速电机，如果产生的PWM信号宽度为50%，则加到电机上的平均电压为4.5V，电机工作状态会很好。

## 项目 6.6 用硬件 PWM 控制电机速度

可以用硬件，即电子元件，或者用软件产生一个 PWM 信号。我们先讲用 555 定时芯片搭建硬件 PWM 电路<sup>[5, 6]</sup>。

搭建这个电路还需要电位器与三极管。电位器是一种可变电阻。如果只接电位器两侧的 2 个引脚，就构成了一个固定电阻（像第 5 章那样）。中间可移动的引脚叫电刷，它沿着电阻移动，在中间管脚与另外两个管脚间产生一个可变电阻<sup>[7]</sup>。所以，100 kΩ 的电位器实际上是 2 个阻值加起来为 100 kΩ 的电阻构成的，用旋钮移动电刷改变阻值。图 6.24 所示电位器有红、黄、黑 3 根线（图上显示为灰、白与黑）

就像我们用过的机械开关一样，三极管在电路中是作为一个电子开关来使用的。如图 6.25 所示，三极管有 3 个管脚：基极（B）、集电极（C）与发射极（E）。本例使用的 NPN 型三极管，在基极上加一个正电压，在发射极加一个负电压，电流就会从集电极流到发射极。即使我们通过 555 定时芯片发送一个时基信号，也不能带动电机工作，否则会烧掉芯片（芯片提供的电流最多只有 200 mA，而电机需要的电流比这个值大），所以需要有一个三极管做为电子开关。当 555 定时芯片计时时间到，就允许电流流过电机。

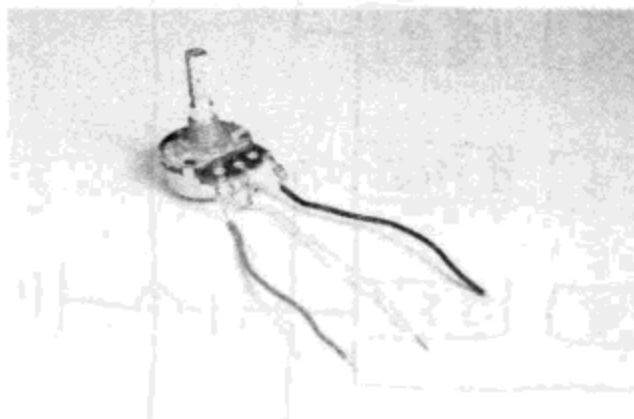


图6.24 电位器

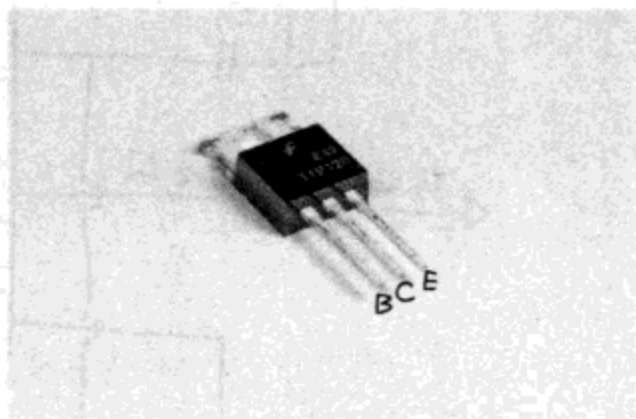


图6.25 三极管

### 1. 材料清单

- (1) 带接线头的普通直流电机。
- (2) 配套的电池（此处为 9 V），带接线头的电池扣（如 RadioShack 的 270-324）。
- (3) 面包板（如 All Electronics 的 PB-400）。
- (4) 跳线（如 SparkFun 的 PRT-00124）或自制跳线（见项目 6.4）。
- (5) 拨动开关（如 SparkFun 的 COM-09609）或其他 SPDT 开关。
- (6) H 桥电机驱动芯片（SparkFun 的 COM-00315）。
- (7) 4 节 AA 电池和电池扣（如 SparkFun 的 PRT-00552）。

- (8) 555 定时芯片 (SparkFun 的 COM-09273)。
- (9) 达林顿三极管 (Digi-Key 的 TIP120-ND 或 Jameco 的 32993)。
- (10) 100 k $\Omega$  电位器 (Jameco 的 29103)。
- (11) 2 个 0.1  $\mu$ F 的电容 (此处用的是电解电容, 也可以用陶瓷电容, 如 SparkFun 的 COM-08375)。

## 2. 操作方法

- (1) 将 5V 电源与地 (AA 电池组) 分别接到面包板的电源与地上。
- (2) 在面包板的另一侧, 将电机电源也分别接到电源与地上。用一根长跳线将两个地短接。
- (3) 将 555 定时芯片插到面包板上, 小凹口在左上角 (图 6.26)。

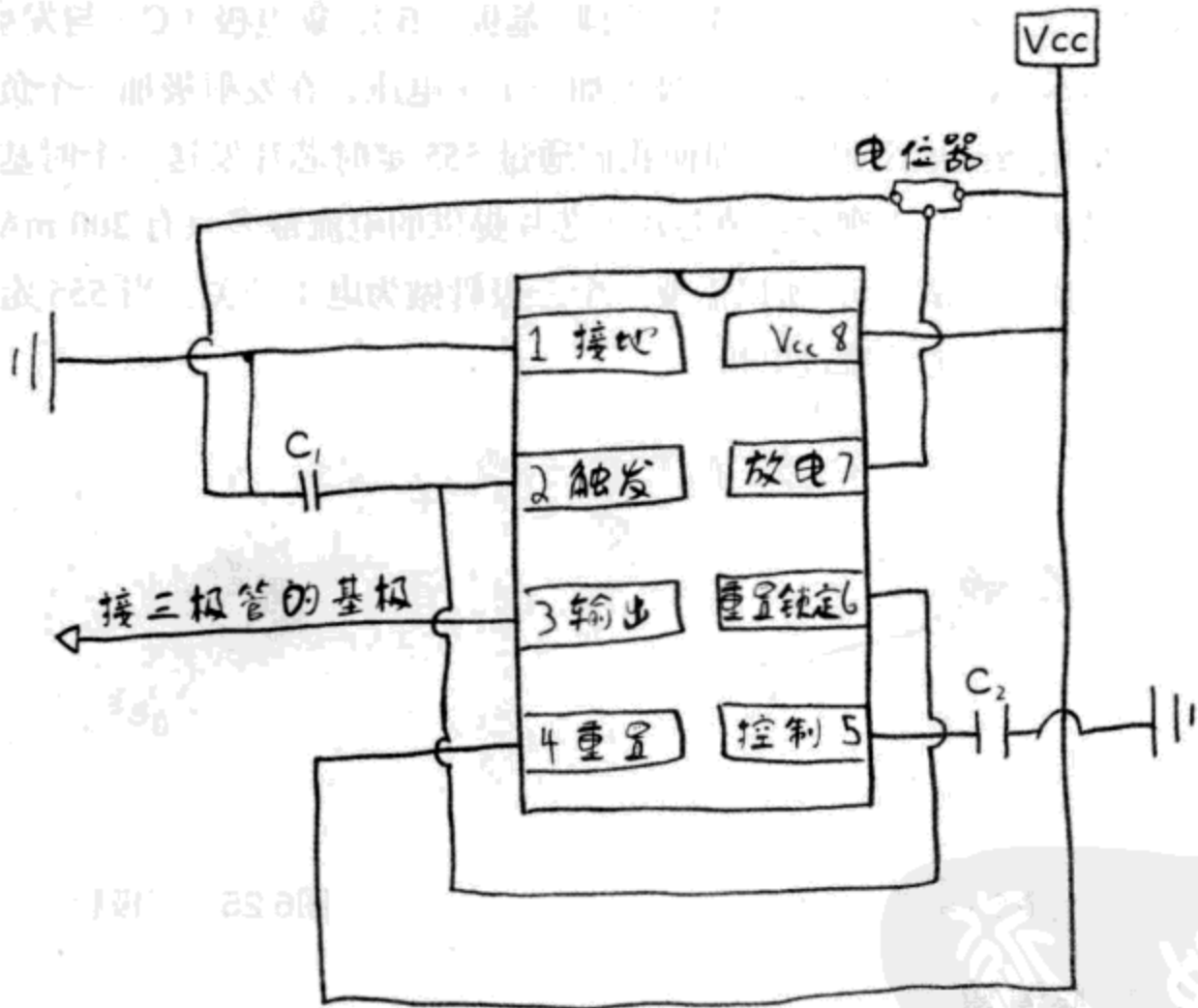


图6.26 555定时芯片的引脚定义

- (4) 将引脚 1 接地。
- (5) 用一个短跳线将引脚 2 和 6 短接。
- (6) 将引脚 2 接到电位器外侧的一个引脚上。
- (7) 引脚 2 接一个 0.1  $\mu$ F 电容, 然后再接地。
- (8) 用一个短跳线将引脚 4 和 8 短接, 再将引脚 8 接 5V 电池的电源列和电位器另外一侧的引脚上。参考图 6.27, 完成一个完整的面包板电路。

- (9) 将引脚 5 接一个  $0.1\ \mu\text{F}$  电容，然后再接地。
- (10) 引脚 7 接到电位器中间的引脚上。
- (11) 将三极管插在面包板上，3 只引脚各占 1 行（见图 6.27）。

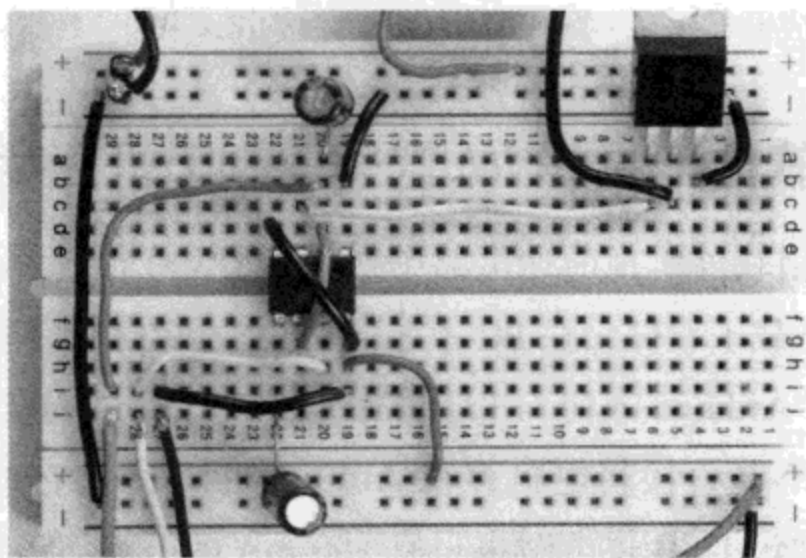


图 6.27 用 555 定时芯片产生 PWM 信号来控制电机（具体接线）

- (12) 将引脚 3 接三极管的基极。
- (13) 将三极管的发射极接地。
- (14) 将电机的一个引脚接到三极管的集电极（中间的引脚）上，另外一个引脚接 9 V 电源。接好的电路应如图 6.28 所示。

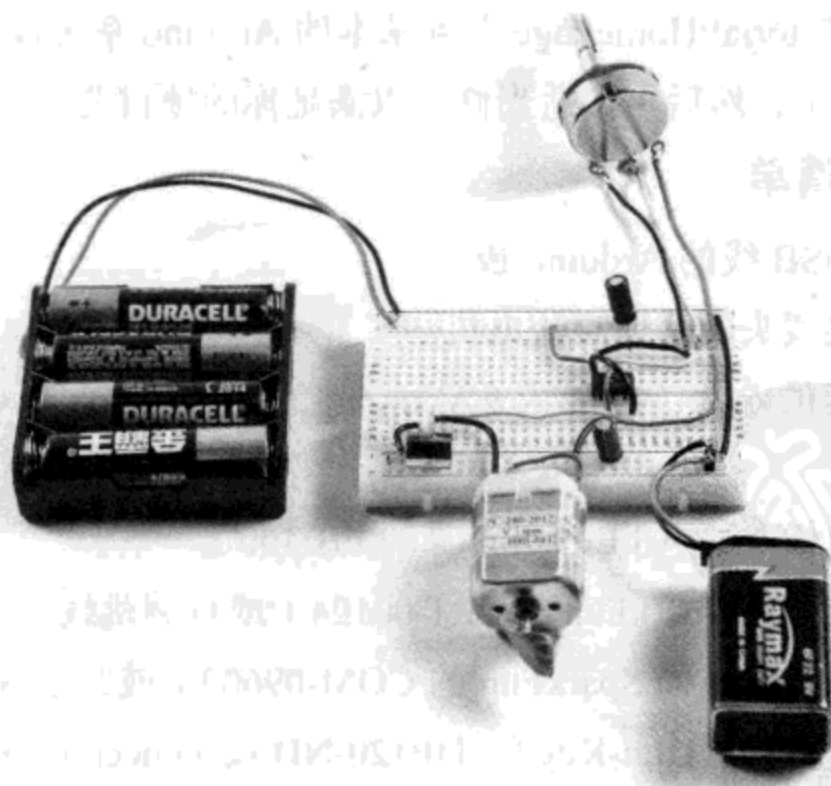


图 6.28 用 555 定时芯片产生 PWM 信号来控制电机（完整电路）

(15) 现在电机应该转了。如果不转，顺时针或逆时针旋转电位器，直到电机开始转。观察一下电机的转速是如何改变的。在这个电路中，555 定时芯片作为脉冲发生器，脉冲的宽度取决于可变电阻与电位器总电阻的比值。

### 6.4.3 更高级的直流电机控制方法

代替面包板、芯片和开关的控制电机的方法是使用微控制器，如 Arduino 原型机开发平台。有了微控制器，就像给你的项目加了一个大脑。通过编写几行程序代码，Arduino 可以完成我们前一个例子中硬件完成的工作。

## 项目 6.7 用软件产生 PWM 信号控制电机速度

在本项目中用软件实现前述电路中产生的 PWM 信号，来学习 Arduino 的功能。假设你已经下载了软件，在 PC 上装了驱动，也知道如何将 Arduino 接到电脑上。参考附录中“Arduino 入门”来学习如何将 Arduino 接到电脑上。

不过，我们不能直接将电机接在 Arduino 上，因为它的每个引脚只能提供 40 mA 的电流，通过 USB 供电时也只有 500 mA 的电流。多数电机需要的电流都比这个大。用 Arduino 通过三极管给电机发送指令，就可以解决这个问题。除了用 Arduino 替代 555 芯片外，其他的与项目 6.6 相似。

在这个项目中，用 Arduino 板搭建一个系统，读取接入的输入信号（如开关、传感器等），并且输出信号给要控制的器件（如电机）。首先来搭电路，学习如何利用 Arduino 的代码通过三极管来控制电机的开关，最后用 PWM 信号来控制电机的转速（有很多有关 Arduino 控制电机或其他器件的详细文档，可在 <http://arduino.cc/en/Tutorial/HomePage> 看到基本的 Arduino 系统设计。多数情况下，可以由这些例子入手，然后再做适当修改以满足你的项目要求）。

### 1. 材料清单

- (1) 带 USB 线的 Arduino 板。
- (2) 带接线头的普通直流电机。
- (3) 配套的电池（此处为 9 V），带接线头的电池扣（如 RadioShack 的 270-324）。
- (4) 面包板（如 All Electronics 的 PB-400）。
- (5) 跳线（如 SparkFun 的 PRT-00124）或自制跳线（见项目 6.4）。
- (6) 拨动开关（如 SparkFun 的 COM-09609）或其他 SPDT 开关。
- (7) 达林顿管（Digi-Key 的 TIP120-ND 或 Jameco 的 32993）。
- (8) 220 k $\Omega$  电阻（Jameco 的 30470）。
- (9) 二极管（SparkFun 的 COM-08589）。

### 2. 操作方法

- (1) 用跳线将 Arduino 的 5 V 电源及地接到面包板一侧的电源及地上（图 6.29）。

在面包板的另一侧，将9V电池接至电源及地。确保面包板上的地是相通的。

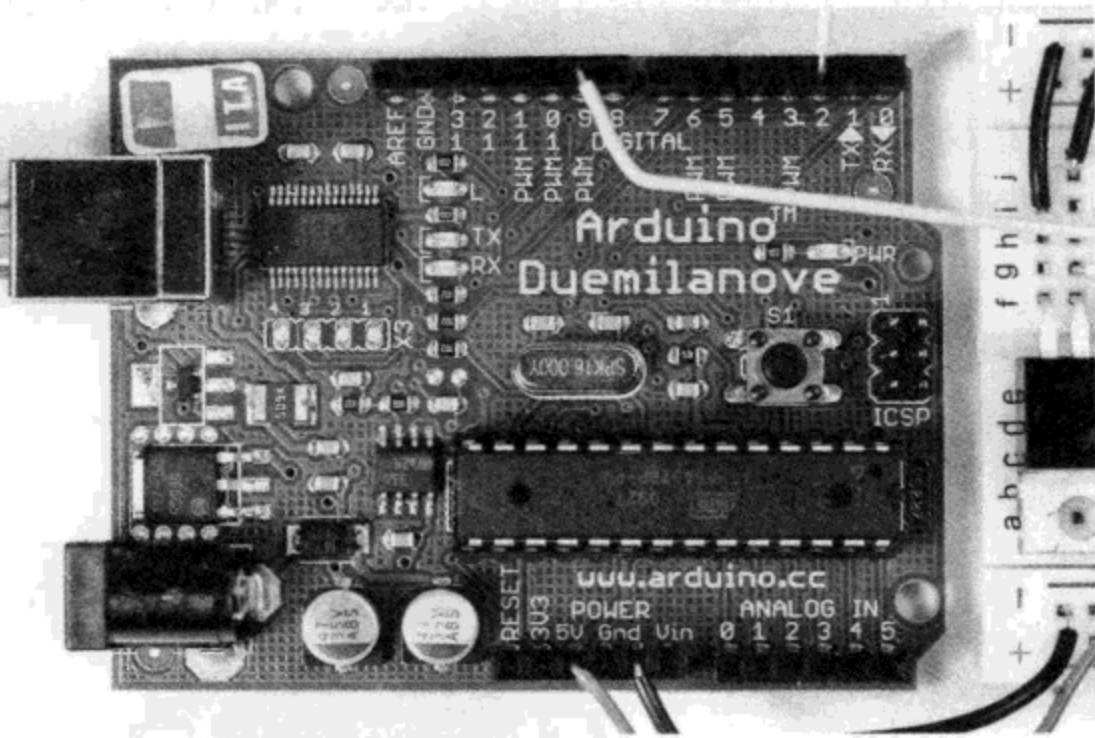


图6.29 给Arduino供电

(2) 如图 6.30 所示，将三极管插到面包板上，三极管的 3 个引脚插在不同的行。将三极管的发射极接到面包板的地。

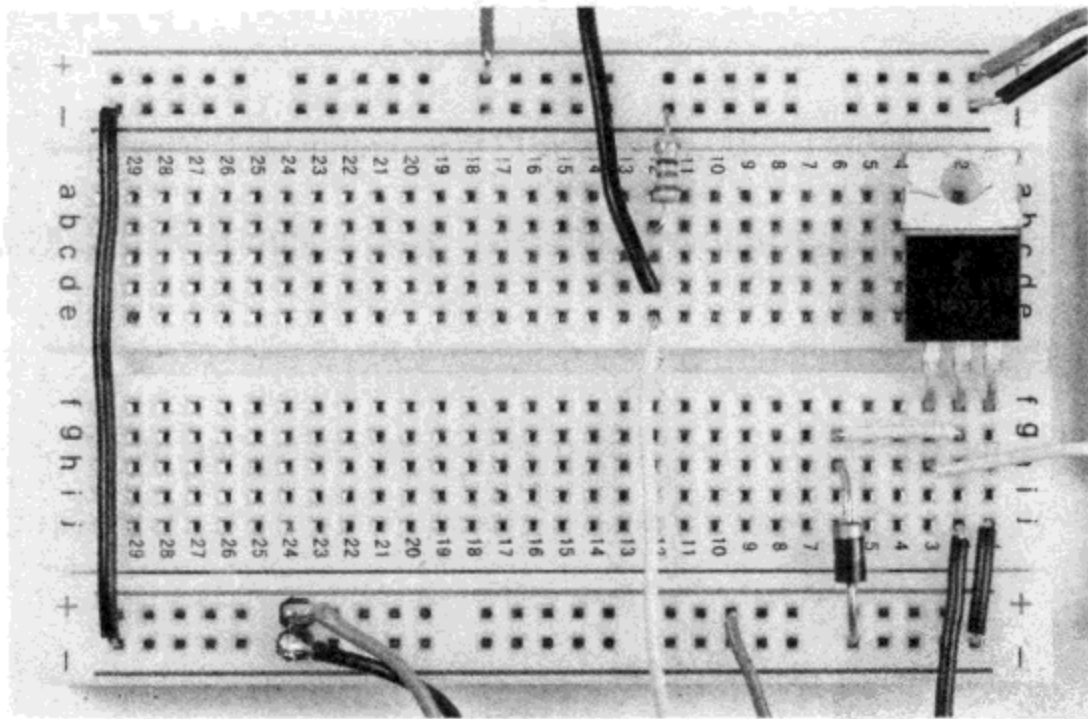


图 6.30 接三极管电路

(3) 将 Arduino 的引脚 9 接到三极管的基极。

(4) 将三极管的集电极经过二极管接地。确保二极管的方向准确，有银色带的一端靠近面包板的中间。

**注意** 二极管是单向导电的，这样接会确保电流只向一个方向流动（在此例中，从9V电源流向集电极）。当电机关断的时候，这个二极管会保护 TIP120



三极管不受电机线圈产生的反向电压的冲击。

(5) 将电机的一个引脚接到面包板上三极管的集电极，另一个引脚接到 9 V 电源上。

(6) 将拨动开关放在面包板另一侧（在关的位置），用一根信号线将开关的其中一个引脚接到 Arduino 的引脚 2。同时，这个引脚也接一个 220 k $\Omega$  的电阻。将开关的另一个引脚直接接到面包板的电源列。接好的电路应如图 6.31 所示。

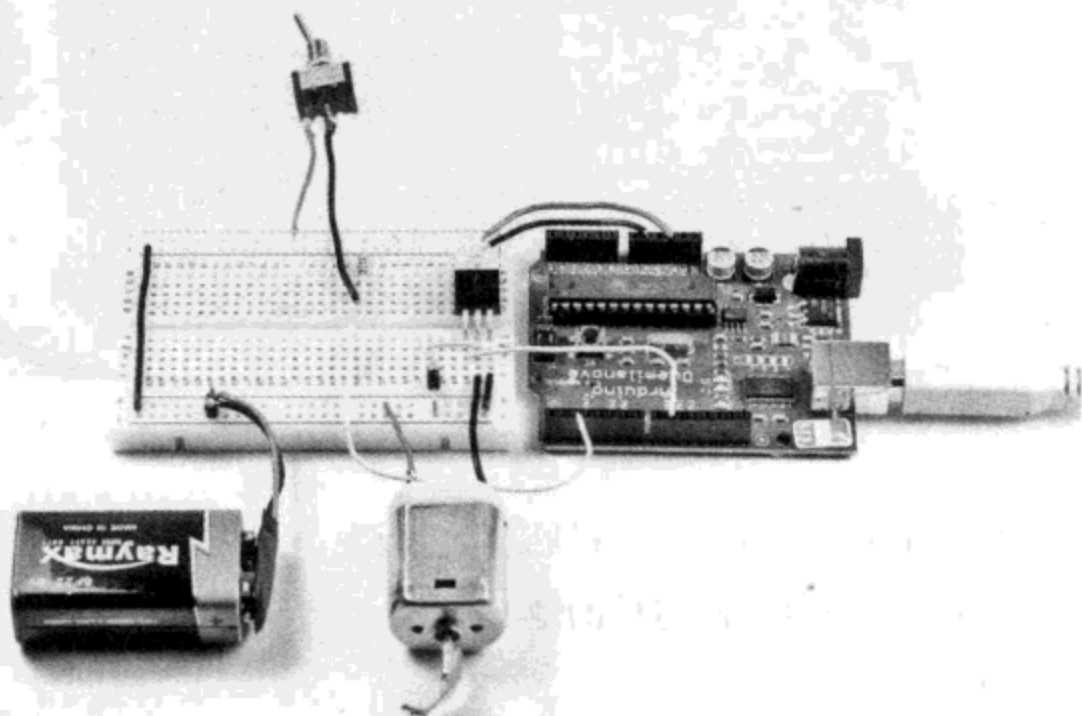


图6.31 用三极管驱动电机的Arduino系统的接法

(7) 打开电脑上的 Arduino 应用程序。输入下面的代码并根据需要进行修改，然后下载到 Arduino 中。

/\* 用开关输入一个信号，通过 Arduino 来控制电机

摘自 Stina Marie Hasse Jorgensen, Sam Galison 和 Dustyn Roberts 于 2010 年上传到 <http://itp.nyu.edu/physcomp/Tutorials/HighCurrentLoads> 网页上的代码 \*/

```
const int transistorPin = 9; // 接三极管基极
const int switchPin = 2; // 接开关
void setup ()
{
  pinMode (switchPin, INPUT); // 将开关设为输入
  pinMode (transistorPin, OUTPUT); // 将三极管引脚设为输出
}
void loop ()
{
```

```

if (digitalRead (switchPin) == HIGH) // 如果开关闭合 (HIGH) ...
{
    digitalWrite (transistorPin, HIGH); // 电机转 (HIGH)
}
else if (digitalRead (switchPin) == LOW) // 如果开关断开 (LOW) ...
{
    digitalWrite (transistorPin, LOW); // 电机停 (LOW)
}
}

```

(8) 拨动开关，看看电机是如何工作的。断开开关，电机停。开关电机的信号从开关流向 Arduino，然后流向三极管的基极，使 9 V 电源的电流经过三极管流过电机。

(9) 现在电机已经可以用三极管控制了，接下来介绍电机的速度控制。你可能已经注意到 Arduino 板上有几个数字量输入引脚旁标着“PWM”。这几个引脚专门识别用 analogWrite 指令编写的 PWM 信号。

/\* 用 Arduino 内置的 PWM 代码来控制电机的转速

摘自 Stina Marie Hasse Jorgensen, Sam Galison 和 Dustyn Roberts 于 2010 年上传到 <http://arduino.cc/en/Tutorial/PWM> 网页上的代码。\*/

```
const int transistorPin = 9; // 接三极管基极
```

```
const int switchPin = 2; // 接开关
```

```
void setup ()
```

```
{
    pinMode (switchPin, INPUT); // 将开关设为输入
```

```
    pinMode (transistorPin, OUTPUT); // 将三极管设为输出
```

```
}
```

```
void loop ()
```

```
{
```

```
    if (digitalRead (switchPin) == HIGH) // 开关闭合 (HIGH) ...
```

```
    {
```

```
        for (int i=0; i <= 255; i++) // 缓慢提速
```

```
        {
```

```
            analogWrite (transistorPin, i); // 将 i 的值送入三极管
```

```
            delay (10);
```

```
        }
```

```
    }
```

```
}
```

```

delay (500); // 等待 0.5s
for (int j = 255; j >= 1; j--) // 缓慢降速
{
    analogWrite (transistorPin, j);
    delay (10);
}
delay (500); // 等待 0.5s
} //if 语句结束
else if (digitalRead (switchPin) == LOW) // 如果开关关断 (LOW) ...
{
    digitalWrite (transistorPin, LOW); // 电机停 (LOW)
}
} // 循环结束

```

(10) 开关闭合时, 电机会缓慢启动, 加速, 然后再降速。这个过程会一直重复, 直到关断开关。

### Arduino 扩展

如果要控制电机速度和方向, 可以找与 Arduino 配套的现成模块来做这项复杂的工作。这些模块集成了本章后半部分的“电机控制的提示与技巧”中的许多功能, 让我们工作起来更轻松。这些模块需要额外付费, 不过还是很值得的。比如, SparkFun 的 ROB-09670 就是一个内置 H 桥的电机驱动模块, 它还有其他的一些功能, 如方向指示 LED。

SparkFun 也提供数字 PWM 电机速度控制器 (ROB-09668), 这个模块可使电机在转矩不变的前提下, 用 PWM 信号控制电机的速度。Adafruit Industries ([www.adafruit.com](http://www.adafruit.com)) 也提供可连接 Arduino 的直流电机、步进电机、舵机接头, 让我们干起活来更方便。你只需要将接头插入已有的 Arduino 板, 将电机的连接线接到正确的接头, 下载这个库, 复制几行代码就可以了。这些套件并没有连接好, 需要做一些焊接才可以使用。不过还好, 网站上有特别详细的使用指南。

#### 6.4.4 模型舵机的控制

所有的舵机都有内置电路。每个舵机有 3 根线, 电源线、信号线和地线。将一根线接地 (通常是黑色的线), 一根线接电机电压范围内的电源 (通常是红色的线), 另外一根接能发出脉冲信号的接头上 (通常是黄色的线)。这个信号就是所谓的脉冲比例调节信号 (PPM)<sup>[8]</sup>, 也叫脉冲位置调节, 这种信号与 PWM 相似。这就是在图

6.10 当中舵机特征表上部的“控制系统”和“信号要求”表示的内容。

舵机内部的智能电路需要一个周期为 20 ms 或频率为 50 Hz 的脉冲信号。不同的舵机要求的信号不同，不过多数舵机需要一个周期为 20 ms，脉冲宽度为 0.5~2.5 ms 的脉冲信号（图 6.32）。这个信号或者脉冲，就好比使灯亮 0.5~2.5 ms，然后关 20 ms，不断地重复这个周期（图 6.32）。可以用硬件或软件方法来产生一个 PWM 信号。

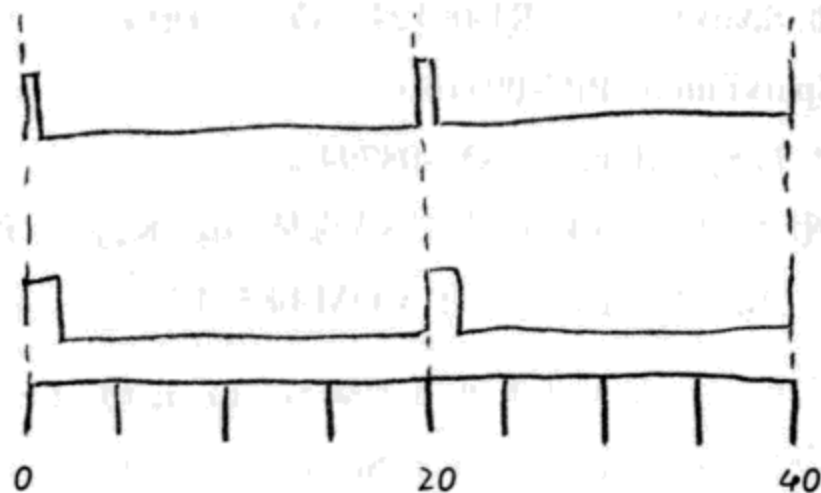


图6.32 PPM信号

**注意** 1 ms（毫秒）包括 1000  $\mu$ s（微秒）。因为 u 看起来像希腊字母  $\mu$ ，而且容易用键盘敲入，所以在数据表上舵机的信号范围经常会标为“500 to 2,500 usec”。

### 1. 普通模型舵机

用脉冲信号控制舵机的旋转方向。图 6.10 所示参数说明舵机的脉冲宽度为 600~2 400  $\mu$ s，1500  $\mu$ s 的低电平时间。舵机内部的电路知道周期为 20 ms，脉宽为 600  $\mu$ s 的信号是让它转动到一个极限位置（0°），脉宽为 2400  $\mu$ s 的信号是让它转动到另一个极限位置（180°）。600 ~ 2400  $\mu$ s 之间的脉宽与舵机的转角 0°~180° 成正比。如果要使舵机的转角不变，就需要不停地发出同样的脉冲信号。

舵机中接在齿轮减速器上的电位器会告诉你轴所在的精确位置。这是一个闭环的反馈。可以用软件或硬件的方法产生这样一个信号，或用一个遥控发射器（如模型飞机上用的遥控器）发出一个信号给接在电机上的接收器，来控制电机的转角。

## 项目 6.8 控制一个普通舵机

本例像项目 6.7 一样，用 Arduino 产生一个脉冲信号。但这次的脉冲信号不是控制直流电机的，而是控制舵机的转角<sup>[9]</sup>。这次使用另一个代码库（已经写好的一组代码）。

**注意** 也可以不采用代码库中的代码。这个库中的代码较多，不过控制功能也很多。更多内容可看 <http://itp.nyu.edu/physcomp/Labs/Servo> 的 4.1 节“使用

脉冲方法”。

### 1. 材料清单

- (1) 带 USB 线的 Arduino Duemilanove 板。
- (2) 舵机 (此处用的是 Hobbico 的 CS-60)。
- (3) 面包板 (如 All Electronics 的 PB-400)。
- (4) 跳线 (如 SparkFun 的 PRT-00124) 或自制跳线 (见项目 6.4)。
- (5) 插针 (SparkFun 的 PRT-00116)。
- (6) 剥线钳 (如 SparkFun 的 TOL-08794)。
- (7) 光敏电阻 (10 ~100 k $\Omega$ , 此处用的是 Digi-Key 的 PDV-P9007-ND) 及电阻 (10 k $\Omega$ , 此处用的是 SparkFun 的 COM-08374)。

**注意** 也可用 1~10 k $\Omega$  光敏电阻 (如 SparkFun 的 SEN-09088), 不过为了得到更好的信号, 就得用 1 k $\Omega$  电阻 (如 SparkFun 的 COM-08980) 了。

### 2. 操作方法

(1) 用跳线将 Arduino 的 5 V 电源及地接到面包板一侧的电源及地上 (图 6.29)。用跳线将这个电源和地接到面包板的另一侧的电源及地上。

(2) 用手将 3 pin 插针的 3 个引脚分开, 并插入面包板上不同的行, 再将舵机的接头插至插针 (图 6.33)。

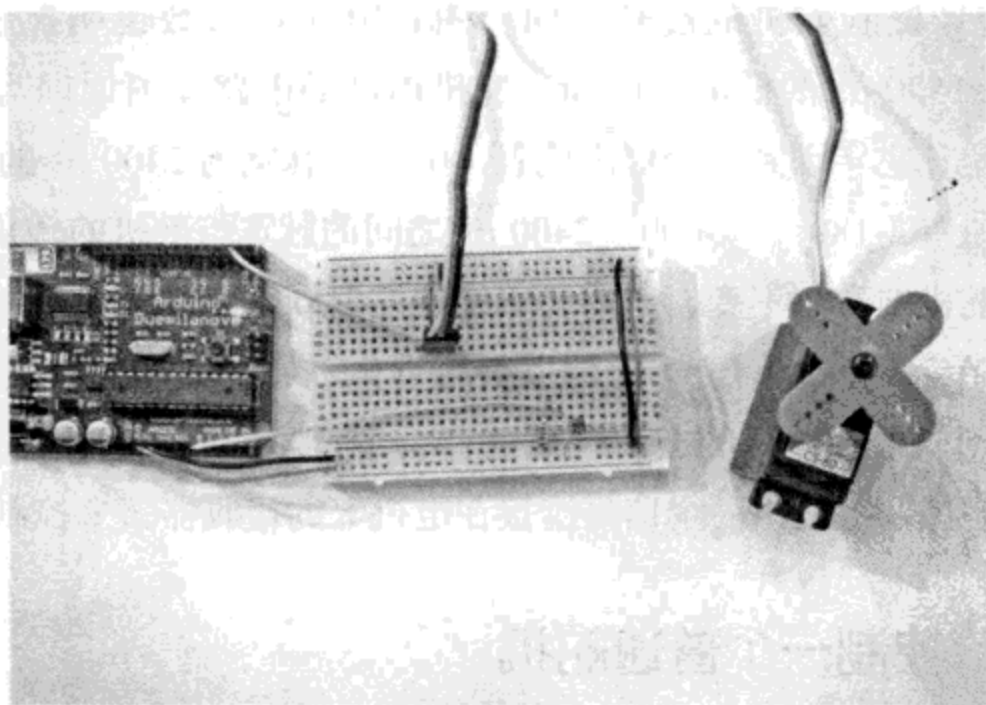


图6.33 普通舵机控制电路

(3) 将舵机的红线接 5V 电源, 黑线接地, 黄线接 Arduino 的数字引脚 2。有时第 3 根线可能为绿色或橘黄色, 不管怎么样, 这根线的颜色肯定不是红色 (电源线) 或黑色 (地线)。

(4) 将光敏电阻一个引脚接入电源。

(5) 将另外一个引脚接到面包板上的一个空行，并将这行通过电阻接地。同时，将这行接到 Arduino 的模拟引脚 0 上。接好的电路应如图 6.33 所示。

**注意** 因为光敏电阻不是一个像开关一样只有开关信号的器件，所以要接模拟量管脚。实际上光敏电阻给出的是一个 0~1023 之间的值（像其他模拟量传感器一样），这个值取决于照在光敏电阻上的光的强度。

(6) 打开 Arduino 的软件，输入下面的代码，然后修改这些代码并下载到 Arduino 板。

/\* 用 Arduino 的舵机库代码来控制舵机转动

摘自 Stina Marie Hasse Jorgensen 和 Dustyn Roberts 于 2010 年上传到 <http://itp.nyu.edu/physcomp/Labs/Servo> 网页上的代码 \*/

```
#include <Servo.h>           // 包含舵机程序库
Servo servoMotor;           // 创建一个舵机控制的例子
int analogPin = 0;           // 模拟引脚
int servoPin = 2;           // 舵机黄线接的数字引脚
int analogValue = 0;         // 光敏电阻给出的模拟量的值
void setup()
{
  servoMotor.attach(servoPin); // 将舵机接至 Arduino 的引脚 2
}
void loop()
{
  // 从光敏电阻上读取模拟量的值（范围 0~1023）
  analogValue = analogRead(analogPin);
  // 光敏电阻的值（1~1023）对应舵机的转角（0~179）
  analogValue = map(analogValue, 0, 1023, 0, 179);
  // 写入新的模拟量的值控制舵机的转角
  servoMotor.write(analogValue);
  delay(15); // 在读新的模拟量值之前，延时等待一段时间，使舵机到达指定的位置。
}
```

(7) 试着用手指挡住光敏电阻，然后再移开，这样来控制舵机的转动。舵机应当来回转，转角的大小取决于房间内的光强。用这种方式控制舵机时，舵机可能不会达到极限角度。

## 2. 360° 舵机

如果你有一个 360° 的舵机（买的或由一个普通舵机改制的），就不能再控制位置了。相反，你给的信号能控制舵机速度。

空载下舵机的最大速度在参数表中已经给出。如 Hitec 的 HS-311 舵机，速度为  $60^\circ / 0.15 \text{ s}$ 。1 圈为  $360^\circ$ ，所以改装完的 HS-311 舵机在  $0.15 \text{ s} \times 6 = 0.9 \text{ s}$  内能转 1 整圈。因为 1 min 有 60 s，所以用 60 s 除以 0.9 s 就得到了舵机的转速：67 r/min。

## 6.4.5 步进电机控制

步进电机主要要两种：单极和双极。外壳上的接线有 4~8 根，接线头的颜色没有统一的标准。用特定的相序通过这些线给电机的不同极供电。通电相序决定了步进电机的转动形式（正反转，每次转一个还是半个步距角等）。单极与双极步进电机都可以用相同的相序来控制，只是接线不同而已。

### 1. 单极步进电机

单极或 4 相步进电机有 5、6 根，甚至是 8 根（这种电机很少）接线头，有 4 个线圈线在电机的外壳内（因此称为“4 相电机”）。单极步进电机用相同的极性或相同的电流方向给所有的线圈供电，因此称为“单极”。

5 线步进电机与 6 线步进电机相同，不同的是中间抽头（5 和 6）。图 6.34 所示的 6 线步进电机是最常见的，可能就是你在打印机里找到的电机。如果你碰到了 8 线电机，它实际上有 4 个线圈，每个线圈有 2 根接线。它们可以像单极或双极步进电机那样接线。

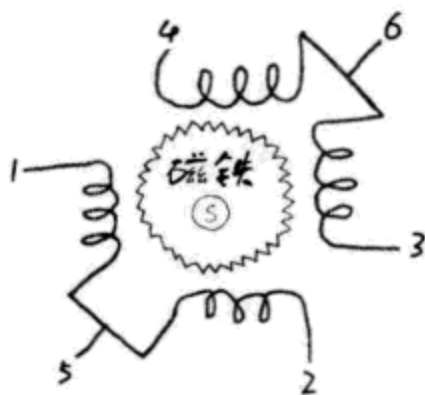


图6.34 6线单极步进电机示意图

**注意** 6 线的单极步进电机就像双极步进电机一样，只不过每组线圈都有 1 个中间抽头。如果厂家是这样设计的，它也可以像双极步进电机一样工作。

步进电机有很多种控制方法。为了减少搭面包板与编程的时间，最好用现成的可正确给每个线圈提供电流的驱动模块，此处有一些建议。

(1) SparkFun 的 EasyDriver (ROB-09402) 可用于驱动 6 线或 8 线单极步进电机, 这个模块可以与任何 0~5 V 脉冲信号 (如手头已有的 Arduino 板) 配合使用。

(2) 也可以用 Arduino 直接驱动步进电机, 但编程量很大, 而且需要额外的芯片与面包板。还好, 现在大部分工作已经完成——在 [www.arduino.cc/en/Tutorial/Stepper](http://www.arduino.cc/en/Tutorial/Stepper) 上查一下 Arduino 的步进电机控制指南与程序库。此代码对于单极与双极步进电机同样适用。

(3) 还可以选用 Arduino 的 Adafruit 实业公司 ([www.adafruit.com](http://www.adafruit.com)) 的直流电机 / 步进电机 / 舵机扩展板。只需要将扩展板插在 Arduino 上, 将步进电机的线接在正确的接点, 下载步进电机控制库, 复制几行程序代码就可以了。这个扩展板可用于 5 线、6 线单极或双极步进电机。

## 2. 双极步进电机

双极或 2 相步进电机有 4 根接线 (见图 6.35), 在外壳内有 2 个独立的线圈 (因此称为“2 相”)。首先给线圈供一个方向的电流, 然后供另一个方向的电流 (所以称为“双极”)。双极步进电机的转矩比同样尺寸的单极步进电机要大。可以用与单极步进电机相同的器件来驱动双极步进电机: 如 SparkFun 的 EasyDriver、带步进电机控制程序库的 Arduino 系统, 面包板、Adafruit 电机扩展板等许多器件。



图6.35 双极步进电机的示意图

## 项目 6.9 双极步进电机的控制

这个项目中, 我们将用 SparkFun 的 EasyDriver 来控制双极步进电机。

### 1. 材料清单

- (1) 带 USB 线的 Arduino 板。
- (2) 面包板 (如 All Electronics 的 PB-400)。
- (3) 跳线 (如 SparkFun 的 PRT-00124) 或自制跳线 (见项目 6.4)。
- (4) 步进电机 (SparkFun 的 ROB-09238)。
- (5) EasyDriver (SparkFun 的 ROB-09402)。
- (6) 插针 (SparkFun 的 PRT-00116)。
- (7) 剥线钳 (如 SparkFun 的 TOL-08794)。

### 2. 操作方法:

- (1) 取 2 组 4 pin、一组 3 pin、一组 2 pin 的插针。
- (2) 将插针焊在 EasyDriver 上, 如图 6.36 所示。4 pin 插针焊在 4 个电机孔上, 3 pin 插针分别焊在 GND、STEP、DIR 这 3 个孔上, 2 pin 插针分别焊在



GND、M+ 这 2 个孔上。

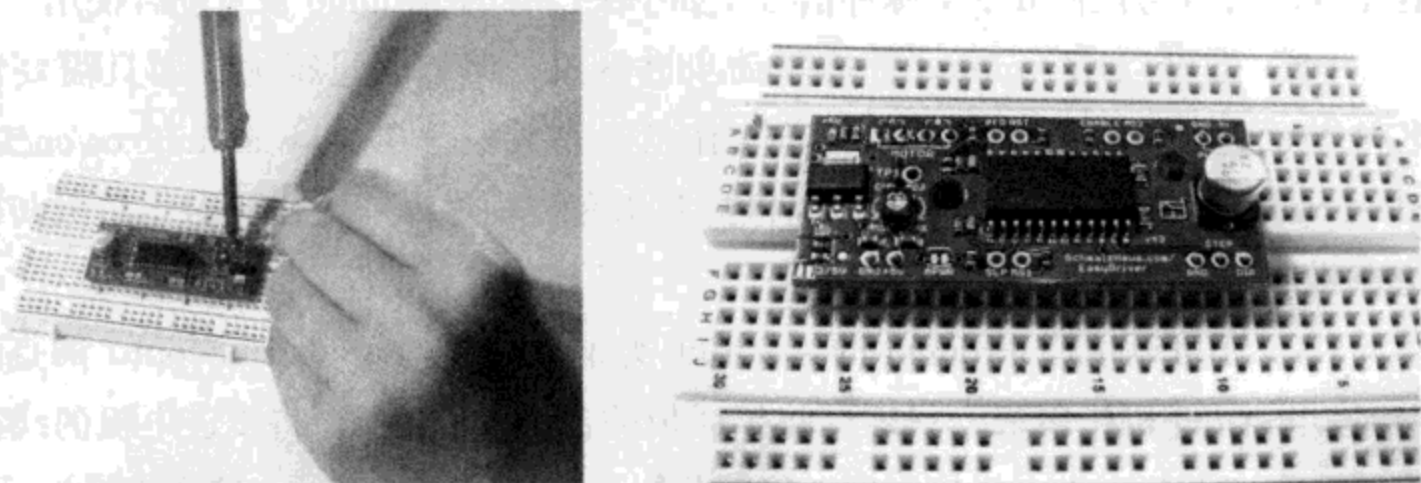


图6.36 将排针焊在EasyDriver上

注意：将插针比较长的一端插在面包板上，将 EasyDriver 板插入插针比较短的一端，边加焊锡边加热焊孔。小心不要加太多焊锡，以免针脚之间互相连在一起。

(3) 取另外一组 4 pin 插针，将它们焊在步进电机的线上，如图 7.37 所示。确保红、绿线在一侧，蓝、黄线在另一侧。



图6.37 将插针焊在步进电机接线头上

(4) 将步进电机插针插入面包板，与 EasyDriver 的电机引脚分别通过面包板连接。红、绿线应当接 A 组引脚，蓝、黄线应当接 B 组引脚。

(5) 从 Arduino 上引一根地线与 EasyDriver 的 GND 连接。

(6) 将 Arduino 的引脚 8 接 EasyDriver 的 DIR。

(7) 将 Arduino 的引脚 9 接 EasyDriver 的 STEP。

(8) 将 12 V 电源分别接在 EasyDriver 的 M+ 和 GND 上。本例中用了一个台式电源，电压设为 12 V（其他给面包板供电的方式可参考附录）。接好的电路应如图 6.38 所示。

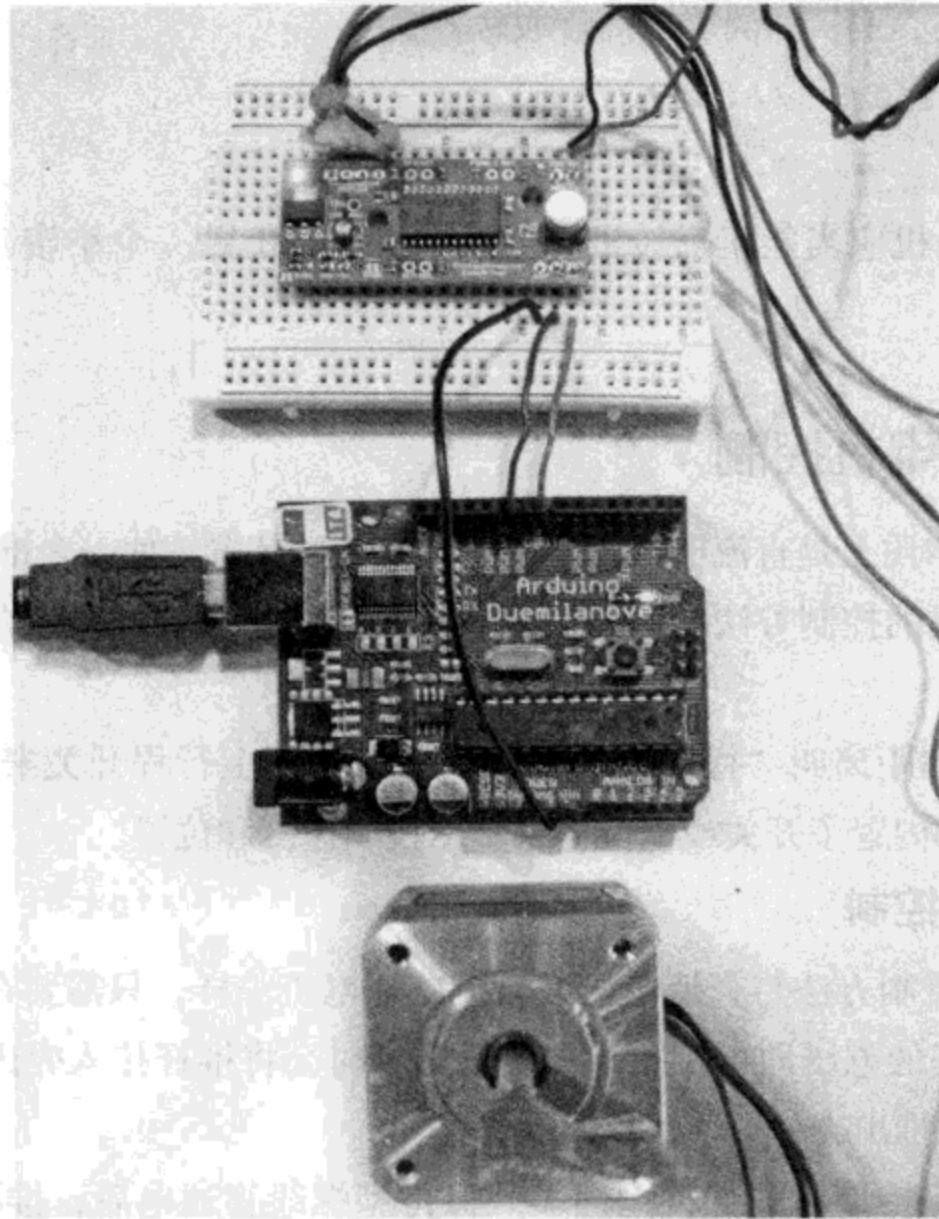


图6.38 接完所有线的步进电机电路

(9) 输入下面的代码，按需要修改后下载到 Arduino 板。

/\* 此代码可以通过 SparkFun 的 EasyDriver 板来驱动步进电机转动，由 Ben Leduc-Mills 和 Dustyn Roberts 于 2010 年 6 月 1 日编写 \*/

```
#include <Stepper.h> // 导入步进电机程序库
```

```
#define STEPS 200 // 值应当等于电机转动的步数
```

```
Stepper stepper (STEPS, 8, 9); // 接 Arduino 数字引脚 8 (DIR) 和 9 (STEP)
```

```
void setup ()
```

```
{
  stepper.setSpeed (200); // 设定步进电机的速度，单位为 r/min
}
```

```
void loop ()
```

```
  stepper.step (6400); // 转 1 整圈
```

```
  delay (100); // 延时 1/10s
```

```
stepper.step(-6400); // 反转1整圈  
delay(100); // 延时1/10s  
}
```

(10) 电机应当能正反转了。可在电机的轴上贴一个小旗，这样可看得更清楚些。

## 6.4.6 直线电机控制

直线电机本质上是直流电机配合一个丝杠传动装置，使一个推杆产生往复运动，所以与直流电机的控制方法相同——只要用两根线接入额定电压范围内的一个电压即可。

推杆的伸缩距离叫“行程”。可以用 Arduino 加上行程开关来限制推杆的行程。多数直线电机都内置了开关或电位器来帮助控制速度和位置。

### 螺线管的控制

螺线管的控制方法与直流电机或直流减速电机一样，只需要在两根接头加上电流足够大的适当的电压即可。拉式螺线管通电时会把推杆拉入壳内，而推式螺线管通电时会把推杆推出壳外。

螺线管分保持型与非保持型两类。保持型螺线管通电后，推杆会伸出或缩回，只要通电，推杆的位置就会保持不动。而非保持性螺线管通电后，推杆只能保持一个设定的时间（有时叫最大工作时间），而断电后推杆不会自动返回初始位置，通常由一个弹簧将推杆推回初始位置。

## 6.4.7 电机控制提示及技巧

开关电机或切换电机转动方向时，会在电机上产生机械应力；在连接线、电路或电池上产生电气应力，电流会反向流过电机，即所谓的“反向电压”，产生反向电动势（EMF），这个电动势是有害的<sup>[2]</sup>。机械和电气应力会综合影响电机的使用寿命，对接在电路上的控制元件产生微小的破坏。前面章节中提到的许多现成的模块就通过缓慢加速、调节电压、均衡电流的方法限制了这种应力，延长了电机的使用寿命。记得使用下面的一些有用提示与技巧吧。

### 1. 超有用的二极管

当直流电机切换方向或启动螺线管时，会产生一种对电路中其他电子元件有害的电流冲击。此时，电流会向无用的方向流动。二极管是一种只能让电流单向流动的电子元件。它会通过使电流只向需要的方向流动的方式来保护电路。如图 6.39 所示，只需将二极管的连接方向与需要的电流方向一致即可。一定要确保二极管的方

向正确。

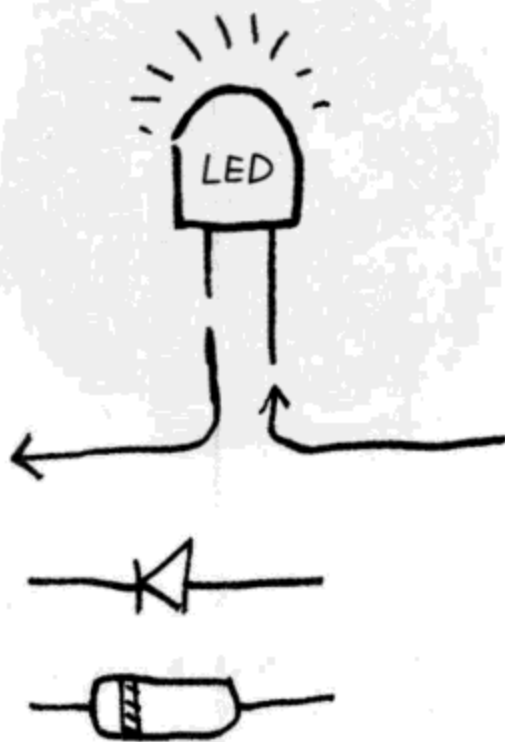


图6.39 二极管与LED在电路中的接法

发光二极管，简称LED，当电流流过时会发光。与所有的二极管一样，LED的方向要正确，否则它们就像一堵不开门的墙一样阻止电流流过。不过还好，多数LED的引脚都是一个长（接电源），一个短（接地），便于识别。

LED接地引脚的侧面通常是平的，所以即使把LED的引脚剪短了，也可识别哪个引脚接地。将LED接在电路中，电流就会从长引脚流向短引脚。

LED本身不会限制电压，所以在将LED接入电源之前，应该先串接一个电阻，否则LED会烧坏。对于多数LED来说，如果使用5V的电压，在电路中用一个220 k $\Omega$ 的电阻就可以了。用来保护LED的电阻的阻值与电压是成正比的。

## 2. 去耦电容

可以在电机电路中用电容来防止启动电机或切换方向时产生的电流冲击，这种电容叫“去耦电容”。

为了安全起见，在电机工作前，先在电机的2个引脚之间焊一个电容。也可以将电容从电机引脚焊到电机的外壳上（图6.40）。由于不能确定电流的方向，所以这种情况下一定用的是陶瓷电容，而非电解电容。这样电机在正反转时，我们就不用担心电机被烧了。

接去耦电容是一种在电路中防止冲击电流的简便方法，这样就可以不用之前讲过的那种现成的智能模块。一般来说，在直流电机上接一个0.1  $\mu\text{F}$ 的电容就可以防止冲击电流。

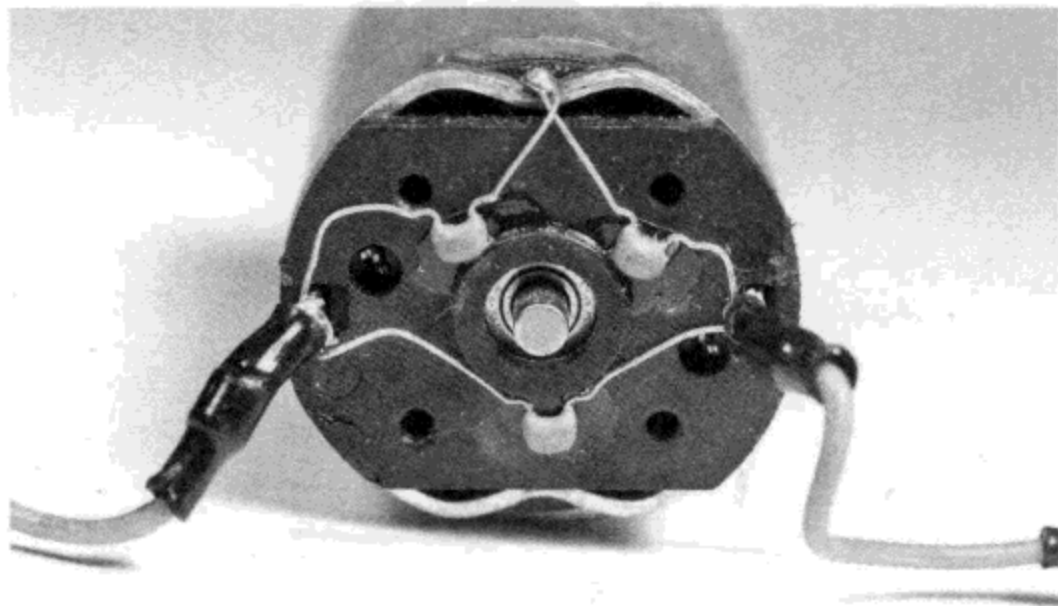


图6.40 焊在直流电机接线头上的去耦电容

### 3. 逻辑电路电源与电机电源要分开设置

最好将电机的电源与逻辑电路的电源（面包板或 Arduino 的电源）分开设置，这样做的原因有以下几个。

（1）多数控制器（如 Arduino 控制板）和芯片（如 555 定时芯片及 H 桥）的工作电压为 5 V，而电机的电压多数情况下不是 5 V。如果用同一组电源给 5 V 的 Arduino 控制板和 12 V 电机供电，其中一路会浪费很多电能或根本不工作。将电源分开设置就意味着，可为每一种回路提供合适的电压。

（2）如果电机比 Arduino 安全工作所需的电流与电压大，就一定得接一个独立的电源。

（3）即使电路或 Arduino 可提供一个小电机所需的电压或电流，也会在开关或切换方向时产生干扰。虽然二极管或去耦电容会起到抑制作用，但最好还是将电源分开设置，避免问题发生。

**注意** 即使控制器的电源与电机电源分开设置，它们也必须共地。为了使逻辑信号能有效地控制电机，最好使逻辑电路电源与电机电源的地保持同一个水平。

### 4. 继电器与三极管

三极管与继电器的作用就如电子开关。机械开关的状态由手指来控制，三极管与继电器的开关则由电信号来控制。在控制电机时，流入控制电路或 Arduino（Duemilanove 模块为 500 mA）的电流大多与电机需要的电流大小不同，所以需要用到三极管与继电器。

用三极管或继电器，仍然需要给电机提供独立电源，需要电机工作时，让三极管或继电器工作就可以了。

TIP120 常用在这种电路中，SparkFun 的 COM-00100 是一种可直接插在面包板上的易用型继电器。这个继电器可用 Arduino 的 5 V/12 mA 的信号控制一个 12 V/5 A 的电机工作。

## 6.5 无电机驱动

虽然电机是最常见的执行器，还是有其他几种驱动方式值得一提，包括流体压力控制与人造肌肉控制。

### 6.5.1 流体压力

第 5 章提到过流体控制，所以应该知道流体是任何一种能流动的物质，如空气、水或枫糖浆。流体的形状取决于容器的形状，因此它们可在各个方向上对容器施加压力。压力大小取决于流体的深度及重量：

$$\text{压力} = \text{深度} \times \text{密度} \times \text{重力加速度}$$

黏度用来表示流体的稠度。水的黏度低，枫糖浆的黏度为中等，橡皮泥的黏度高。

液压流体和压力氮可用在一些盖子、窗户和行李箱的气压弹簧（如 McMaster 9416K14）上。辅助闭合的气压弹簧常用于防止屏蔽门对人产生猛烈撞击。这种气压弹簧只能在一个方向产生流畅的运动，却会阻止另外一个方向的运动，在助力行程控制中很有用。压力气体可发挥这种功能，而液体则可以防止推杆在极限位置上产生撞击。

#### 1. 液 压

液压用在用流体驱动的机构中。液体是不可压缩的，所以受压时会有反作用力。液压缸通常在高压下工作（一般为 1000 lbf/in<sup>2</sup> 或更高），用于锄耕机或工程机械。

使用液压有点像使用交流电源。在使用前要确定需要做什么，否则结果可能是致命的。液压设备一般会非常昂贵。本书中所涉及的项目不需要液压系统产生的高压。

#### 2. 气 动

气动用在用气体驱动的机构中。气体是可压缩的，可存储压缩它们时所用的能量，以备后用。气动的压力一般都比液压小（约为 100 lbf/in<sup>2</sup>），所以在使用电机比较危险的场合（如地下矿井），或不能用电机的情况下（如牙科工具），气动就会更安全。气动钻或钉枪在 DIY 一个项目时也会经常用到。

产生压力气体的廉价气源有空气刷套件、自行车轮胎泵、汽车轮胎泵，以及便携式的台式压缩机。压缩机需要通电才能压缩空气。Black & Decker 就提供小型的便携式压缩机 (Model ASI300)，做项目时可能会用得到。

空气肌肉是应用压缩气体的另外一种技术。可以把这种东西看作是小时候玩的密封版的“中国手指套”。给网状排列的软管充气后，会发生整体收缩。www.imagesco.com/catalog/airmuscle/AirMuscle.html 上的这种空气肌肉，充气时的体积为不充气时的 75%。这种肌肉需要一个至少能产生 50 lbf/in<sup>2</sup> 的气泵，或一个小压缩机，或自行车轮胎泵才能工作。

## 6.5.2 人造肌肉

有两种材料通电时体积会缩小：电活性聚合物与镍钛合金。由于这种材料可以模仿人的肌肉运动，所以两种技术一般都称为“人造肌肉”或“肌肉电线”。因为这种材料体积小，比电机轻，容易产生更类似人的动作或运动，所以对于工程师与设计人员来说，这种技术很有吸引力。不过由于需要大电流，所以这种技术还不成熟，很难用于实际。

### 1. 形状记忆合金

当加热的温度超过一定值时，用镍钛合金制成的线可以收缩，而在室温下又可以恢复到原来的长度。由于这种线可以“记住”原来的形状，所以这种效应叫“形状记忆”。这种金属合金就是形状记忆合金 (SMA)。

Dynalloy (www.dynalloy.com) 是生产“柔性合金”的 SMA 主要生产商，这种合金强度很高，可用于驱动机构运动。SparkFun 就从 Miga 购进了一些执行器，如 Miga 的 NanoMuscle (ROB-08782)，可用于产生小的直线运动。

对肌肉电线的主要争议是它只能缩短原来长度的 3%~5%，这就限制了它的实际应用，不过可以用几个 LEGO 零件和一小段 SMA 线做一个尺蠖虫机器人。至于如何用这种肌肉电线做项目，可查看 Roger Gilbertson 的 *Muscle Wires Project Book* (Mondo-Tronics, 2000)。

### 2. 电活性聚合物

电活性聚合物 (EAP) 与 SMA 类似，只不过它所用的材料是塑料而不是金属 (不过现在已经有了金属塑料合成物)。这种材料的伸缩性可达 380%，比镍钛合金大得多。研究人员尝试用这种材料做拳击机器人，甚至控制鱼形的可膨胀飞船，不过这项技术还不成熟，还没有成为主流技术。图 6.41 所示为一个用 EAP 驱动的四指手爪。可在 [www.empa.ch/plugin/template/empa/\\*/74071](http://www.empa.ch/plugin/template/empa/*/74071) 上看到更多有关 EAP 的文章。

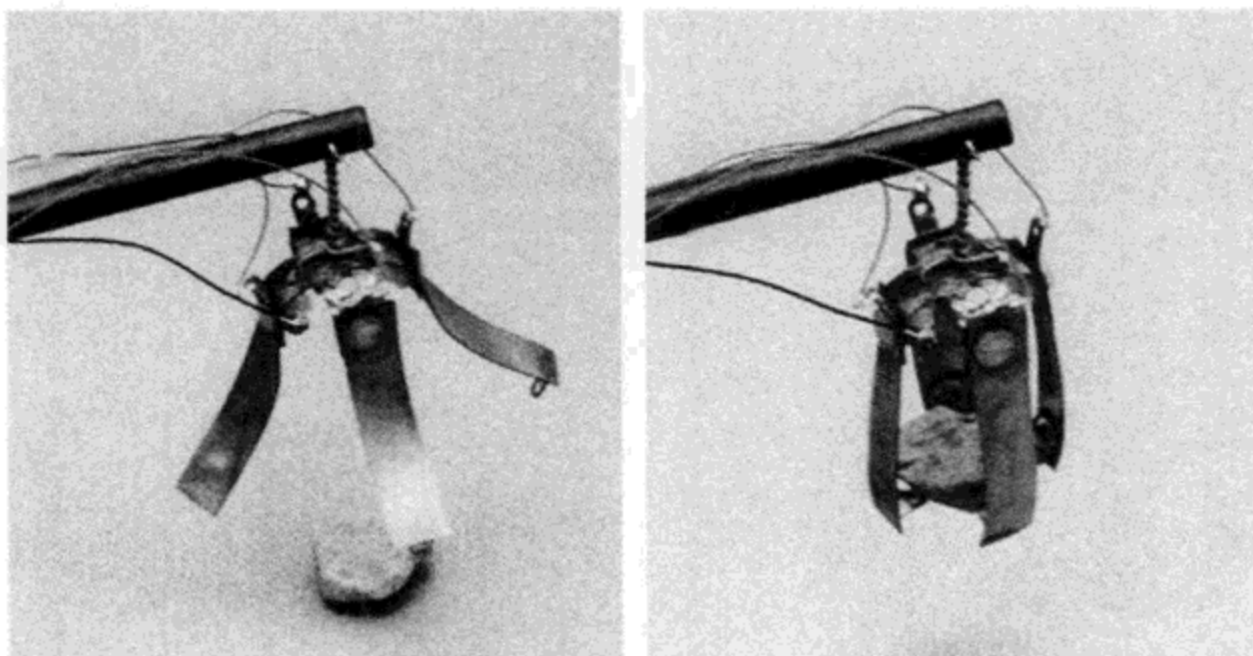


图6.41 EAP驱动的四指手爪  
(所有权：NASA加利福尼亚理工学院喷气推进实验室Yoseph Bar-Cohen)

## 参考资料

- [1] Mike Passaretti, Honeybee Robotics, introduced me to this project.
- [2] Dan O'Sullivan and Tom Igoe, *Physical Computing: Sensing and Controlling the Physical World with Computers* ( Boston: Thomson, 2004 ) .
- [3] Dennis Clark and Michael Owings, *Building Robot Drive Trains* ( New York: McGraw-Hill, 2003 ) .
- [4] Tom Igoe, "DC Motor Control Using an H-Bridge"  
( <http://itp.nyu.edu/p3hyscomp/Labs/DCMotorControl> ) .
- [5] Tom Igoe, "Using a Transistor to Control High Current Loads with an Arduino"  
( <http://itp.nyu.edu/physcomp/Tutorials/HighCurrentLoads> ) .
- [6] Gordon McComb, *The Robot Builder's Bonanza*, ed. Michael Predko ( New York: McGraw-Hill, 2006 ) .
- [7] Tom Igoe, "Components"  
( <http://itp.nyu.edu/physcomp/Labs/Components#toc4> ) .
- [8] Dennis Clark and Michael Owings, *Building Robot Drive Trains* ( New York: McGraw-Hill, 2002 ) .
- [9] Tom Igoe, "Servo Motor Control with an Arduino"  
( <http://itp.nyu.edu/physcomp/Labs/Servo> ) .



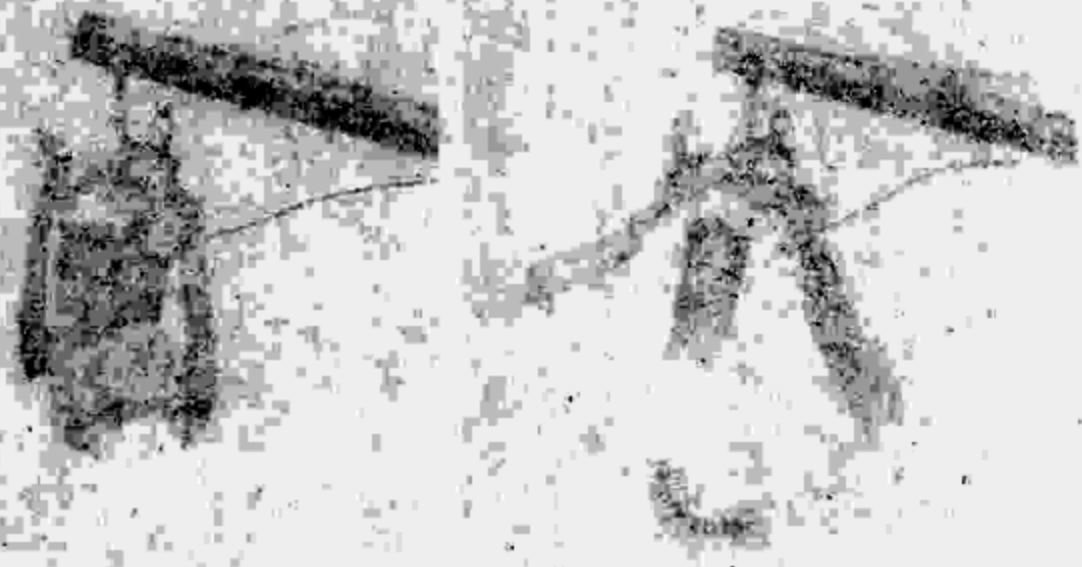


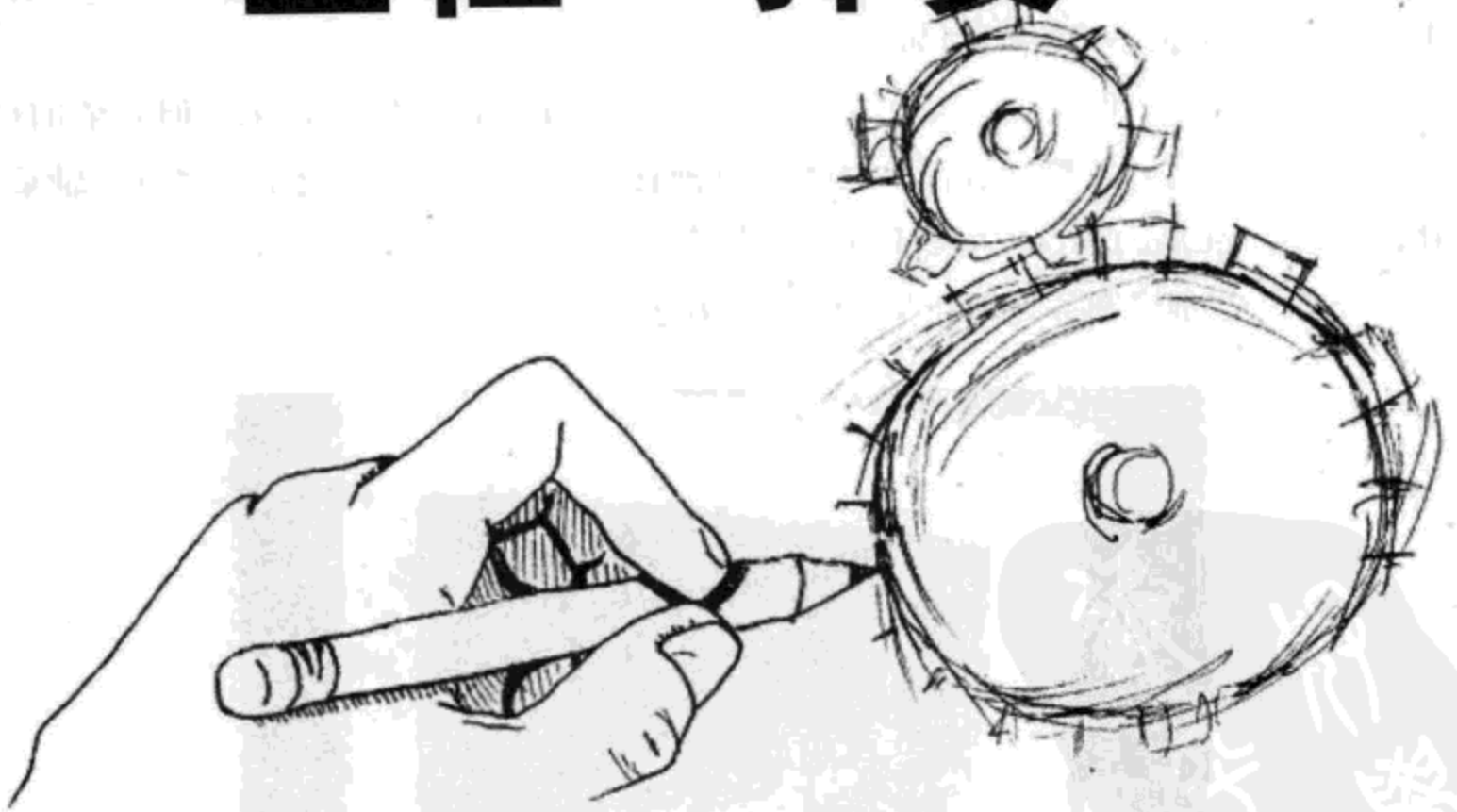
图 11 燕雀 (Cyanus cyaneus) 的脚 (Cyanus cyaneus)

燕雀的脚

The illustration shows two views of the feet of a bird, likely a cyanid (燕雀). The left drawing shows the dorsal view, and the right drawing shows the ventral view. The text below the drawings discusses the structure and function of the feet, mentioning the arrangement of the toes and the webbing. The text is in Chinese and appears to be a scientific description of the bird's feet.

# 第7章

## 传动件：轴承· 联轴器·齿轮· 丝杠·弹簧



机构的传动件是在输入与输出之间用到的所有的零件。输入是能量输入源，可以是手柄，也可以是电机；输出就是需要的运动，可以让机构爬行、旋转或振动。有时需要在电机轴上装上齿轮，或设法减小传动中产生的摩擦。

本章中所提到的零件都是零散的，通过你的创意可将它们组成实际的机构。多数构件都可以在 McMaster 或我提供的供应商那里找到。

## 7.1 轴承与轴套

轴承用在运动件及静止件之间，起支撑和减小摩擦的作用。简单的轴承可以是一块有孔的木头块，也可以是溜冰鞋或溜冰板中的滚珠轴承。电机中也有轴承，用来支撑电机轴，并且通过减小摩擦使电机轴的转动流畅。

根据载荷的类型，轴承可分为如下几类。

(1) 径向轴承：就是在溜冰鞋中用到的那种轴承，用来支撑径向载荷（回顾一下第1章中图1.26的径向和轴向载荷的示意图）。

(2) 推力轴承：用来支撑轴向的载荷。既需支撑你的重量，又需要旋转的吧台凳和吧台椅中用的就是这种轴承。

(3) 滑动轴承，用来减小滑动组件间的摩擦，组件不一定做旋转运动。在文件柜或化妆柜的抽屉两侧有这种轴承。

(4) 轴套：也叫衬套、轴衬、套管，是一种没有转动件的轴承，但它依旧可以减小径向、轴向及滑动载荷的摩擦。可把轴套当做一个没有滚子的“母”轴承。MakerBot CupCake CNC 中就用到了线性轴套（图7.1）。

下面会详细说明各种轴承及它们的使用方法。

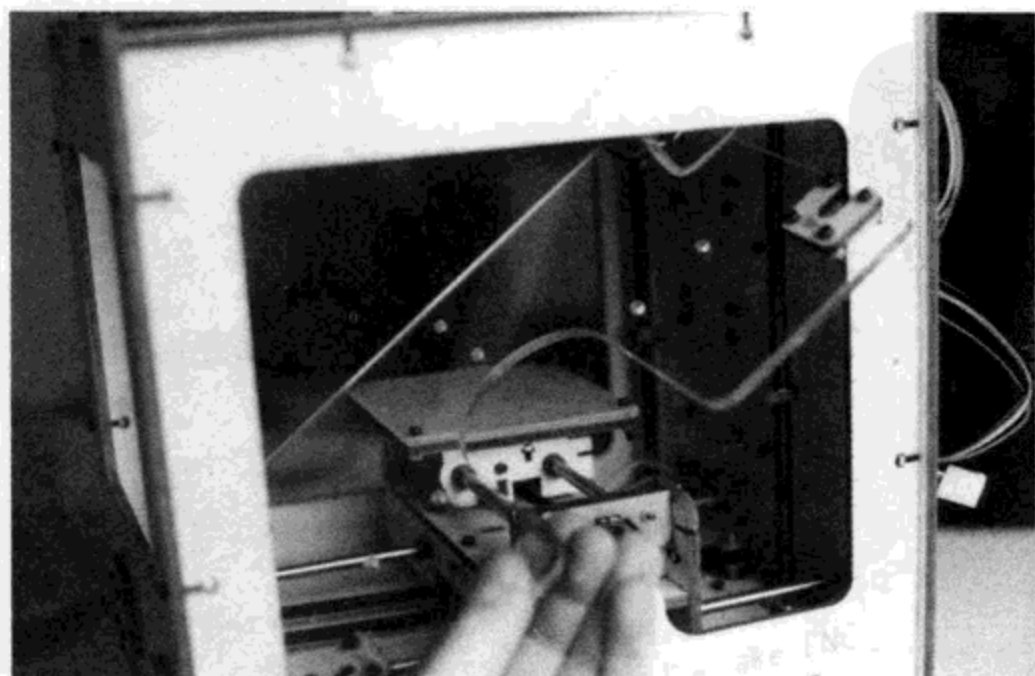


图7.1 MakerBot CupCake CNC上的线性轴套（所有权：MakerBot 实业公司）

## 7.1.1 径向轴承

径向轴承的作用是支撑一个旋转轴或杆，即使像齿轮和皮带轮这样的物体给轴施加了载荷，有了径向轴承，这些轴的转动也会很流畅。有些径向轴承内有用于减少摩擦的滚动体。当滚动体是球时，称轴承为滚珠轴承；当滚子是长圆柱形滚柱或滚针时，称轴承为滚柱轴承（图 7.2）。

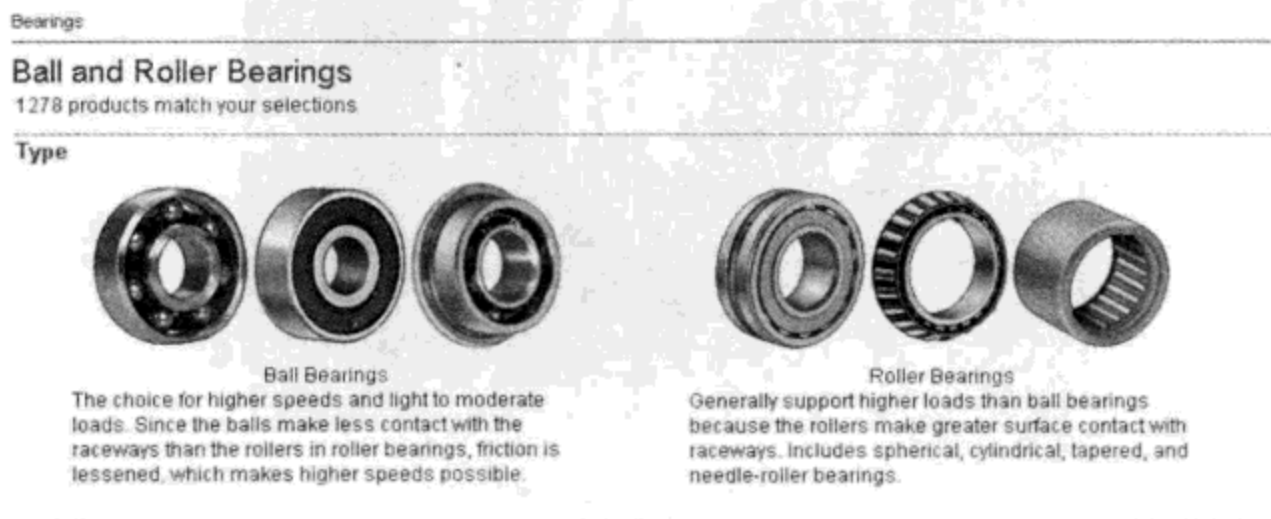


图7.2 径向滚珠轴承与滚柱轴承（所有权：McMaster-Carr）

有比木块中的孔的摩擦力还要小的塑料和金属轴套，但摩擦力不会象滚珠轴承那么小。我们称这种轴套为“径向轴套”（图 7.3）。

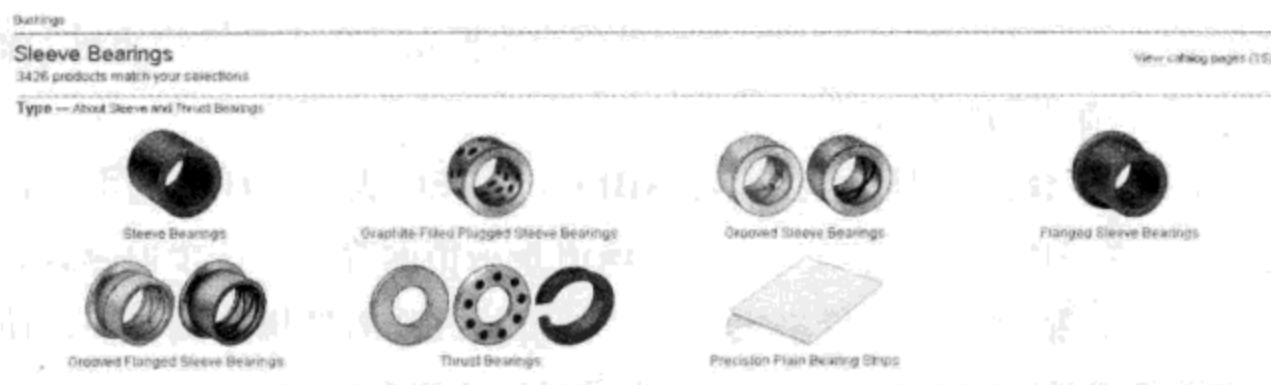


图7.3 径向轴套（所有权：McMaster-Carr）

### 1. 径向滚珠轴承与径向滚柱轴承

溜冰鞋中的轴承就是一种径向滚珠轴承，这是一种迄今为止应用最广泛的轴承。掌握了有关滚珠轴承的结构和术语，就能够为你的项目选择轴承了（图 7.4）。

- (1) 外径：轴承外圆柱的直径。
- (2) 外圈：滚动元件外部的圆柱零件。
- (3) 内圈：所用的轴应能与轴承的内径配合，这样轴与内圈才能一起转动。
- (4) 内径：也叫孔的尺寸或孔径，参照要配合的轴的尺寸设计。
- (5) 滚珠或滚柱：球形或圆柱形的滚子，通常由硬化钢制成。

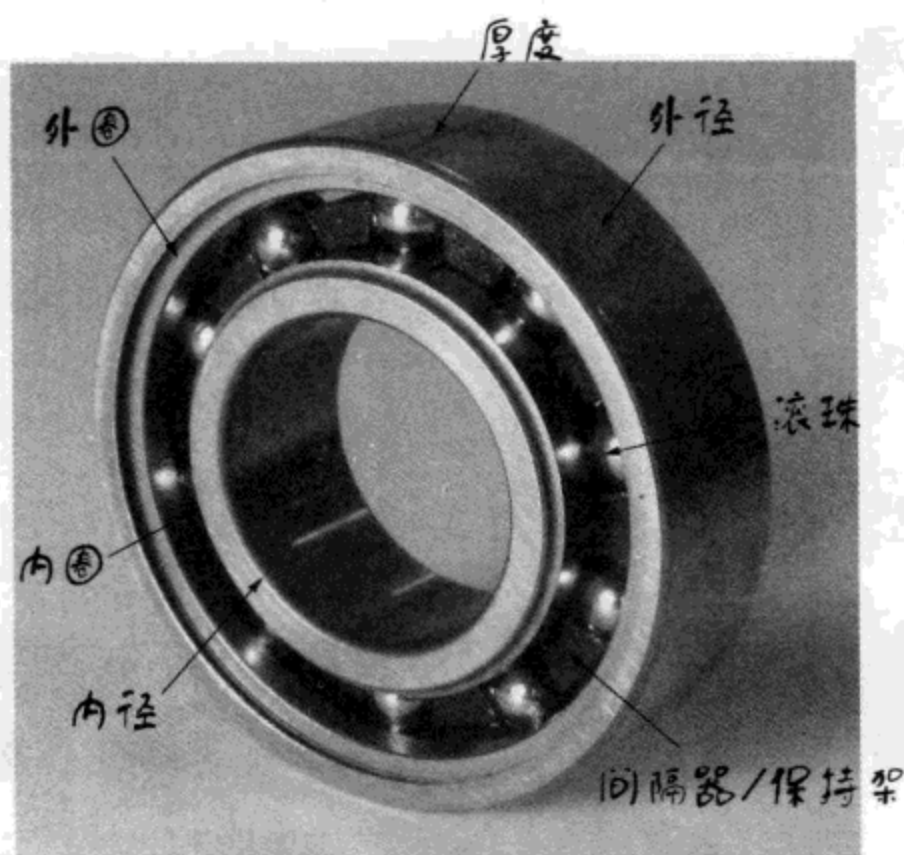


图7.4 轴承结构

(6) 厚度: 轴承的厚度。

(7) 间隔器 / 保持架 (可选): 这个零件可使滚珠之间保持相互独立, 互不接触。无间隔器的轴承中, 滚珠可以自由转动, 称为满装轴承。

(8) 密封套或保护壳 (可选, 图中没有显示): 有些轴承的滚子是外露的, 可以看见所有的滚子, 有些则有一个或多个密封套或保护壳, 防止黏性物质进入轴承。

下面是几个有用的轴承术语。

(1) ABEC 等级: 有时轴承会标有 ABEC。ABEC 表示“环形轴承工程师委员会”。ABEC 的规格用 1~9 (奇数) 表示, 该值表示精度等级。这个值越大, 轴承的精度越高。当然, 精度越高, 价格也越高。精度高意味着摩擦与损耗小, 使用寿命长, 转速高, 可靠性高。溜冰板与溜冰轮上的轴承等级为 ABEC-3。

(2) 每分钟转数 (r/min): 指的是轴承转动的快慢。如果你能估计出需要的转速, 就可以把这个转速值输入网页, 如 McMaster, 来缩小轴承的选择范围。转速一般会特别高, 可能会达到 15 000 r/min, 几乎能满足你所有的设计要求。选择轴承的转速应比你需要的转速要快得多。

(3) 静态载荷与动态载荷: 在选择轴承时, 你会在 McMaster 与 Stock Drive Products ([www.sdp-si.com/estore](http://www.sdp-si.com/estore)) 网站上看到静态载荷、动态载荷、动态径向载荷等参数。静态载荷是轴承静止不动时所能承受的载荷大小, 如你站着不动时, 溜冰鞋能承受的重量。径向载荷则垂直于旋转轴。动态载荷是轴承旋转时所能承受的载荷大小, 如果你重 200 lbf, 肯定不能穿动态载荷为 10 lbf 的溜冰鞋。动态载荷的大小通常是静态载荷的 2 倍以上。

**提示** 在转动时，由于所有滚子能分担载荷，所以轴承在转动时能承受更多载荷。当轴承不转动时，所有的载荷都集中在几个滚子上，因此很有可能导致轴承材料的磨损与变形。

如果转速高、载荷轻，则最好选择滚珠轴承，如溜冰板和溜冰鞋中的轴承。由于每个滚珠只与内圈和外圈上的一点接触，滚动摩擦非常小。使用滚柱轴承时，重量沿着圆柱体一条线分布，而不像滚珠上只有一个接触点，所以滚柱轴承可以承受较大的载荷，但因为接触面大，所以摩擦比滚珠轴承略大一些。相比于滚柱轴承，滚针轴承的滚动体又长又细，适合用在径向空间有限的情况下<sup>[1]</sup>。

安装轴承时，轴承的一个圈需固定不动，另外一个圈运动。一般情况下，轴承是与光滑的轴配合的。有时也与螺纹轴配合，虽然这种配合有点不合乎常规，不过却可以将内圈固定在轴上，使内圈和轴一起转。图 7.5 所示是一个轴承安装的例子，外圈固定不动，内圈与螺纹轴一起旋转。

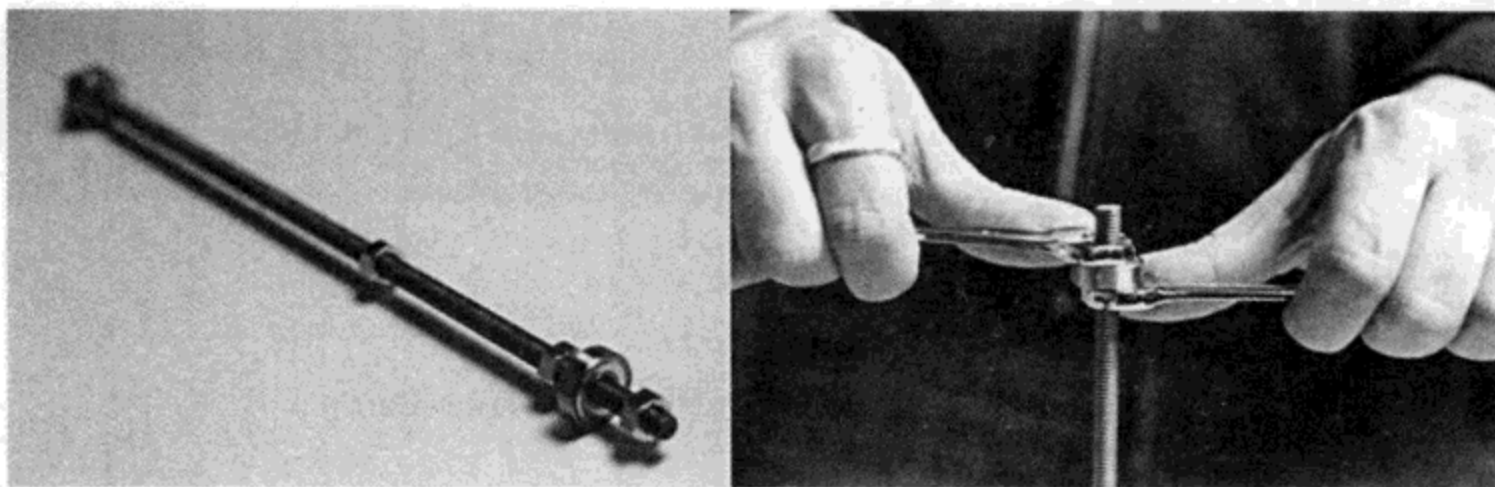


图7.5 螺纹轴与轴承配合（图片经MakerBot实业公司允许使用）

也可以使轴承的内圈不动、外圈运动，溜冰鞋与溜冰板中的轴承就是这种安装形式。内圈被卡紧，外圈套进塑料轮中，轮子就可与轴承的外圈一起转动了（图 7.6）。

## 2. 径向轴套

在转速低、载荷小、运动精度要求不高，或你的预算不够时，可使用径向轴套。径向轴套看起来就像一小段管子或麦秆。轴套的材质可能是塑料或铜，有时也用铝或钢，内层会有聚四氟乙烯或氟利昂等类似的低摩擦涂层。含油轴套是一种特殊的铜制轴套，这种轴套上有许多可以装油的小孔，所以表面非常光滑。

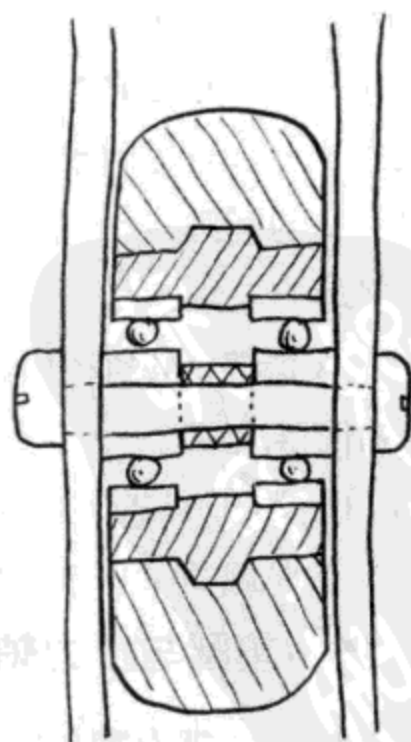


图7.6 溜冰鞋中轴承的安装方式（内圈被卡紧，外圈可自由转动）

轴套有三个参数：外径、内径和长度。装轴套前，要确定轴套与轴的尺寸是否可以配合，在旋转时不能太紧，也不能太松。装轴套时，只要把轴套压进，或用锤子敲进与它的外径尺寸相同的孔内即可。如果能用心轴压机（如 McMaster 的 2444A61）就更好了。最好再用一些润滑油（WD-40、3-IN-ONE 或润滑脂），这样可以更有效地减小摩擦。

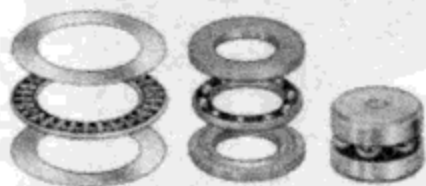
## 7.1.2 推力轴承

推力轴承用于支撑轴向载荷，如图 7.7 所示。轴向载荷的作用方向与轴平行。推力轴承中有滚子或仅有由光滑材料制成的衬套。餐厅里的旋转餐桌中就有推力轴承。旋转餐桌上放很多食物后，还能够转动自如。吧台凳、吧台椅和调味品架上都用了推力轴承。通过学习第 10 章项目 10.1 和项目 10.2，我们会知道如何使用推力轴承。

### Thrust Bearings

Your search returned products in the following categories.

#### Thrust Bearings



Handles thrust loads, also called an axial or side load, which is a load parallel to a shaft. Facilitates smooth rotation between surfaces like other rotary bearings, but their design supports higher thrust loads. Choose from plain and ball bearing designs.

图7.7 推力轴承与轴套（所有权：McMaster-Carr）

### 1. 推力滚珠轴承与推力滚柱轴承

推力滚珠轴承、推力滚柱轴承与径向滚珠轴承、径向滚柱轴承类似，只不过有支撑轴向载荷的零件。多数参数术语也相同，不同的只有以下几个术语。

(1) 外径：推力轴承的外径不接触任何东西，所以尺寸合适即可。

(2) 内径：与径向轴承不同，推力轴承的内径不能与轴紧配合。内径与轴之间应当留一定的间隙，保证它们相互之间可自由转动，不过间隙也不能太大，否则轴会产生摆动。

(3) 保持架：虽然径向轴承中这个零件是可选的，但推力轴承中必须有保持架，以隔离和保持滚子。

(4) 保护壳（可选），有些推力轴承带有保护壳，可防止黏性物质进入滚动体中。

(5) 轴向载荷：这个参数指的是转动时轴承能承受的重量。

### 2. 推力垫圈与推力轴套

没有滚子的推力轴承叫做推力垫圈或推力轴套。其外观与一般的垫圈一样，只不过为了支撑旋转的零件，它们是由光滑材料制成的，而且表面光洁度很高。一般


与推力滚珠轴承和滚柱轴承成套出现，以确保滚子可与光滑的硬质表面配合。如果不需要滚子，也可单独使用推力垫圈作为推力轴套来减小摩擦。

### 7.1.3 线性轴承与滑轨

线性轴承可允许直线运动，通常是沿着一个轴直线运动。线性轴承内有滚子，滚子的形式也很多。最常见的形式是滚子沿轴滑动，如图 7.8 所示。与其他轴承一样，圆柱形衬套内有一个保持架来隔离滚子，只不过在线性轴承中，轴承可以沿轴移动，而不绕着轴转动。线性轴承装在高精度的硬化钢轴上，来支撑较大的载荷，因此系统零件的价格相当高。

#### Linear Ball Bearings

For shafts, see pages 1058-1069. For housings, see page 1072.

Technical drawings and 3-D models available for items with this symbol. 

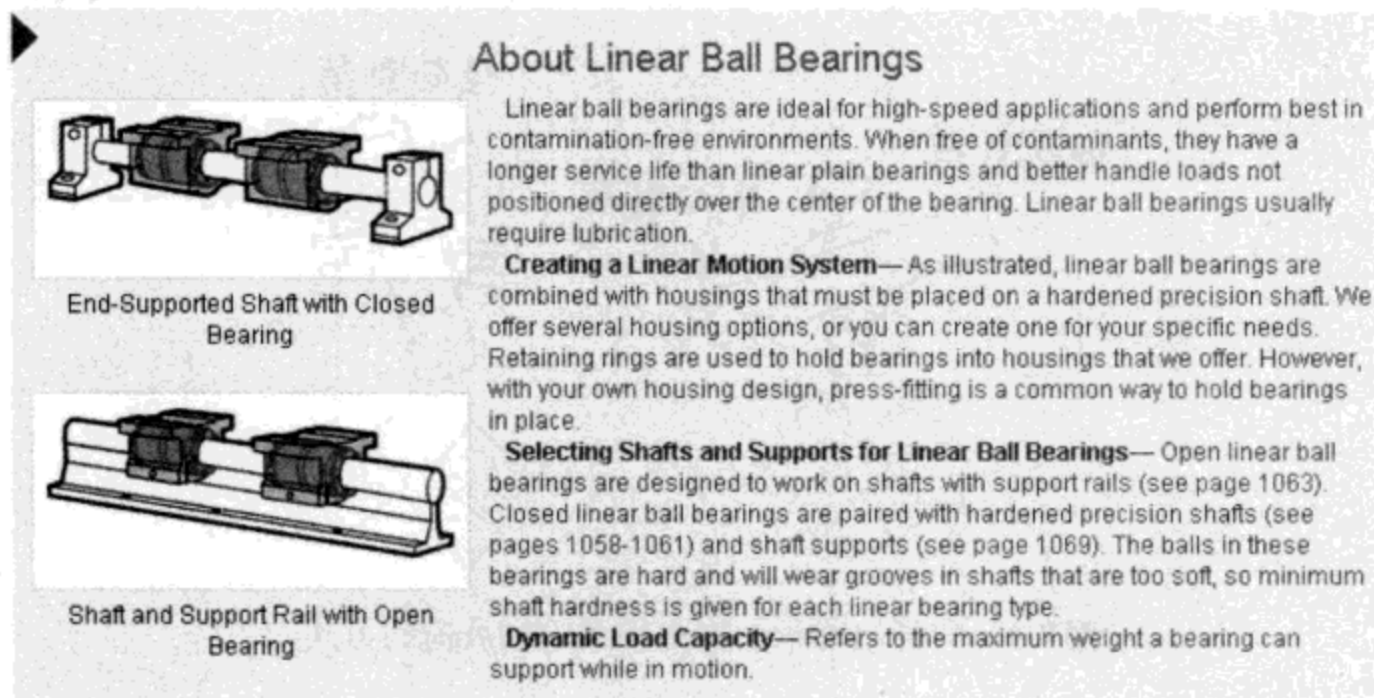


图7.8 线性滚珠轴承的结构（所有权：McMaster-Carr允许使用）

另一种线性轴承是抽屉上用的滑轨或滚轮。家里的化妆台、炊具、文件柜或商店的抽屉里都有这种轴承。用了这种轴承，即使抽屉内有很多重物，抽屉也可以产生流畅、摩擦相对小的运动，所以这种滑轨或滚轮可以用在需要流畅的线性运动的项目中。

载荷小摩擦小的情况下，用线性轴套会比较经济。线性轴套的外观很像径向轴套。最简单的线性轴承是用光滑材质制成的，如塑料或铜制成的中空小圆柱体。图 7.1 的 MakerBot CupCake CNC 用得就是这种。高端的线性轴套内表面会有聚四氟乙烯或其他光滑材料制成的内衬。在又脏、又湿、有振动、摩擦较大的情况下，线性轴套比线性轴承效果好。有些线性轴套还设有槽，这样污物和碎片就可以从槽中滑过。



### 7.1.4 混合轴承与特殊轴承

一般的径向滚珠和滚柱轴承不会用来支撑轴向的载荷或转矩，推力轴承也不会用来支撑径向的载荷或转矩，如图 7.9 所示。

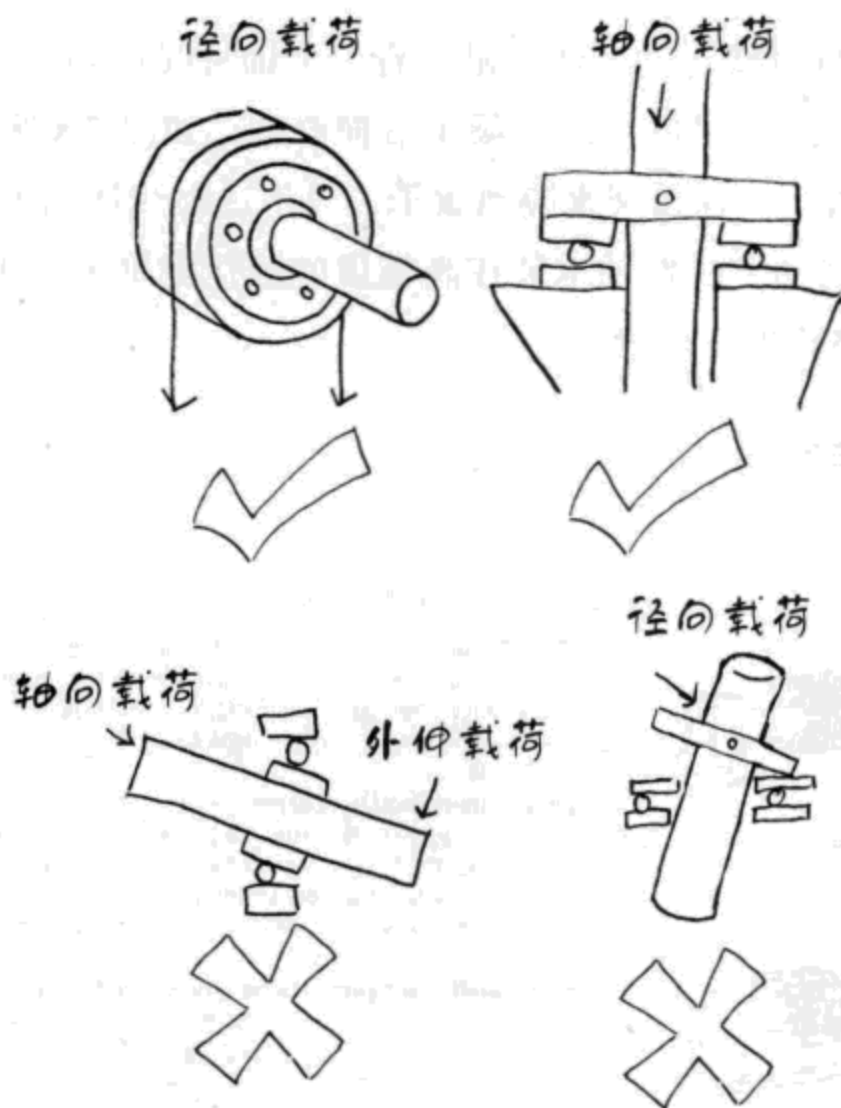


图7.9 向径向轴承与推力轴承施加载荷的方式



图7.10 向心止推滚动轴承可支撑径向载荷与轴向载荷

滚珠轴承的径向尺寸大，所以不宜用在小项目中。而且在安装时很难将所有零件对齐，以至于轴承无法发挥它们的功能。下面有几个常用的轴承，可用于解决这类问题。

(1) 向心止推滚动轴承：如果将轴向载荷加在径向轴承上，效果可能不好，还可能会损坏内圈与外圈。但是，在实际应用中，很少仅有纯轴向载荷或纯径向载荷的情况。向心止推滚动轴承内有角面环，因此既可以承受径向载荷，也可以承受轴向载荷。图 7.10 为向心止推滚动轴承的截面图以及施加载荷的方向。

(2) 球面轴承：球面轴承的外圈是圆球形的，当载荷错位时，可增加与外壳及载荷的接触面积。这种轴承

可用于支撑径向载荷与轴向载荷，因此常用于载荷有错位的情况，如图 7.11 中的健身器。

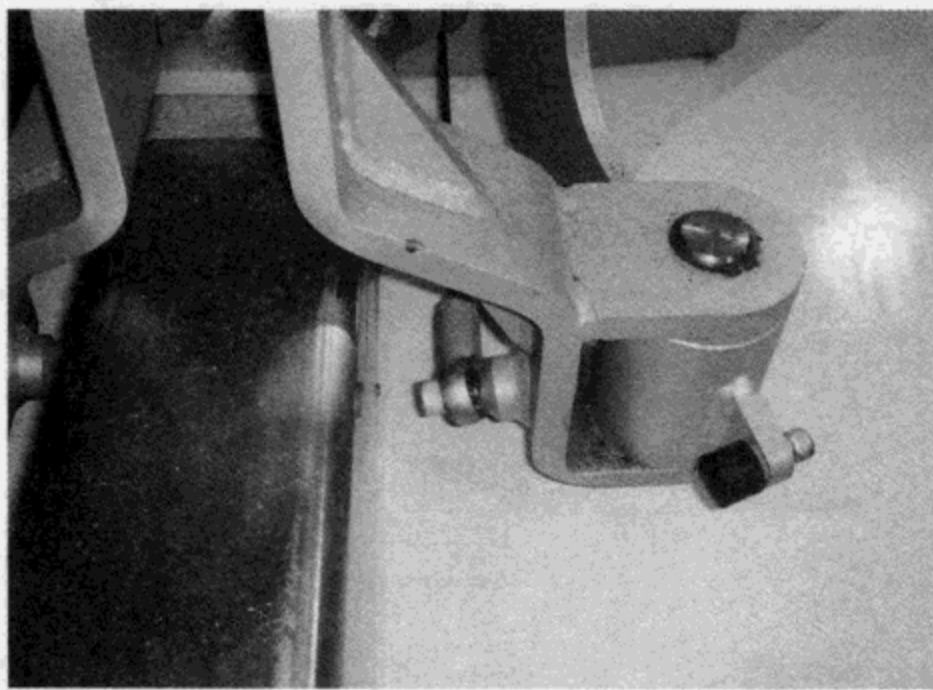


图7.11 健身器材上的球面轴承，承受缆线拉动引起的错位

(3) 混合轴套：凸缘轴套（图 7.12）可承受径向载荷与轴向载荷。这种轴套的安装方法与径向轴套一样，只不过凸缘作为轴向的垫圈或间隔器。

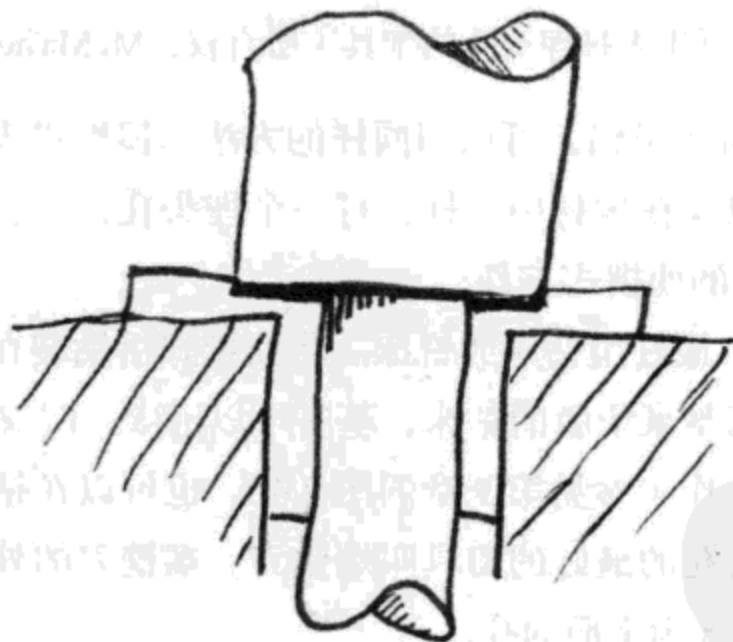


图7.12 凸缘轴套可承受径向与轴向载荷

### 7.1.5 轴承安装提示与技巧

安装轴承的方式主要有两种：把轴承装进结构件或用轴承架。前面已经讨论过将轴承装进结构件中的例子了，如用压入法将轴套压进比它的外径略大的孔中。对于径向轴承或轴套，如果要配合的是木头，应当先钻一个小孔，然后将孔逐渐增大，直到轴承能与孔配合。也可以用图 7.13 所示方法，用打埋头孔的工具（如 Forstner）

打一个凹孔来安装轴承。



图7.13 可用来打埋头孔的工具（所有权：McMaster-Carr）

如果安装轴承的材质是铝，可以用同样的方法，慢慢扩大孔，直到轴承的外径能与铝材配合。也可以像在木材中一样，打一个埋头孔，不过多数能用于金属材质的打孔工具都不是手动的便携式工具。

要在金属中打孔，最好用钻床或铣床。将便携式手钻装在一个带基座的固定架上就是一个钻床。铣床是豪华版的钻床，基座可以沿  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  轴运动，所以可做一些比钻直孔更复杂的工作（参见第 9 章的图 9.4）。也可以在钻床中使用打埋头孔的工具。在铣床上打埋头孔的最好的刀具叫端铣刀。端铣刀的外观就像把钻头的尖去掉一样，所以可以钻底部为平面的孔。

安装轴承与轴套的方式有很多种。安装时要考虑的主要问题是如何使轴承的内圈与轴配合完好，轴承的外圈如何与一些外壳适当配合。图 7.14 所示为安装长轴的常用方法。在这个基础上还有一些不同的安装方式：将凸缘轴承装入外圈，用垫圈或螺母代替外壳上的轴肩，或用弹簧卡环或轴圈来防止轴在轴承内滑动等。

另外一种不用特殊工具的轴承安装方法是用轴架。在轴架中，轴承已装在自己的壳体中。这个壳体上有安装孔或槽，所以在拧紧之前还可以调整螺钉的位置，如图 7.15 所示。不过使用这种轴架，你得多花一点钱。不过还好，大约多花上 3 美元，就可以节约很多时间。

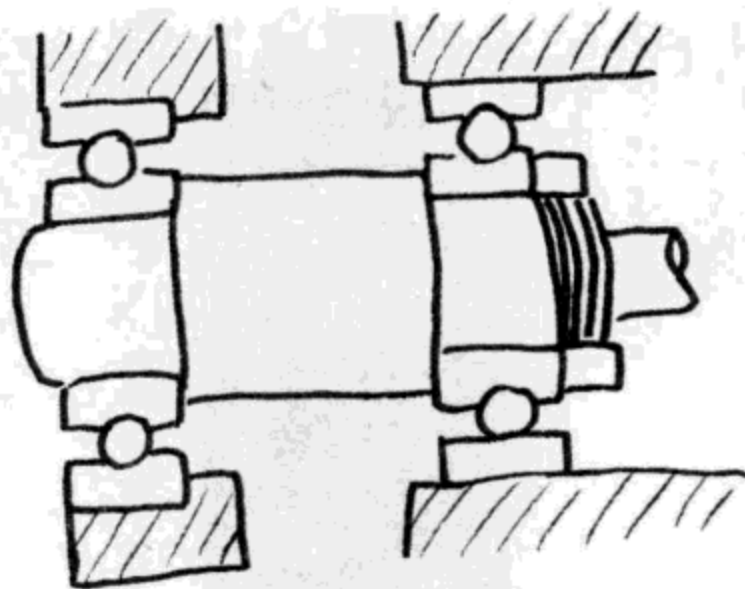


图7.14 一般的轴承安装方式

Mounted Bearings

Mounted Bearings

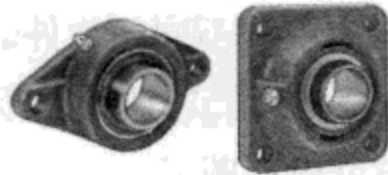
443 products match your selections

View catalog pages (11)

Mounting Style



Base Mount



Flange Mount

图7.15 用轴架可以方便地安装支撑旋转轴的轴承（所有权：McMaster-Carr）

## 7.2 联轴器

联轴器用于传递两种旋转物体间的转矩。在电机输出轴上连接零件可能是在机构制作过程中我们面临的最大难题了。很少有与你的使用情况完全相同的资料。连接方法取决于电机的类型及轴的形状。下面的章节我会总结我多年的连接经验及其他不同的连接方法，这样你就能很方便地找到适合你的方法：将轴延长，或将轴与另外一个轴连接，或与齿轮配合等。

### 7.2.1 舵机

因为舵机的输出轴上有舵盘（像齿一样的东西），所以连接比较容易，如图 7.16 所示。所有与舵机连接的零件同样也带舵盘，因此只要将这些零件套进电机输出轴，用螺钉固定就可以了。



图7.16 轴上带舵盘的舵机及其配件

在 ServoCity ([www.servocity.com/html/servo\\_shafts\\_couplers.html](http://www.servocity.com/html/servo_shafts_couplers.html)) 的“舵机及其配件”下，至少有 6 种不同的连件器用来连接零件或轴。ServoCity 也提供各式可直接与舵机轴连接的舵臂、皮带轮、齿轮、连接链条的链轮。如果有现成的与舵机配合的零件，一定就没问题了。

即使不用现成的舵机配件，也可以利用舵机轴带舵盘的特点，用螺钉将其他零件连接在舵机轴上。多数舵机都带一个脆性的塑料舵盘，可以将这个臂连接在其他更结实的零件上。很多舵机供应商会提供少量与舵机配合的螺钉，这样你就不用考虑螺钉的规格问题了，只要在 McMaster 买每盒 100 个的螺母就可以了。一般的舵机用 4-40 的螺钉（有关螺钉的规格第 3 章中已讲过），不过在用螺钉之前一定要确认一下螺钉的规格是否合适，否则会损坏螺纹。

## 7.2.2 其他电机

其他电机，包括直流电机、直流减速电机、步进电机，轴的规格小到  $\frac{1}{16}$  in，大的电机可达  $\frac{3}{8}$  in。问题就在于，多数齿轮和其他零件的内径都比电机轴大，另外也有可能需要将电机连接到一个尺寸不同的轴，如果连接时轴心对不准，机构就会摇摆。

将零件连接到电机轴上时，要考虑怎么样安装才能不打滑，将电机轴的转矩传递至要连接的零件（如齿轮、皮带轮、联轴器等）。舵机可通过利用舵盘与零件咬合来传递转矩。将一个光滑的金属圆形轴装进同样具有光滑面的内孔是不能传递转矩的，这个问题是使用电机时常碰到的问题，所以下面提供了一些解决这种问题的方法。

## 1. 使用 D 型或扁型电机轴

一个最重要的经验是，任何一种形状的轴都可以比圆形的轴更能有效地传递转矩。多数电机都有 D 型或扁型的轴（将圆的一面打平，如图 7.17 所示），或两面都打平。尽可能使用这种电机。

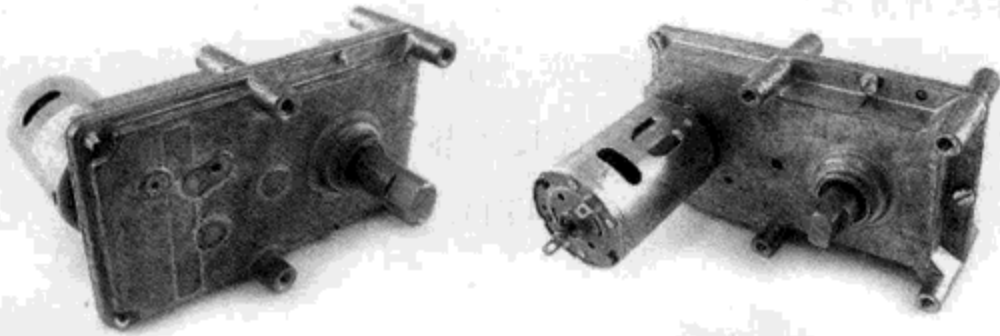


图7.17 带扁平轴的减速电机，这种轴用紧定螺钉轴毂连接(所有权：ServoCity)

如果你的电机轴不是扁平的，可以用金属锉刀锉一个小平面。其他电机轴上可能会有沟（也叫键槽），可与带键的零件配合。还有一些电机的轴上有螺纹孔，将零件直接拧在孔中就可以了。不管怎么样，至少需要备一把锉刀或砂纸，在电机轴上打一些纹路，就能更好地咬住与其配合的零件了。

## 2. 电机轴与零件的连接

如果你真的很幸运，会找到可与电机输出轴形状配合的轮或其他零件。Solarbotics([www.solarbotics.com/products/gmpw\\_deal](http://www.solarbotics.com/products/gmpw_deal)) 就有一种特别好的小直流减速电机套件，内有 1 个扁型电机轴，1 个与之配套的轴毂，还有安装螺钉。

如果没有这么幸运，就找一些带紧定螺钉轴毂的零件，如齿轮、滑轮、链轮等。轴毂套进电机轴后，用一个螺钉或卡子就可以固定了，如图 7.18 所示。也有些零件有轴毂，但没有螺纹或夹子来固定，也就是所谓的普通孔。如果配合后太松，常需要钻一个小螺丝孔来装螺钉（第 3 章有钻孔和攻丝的详细内容）。



图7.18 带紧定螺钉轴毂的零件（ServoCity的齿轮，与电机连接很容易）（所有权：ServoCity）

如果也找不到带紧定螺钉轴毂的零件，可以通过压入法连接电机轴。不过只能在零件的孔径与电机轴的直径很接近的情况下才能使用，因为配合应力的存在，轴

与零件不会产生相互运动。图 7.19 就是一个 ServoCity 的用压入法与小直流电机轴配合的齿轮。

**注意** 电机轴与零件配合时，压入法是最不好的方法。在压齿轮或其他零件时，会施加轴向载荷，所以这种方法会破坏有些电机的径向轴承，只有在万不得已的情况下才选择这种方法。

还有另外一种连接方式是用轴毂夹，也叫安装法兰，如图 7.20 所示。使用时，将电机轴夹进夹子中，然后用安装孔连接齿轮、滑轮等任何需要的零件。对于大直径的轴，McMaster 提供一种轴毂夹 (9684T1)，可完成这种安装。

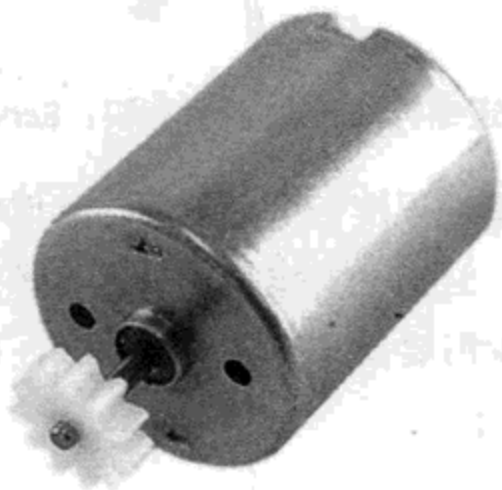


图7.19 ServoCity的压入法安装齿轮

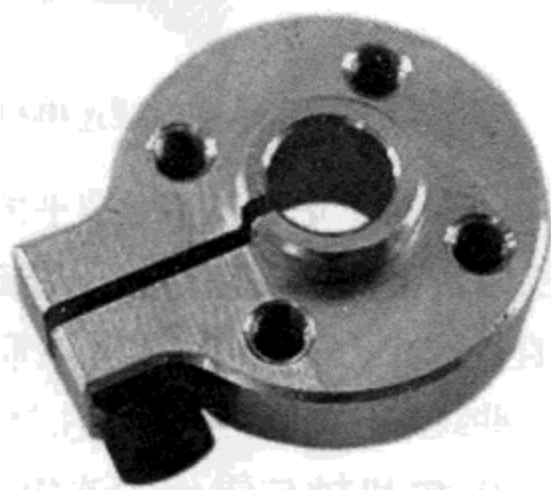


图7.20 轴毂夹

在 WM Berg ([www.wmberg.com](http://www.wmberg.com)) 上也可以找到轴毂、轴配合器以及其他尺寸合适的零件 (WM Berg 网页上的产品图片不能打印，可订一份免费的纸质产品目录)。

### 3. 加大轴的尺寸

因为电机轴通常比要连接的零件的尺寸小，有几个技巧可以取消间隙。一种方法是用垫片。垫片是所有用来填补空隙的薄片的统称，可以是木质的，金属的或塑料的。在电机轴上缠胶带，使电机轴能与零件紧密配合，实际上也是一种增加垫片的方式。如果缠胶带有效，当然可以用这种方法，不过有一种更专业的方法——用一卷垫片，通常是厚锡片，剪下一段缠在电机轴上即可。

多数五金店（当然还有 McMaster）都有这种成片或成卷的垫片。如果有锡剪，也可以用容易找到的苏打水或啤酒罐。垫片的厚度可能只有 0.001 in，如果配合特别松的话，可用多层垫片。

也可以用铝或铜管作为垫片，这样电机轴的表面特性就一致了。这些东西在 McMaster 和多数五金店、工艺品店都有，尺寸也很丰富。这些零件的管壁可能就像吸管那么薄，所以如果必要的话，可多套几个。

### 4. 电机轴与其他轴的连接

有时需要把电机轴延长后，再连接一个轮，或带动一个长轴旋转。比如，要使

百叶窗能够自动开关，可能需要将电机轴连接到一个长度与窗户宽度一样的杆上，电机通电后，会将百叶窗卷起来。有3种主要的方法来达到这个目的，具体选用哪种方法取决于轴的相对尺寸。

(1) 将小轴装入大轴的方法：在大轴上打一个孔，将小轴穿进去，用紧定螺钉固定。参见项目9.2，学习如何不用车床钻中心孔的方法。

(2) 用刚性联轴器：有些联轴器可连接不同尺寸的轴，如图7.21所示。联轴器的内径与轴是紧配合，紧定螺钉拧进轴内一点有助于传递转矩。刚性联轴器的形式多样，轴毂夹也是其中一种（图7.22）。轴毂夹可紧紧夹住两个轴，因此传递转矩的性能很好。但轴毂夹的重量不均衡，可能会使系统产生摆动，所以不能用于高速运动的情况。



图7.21 紧定螺钉式刚性联轴器

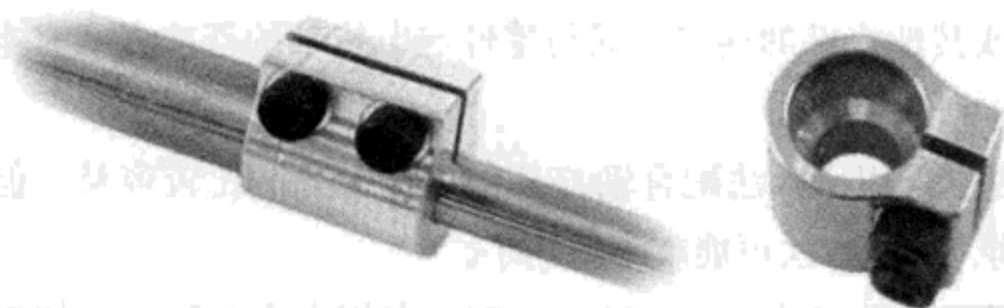


图7.22 轮毂夹式刚性联轴器

**注意** 从图7.21、图7.22可以看出，这些带紧定螺钉的联轴器自己很容易就能制作。只要拿一小段铝或塑料棒，在中心钻一个与电机尺寸匹配的孔（中心度不一定特别好），钻两个与手头螺钉尺寸对应的螺纹孔（见第3章），就可以了。工作时最好用一个小夹具，如McMasters的5312A2，来固定要钻的材料。如果其中一个轴的尺寸比另外一个大，用一个大钻头钻到联轴器一半处就可以了。大钻头在已有的孔上会自动找中心。

(3) 使用柔性联轴器：如果安装时有偏差，柔性联轴器可补偿轴运动中产生的错位。这种联轴器会吸收错位产生的应力，能够使电机带动偏心的零件转动。



在柔性联轴器中，橡胶管是至今最简单的一种（但强度最差）。如果有幸能找到一根橡胶管，它的内径又刚好能与电机和轴配合，只要切下一段，然后把橡胶管一端套上电机轴，一端套上要连接的轴即可。如果需要紧配合，在两端各用小管夹（如McMaster的5388K14）固定即可<sup>[2]</sup>。在McMaster网站上搜索“管件”，就会有各种材质、各种尺寸的管件可选。

要连接两个平面不同的轴，需要一个万向联轴器（U型联轴器），如图7.23所示。这种联轴器的尺寸与形状有很多种，角度偏差的类型也很多，也可以用来连接尺寸不同的轴。还可以用一些其他的柔性连接方法，在McMaster（或其他供应商）的网址上搜索柔性连接，就会有很多选择，名字也很有趣，如“spider”、“Oldham”、“bellows”），它们能允许各种错位方式。



图7.23 U型联轴器（所有权：ServoCity）

### 5. 轴与齿轮或其他零件的连接

轴与齿轮或其他零件的连接方式与零件与电机轴的连接方式基本相同，补充以下几点。

（1）压入法：采用压入法配合轴与其他零件的方法比较容易。但如果需要将零件置于轴的中间，这种方法可能就不适用了。

（2）黏接法：如果零件能套在轴上，就可以用强力胶固定。如果两个零件都是木质的，可以选用木胶。

（3）用销钉连接：如果零件的尺寸适于在侧面或轴毂上钻孔，则可以在轴上与零件套在一起钻孔，用钉子或销钉（木钉或金属钉）将它们连在一起（如图7.24左部与中间）。钻孔时，两个要配合的零件要对齐。

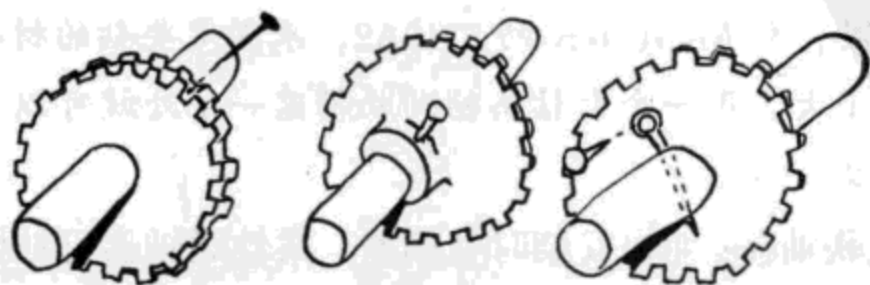


图7.24 零件与轴的连接方式

(4) 螺钉连接：如果零件有带螺纹孔的轴毂，问题就简单了。如果有普通孔，可以对这个孔攻丝。如果根本就没有轴毂，可以自制一个，或用一个图 7.20 所示的现成轴毂。

(5) 用销钉连接：如果可以沿径向在轴上钻孔，可以在零件的任何位置钻孔，将轴与零件用销钉或硬金属丝连接。图 7.24 的右图就是这种连接形式。

(6) 用销钉夹的方法：在平齿轮的任何一面装一个轴环将其固定。在扣紧夹子或螺钉时，如果一起挤压轴环，也可以将零件夹紧。这种方法在第 10 章项目 10.2 中安装固定叶片的风轮零件时就用到。

(7) 自制轴毂：用环氧灰泥将轴环粘在平零件的两侧来做一个自制轴毂。这种方法在项目 10.2 中将激光切割的齿轮装在风轮的轴与电机轴上时用到了。

### 7.2.3 使用离合器

离合器是一种特殊的连接器，用来连接或切断驱动件（电机）与被驱动件（轴），通常作为一种保护装置或只允许一个方向的运动。有些离合器，如 SmallParts (www.smallparts.com) 的 MSCB-4，可用来设定滑动或夹紧的极限位置（图 7.25）。

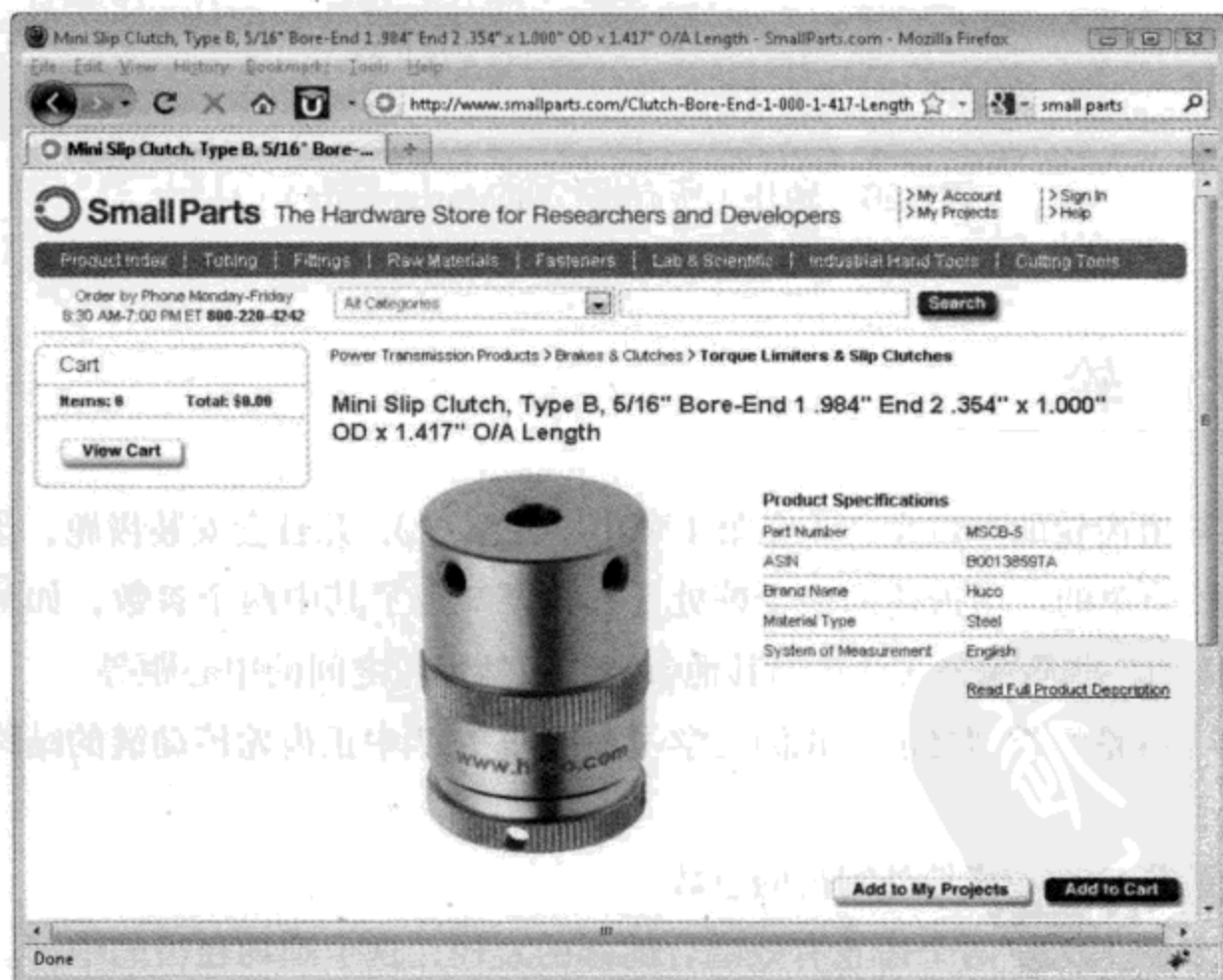


图7.25 普通螺旋爪式离合器（所有权：SmallParts.com）

在自行车上可看到爪式离合器<sup>[3]</sup>。当脚踏板向前运动时，这个离合器给后边的链轮传递功率；脚踏停止运动或向后运动时，后轮还能自由地转动。

## 7.3 轴环

轴环，也叫锁环，将刚性轴联轴器过圆心沿直径一分为二，就是锁环。这种轴环用作止动器，来限制轴的运动距离，也可用作齿轮或其他零件间的间隔器。如图7.26所示，轴环有紧定螺钉安装型与夹紧型，材质可以是金属或塑料。

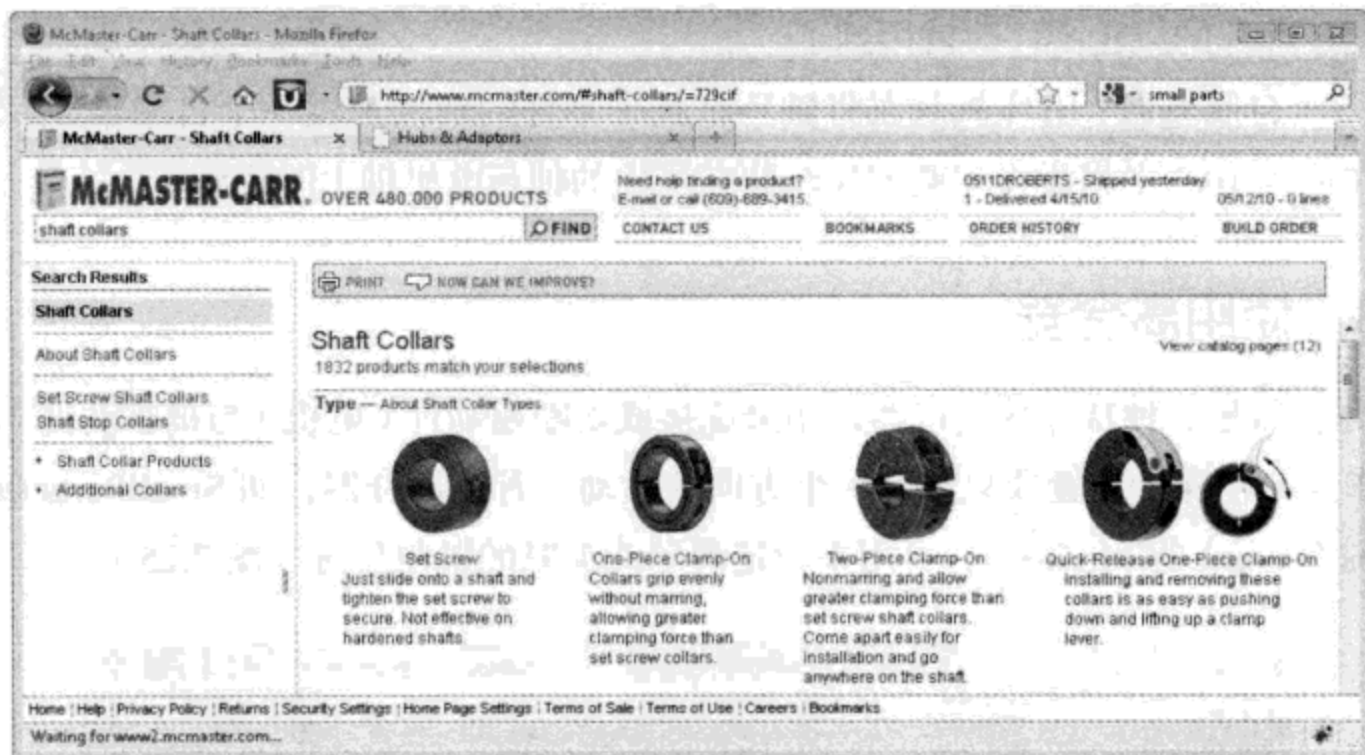


图7.26 轴环（所有权：McMaster-Carr）

## 7.4 齿轮

如果知道齿轮的参数意义（在第1章中已介绍过），并且会安装齿轮，齿轮用起来还是比较简单的。用齿轮的一个好处是，只要知道了其中两个参数，如外径和齿数，就可以用一些简单公式计算出其他参数，包括齿轮之间的中心距等。

在学习齿轮的类型之前，我们先学习一下图7.27中正齿轮传动链的结构及相关的术语。

(1) 齿数 ( $N$ ): 齿轮外圆齿的总数。

(2) 节径 ( $D$ ): 两个齿轮有效啮合的圆的直径，这个圆约在齿的中部。如果齿轮的间距正确，两个齿轮的节圆应是相切的。

(3) 径节 ( $P$ ), 节圆上每英寸长度上的齿数。可以看成是齿的密度，这个值越高，齿越小，齿的间距也越小。用在业余项目中的齿轮的径节一般为24、32和48。

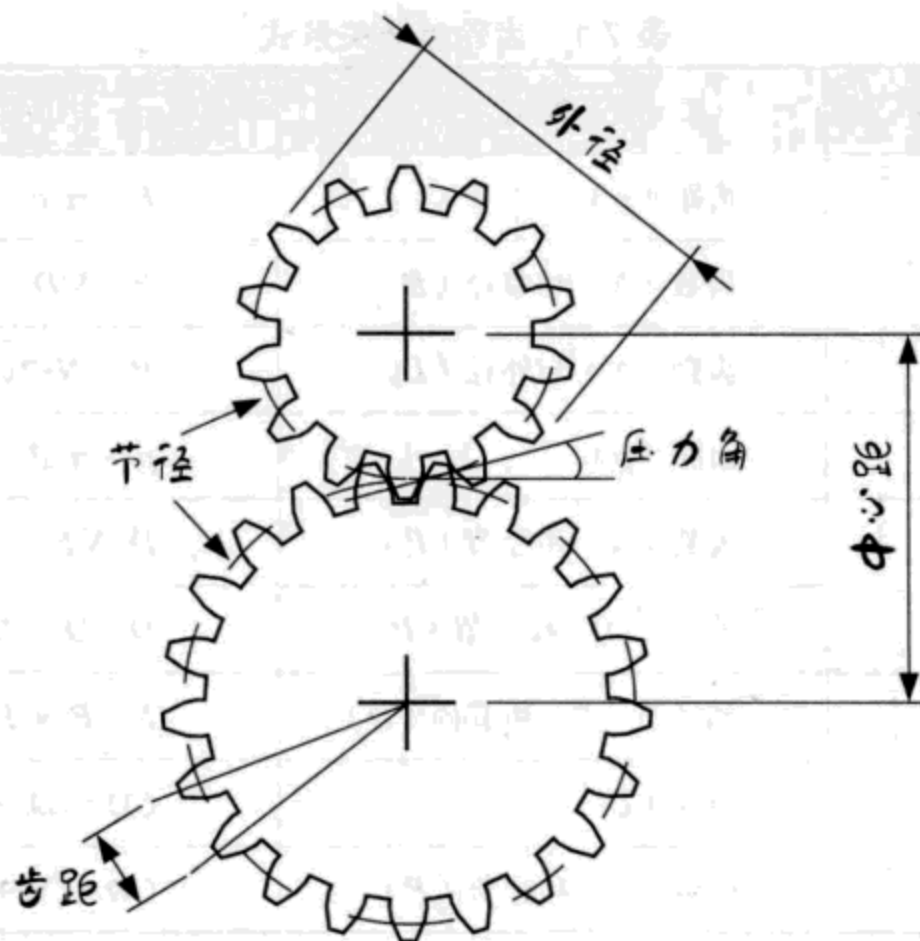


图7.27 正齿轮的结构

**注意** 所有能啮合的齿轮的径节和齿距是相同的。

(4) 齿距 ( $p$ ): 两个相邻齿之间圆弧的长度, 它的大小为  $\pi$  ( $\pi=3.1416$ ) 除以径节 ( $P$ )。虽然这个参数很少用来区别现有的齿轮, 但在用 2D 或 3D 软件建模时经常会用到这个参数 (见项目 7.1)。

(5) 外径 ( $d_0$ ), 与齿接触的最大的圆的直径, 可以用 SparkFun 的 TOL-00067 这样的测径器来测量这个参数。

**注意** 齿数为偶数的齿轮很容易测量, 因为每个齿都正对着另一个齿。而齿数为奇数的齿轮中, 如果从一个齿的中心过齿轮的中心画一条直线, 这条线将落在两个齿之间。因此, 如果测量的是齿数为奇数的齿轮, 在计算外径时就要仔细一点了。

(6) 中心距 ( $C$ ): 一个齿轮节圆直径的一半加上另一个齿轮节圆直径的一半就是中心距的正确值。要想设计一组平稳啮合的齿轮组, 这个尺寸很关键。

(7) 压力角: 渐开线上任一点法向压力的方向线 (即渐开线在该点的法线) 和该点速度方向之间的夹角称为该点的压力角。由于某些原因, 标准压力角的大小为  $14.5^\circ$  和  $20^\circ$ 。对于小齿轮来说,  $20^\circ$  的压力角比较好, 但影响不大。理解这个参数的意义并不重要, 重要的是要知道所有需要啮合的齿轮的压力角必须相同。

所有齿轮的参数间的关系都可以用简单的关系式表示, 表 7.1 中的公式是由 Boston Gear 发表的 ([www.bostongear.com/pdf/gear\\_theory.pdf](http://www.bostongear.com/pdf/gear_theory.pdf)), 这些公式用起来很方便, 而且是免费的。

表 7.1 齿轮参数关系式

所求的齿轮参数	已知参数	所用公式
径节 (P)	齿距 (p)	$P = \pi / p$
	齿数 (N) 和节径 (D)	$P = N / D$
	齿数 (N) 与外径 (D <sub>0</sub> )	$P = (N+2) / D_0$ (近似)
齿距 (p)	齿距 (p)	$p = \pi / P$
节径 (D)	齿数 (N) 和径节 (P)	$D = N / P$
	外径 (D <sub>0</sub> ) 和径节 (P)	$D = D_0 - 2 / P$
齿数	和径节 (P) 和节径 (D)	$N = P \times D$
中心距 (CD)	节径 (D)	$CD = (D_1 + D_2) / 2$
	齿数 (N) 和径节 (P)	$CD = (N_1 + N_2) / 2P$

## 项目 7.1 自己动手做齿轮

在本项目中，我们用免费的软件设计正齿轮，并且通过网店 Ponoko，以我们能够承受的价格用激光切割方式来加工正齿轮<sup>[4]</sup>。如果你在学校用过激光切割机器的话，就更好了。先打印一个模板，然后将其固定在纸板或木头上，就可以手工制作齿轮了。

我们可以用 Inkscape，与 Adobe Illustrator 类似的软件来设计齿轮。Inkscape 是一种免费的，开源的矢量绘图软件。这个软件可以在多数 Windows, MAC 和 Linux 操作系统下运行 (<http://wiki.inkscape.org/wiki/index.php/FAQ> 有详细的 FAQ 内容)。用 Inkscape 软件，可以用一种 Inkscape 自带的一种工具来画齿轮。有一点不太方便的地方是，齿轮的节距没有用英寸来表示，而是用像素的个数来表示的，对应关系见表 7.1。仅仅通过选择节距，改变齿数，就可以得到不同的传动比。但是，如果你做的齿轮需要和现成的齿轮配合的话，考虑的问题就要多一些。

在 Inkscape 中，缺省模式下 1 in 有 90 个像素 (px)。所以在用齿轮工具时，如果节距设为 24 px，就相当于 0.267 in ( $24 / 90 = 0.2666\cdots$ )。由于径节  $P = \pi /$  节距 (p)，所以径节  $(P) = \pi / 0.267 = 11.781$ 。在现有齿轮中，找不到径节为 11.781 的齿轮。前面说过，齿轮的径节一般为 24、32 和 48，如果你做的齿轮要与现有的齿轮配合，就应该用现有齿轮的径节大小及表 7.1 中的公式来倒推出在 Inkscape 中齿距的像素值。

## 1. 材料清单

- (1) 1/4 in 的木销。
- (2) 木工刀。

## 2. 操作方法

- (1) 从 [www.inkscape.org](http://www.inkscape.org) 网站上下载并安装 Inkscape 软件。
- (2) 从 [www.ponoko.com/make-and-sell/downloads](http://www.ponoko.com/make-and-sell/downloads) 下载 Inkscape 的入门套件。这个套件是一个 PDF 文件，有 3 个与 Ponoko 提供的材料尺寸对应的模板。解压这个文档并存在自己能记得的地方。
- (3) 在 Inkscape 中新建一个新的文档。从菜单栏选择“File/ Document Properties”来打开“Document Properties”窗口。在右上角把缺省的单位改为 in。再返回主窗口，在工具栏中将测量尺从像素改为 in。此时的屏幕应当如图 7.28 所示。关掉“Document Properties”窗口。

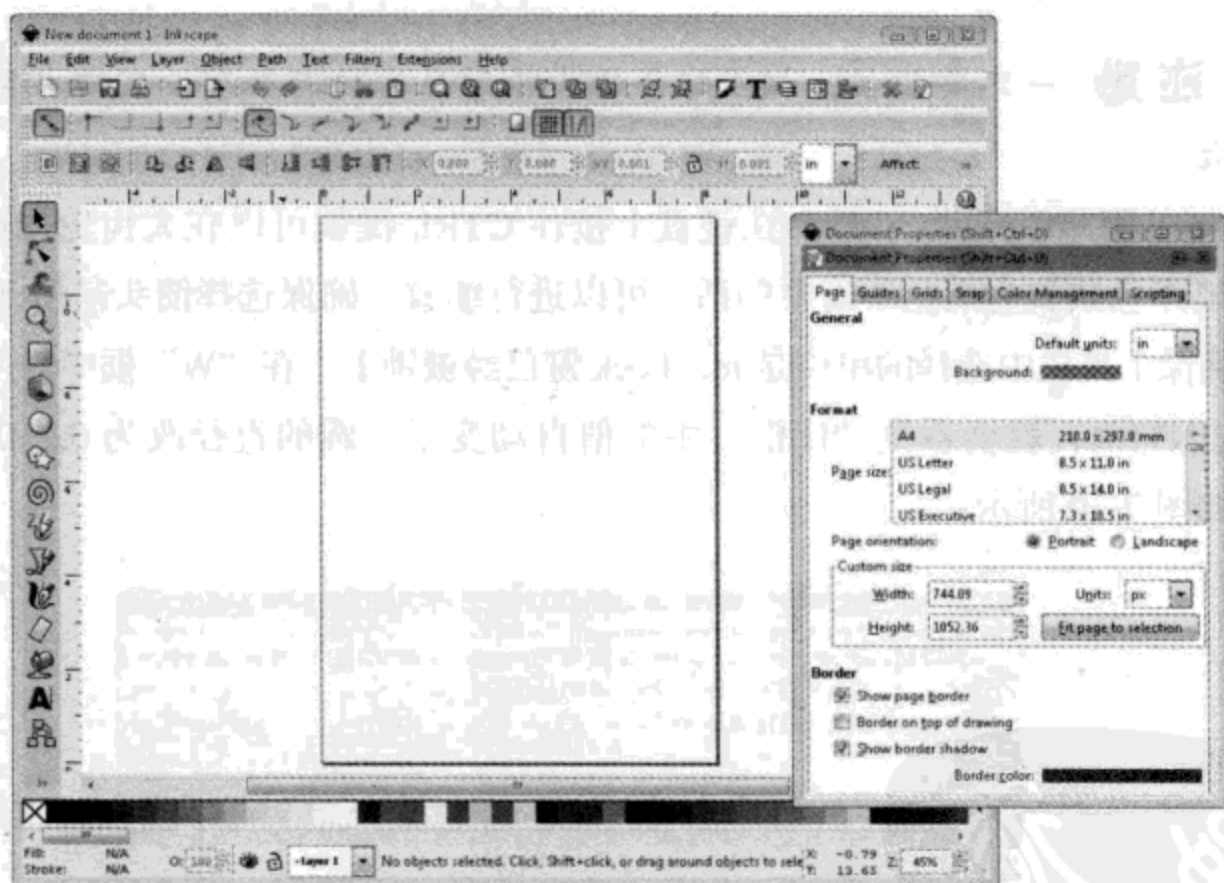


图7.28 在新建的Inkscape文档中修改文件设置

- (4) 从菜单栏选择“Extensions / Render / Gear”，会出现一个小的齿轮窗口，这个窗口有 3 个选项：齿数；径节，px；压力角。把压力角设为 20.0，因为 20° 是现有齿轮的标准尺寸。把其他选项设为需要的值。在图 7.29 中，我选择的齿数为 28，径节是 24。单击“Apply”，然后单击“Close”。

- (5) 因为要创造 1 个配合齿轮，所以要重复第 (3)、(4) 步，再画至少 1 个齿轮。我画的第 2 个齿轮的齿数是 14。

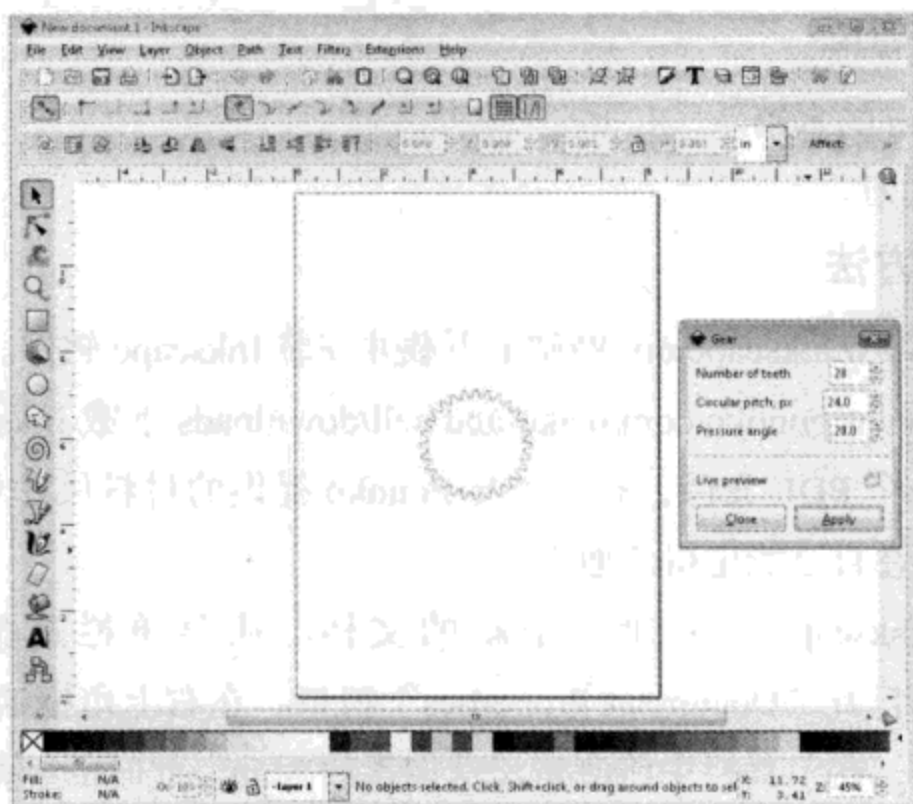


图7.29 在Inkscape中用齿轮工具

**注意** 一定要记住，相互配合的齿轮的压力角与径节一定要相同；只能改变齿数。

(6) 用“Circle”工具，在键盘上按住 CTRL 键就可以在大齿轮内画一个圆。圆的填充色缺省为黑色。需要的话，可以进行缩放。确保选择箭头是激活的，单击圆。确保工具栏中选择的单位是 in，Lock 键已经被锁上。在“W”框中输入 0.250 in，按下 ENTER，就会看到“H框”中的值自动变了。圆的直径改为 0.250 in，屏幕应该如图 7.30 所示。

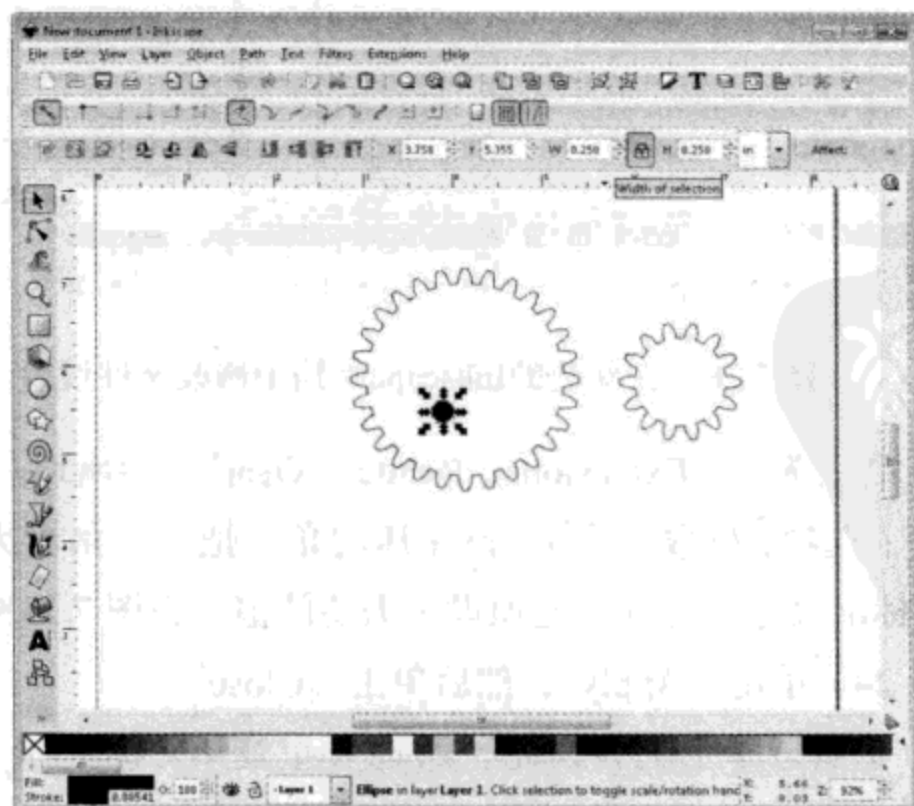


图7.30 重新定义圆的尺寸

(7) 围着大齿轮、小齿轮及圆画一个方框，就可以选中所有这些图形。在菜单栏上选择“Object / Fill and Stroke”出现“Fill and Stroke”窗口，如图 7.31 所示。

①在 Fill 选项卡下，单击“X”，为无填充色。

②在 Stroke paint 选项卡上，单击紧邻“X”的键，选择单色。此时设置缺省为黑色。

③在 Stroke style 选项卡上，将宽度改为 0.030 mm，按下 ENTER 键。这个值是 Ponoko 在进行激光切割时要求的线粗。如果用不同的激光切割机，必要时需要再调整这个值的大小。关掉窗口。

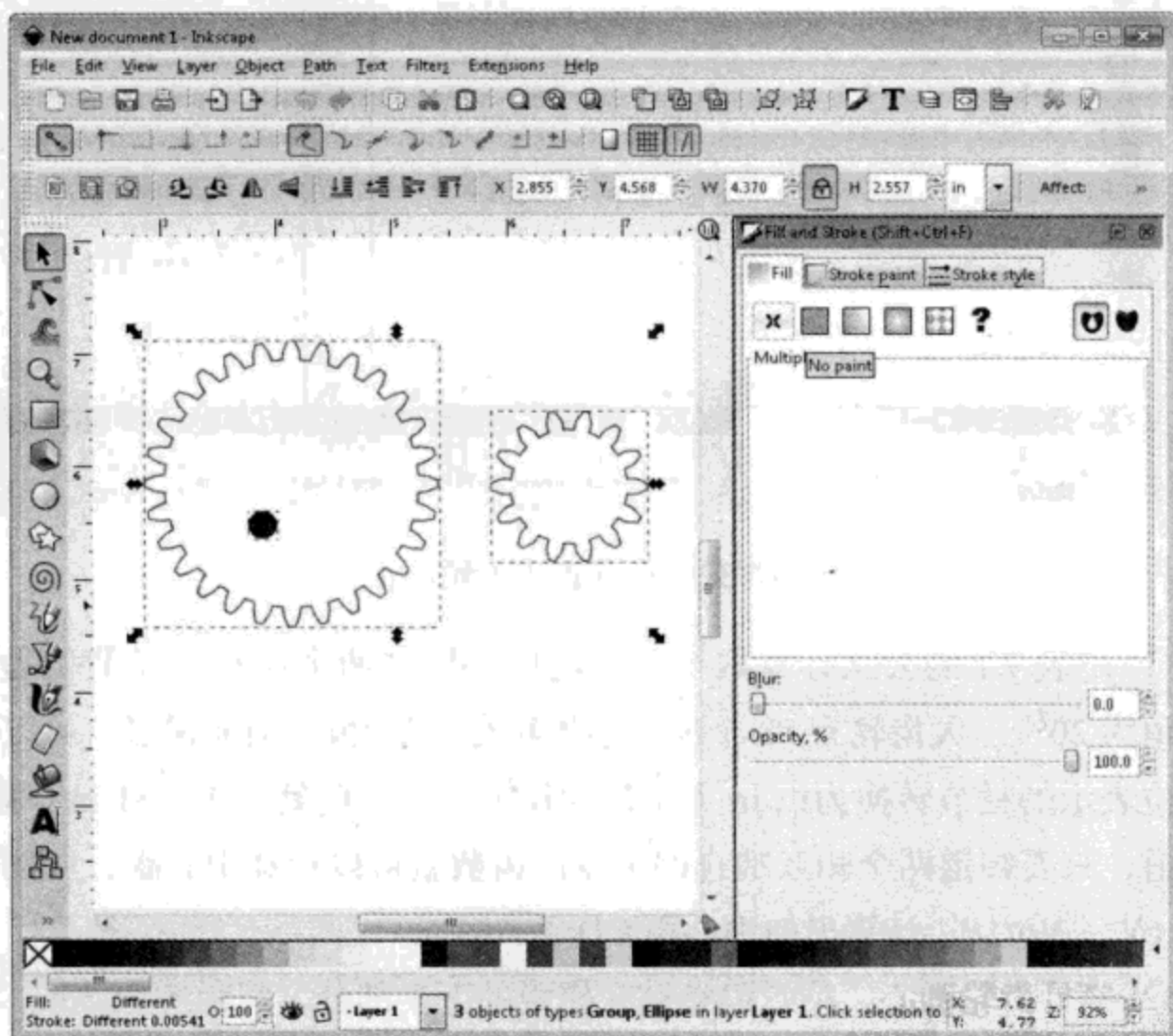


图7.31 “Fill and Stroke”窗口

(8) 这个圆需要放在齿轮的正中心。确保选择箭头是激活的，单击并且在在大齿轮和圆的周围拖一个方框，就可以选中它们。在菜单栏上选择“Object / Align and Distribute”，选择“中心水平对齐”（图 7.32 中高亮显示）。然后，再单击它正下方的工具，即“中心垂直对齐”。此时，孔在齿轮正中心的位置了。拷贝并且粘贴这个圆，重复这一步，就可以在另一个齿轮中设一个中心孔。

(9) 现在齿轮已经画完了，需要一个基座，基座上需要两个距离合适的孔，这样才能安装带有  $\frac{1}{4}$  in 木销的齿轮，让它们转起来。



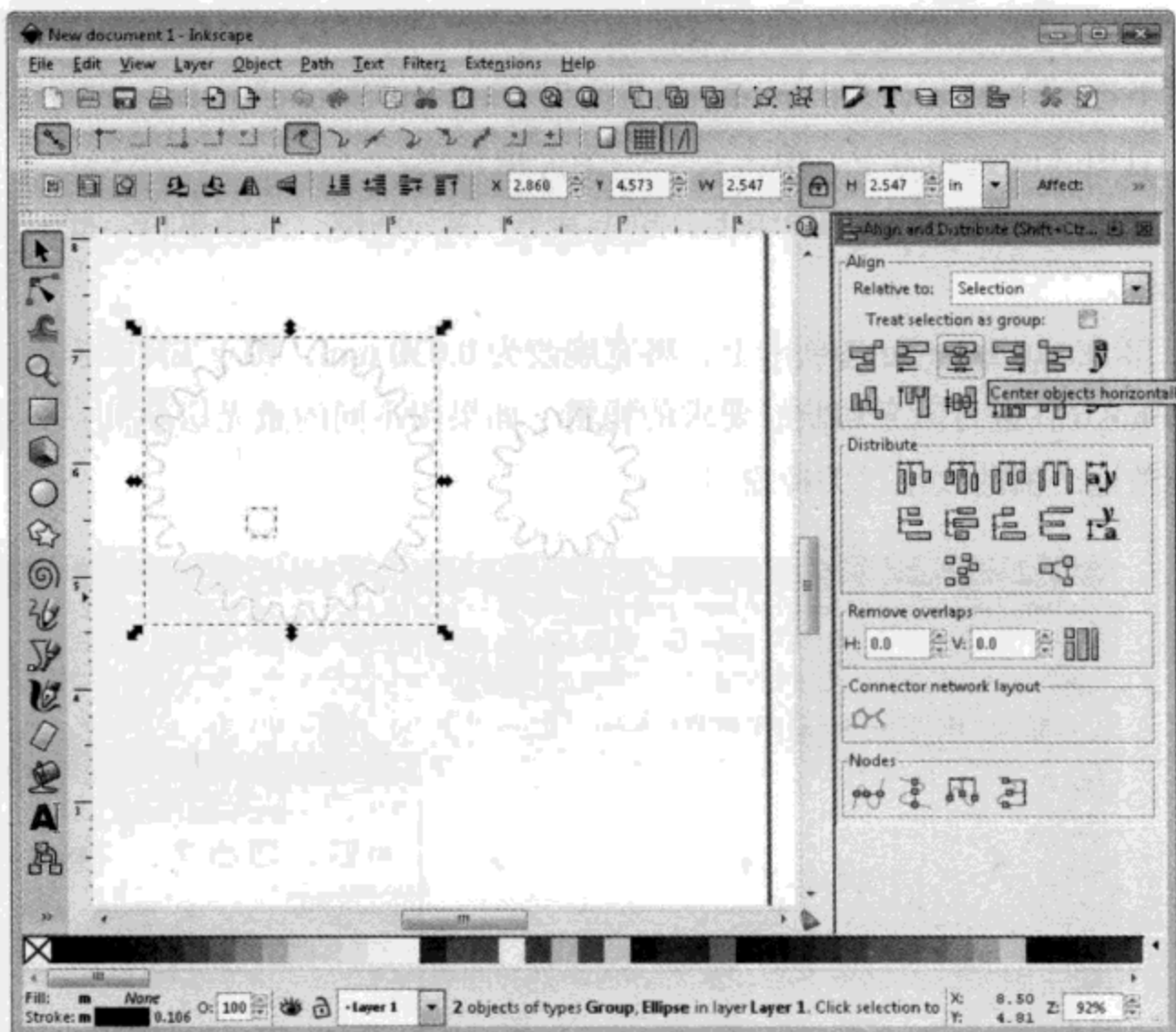


图7.32 将圆置于齿轮的正中心

① 用表 7.1 的公式计算两个齿轮的中心距。两个齿轮的径节均为 24 像素，压力角为  $20^\circ$ 。大齿轮有 28 个齿，小齿轮有 14 个齿。前面说过，可以将以像素为单位表示的径节转换为以 in 为单位的径节尺寸，此处为 11.781 in。看表 7.1 就可知道，只要知道两个相互啮合的齿轮的齿数就可以计算中心距，所用的公式为  $CD = (N_1 + N_2)/2P$ ，计算出的中心距  $CD = 1.783$  in。

② 拷贝齿轮圆心，把它们粘贴在模板的下半部分，间距约为 2 in。选择离左边最远的那个圆，把工具栏上的坐标值改为 3 in，然后按下 ENTER，屏幕应如图 7.33 所示。

③ 重复相同的步骤，把第 2 个圆放在第 1 个圆的右边，坐标值为 4.783 in。这个值是计算出来的中心距 (1.783 in) 加上第 1 个圆坐标值 (3.000 in) 的和。

④ 在这两个圆的周围画一个矩形框，基座就完成了。两个圆与矩形框的排列如图 7.34 所示。

(10) 现在就准备要上传到 Ponoko 网站的文件。

① Ponoko 用颜色来表示处理文档的方式。0.030 mm 的蓝线表示要切透。选中你画的所有的图，在屏幕底部的调色板点蓝色，同时按住 SHIFT 键。

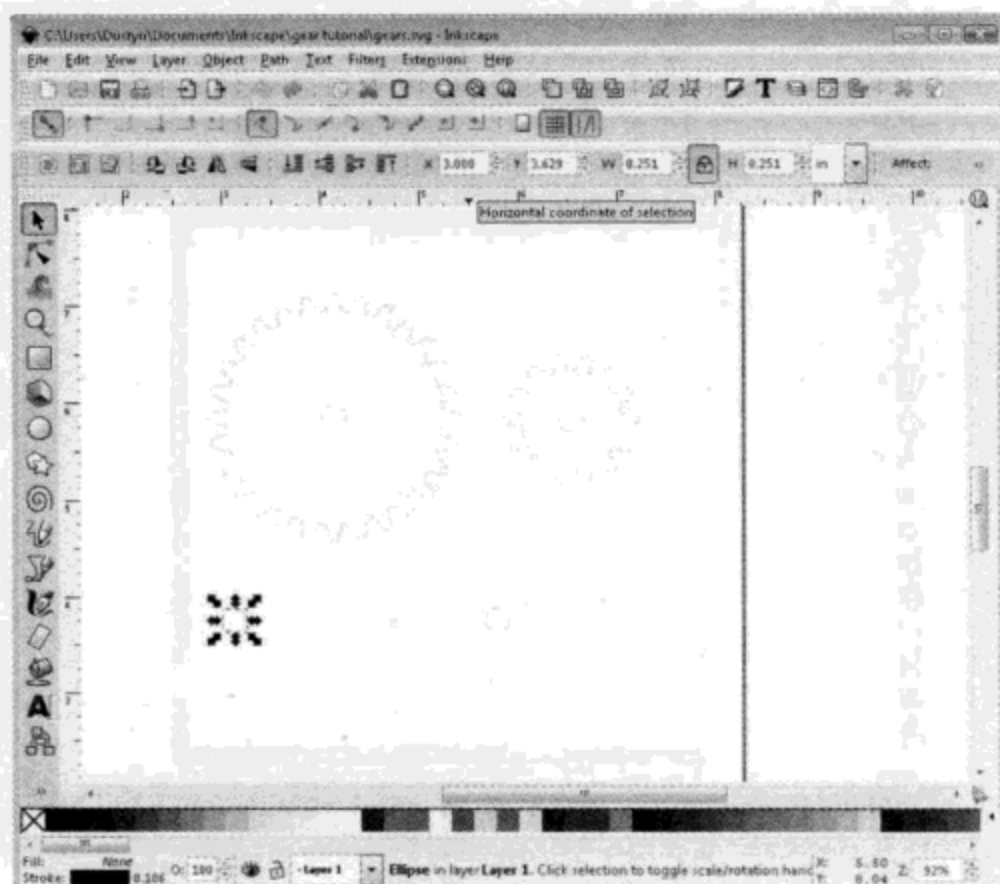


图7.33 齿轮基座的孔的放置

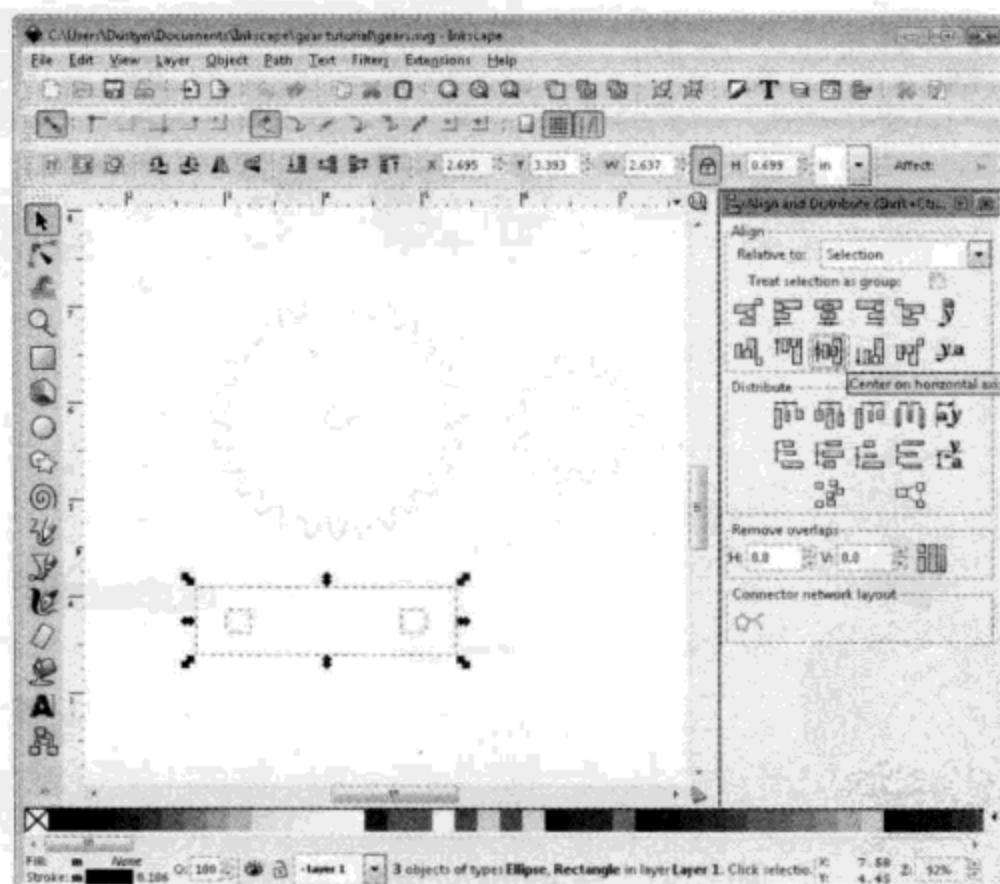


图7.34 要传给Ponoko的齿轮与基座

②打开之前下载的“P1.svg”模板。选中你画的所有的图形，把它们拷贝并粘贴到这个模板中，如图 7.35 所示。不用理会橙色的边框与文字。

③在 [www.ponoko.com](http://www.ponoko.com) 建立一个免费账户，然后上传你的文件，选择材料，安排包装运输方式。我选择用竹子材料，如图 7.36 所示，总价仅为 \$4.13(包含运费)。

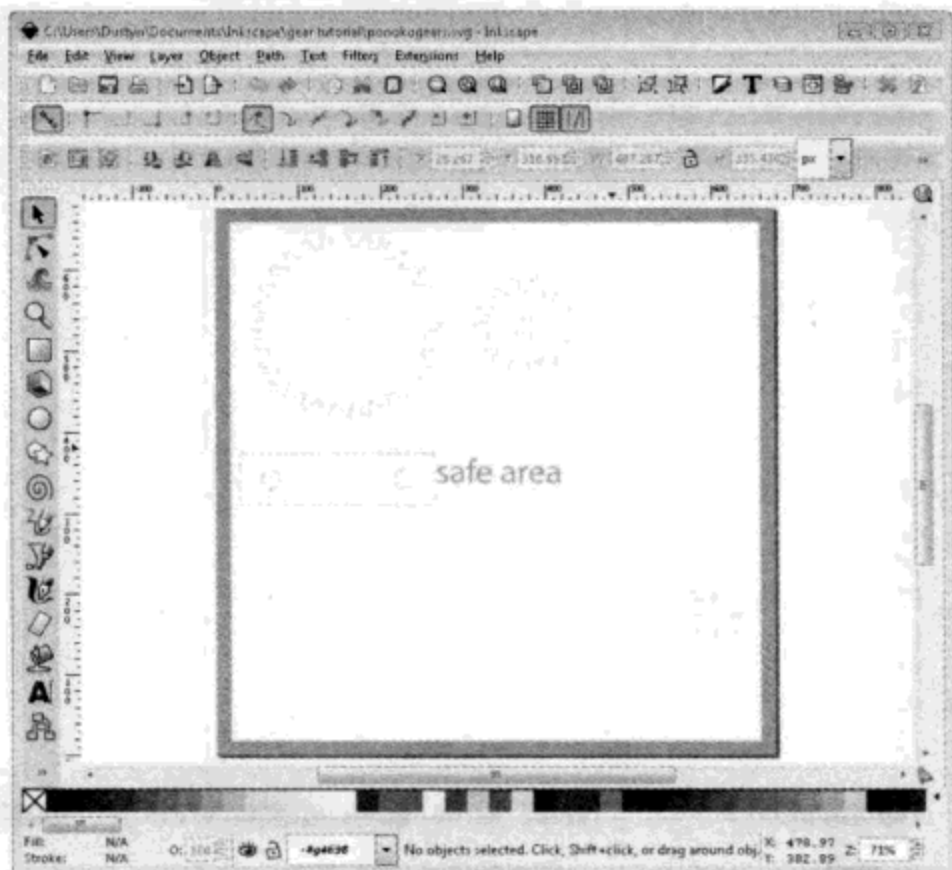


图7.35 把齿轮与基座传送到Ponoko模板

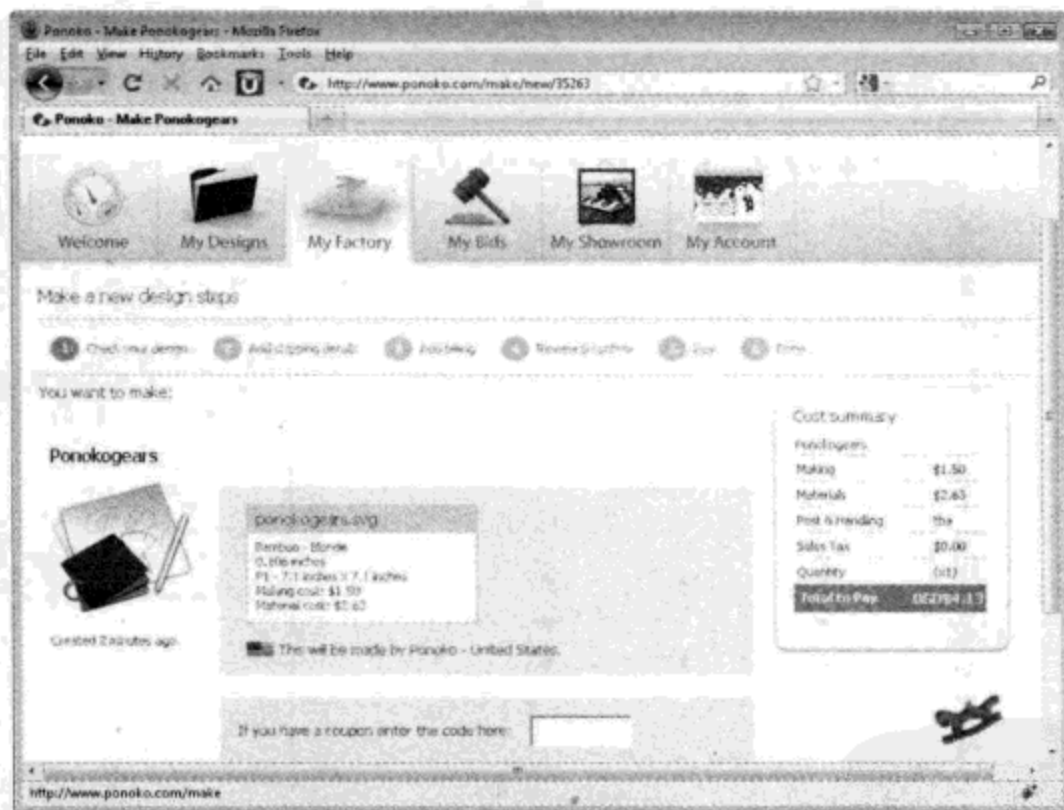


图7.36 在ponoko.com上订制齿轮

**注意** 建立免费账户后，在“My Accounts / Preferences”下设置 Ponoko 目的地—离你比较近的地方。我设置的缺省地址是新西兰，所以我的运费出奇地高。

(11) 等待 Ponoko 加工的过程中，用刀取两段 2 in 长度的木销，用锉刀把两端磨平。

(12) 齿轮到货时是放在一个方模当中的，两边均贴着保护纸。撕下纸，取

出齿轮，定位到基座的两个孔上。插入木销，就OK了。图7.37是我装好的齿轮。

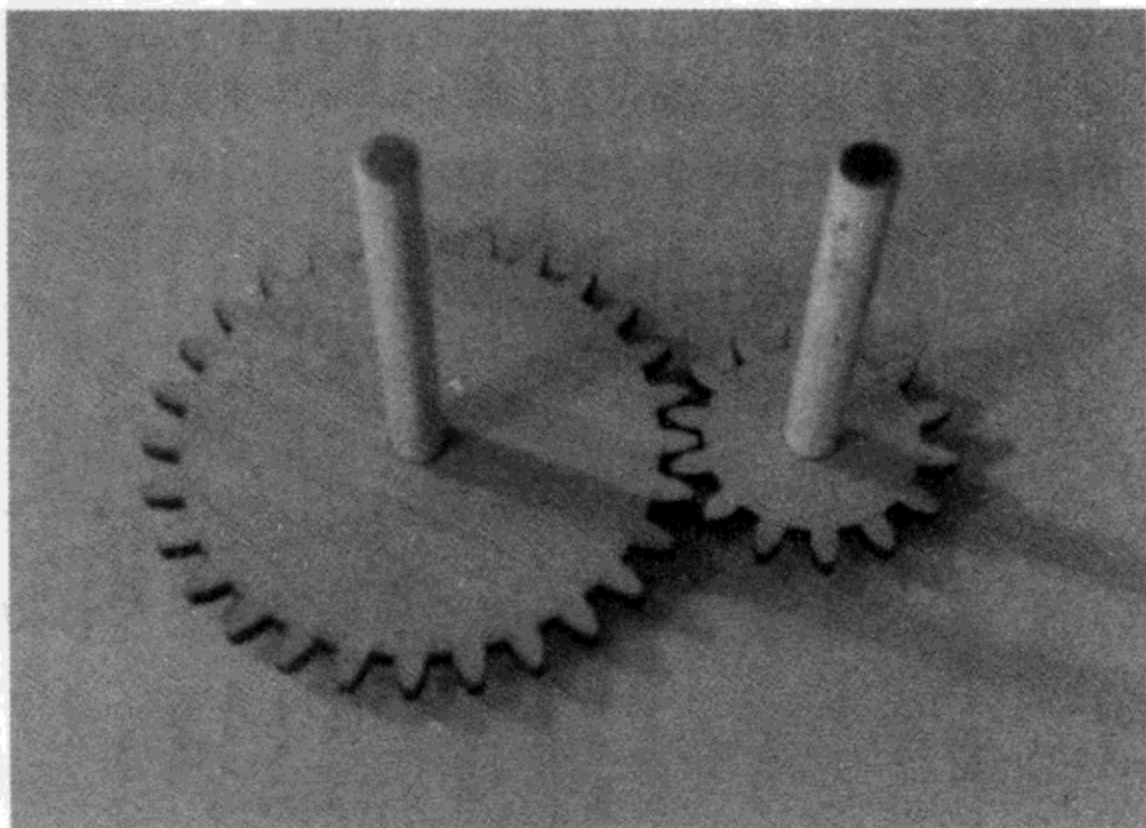


图7.37 最终用激光切割的齿轮的装配

### 7.4.1 惰轮

两个相互啮合的齿轮旋转方向是相反的。如果想得到两个转动方向相同的齿轮，可以在它们之间再装一个齿轮，这个齿轮叫惰轮。它不改变传动比，功能是让输入齿轮与输出齿轮的转动方向相同（如图7.38所示）。

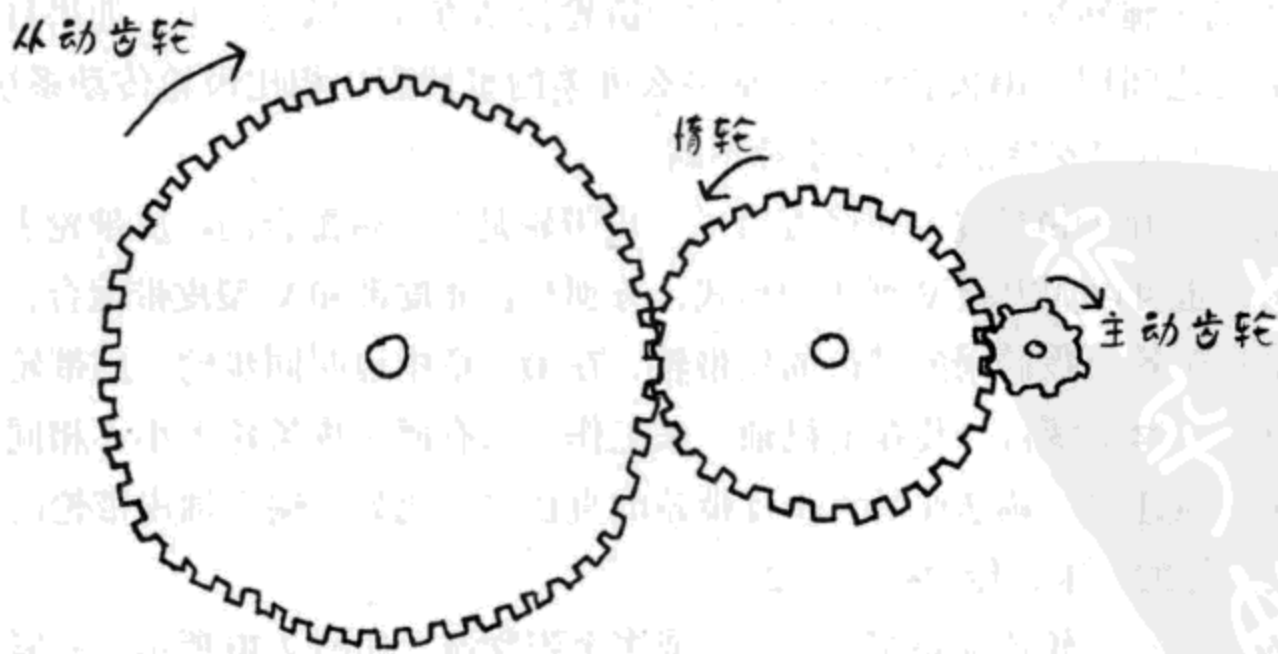


图7.38 惰轮只改变转动方向，不改变传动比

当输入齿轮轴与输出齿轮轴相距较远时，也可以用惰轮。齿轮的中心点不一定非要在一条直线上，这样就可以几乎无限地改变输入轴与输出轴的距离了。

## 7.4.2 组合齿轮

在同一个轴上装多个齿轮就构成了组合齿轮，如图 7.39 所示。组合齿轮系有多个齿轮组。每一组齿轮都有自己的减速比，但是因为有一个共同的轴把两组齿轮连接在一起，所以系统的减速比是两组齿轮减速比的积。

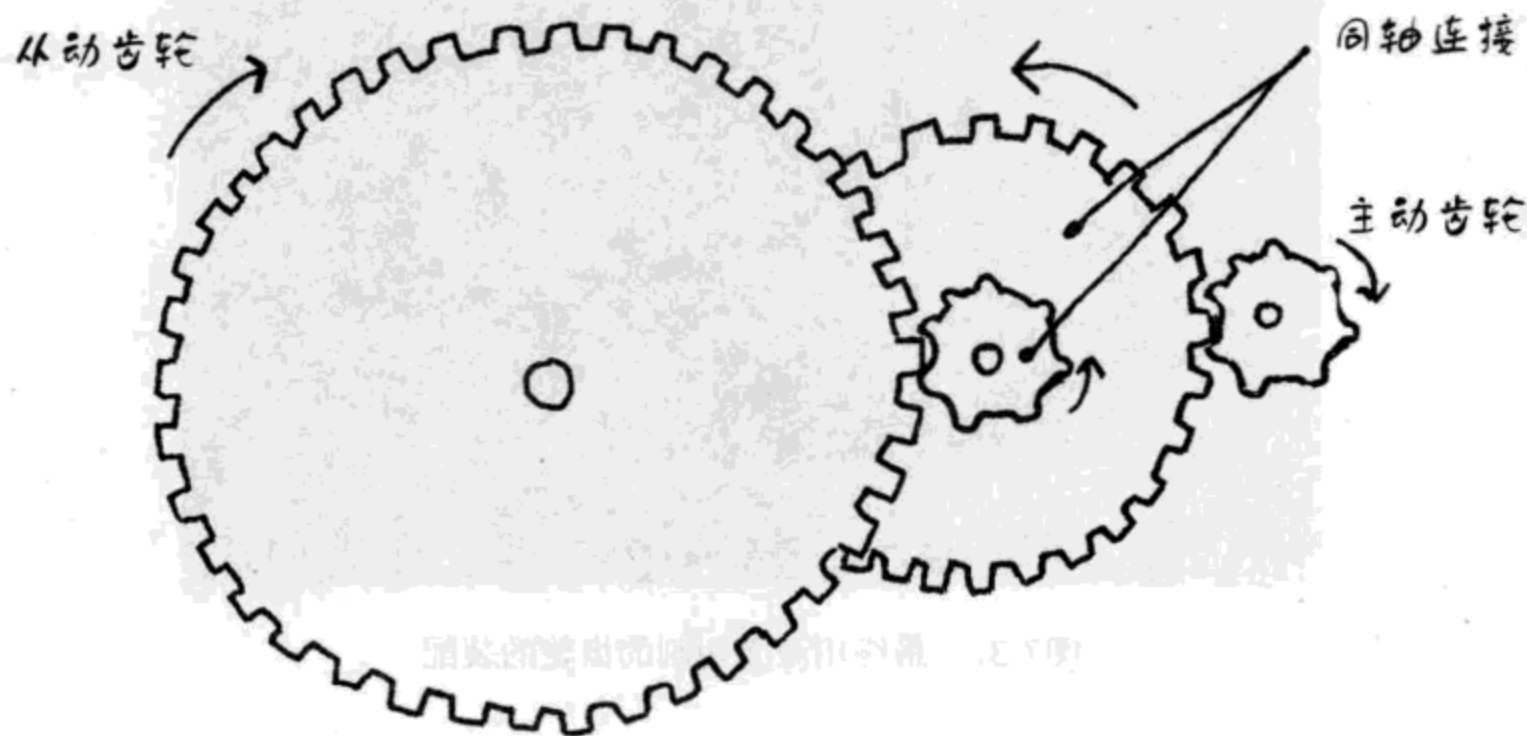


图7.39 组合齿轮系

## 7.5 皮带轮与链轮、皮带与链条

远距离传输转矩时，常选择皮带轮与链轮传动方式。试想一下，如果自行车的脚轮与后轮之间用一串齿轮传动，是多么可笑的事情啊！相比齿轮传动系统而言，这两种传动方式对安装精度的要求都不高。

自行车上用的链轮是与链条配合的。皮带轮是与皮带配合的。皮带轮表面可以是光滑的，也可以加工成 V 型槽的形式，分别与普通皮带和 V 型皮带配合，也有表面带槽的皮带轮。我们用的带齿的皮带轮，在第 1 章中也叫同步轮。皮带轮与链轮都带有轴毂、紧定螺钉，装在电机轴上来工作。只有两个皮带轮大小不相同，才会得到一定的减速比，减速比是大小皮带轮的直径比。比如，输入轴皮带轮的直径为输出轴皮带轮的一半，传动比就为 2 : 1。

通常会在皮带轮传动系统中装一个或多个张紧器，如图 7.40 所示。张紧器也是一个轮子，安装在一个槽中，承受弹性载荷，而且是可调的。当机构运动时，张紧器会保持皮带始终是张紧的。



图7.40 带张紧器的MakerBot同步带系统（图片经MakerBot实业公司允许使用）

安装完皮带后，经常需要调整张紧器，这比调整已经安装好的皮带轮的位置要简单得多。张紧器与惰轮相似，不改变系统的传动比，只改变传动方向。实际上，这种轮也叫惰轮，通常也用轴承与垫圈做轴毂来保证流畅的转动。

在 McMaster 和 Stock Drive Products 上可以买到各类皮带与皮带轮。ServoCity 也提供一些小的链轮与链条，尤其是使用舵机或 ServoCity 的直流电机时，在 ServoCity 上都可以买到相应的小链轮与链条。

### 7.5.1 普通皮带轮与皮带

一般的皮带轮提供的是摩擦传动，因此对皮带的张紧度要求高。若皮带太松，无法传递运动；若太紧，摩擦力会太大，或产生一些结构上的问题。用同一条皮带连接的皮带轮的转动方向相同。若想使两个皮带轮的转动方向相反，可将皮带扭成“8”结构。

皮带轮的表面可以是平的，有的上面也加工有齿，可与光滑的或V型皮带配合。有些皮带特别硬，需要很大的张紧力才能顺利运转，对于用纸壳或冰棍棒做的机构，皮带是无法工作的。在选择皮带之前，应确保其他的机构都安装到位。皮带的硬度没有办法减小，但一般来说，皮带越薄、越细，皮带就越软。

## 7.5.2 同步轮与同步带

因为同步带的槽与同步轮的齿可以啮合，所以传动效率高。汽车中有这种同步带与同步轮（见第1章图1.10），打印机中也有更小的同步带，CupCake CNC中也用到了这种配合（图7.40）。

同步轮与同步带有很多尺寸系列，名称有MXL和HTD等。记住这些系列的名称不重要，重要的是确保你选择的同步轮与同步带的规格相同，也就是说，皮轮要足够宽，能够装下同步带。与齿轮啮合类似，相互配合的同步轮与同步带的径节应该相同。

## 7.5.3 链轮与链条

与齿轮传动类似，因为链轮与链条是咬合在一起的，所以提供的是一种强制传动。标准的自选车链条是 $\frac{3}{8}$  in，也有更小一些的金属链条，甚至还有扣合连接的塑料链条。图7.41所示为用于舵机的一种铝链轮及 $\frac{1}{4}$  in的链条。



图7.41 装在舵机上的铝链轮与 $\frac{1}{4}$  in的链条（所有权：ServoCity）

## 7.6 丝杠传动

在第1章中学习过简单的有关丝杠的知识，第3章中用丝杠来固定零件。因为丝杠可以用作传动机构，所以有了“丝杠传动”这个名词。丝杠的几何尺寸决定了它可以支撑大载荷，也可以精确控制在其上滑动的任何零部件的位置。

丝杠传动有两种类型：普通丝杠与滚珠丝杠。你可能碰到过普通丝杠，有时也叫螺纹丝杠，用于固定厚零件或相距较远的零件，看起来就像一根长螺栓一样。在 MakerBot CupCake CNC 中，虽然不需要高精度的传动，也不需要支撑较大的载荷，但还是用普通丝杠做传动了。Acme 丝杠的螺纹尺寸经过了特殊的设计，用于更有效地支撑大载荷。

滚珠丝杠的螺纹是截面为半圆形的槽，与之配合的螺母内的钢珠可以在这个槽内滚动自如。因为传动效率高，所以滚珠丝杠与螺母副比其他类型的丝杠价格高。因为摩擦小，更多输入功率可转化成有用功。

不管用何种丝杠，丝杠传动都有一个最大的优点，那就是传动比特别高。第 1 章中汽车千斤顶上的丝杠的传动比为 600:1。在应用中，如果要用很小的输入力抬起一个很大的载荷，高传动比就至关重要了。很多年来，丝杠都是起这个作用，有时也用作将大的输入力转化为小的输出力。图 7.42 是一种手动的木制丝杠，在冲床还没出现之前，被葡萄酒厂用来压葡萄汁。

McMaster 与 Nook 实业公司 ([www.nookindustries.com](http://www.nookindustries.com)) 都提供丝杠。



图7.42 在葡萄酒厂博物馆的立体模型中，用来压榨葡萄汁的丝杠

## 7.7 弹 簧

弹簧在机构设计中是非常有用的零件。可以用来保持盖子关闭，将螺线管返回初始位置，用在门插销和防倒转的棘齿上等。第 5 章中提到过，弹簧可以存储能量，



是第8章中机械玩具常用的零件。现在学习弹簧的类型及它们的用法。

### 7.7.1 压簧

说到弹簧，多数人可能会想到压簧。在自动钢笔或铅笔中用的就是小压簧；在山地车的减震器中用的是大一点的压簧。现在先学习一下弹簧的规格参数的定义，这样在购买时就知道这些参数表示的意思了。图7.43是用在压簧上的参数。

- (1) 内径：弹簧内可以装的杆件的最大直径。
- (2) 外径：弹簧外边缘的直径。
- (3) 线直径：用来做弹簧的金属丝的直径。
- (4) 自由长度：没有压下时的弹簧长度。
- (5) 压并高度：压至各线圈完全接触时的高度。
- (6) 弹簧劲度或刚度：虎克（Hooke）定律中的  $k$ ，单位为力/长度，指的是在特定重量下弹簧的压缩量。

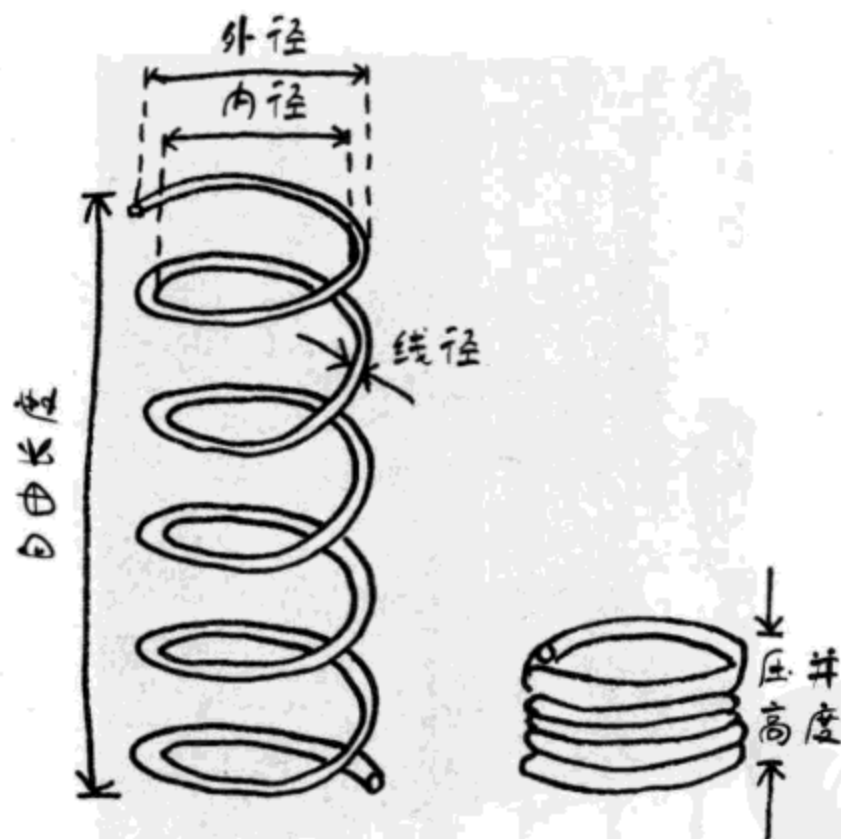


图7.43 压簧的参数示意图

压簧可用作减震器，在螺线管中可用作返回弹簧，还可用于发射器、皮带张紧器、木偶盒上的返回弹簧（图7.44）等。使用平底的压簧最容易了。将弹簧用外壳包起来，或将它固定在轴上可防止弹簧向侧面弯曲。

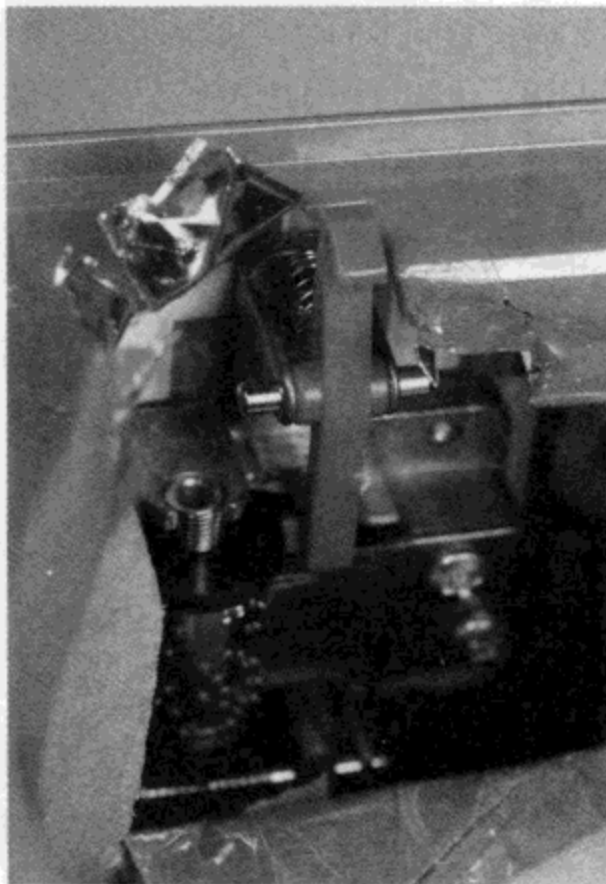


图7.44 木偶盒上的压簧

## 7.7.2 拉簧

拉簧也叫张簧，与压簧的原理和作用相反，但大部分规格参数的定义相同。拉簧的初始状态是每个线圈都完全接触，被拉长时产生反作用力，如图 7.45 所示。只要能返回初始长度，就可以继续拉伸。拉伸的最大安全距离就是拉伸长度。

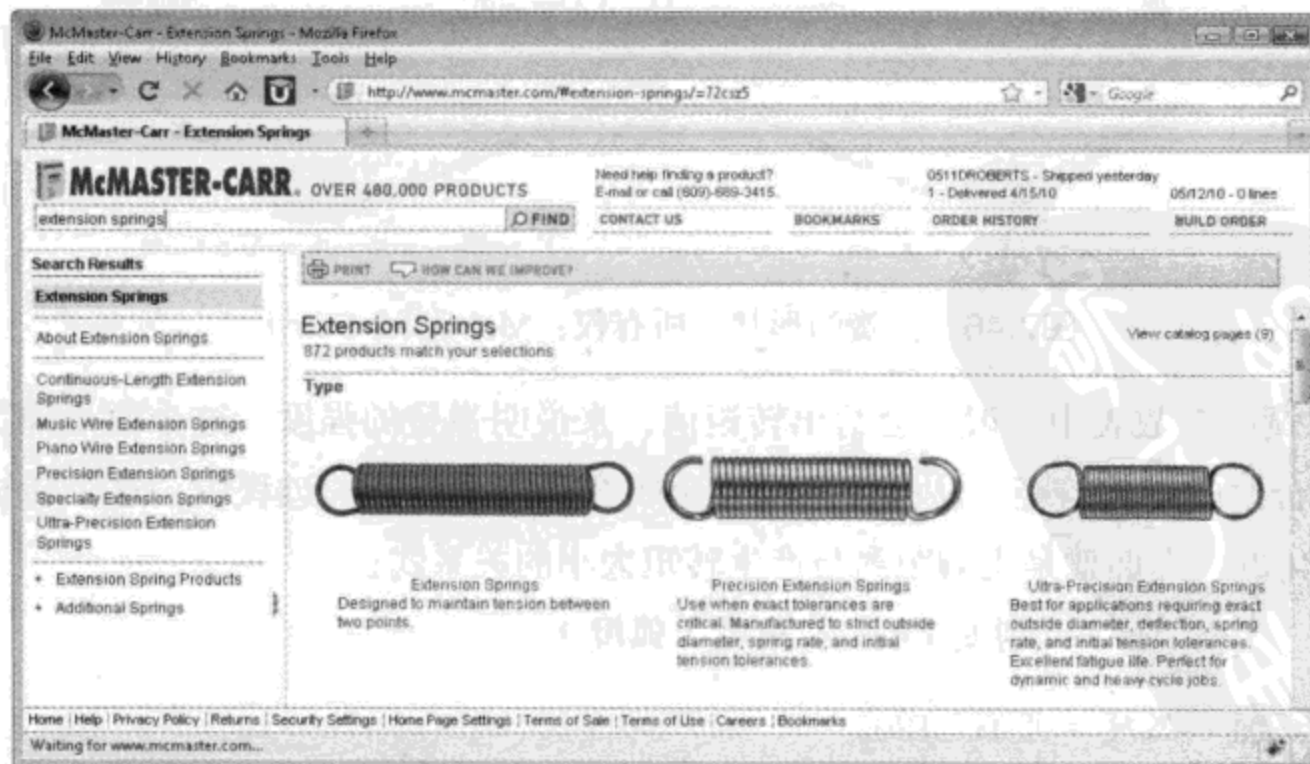


图7.45 拉簧（所有权：McMaster-Carr）

其实我们多数人的写字台上都有拉簧，就在你的订书机里。里面的拉簧一直给

钉书钉施加力，所以总会将下一个钉书钉送到能钉的位置。

在多数使用压簧的情况下，可以使用拉簧，只是安装方式不同而已。因为不需要孔或轴作为导向装置，所以一般来说，拉簧用起来更容易些。拉簧不一定要固定在一个平面上，也可以像弹簧秤上的拉簧一样悬挂在一些机构上。在车库门机构上或蹦床的四周也都用到了拉簧。

### 7.7.3 扭簧

扭簧通常用于关闭某种机构，施加的是转矩或旋转力。在发夹、捕鼠器、衣服夹、有夹子的笔记板中都有这种扭簧。有的门把手中也有这种弹簧，用于在开门后使门把手自动回到初始位置。

理解扭簧的工作原理或买扭簧时需要一点技巧。扭簧也有几种不同的种类，可以按照扭簧的两个支脚张开的角度的大小，以及运动范围来进行分类，如图 7.46 所示。

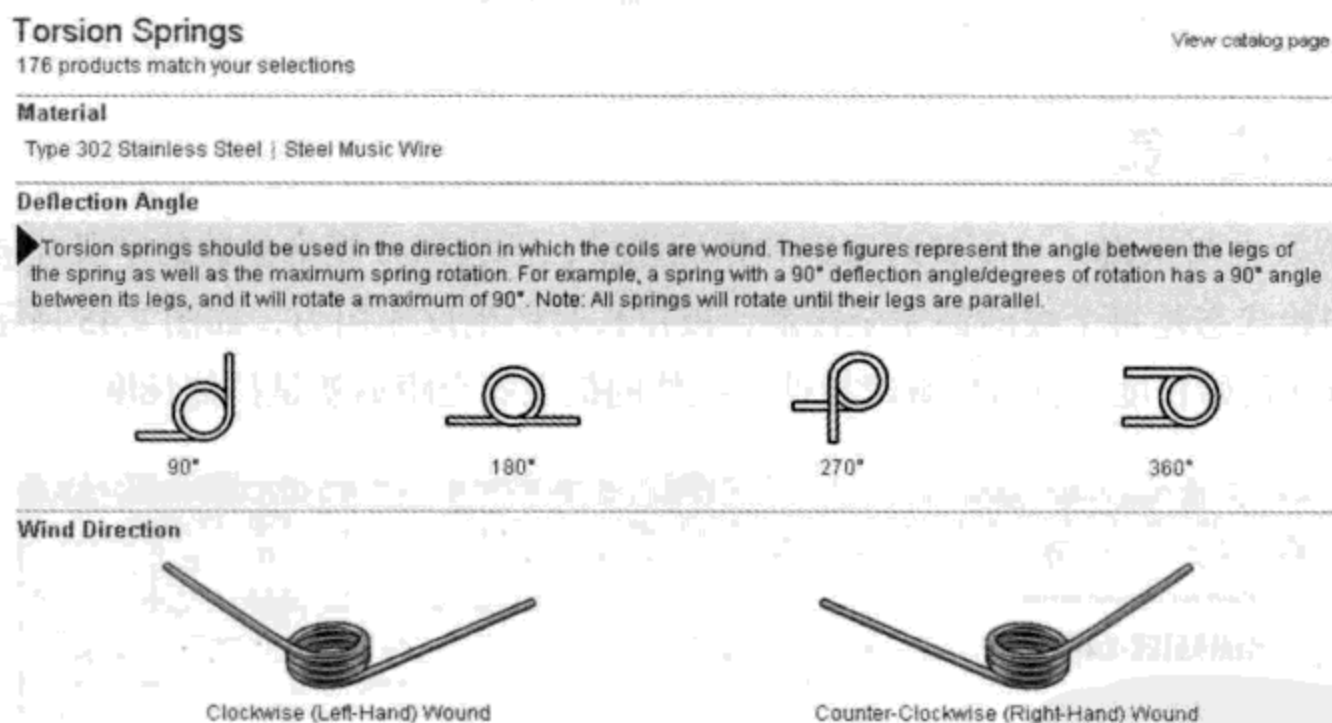


图7.46 扭簧的形状（所有权：McMaster-Carr）

弹簧的参数表中一般只会给出转矩值，来说明弹簧的强度。这个值是弹簧两个支脚闭合时的最大转矩。从两个支脚完全闭合到完全张开的过程中，这个转矩的大小是变化的。下面就是支脚距离与产生转矩大小的关系式：

$$\text{转矩} (T) = \text{刚度} (k) \times \text{角度} (\text{弧度})$$

**注意** 弧度 = 度数 / 180。

若求任何一个中间角度时弹簧的转矩值，首先用公式及弹簧的最大变形量计算出弹簧的刚度，然后用刚度乘以中间角度值即可。也可以用等比公式计算，如 90° 时的转矩为 1 lbf · in，那么 45° 时的转矩就是 0.5 lbf · in 了。如果想学习如何使用

一个扭簧，复习一下第5章中的项目5.1，就会觉得原来捕鼠器的工作原理是多么简单了。

### 7.7.4 弹簧垫圈

弹簧垫圈，有时也称作阀瓣垫圈。第3章中学习了如何防止螺栓连接点的松动方法时，用过这种弹簧垫圈。这是弹簧垫圈最常见的用途，它的作用就像一个只有一圈线圈的压簧。

### 7.7.5 板簧

几乎每个人都看到过跳水板，它就是应用板簧的一个例子。在跳水板的端部跳起来时，板簧的弹性会缓和跳下来的冲击力，向下运动，然后把人向上推。汽车和卡车的悬挂装置及其他用到板簧的装置中，均是应用了板簧的这种缓冲作用。

### 7.7.6 盘簧

在第5章中学习过，盘簧常用在发条玩具中存储能量，当外部的缠绕动作停止时将这种能量转化成运动。另一种盘簧叫恒力弹簧，用在卷尺中。这种弹簧会让卷尺总是趋于恢复其初始的状态，所以在这个方向上会产生不变的拉力。McMaster 就提供这种恒力弹簧。

## 参考资料

[1] Richard G. Budynas, J. Keith Nisbett, and Joseph Edward Shigley, *Shigley's Mechanical Engineering Design* (Boston: McGraw-Hill, 2008).

[2] Dennis Clark, *Building Robot Drive Trains*, ed. Michael Owings (New York: McGraw-Hill, 2003).

[3] U.S. Bureau of Naval Personnel, *Basic Machines and How They Work* (New York: Dover Publications, 1971).

[4] Lesley Flanigan, "Making Basic Gears: Tutorial," ITP Mechanisms and Things That Move Archives ([http://itp.nyu.edu/~laf333/itp\\_blog/mechanisms\\_and\\_things\\_that\\_move/](http://itp.nyu.edu/~laf333/itp_blog/mechanisms_and_things_that_move/)).

本 章 主 要 講 述 了 計 算 機 的 概 念 和 應 用 范 圍

1.1

### 1.1 概 論

計 算 機 是 一 種 能 夠 自 動 地 接 受 命 令 並 按 命 令 的 要 求 進 行 運 算 的 電 子 器 件

### 1.2 計 算 機 的 應 用

計 算 機 在 各 個 領 域 都 有 廣 泛 的 應 用 如 工 業 控 制 系 統 數 據 庫 系 統 等

### 1.3 計 算 機 的 發 展 史

計 算 機 的 發 展 史 可 以 分 為 四 個 階 段 即 電 子 管 計 算 機 晶 體 管 計 算 機 等

### 1.4 計 算 機 的 特 點

計 算 機 具 有 運 算 速 度 快 精 確 度 高 等 特 點

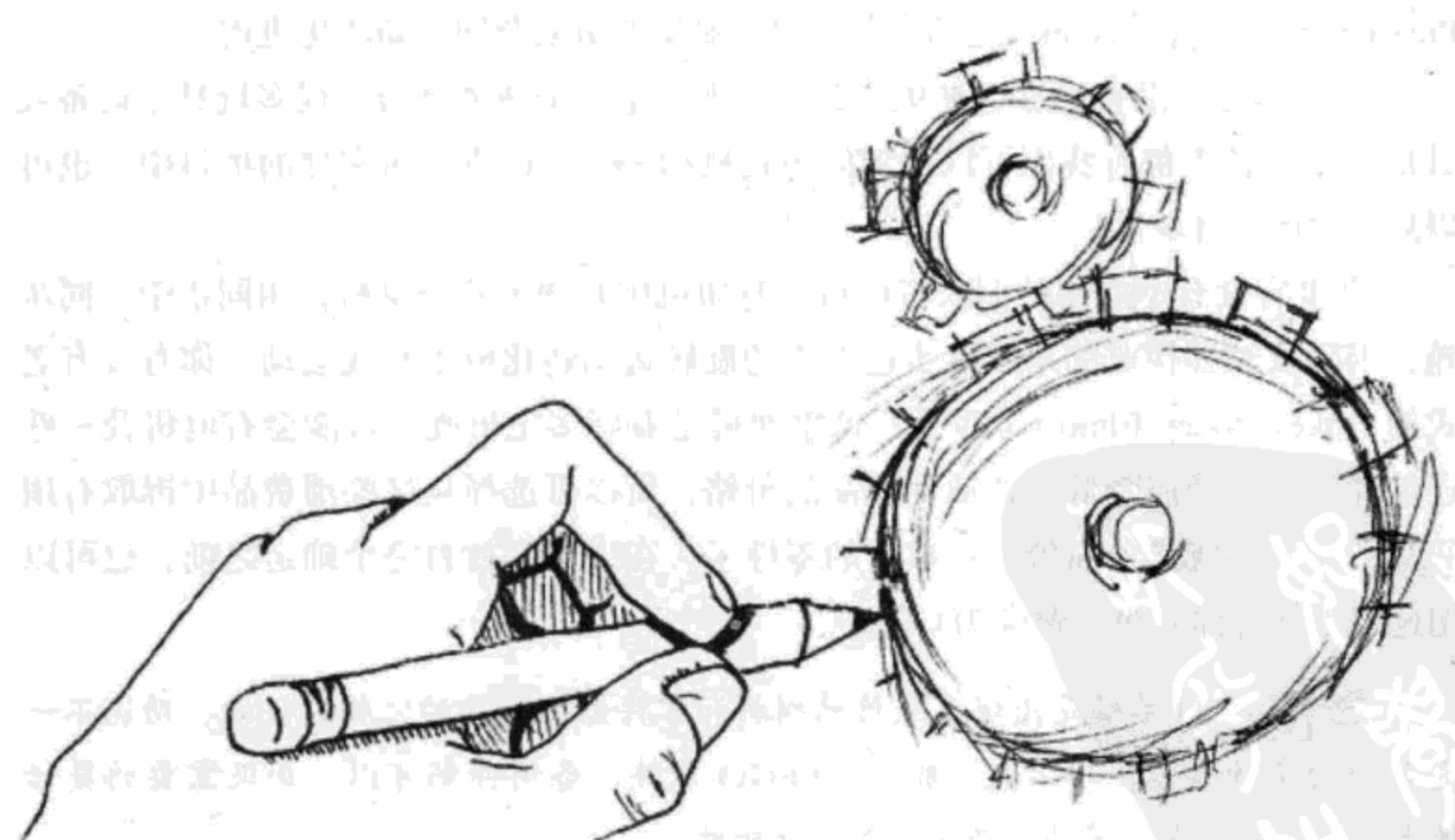
身 心 意 行 四 大 功 能 的 培 养 亦 是 本 书 特 别 注 重 的 出 发 点 和 目 的 。

首 先 以 对 象 的 中 心 思 维 运 行 地 点 。

## 第 8 章

# 组合简单机械的乐趣

本 章 的 学 习 目 的 是 通 过 对 简 单 机 械 的 组 合 运 用 。



本 章 的 学 习 目 的 是 通 过 对 简 单 机 械 的 组 合 运 用 。

几百年来，工程师与设计者们想出很多种方法来将旋转运动转化为有用功。我们已经知道如何选择电机，如何将电机与零件连接，不过我们需要的不仅仅是旋转运动。

本章将会探讨如何通过简单机械的组合，将旋转运动转化为更复杂的运动。首先学习一些我们会用到的一般的机构，然后学习基本的运动形式及运动之间的转换方式。最后，学习一些用简单机械来制作运动机构和机械玩具。不管你组合这些简单机构是为了工作还是个人爱好，它们的应用都是你无法想象的，而且其中还用到一些特别复杂的物理学定理。

## 8.1 运动形式的转换机构

最常见的输入运动——旋转运动可以通过凸轮及从动件、曲柄、连杆及棘轮转换成更复杂的运动形式。所有复杂的机械、机构及机器人都是这些简单机构的组合。这些机构可以将旋转运动转化为水平运动、上下运动、振荡或间歇运动等。Cornell大学有应用这些机构的库，可以在线访问，如设计数字图书馆的动态模型库 (<http://kmoddl.library.cornell.edu>)。Cabaret Mechanical Theatre ([www.cabaret.co.uk](http://www.cabaret.co.uk))与 Flying Pig ([www.flying-pig.co.uk](http://www.flying-pig.co.uk))这两个公司也主要生产更复杂的运动转化机构。

如果你之前没有学过这种机构，就应该一个一个地来学习。很多玩具、设备或其他日用设备中都有我们可以用到的内置机构——可以直接用在你的项目中，也可以启发你的设计灵感。

家里有没有不能用的旧式打印机？打印机中有两个步进电机，用同步带、同步轮、钢轴及轴套构成的系统将步进电机的旋转运动转化成了直线运动。你有没有老式的Hokey Pokey Elmo（玩具）？这里面可是有好多宝贝呢，可能会有电机及一些连接件。规模经济降低了普通消费品的价格，所以可选择从这些消费品中拆取有用的零件，这样就避免高价去买单个的零件了。在设计和材料完全确定之前，也可以用这些零件将你的想法做成3D草稿。

**注意** 3D草稿是用现有廉价的材料和零件做的简单的、临时性的、功能不一定全面的实物模型，用纸板、胶带、LEGO零件、备用件都可以。如果需要的灵活性更高，可以用第9章中讲到的3D建模软件。

### 8.1.1 曲柄

曲柄本质上是将连杆连接在旋转轴上的一种机构。就像老式的井上用来提水桶的机构一样，可以用曲柄作手柄来转动一个轴（图8.17中的点头羊就用了一个

曲柄)。此时的曲柄就相当于一个简单的轮轴机构，与第1章中讨论的汽车方向盘相似。如果将输入与输出替换一下，则是用旋转轴带动曲柄。此时，曲柄可用来将旋转运动转换为往复运动，或来回运动。曲柄的“行程”是它经过路径的直径的长度。

将木销粘到一块木头的孔中，或用老虎钳将衣架或其他粗电线做成一个曲柄。因为是利用摩擦和重力回到初始位置的，所以图8.1左图的机构是一种摩擦传动形式；右图中曲柄连接在输出轴或杆上了，所以利用的不是重力。

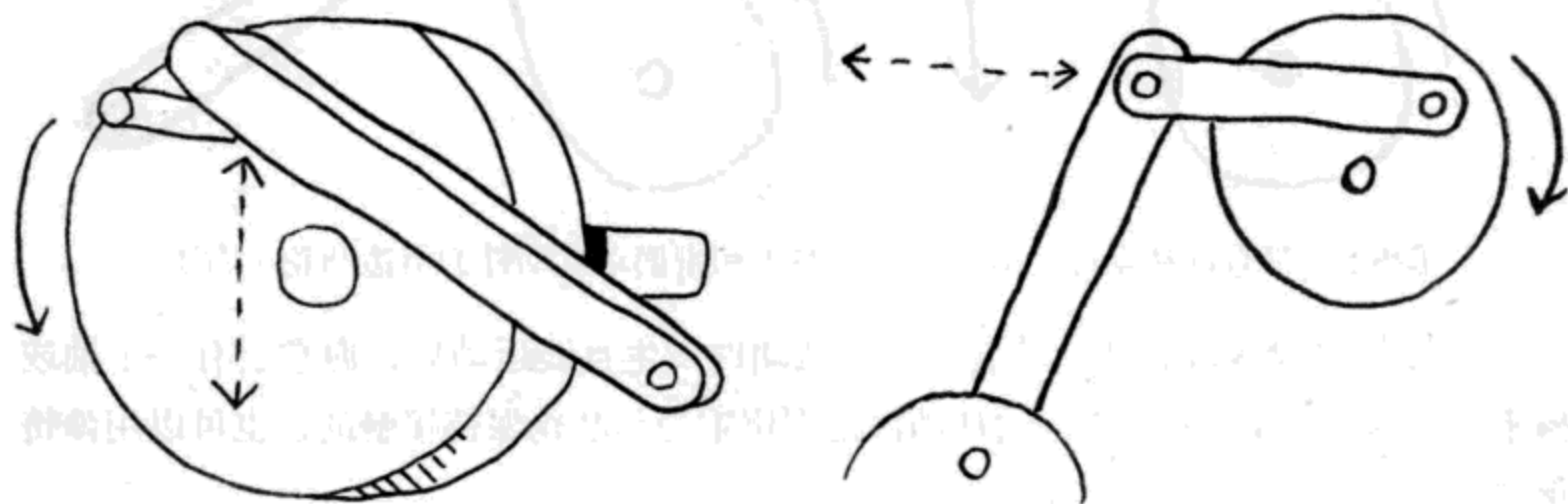


图8.1 利用重力的摩擦驱动曲柄（左）与强制驱动的摆动曲柄（右）

### 8.1.2 凸轮与从动件

如果想实现一种周期性的不规则运动，可以用凸轮。多数定义都是这样说的：凸轮是一种非圆形的，可将旋转运动转化成直线运动的构件。在新式内燃机中，凸轮用来打开或者关闭阀。在本章后面要讨论的机械玩具中，凸轮用得很广泛。

如果有基本的工具，可以自己动手用木头做凸轮，或直接从 WM Berg ([www.wmberg.com](http://www.wmberg.com)) 或其他供应商那里购买现成的凸轮。图 8.17 所示点头羊就用了凸轮，它连接到一个旋转轴上，使点头羊做点头动作。

#### 1. 沿边凸轮

最常见的凸轮是沿边凸轮（也叫盘形凸轮、圆角凸轮），如图 8.2 所示。凸轮带动的零件叫从动件。沿边凸轮可将运动转换成从动件沿凸轮边的移动。由于没有用零件将凸轮与从动件固定在一起，所以是一种摩擦传动。沿边凸轮用来生成或转换直线运动和周期性的旋转运动。

凸轮的最大半径与最小半径的差值叫做凸轮的推程，是凸轮传递给从动件的最大行程。凸轮可以是一个偏心安装的圆盘，此时推程就是圆盘的边缘到旋转轴的最大距离与最小距离的差值。从动件可以是一个图 8.2 左图所示平面件，也可以是一个图 8.2 右图所示滚动件，还可以是曲面或半圆。



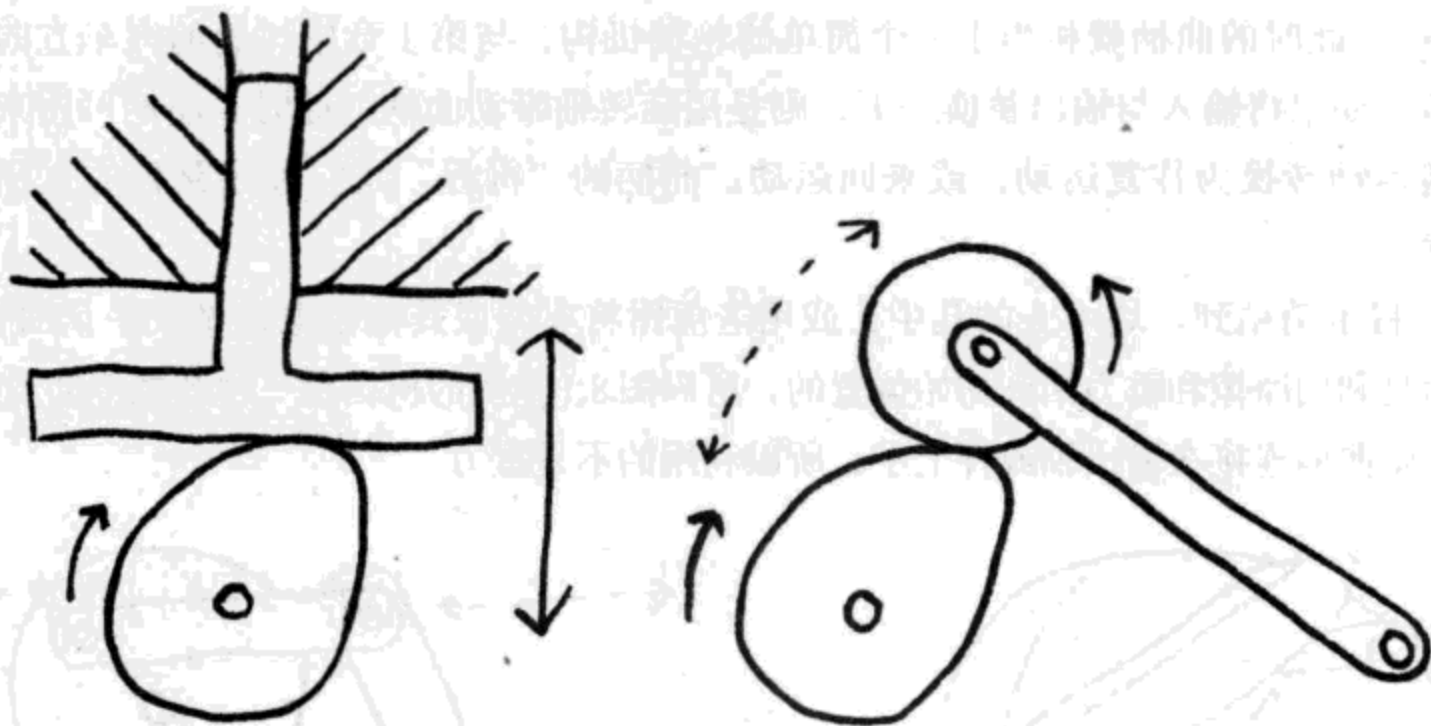


图8.2 带直动从动件的沿边凸轮（左）和带摆动从动件的沿边凸轮（右）

凸轮轴是输入轴，使凸轮旋转。当从动件产生直线运动后，通常会有一个轴或棒来引导这个运动。图 8.2 中的从动件是利用重力与凸轮保持接触的，也可以用弹簧保持接触。

图 8.2 中的凸轮可以实现正反转，但有时也需要凸轮只向一个方向转动，不能反方向转动。当逆时针转动时，图 8.3 左边的棘齿凸轮先有一个稳定的上升运动，然后突然下降；如果凸轮顺时针转动，最终会锁住从动杆。图 8.3 右边的棘齿凸轮中有 4 个这样的齿，因此凸轮旋转 1 周会产生 4 个这样的运动，凸轮旋转 1 周就是 1 个周期。每圈产生的运动形式是由凸轮的尺寸决定的。运动产生的时间是由凸轮轴的转速决定的。

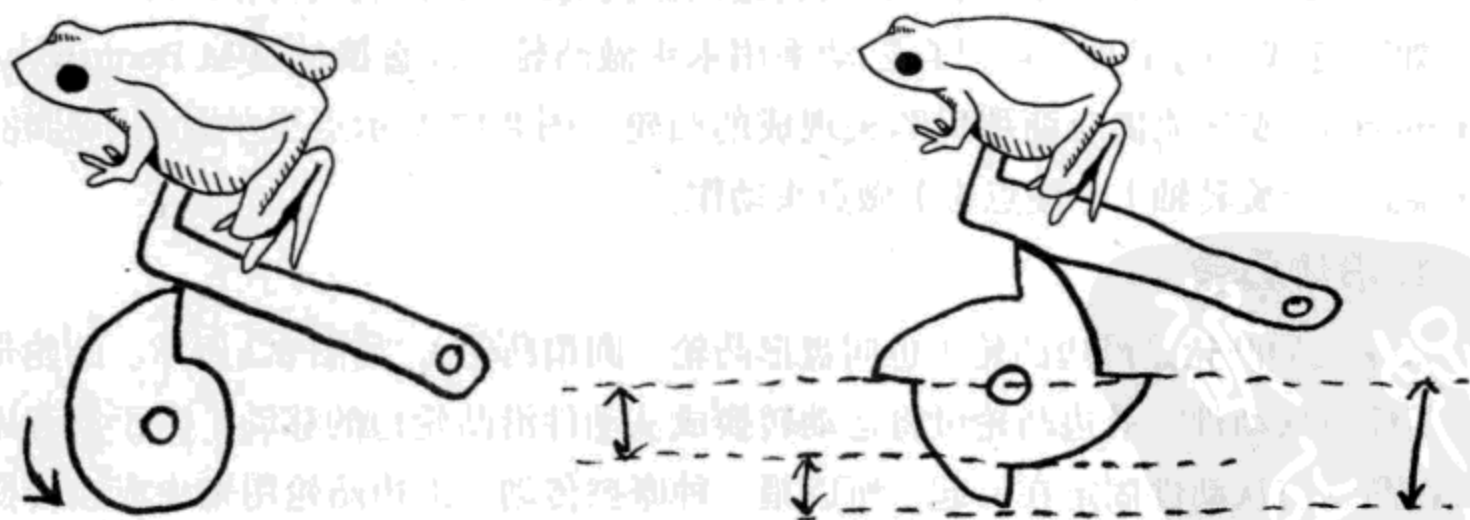


图8.3 棘齿凸轮

凸轮也可以生成复杂和不规则的运动。图 8.4 所示的沿边凸轮除了有凸起之外，还有凹陷。因为从动件在凸轮的凸起与凹陷之间会停止不动，所以凸起与凹陷之间半径不变的轮廓称为间歇。从动件的外形也很重要。从动件的接触点越好，越能根

据凸轮的形状产生各种复杂的运动。不过，接触点的强度要够大，才能承受碰撞产生的应力（参见 [www.flying-pig.co.uk/mechanisms/pages/cam.html](http://www.flying-pig.co.uk/mechanisms/pages/cam.html)）。在从动件的末端装上一个轴承或滚珠，就可以通过减小摩擦的方式来减小应力。凸轮越大，施加在从动件上的杠杆作用力越大，所以做同样工作时，大凸轮比小凸轮更容易转动，这就是为什么在大功率场合不要小凸轮的原因。

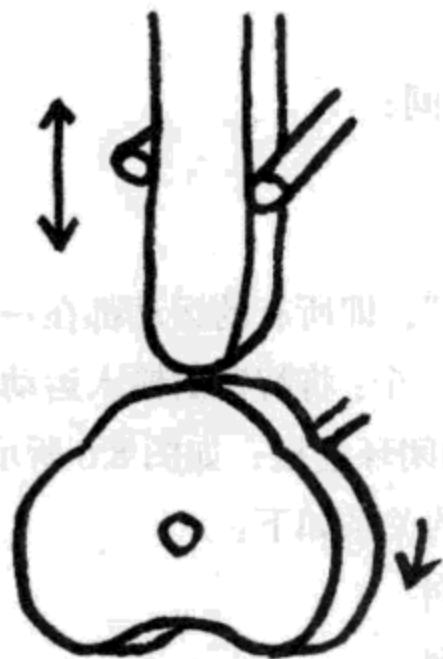


图8.4 带凸起与凹陷的沿边凸轮

## 2. 平面凸轮与鼓形凸轮

平面凸轮，也叫面凸轮或端面凸轮，将运动传递到在其表面的槽内自由运动的销或滚珠上。因为从动件被限制在平面凸轮的槽中，可以在两个方向上产生强制驱动，所以这种凸轮常用于生成两个方向的运动。

鼓形凸轮，也叫凸轮鼓或鼓状凸轮，在滚珠或从动件接触的圆周上有一个导槽<sup>①</sup>。这种凸轮可以使从动件在平行于凸轮轴的平面内产生往复运动。

图 8.5 所示为平面凸轮与鼓形凸轮的轮廓图。平面凸轮与鼓形凸轮并不常见，而且对于业余爱好级的用户来说难以制作，不过在这里还是要说明一下，也许你会用得到。

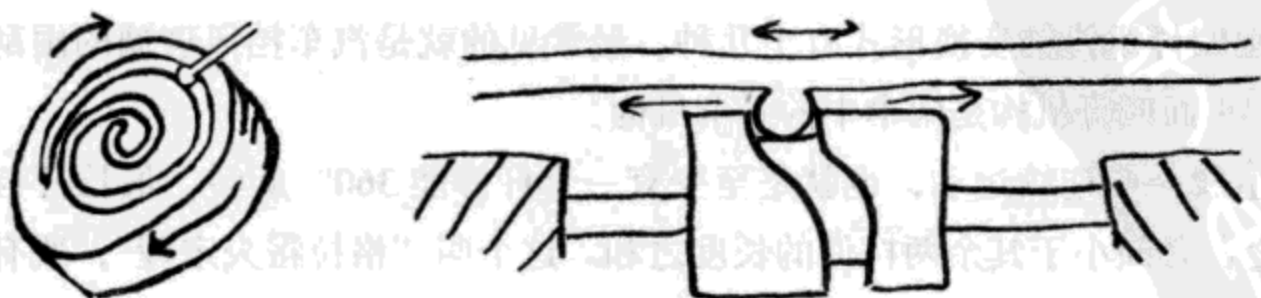


图8.5 平面凸轮与鼓形凸轮

### 8.1.3 连 杆

连杆可将一个机械零件的运动传递给另外一个机械零件。在生成复杂运动的过程中，连杆通常是最简单、最便宜、最有效的机构。连杆的形状与组成各异，有很多功能，比如：

- (1) 变换方向或改变路径；
- (2) 改变速度或加速度；
- (3) 改变运动件的运动时间；
- (4) 提供一定的减速比；
- (5) 生成复杂高效的运动。

多数连接都是“平面连接”，即所有的运动都在一个平面上。不管连接的数量有多少，连接件的功能通常只有一个：将特定的输入运动转换为特定的输出运动。

平面四杆机构是最简单的闭环连接，如图 8.6 所示。通过改变 4 个杆件的长度，可生成不同的运动。4 个杆件的关系如下。

- (1) 机架：固定不动的杆件。
- (2) 连杆：机架对面的杆件。
- (3) 曲柄与摇杆：连接机架与连杆的被动杆件。如果能转  $360^\circ$ ，就叫曲柄。如果只能做往复运动，就叫摇杆。
- (4) 从动件：曲柄或摇杆对面的杆件。不过让人迷惑的是，根据运动形式不同，从动件有时也叫曲柄或摇杆。

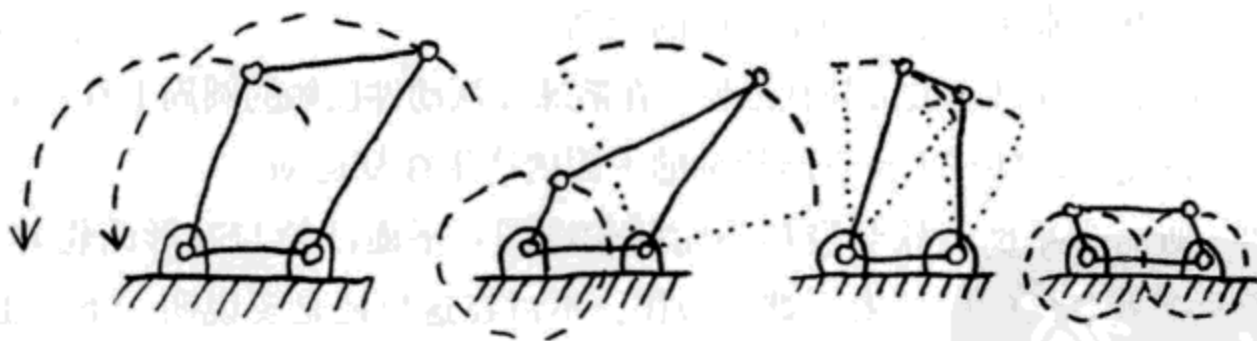


图8.6 平面四杆机构的类型

平面四杆机构的变换形式有十几种。最常见的就是汽车挡风玻璃的雨刮。另一个类似的平面四杆机构是雨伞中的开伞机构。

要生成一个连续运动，也就是至少有一个杆件能  $360^\circ$  旋转，最长杆与最短杆的长度之和必须小于其余两杆件的长度之和。这个叫“格拉霍夫定理”，所有满足这个定理的平面四杆机构都称为“格拉霍夫连杆”。

“缩放仪”中的连杆机构的功能是：一个连接点画出一个轨迹时，固定在另外一点的笔会画一个放大或缩小版的同样轨迹的图。几百年前，这种仪器用来复制或缩

放线条图。“剪式连接”用于大型剪式提升机构和小型升降台上作提升机构(图 8.7)。

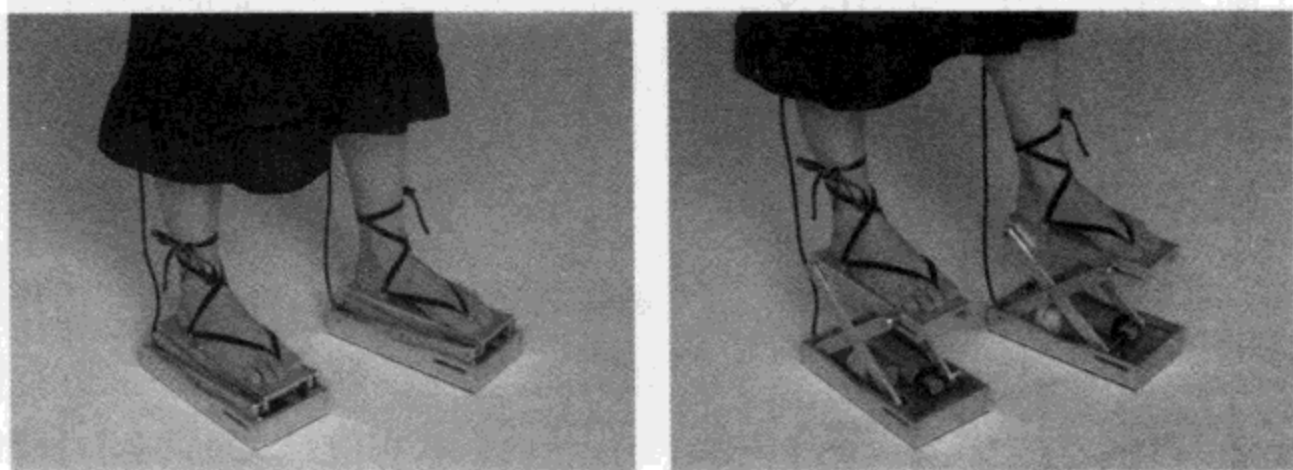


图8.7 Adi Marom用剪式提升机构和推杆做的可以站人的升降台

## 项目 8.1 缩放仪

在本项目中，我们会做一个图 8.8 所示纸板缩放仪，并用这个缩放仪进行一些实验。

### 1. 材料清单

- (1) 图钉。
- (2) 纸板。
- (3) 钢笔或记号笔。

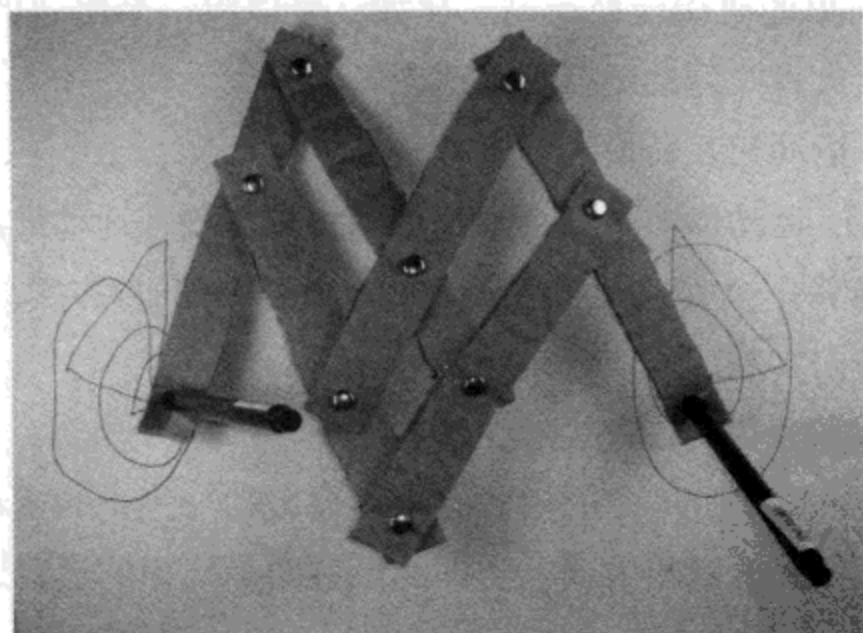


图8.8 纸质的缩放仪

### 2. 操作方法

- (1) 将纸板剪成长度相同的条。图 8.8 所示纸条长度约为 6 in，宽度约为 1 in。
- (2) 将纸条用图钉按图 8.8 的方式连接。
- (3) 在侧面每个纸条的端部打一个孔，每个孔中都放入钢笔或记号笔。

(4) 抓住中间的图钉，通过移动纸板，观察画对称图（但为镜像图）的过程。

(5) 试着将其中一些图钉换成笔来画图，或改变一下纸条的长度来画一些非对称图。

### 8.1.4 棘轮和掣爪

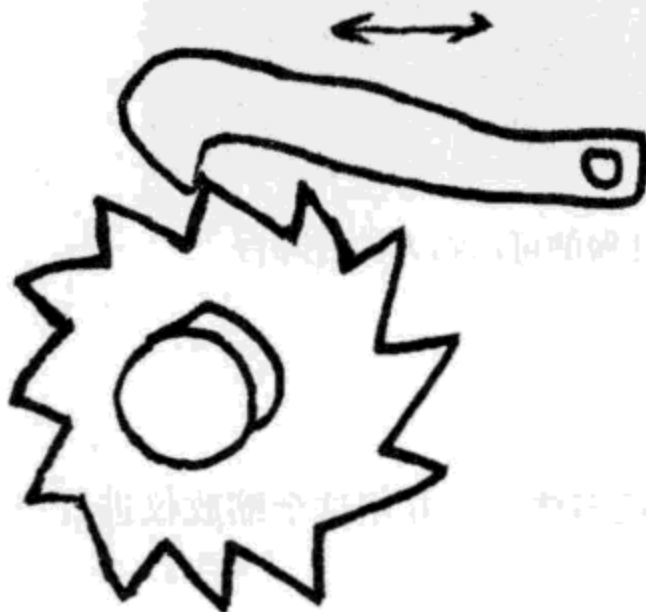


图8.9 棘轮和掣爪

棘轮和掣爪可生成步进运动，用作闭锁机构，如图 8.9 所示。棘轮是一种上边有切口的轮，与齿轮的形状相似<sup>[2]</sup>。掣爪会拉这种切口，使棘轮产生步进运动。掣轮器或制动器用来防止轮子打滑。棘轮和掣爪也可用作单向旋转的轴的制动机构。

### 8.1.5 运动转换

多数情况下，机构输入的最简单的运动形式是旋转运动，这种运动可以由电机或手柄产生。有很多种方式可将这种旋转运动转换为直线运动、间歇运动、往复运动、摆动或不规则运动。有时这些运动形式之间也可以相互转换，如摆动与直线运动的相互转换。在不改变运动形式的前提下，也可以用本章中说明的最简单的机构转换运动。比如，可以将一个慢速的旋转运动转换为快速的旋转运动、放大直线运动的行程或改变转动轴。

表 8.1 为以下运动相互转换的一些方式。

(1) 旋转运动：运动形式是一个圆，是最常见的输入运动形式。

(2) 摆动：绕着一个支点的往复运动，如老式钟表的钟摆，这种形式的运动用普通舵机就可以轻松实现。

(3) 直线运动：沿着一条直线的往复运动。

(4) 间歇运动：以一种固定的模式有规律地启动与停止的运动。

(5) 不规则运动：不能归为以上类别的没有明确规律的运动。

这张表中，上边为输入运动形式，左侧为输出运动形式，表中的交叉点是进行运动转换的方法（表中大多数材料都可以在 [www.flying-pig.co.uk/mechanisms](http://www.flying-pig.co.uk/mechanisms) 上买到）。

我们已经学过常用的运动转换方法：齿轮、皮带轮与皮带、链轮与链条、杠杆、曲柄、连杆等。下面是表 8.1 提供的运动转换方法。

表 8.1 运动形式转换方法

		输入运动形式				
		旋转	摆动	直线	往复	间歇
输出运动形式	转换形式	齿轮、皮带轮与皮带、 链轮与链条、曲柄滑块 曲柄、快速返回机构 方向盘、齿轮与齿条、滑块总成 凸轮、曲柄、活塞 日内瓦机构 凸轮	曲柄  滑块总成 曲柄、凸轮、双臂曲柄 棘轮 凸轮	齿轮与齿条 连杆 剪式连接	活塞、双臂曲柄 连杆	
	传动形式	齿轮、皮带轮与皮带、链轮与链条 齿轮 正齿轮、蜗轮蜗杆	齿轮 齿条 双臂曲柄	皮带轮、杠杆 双臂曲柄	杠杆 皮带轮、杠杆 双臂曲柄	杠杆、齿轮 皮带轮、杠杆 双臂曲柄

(1) 滑块总成：用来将摆动转换为直线往复运动，如图 8.10 所示。用滑块总成可将舵机臂的摆动转化为直线运动。

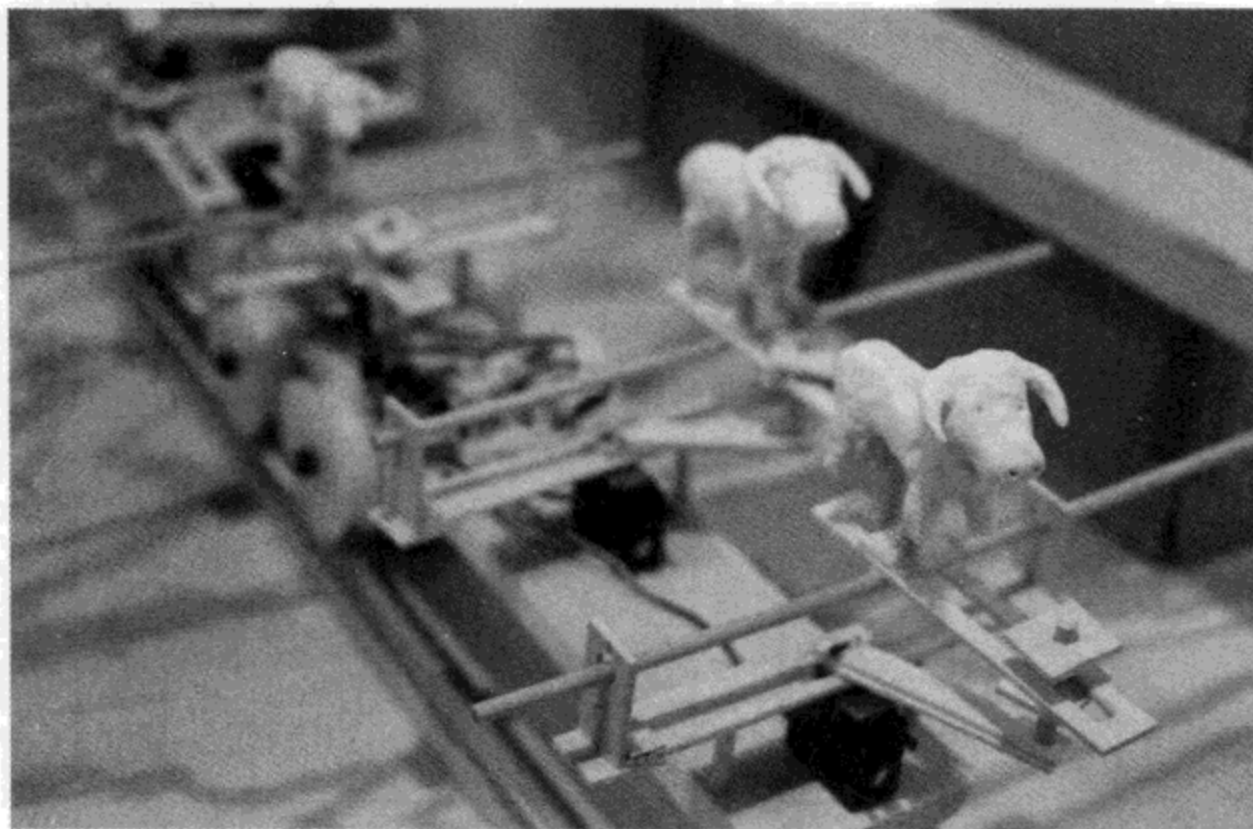


图8.10 “奔跑的公牛”中的滑块总成  
(CC-BY-NC-SA图片经Greg Borenstein 与Scott Wayne Indiana允许使用)

(2) 双臂曲柄：可生成不同运动形式的转换与传动，具体形式取决于那个是主动件，那个是从动件，如图 8.11 所示。这也是为什么在表 8.1 中这种机构出现过多次的原因。

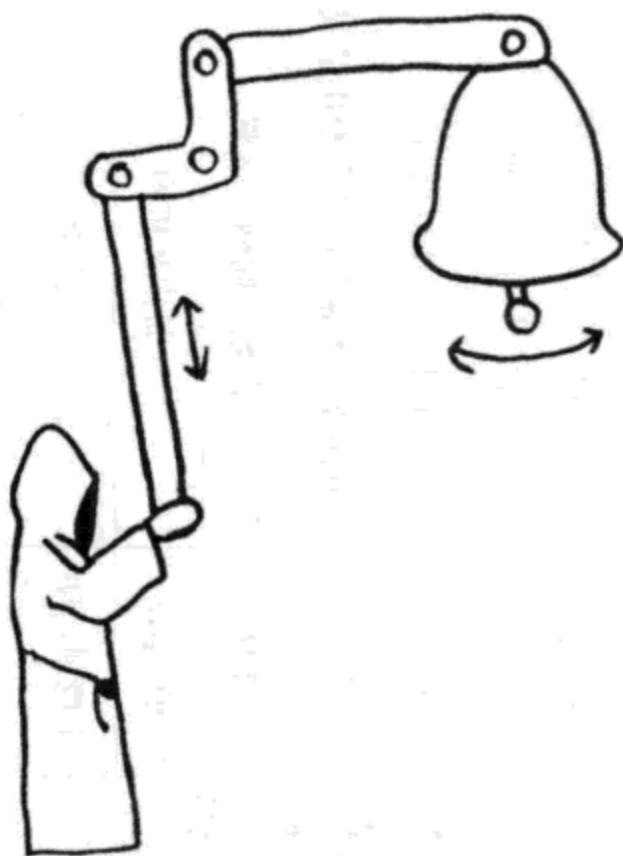


图8.11 打铃的曲柄机构

(3) 日内瓦机构：用于将旋转运动转换为间歇运动。在图 8.12 的例子中，星形件每转 1 圈带动下部的圆轮转动 4 圈。其尺寸很难把握到恰到好处，不过你可以从 WMBery 购买现成套件，或者从 Thingiverse 下载制作文件（2D 激光切割版：[www.thingiverse.com/thing:1616](http://www.thingiverse.com/thing:1616)；3D 打印版：[www.thingiverse.com/thing:1642](http://www.thingiverse.com/thing:1642)）。

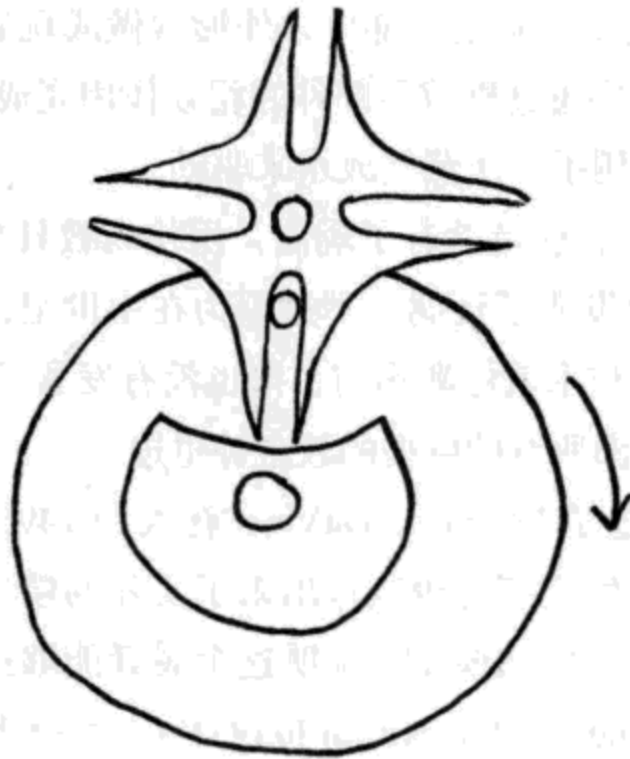


图8.12 日内瓦机构

(4) 快速返回机构：用于将连续的转动转化为摆动。在由 8.13 的例子中，由于在摆动过程中带动手臂来回摆动的销钉离底部支点比较近，所以在一个方向的摆动速度比另外一个方向快。

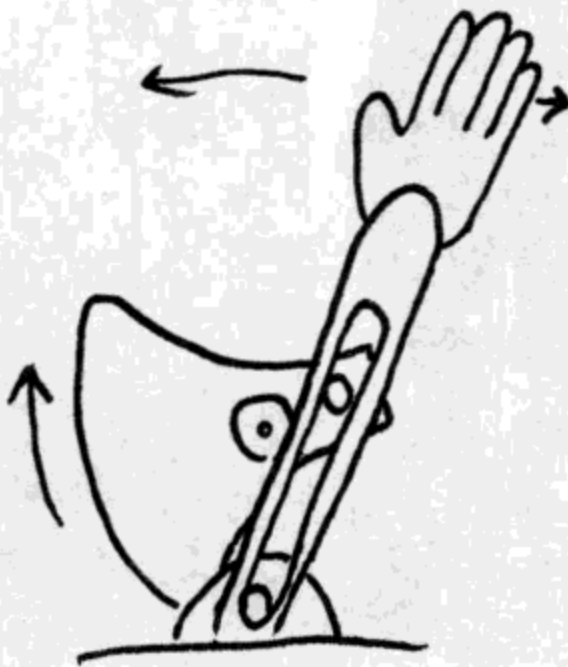


图8.13 快速返回机构



## 8.2 自动机械玩具

一些最早的自动机械玩具中就应用了动态设计。有的自动机械玩具相当复杂，包括了凸轮、连杆、弹簧以及其他零部件，外形常做成玩偶或木偶。这些玩偶会写诗或吹长笛，动作全部都是通过机械零部件的相互作用完成的，没有任何电子器件、传感器或反馈装置，都是用手、水蒸气或水来驱动。

大约在公元前2世纪，埃及就有了玩偶，用作为教具来探索运动定律<sup>[3]</sup>。紧接着，希腊和阿拉伯国家也发明了玩偶。不过因为在中世纪，多数制作机械装置的人都被定罪成异教徒，玩偶技术就停滞不前，再也没有发展了。幸运的是，到14世纪时，自动机械开始用在欧洲所有的巨型的教堂钟里边。

最早的人形机械装置是Leonardo DaVinci在大约1495年设计的机器人，如图8.14所示。不知道他在有生之年是否制作出来了实际的模型，不过后来有几个人沿用了他的设计思想，做出了实物模型，证明这个装置能够达到预期的效果。法国有一个自称是神父的人Jacques de Vaucanson也设计了一种人形机械装置，因为他设计这个装置有明显的异教倾向，所以被耶稣主教毁了。

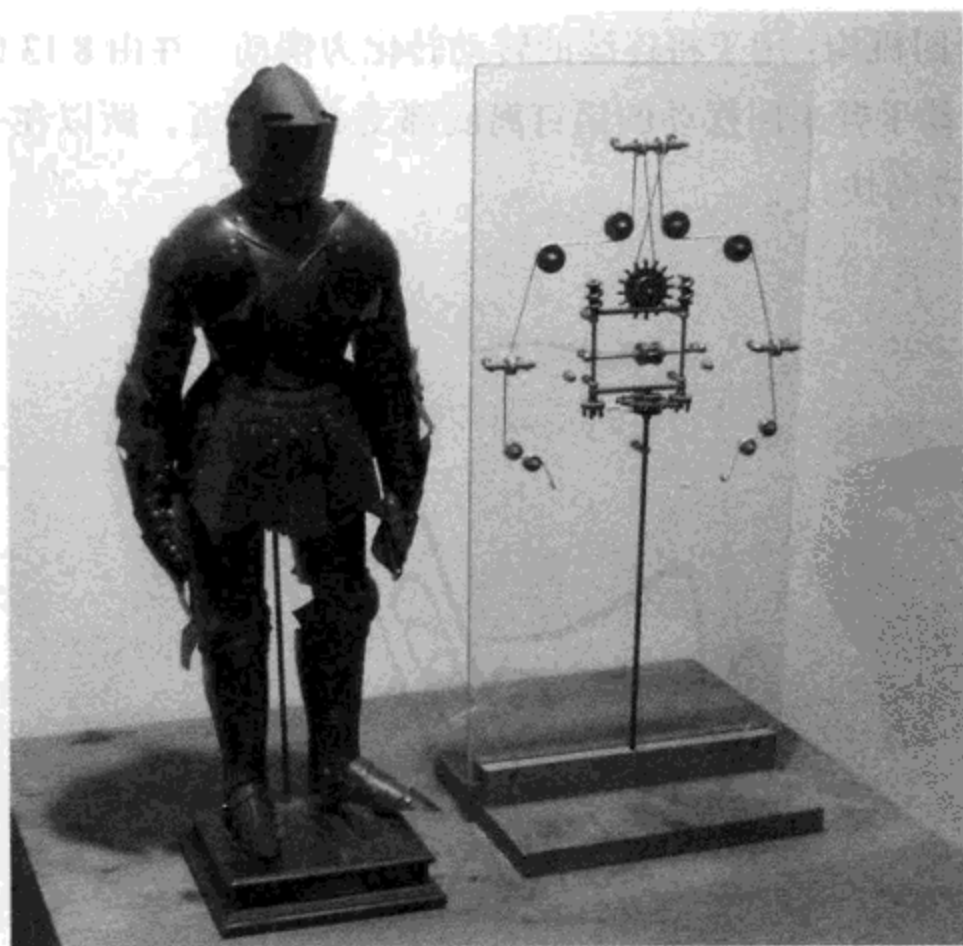


图8.14 Leonardo DaVinci的机器人

在1739年，Jacques de Vaucanson制作了“会动的鸭子”，这个装置巧妙地使用了凸轮与连杆机构，使这个装置的外形、声音以及动作都像一只真正的鸭子。一位

瑞士的钟表匠 Pierre Jaquet-Droz, 也能做出精巧的自动机械装置, 他在大约 1772 年做了一个小机械家庭, 有写字的人、绘图的人, 还有演奏风琴的人。Henri Maillardet 在 1810 年发明了一种类似的绘图机器人, 这个机器人一直展览在费城的富兰克林研究院, 恢复了它最初的绘图功能。

到 19 世纪后期, 已无法靠销售和展览这种精巧的自动机械来谋生了, 所以人们就开始生产能大规模制造的机械玩具、音乐盒、钟表。很多玩具的手柄都用弹簧储存能量, 带动玩具动作。人们生产了成千上万的简单弹跳玩具及其他外形的机械玩具, 销售在整个欧洲。

当这些制造商移民到美国之后, 不同国家的文化就融入到美国民族艺术与玩具设计中。Alexander Calder, 一个机械工程师, 后成为艺术家, 他成立了一个“运动机械马戏团”, 可能是第一个通过这种方式来普及动态艺术的美国人。Calder 的马戏团从 1920 只有几个机械人偶, 发展到最后的满满 5 箱子机械人偶, 他带着这些人偶四处表演。他的马戏团在 1961 的一个演出视频最近在纽约的 Whitney 美术馆展出, 同时参展的还有其它的一些人偶。英国的艺术家 Sam Smith 在 19 世纪 70 年代至 80 年代之间, 做了很多动态艺术品与玩具, 对现代的机械玩具制造商有深远的影响。

离现在最近的动态艺术品和机械玩具有 Arthur Ganson 的机器, 以及 CMT (一个收藏和展览各种全手工自动机械装置的博物馆) 艺术家的作品。图 8.15 是 Eun Jung (EJ) Park 的“故事机”( [www.ejpark.com](http://www.ejpark.com) )。图 8.16 为 Andrew Jordan 的“发声机”( [www.andyjordan.us](http://www.andyjordan.us) )。

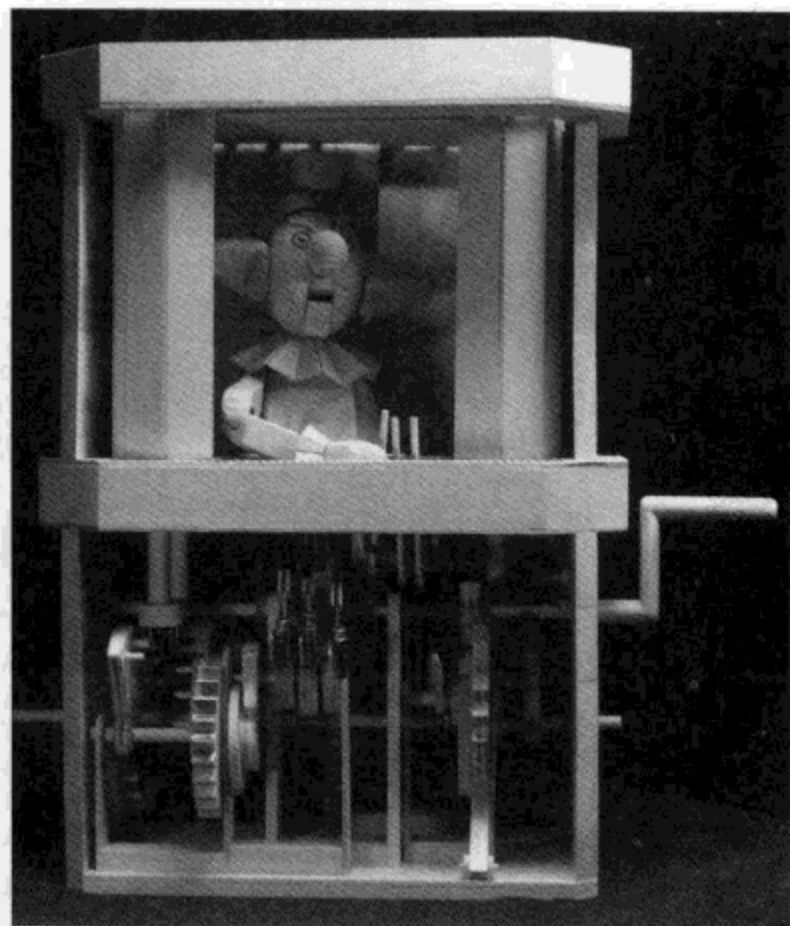


图8.15 “故事机” (图片经Eun Jung Park允许使用)



图8.16 Andrew Jordan 的“发声机”

(当输入轴连续转动时,中间的凸轮来回推外框,产生不规则的往复运动)

## 项目 8.2 DIY 一个玩偶: 点头羊

Flying Pig 免费提供几种用纸做玩偶的方法。我最喜欢的是 Rob Ives 的点头羊。图 8.17 是我们做的版本。

### 1. 材料清单

- (1) A4 或 8.5 in × 11 in 的硬纸。
- (2) 小刀及剪刀。
- (3) 金属尺。
- (4) 垫子或旧杂志。
- (5) 胶棒或白胶水。
- (6) 硬币。

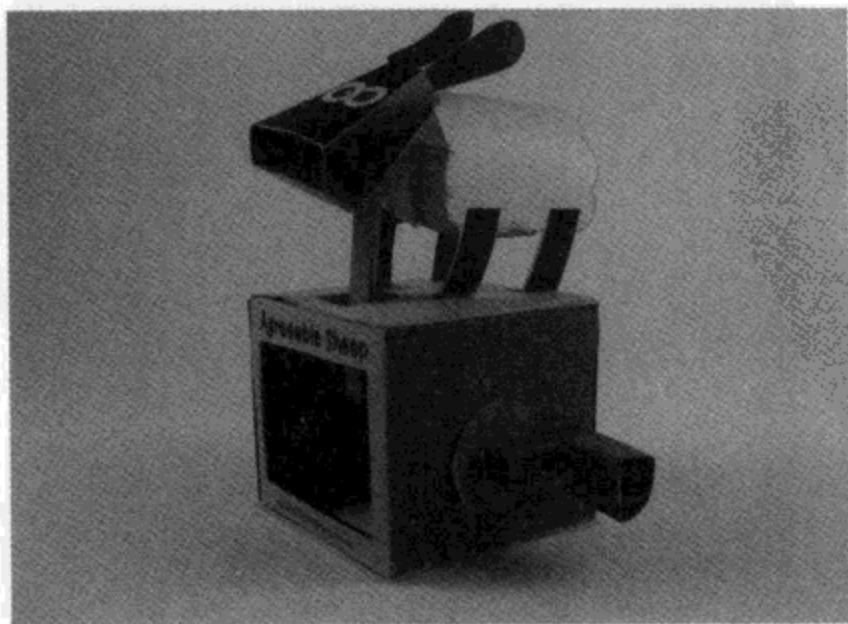


图8.17 点头羊(所有权: Jade Highleyman, 是他拼装了这个模型, 并且拍了照)

## 2. 操作方法

- (1) 从 [www.flying-pig.co.uk/pdf/sheep.pdf](http://www.flying-pig.co.uk/pdf/sheep.pdf) 下载模板及拼装说明书。
- (2) 打印模板。PDF 文件有 9 页，前 3 页是说明书，后 6 页是“羊”的 3 个模板，需要正反面打印。如果不能双面打印，需要手动送纸，要确保方向准确。不用太在意对准精度。
- (3) 用剪刀或小刀将图片切下来。
- (4) 轻轻地用刀划点划线。金属尺能帮你把线划得更直。
- (5) 沿着点划线折叠。
- (6) 按说明书用胶水粘贴。需要点儿耐心才能粘得紧。
- (7) 把硬币按说明书放进去。
- (8) 问羊一个能用“是”或“不是”来回答的问题，摇手柄看看答案是什么。

## 参考资料

- [1] U.S. Bureau of Naval Personnel, *Basic Machines and How They Work* (New York: Dover Publications, 1971).
- [2] Aidan Lawrence Onn and Gary Alexander, *Cabaret Mechanical Movement: Understanding Movement and Making Automata* (London: G&B Litho Limited, 1998).
- [3] Rodney Peppe, *Automata and Mechanical Toys* (Marlborough, Wiltshire: Crowood Press, 2002).



新式郵票 5

許地強與許地強... 許地強與許地強... 許地強與許地強... 許地強與許地強... 許地強與許地強... 許地強與許地強... 許地強與許地強... 許地強與許地強... 許地強與許地強... 許地強與許地強...

許地強與許地強... 許地強與許地強... 許地強與許地強... 許地強與許地強... 許地強與許地強... 許地強與許地強... 許地強與許地強... 許地強與許地強... 許地強與許地強... 許地強與許地強...

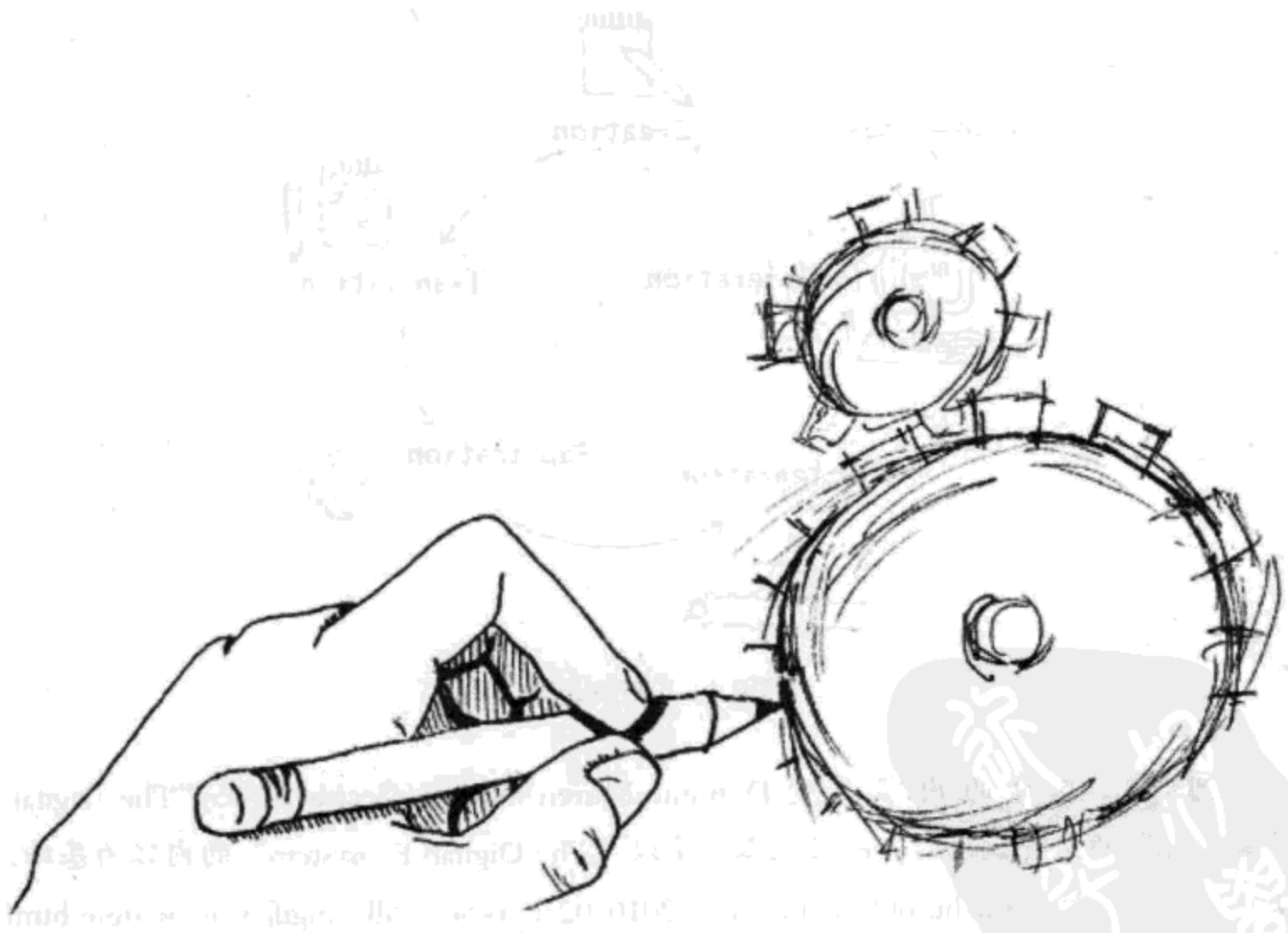
許地強與許地強... 許地強與許地強... 許地強與許地強... 許地強與許地強... 許地強與許地強... 許地強與許地強... 許地強與許地強... 許地強與許地強... 許地強與許地強... 許地強與許地強...



内容... 创意... 实现... 分享... 第9章

## 第9章

# 创意实现与分享



新学网  
PDG

在前面的章节中，我们已经学习过有关材料、零部件、常用的连接方法等内容。现在要学习如何做一个实际的东西，或让其他人或机器如何做东西。

首先要做的是设计，可以用纸画草图，也可以用3D软件设计装配模型。有些项目用手工锯木材或用现成的零部件就可以完成；其他一些项目需要用数字文件，采用现代化快速成型方法才能完成——3D打印机和激光切割；还有一些项目适合用机加工或其他加工方法。然后把零件组装起来。最后一步就是分享你的作品，这样会鼓励其他人做一个与你一样的东西。

## 9.1 CTFIP 循环

每一个阶段都有可以用手工（模拟）和计算机化的机械软件（数字）来实现的方法。我们把整个过程叫做CTFIP循环——创意（Creation）、转化（Translation）、制作（Fabrication）、集成（Integration）、分享（Proliferation），如图9.1所示。

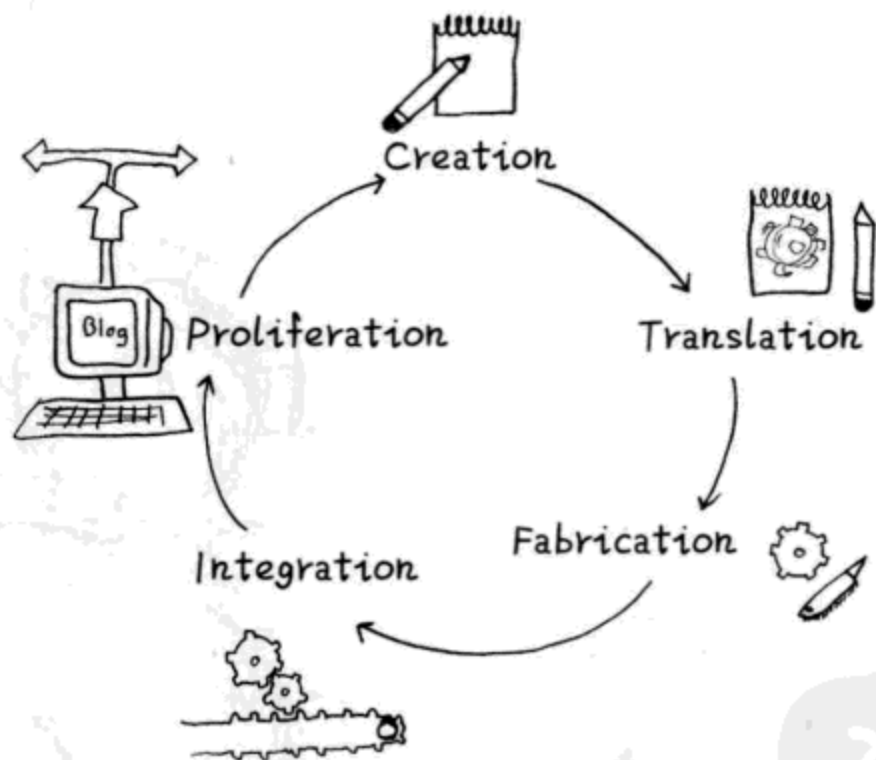


图9.1 CTFIP循环

**注意** 本章的内容是受 Dominic Muren Dorkbot Seattle 有关“The Digifab Ecosystem”的启发编写的，而且基本上是以“The Digifab Ecosystem”的内容为基础，读者可以参考 [www.humblefactory.com/2010/02/dorkbot-talk-digifab-ecosystem.html](http://www.humblefactory.com/2010/02/dorkbot-talk-digifab-ecosystem.html) 的视频。

本体系当中所有的阶段与实际项目实现过程所经历的阶段是一样的。不过这个体系的提出有助于你在设计零件或机构的开始阶段确定加工方法，即“为加工而设计”。所以，在深入开发一个项目之前看看本章的内容，会对你有帮助。

## 9.2 创意阶段

要做出一个实体零件或组件，首先要对它进行创意。如果打算用激光切割机或3D打印机加工零件，就需要数字化的设计。如果打算手工切割或成型，就可以用更多模拟化技巧来设计零件或组件。

### 9.2.1 模拟化构思

最简单的构思方法是仔细思考。如果仅仅需要做一个连接两个支架的1 in的隐形棒，可能就不需要用计算机程序来设计，只要想一想就可以做了。

下一步就是将你的零件或机构在纸上画出来。这样做有助于你安排计划，确定比例，没准还会想一想如何将不同的零件装配在一起呢。多数机构，不管是用手工还是用机加工，都是先在纸上画一张2D图。

你可以用3D草图。此处的3D不是说你在画图时要戴上3D眼镜，而是在3维状态下，用可反复组装与可随意使用的材料，把你的想法表现出来。

LEGO在这方面就做得很完美。特别是LEGO套件，有齿轮、电机，还有好多各种各样的其他组件，你可以用这些做出简单机构。LEGO也销售几种简单机器，及电机带动的机构，所以特别适合完成3D构思。有些大学有专门放LEGO零件的房间，在做原型机阶段很有用。

### 9.2.2 数字化构思

能帮你完成可视化设计的软件统称为CAD软件。CAD表示“计算机辅助设计”。多数CAD软件不仅能帮你完成可视化设计，还可以直接生成加工文件。我们在本章的后半部分会学习有关加工的知识。

**注意** 不论你是用手工方式还是机加工，CAD软件在做原型机阶段都是很方便的。我的一个学生就很好地利用了这种软件，他先用Alibre Design软件为一个零件进行3D建模，然后加工成塑料片。他说“无论如何我都会用3D建模，因为它对可视化设计太有用了”。

你要做的项目决定了你所用的软件的类型，以及要创建的文件类型，所以要学习有关2D、3D的知识及完成零件装配的软件。

#### 1. 2D设计

2D图是纸质草图的数字版本。如果在第7章自己做过齿轮，你已经熟悉了一种



2D 软件了。在项目 7.1 中，我们用的是 Inkscape，与 Adobe Illustrator 相似，它是一种开源的矢量设计软件。这些软件能够生成计算机可以识别的代码，这就是为什么激光切割机能够加工我们设计的齿轮外形的原因。

有一种功能强大，但使用简单，价格还可以接受的软件是 QCAD(www.qcad.org)。QCAD 用来做零件的 2 维设计，而 Inkscape 与 Illustrator 却是主要的绘图软件。

另外一种大型的 CAD 软件是 AutoCAD，但这种软件对很多初学者来说学起来很难，而且价格偏高。表 9.1 是 2D 和 3D 建模软件比较。

表 9.1 2D 和 3D 建模软件比较

	价格	兼容性			备注	
		WINDOWS	MAC	LINUX		
2D						
*Inkscape	免费	×	×	×	开源	
QCAD	24 欧元	×	×	×	开源，有免费的试用版，不过这个软件用过 10 min 后会关闭，最多能用 100 h	
Adobe Illustrator	599 美元	×	×		标准的矢量绘图工具，尺寸测量插件有助于完成 2D 的设计	
AutoCAD	3975 美元	×			适合设计 2D 零件，不适合做 3D 设计。AutoCAD LT 是 AutoCAD 的简化版，价格为 1200 美元	
3D						
MESH	Blender	免费	×	×	×	更适合用于动画与人物建模，是一款非常有前景的开源软件，对机械设计来说用处不大

续表 9.1

	价格	兼容性			备注
		WINDOWS	MAC	LINUX	
	免费	×	×	×	免费、开源的 3D 建模与渲染软件。作为开源软件来说已经非常好用了，但不适合用于机械设计。是一款特别基础的软件，只能设计一些简单的形状
	免费	×			特别适合做 2D 及 3D 的零件设计及装配，学起来简单，对实现可视化设计很有用
MESH	免费		×		在 MAC 系统下运行是免费的，但为 Windows 设计的插件不能在 MAC 系统下运行。学起来直观，进行基本的形状设计比较容易，特别适合做单个零件的设计
	995 美元	×			教师和学生版本只需要 195 美元，免费的评估版可节省 25 倍
	1795 美元	×	×		
	3495 美元	×			30 天试用期
	3495 美元	×			30 天试用期
SOLID	免费	×	×	×	开源
	免费	×			开源

		价格	兼容性			备注
			WINDOWS	MAC	LINUX	
SOLID	*Alibre Design Personal	99 美元	×			下载后，专业版有 30 天的免费试用期。试用期过后，付 99 美元就可以继续使用，这个版本的功能还比较多
	SolidWorks	3995 美元	×			是一款功能强大的实体建模软件
	Autodesk Inventor	5295 美元	×			学生版可用 12 个月，不过所有的文件上都会水印“不得用于商业目的”
	Pro/ ENGINEER	4995 美元	×			是一款顶级的 3D 建模软件
MATH	OpenSCAD	免费	×	×	×	开源
	TopMod	免费	×	×	×	开源

## 2. 3D 设计

多数 3D 零件都是由 2D 图经过拉伸、抽取、变形生成的。除了用网线框图来创建零件外，其他都是实体图，只有一小部分软件直接采用数学语言来描述<sup>[1]</sup>。实体建模软件更容易生成机床能够加工的加工文件，但是有计算机背景或编程背景的人更喜欢用数学语言。

表 9.1 所列为 2D 与 3D 建模软件，标“\*”号的为选项多、容易使用的软件，“×”表示软件可以运行的操作系统。

**注意** 可以在 MAC 上使用 Boot Camp, Parallels 或 VMware Fusion 来运行只在 Windows 环境下运行的软件。

表 9.1 中有一些 3D 建模软件可以实现多种零件的装配，结果就与真实装配的结果一样。所以可以在屏幕上移动零件，模拟实际功能，确保零件运动互相不干涉，这样就会有足够的运动空间。

可以从 McMaster 或其他商家那里直接下载现成的各类零件的 CAD 文件。在购买之前，你可以先在屏幕上进行装配，这样就能确保零件配合完好。单 McMaster 就提供 63 000 个 CAD 文件，可大大节约你的设计时间。

有了软件的装配功能，你就可以看到你设计的最终机构是什么样子的了。同时，零件文件还可以独立地存放，互不影响。通过这种方式设计的零件，可以是一个现成的电机，可以导出后直接送给 3D 打印机来快速成型，也可以转换成工程图来进行激光切割。

## 项目 9.1 下载并打开一个零件的 3D 图

在表 9.1 所列的软件中，仅有几个软件有零件装配的功能：SolidWorks, Autodesk Inventor, Pro/ENGINEER 和 Alibre Design Personal。此处用常见的 Alibre Design 为例来说明。Alibre 的目标是“提供全参数化的 CAD 设计技术。”

### 1. 操作方法

(1) 从 [www.alibre.com](http://www.alibre.com) 下载 Alibre Design。该网址提供一个可以试用 30 天的专业版本，你可以选择花 99 美元购买个人版，确保所有的功能可用。

(2) 在 McMaster 网站 ([www.mcmaster.com](http://www.mcmaster.com)) 上找到你要下载的零件。如图 9.2 所示，我选择的是一个 1 in 长的  $\frac{1}{4}$ -20 标准不锈钢沉头螺钉。在工具条上查一下这个零件的 3D 模型是否可以用，否则选择其他 3D 模型可用的零件。



图9.2 从McMaster-Carr下载一个3D模型

(3) 点击 3D 模型图，会出现下拉菜单，显示可以下载的 3D 模型图或 2D 工程图。选择 3D STEP, IGES 或 SAT，下载零件并把它存在你能记得的地方。

(4) 打开 Alibre Design，从菜单栏上选择“File/Import”（文件/导入），找到刚刚下载的文件。在“Import File Options”（导入文件选项框）中打开文件，点击 OK。

(5) 哇！零件的 CAD 图已经出现在屏幕上了，如图 9.3 所示。用“Rotate”旋转按钮进入旋转模式，选择“select Tools / Measurement Tool”（选择工具/测量

工具)可以确定零件是否已经被正确的导入了。

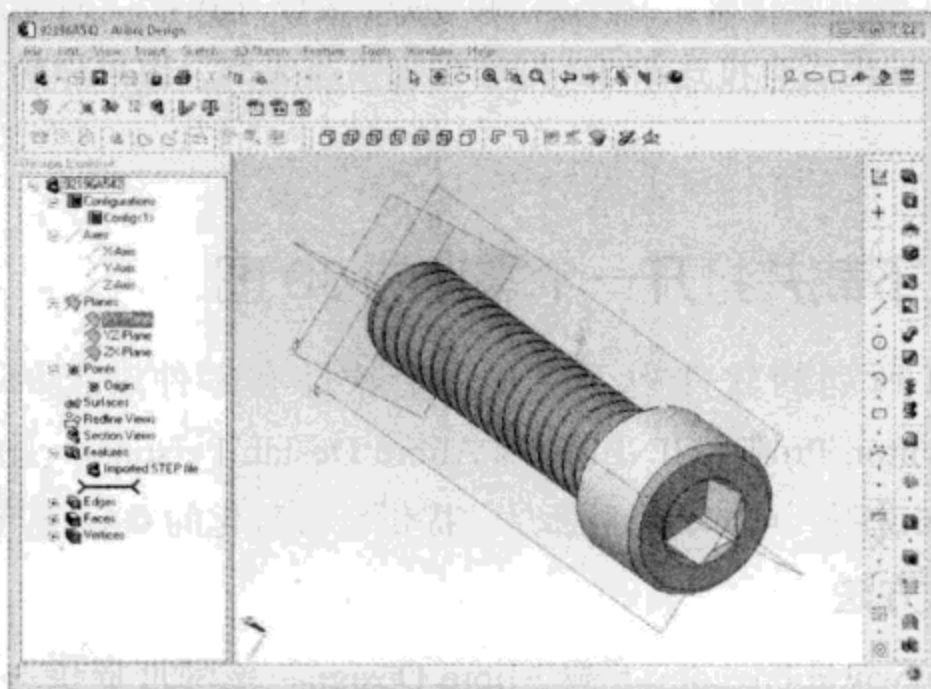


图9.3 将CAD文件导入Alibre Design

**注意** 能够用软件进行虚拟装配，并不意味着就能够进行实体装配。正如 Make 杂志上的一个在装配过程中备受挫折的人所说“我试图把 Arduino 板装在机器人机体内，但突然之间，我受到了计算机辅助设计给我带来的一个深刻的教训。在实际装配中，我并不能穿过零件将电路板装在需要的位置。但在计算机中，我们都是这样完成装配的。在计算机中进行组装时，只需鼠标简单的一个动作，Arduino 板就会穿过机器人的铝制外壳，滑移到正确的位置。但实际情况并非如此，Arduino 板根本装不上。因并未留出合适的角度或斜度，所以 Arduino 板无法滑进机器人体内。这时就需要大力钳和钢锯。我看到的结果是，铝壳被扭弯了，才将 Arduino 板装进去。这是真正的“现实辅助设计”。

## 9.3 转化阶段

要做一个实物，必须把你的创意、草图或计算机模型转化成可以做的东西。如果是手工制作，这个工作就如在锯木头前用铅笔做标记一样简单了。如果采用数字化设计方法，就需要将文件存成与默认格式不同的格式，或用软件将模型或图转化成加工机床能够识别的代码。

无论用什么方法制作零件，都需要选择材料。这是将你的设计从纸上或计算机上转化为实物的很重要的一步。比如，我们不能用木头做 3D 打印成型的零件，但可以用激光切割的方法将木头加工成很多层，然后用胶水将这些木片粘在一起做一个 3D 模型。有关材料的类型及用途可以参考第 2 章。在本章后面对加工方法进行了讨

论, 我们提到了更多加工不同材料的方法。

### 9.3.1 模拟转化

如果在纸上画了一张图, 要用平板材料完成实体, 至少有 3 种方法可以实现。

(1) 用铅笔描图。把描过的图翻过来, 粘在材料上。用勺子把压描过的线, 在材料上留下图印。

(2) 用同样的方法将描好的图粘在纸板上, 沿线割下来, 可以做模板。

(3) 在原始草图或打印的草图背面轻轻地喷上喷胶, 把图纸粘在木头、铝材、纸板或其他材料上, 也可做成一种可以切割的模板。

**注意** 使用喷胶时, 要保证工作空间的通风, 可能你还需要带上防护面罩。喷胶的味道很难闻, 到处都会留下它的味道。

### 9.3.2 数字转化

如果用实体造型软件(如 Alibre Design)设计了零件, 可以直接用机床进行加工。如果用网格造型软件(如 Rhino), 在将文件送到加工机床之前还需要先将零件检核或清理一下。可以通过对模型进行切片或展开的方法, 用 2D 的方法来创建 3D 目标。下面是几种数字转化的方法。

(1) 清理: 用 MeshLab(一种开源的立体网格处理软件)与 Blender 可以清理网格建模软件生成的 3D 文件。有时, 用网格建模软件设计的模型是无效的。也就是说, 加工机床可能无法分清内外表面, 或会产生混淆。

(2) 展开: 如果想用 2D 的材料或织物做一个 3D 的零件, 有几种软件可以帮你展开或切片。用 Google SketchUp 可以从 <http://sketchuptips.blogspot.com/2007/08/plugin-unfoldrb.html> 下载一个免费的展开工具插件。Pepakura Designer 是一种低成本软件, 可将 3D 模型分解为 2D 平面, 然后用纸折叠 3D 物体。Lamina Design 和 Rhino 有更多展开选项, 用起来更灵活, 不过价格略微有点高。

(3) 刀具路线生成: 刀具路线生成软件可以将 3D 模型分解为激光切割机和 3D 打印机能够识别的刀具路径和层。这些软件有 ReplicatorG, Skeinforge, Pleasant3D 及 SketchUp SliceModeler。

## 9.4 制作阶段

用两种方法可以制作实物: 自己做或找人、找机器做。如果自己做, 花的时间

就会比较长。在确定实际耗时时，可考虑用“ $\pi$ 法则”，即用 $\pi$ （3.14）乘以你构思所花的时间。这个法则令人惊奇的准。所以制作实物时，尽量请其他人或机器帮你做。

请记住，DIY并不意味着所有的事情都要亲力亲为。不一定非要从草图开始，你完全可以将现成的零件拼在一起。在集成阶段还可以为你的机构注入生命，不过如果你花太多的时间来制作，可能就达不到这个目的了。也就是说，可以自己做一些简单零件，或修改一些现成的零件。后边我们会学习一些手工制作中使用的常用工具，以及用数字文件制作零件的方法。本章会讨论一些“减材料”的方法（去除材料），以及“加材料”的方法（顺序加层的方法）。

## 9.4.1 模拟制作

测量两次，切割一次。实际工作中，先测量一次，然后检查测量计算结果，再测量一次，最后切削。我们会讨论各种钻削和材料成型的方法，多数方法都可以不使用价格昂贵的工具。不过，如果你需要自己没有的工具，而且不想自己购买（比如车床），特别是如果你住在离大城市不远的地方时，那就请去本地的创客空间看看——旧金山的TechShop，纽约的3rd Ward，费城的Hacktory。[www.hackerspaces.org](http://www.hackerspaces.org)上可以查到更多这种创客空间，也可以在本地的机加工店定制。

### 1. 钻 孔

随处可见的便携式工具有手钻或Dremel电磨。Dremel电磨特别适合在薄材料上钻小孔，手提式手钻的转矩更大，所以可快速钻更大、更深的孔。

钻孔前首先要戴上防护镜。通过夹紧的方式将零件固定在工作面上（用1~2个C型夹，如McMaster的5133A15）。如果在木头上钻孔，可以将钻头对准要钻孔的位置，直接钻即可。如果要在金属甚至塑料上钻孔，最好先用冲子（如McMaster的3498A11）或其他锋利、坚硬的东西做个标记，再开始钻，这样做会防止钻头偏离钻孔位置。

也可以用钻床，如图9.4所示。Dremel公司提供一套型号为220-01 WorkStation的可以安装Dremel电磨的工具，花上大约40美元，就可以做一个台式钻床。有了这个设备，就可以钻与工件表面垂直的孔或有一定角度的孔。也可以在McMaster买到更多大功率的钻床，如那些装在桌子上或地面上的钻床，不过价格也高一些。

去毛刺的工具，如McMaster的4289A35，也是一种手提式工具，在金属材料中钻孔时会用到。这种工具有一个尖尖的旋转头，可以清除钻孔时产生的毛刺或小金属屑。如果没有去毛刺的工具，可以用圆锉或打埋头孔的工具来代替。

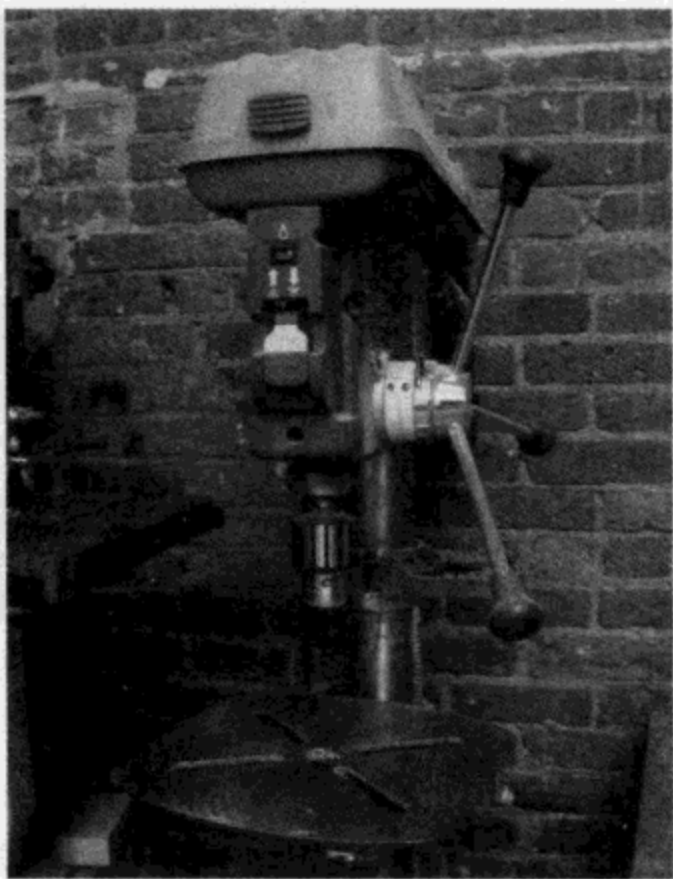


图9.4 钻床

## 项目 9.2 不用车床的钻孔方法

第一次在一根杆或轴上钻孔时，会发现手钻，甚至钻床都不好用。几乎不可能在杆上标出真正的中心孔，更不用说钻出一个中心孔了。车床是用来加工横截面为圆形的零件的，在钻中心孔时，它是最好的工具了。如果你没有用过车床，下面就有一个用钻床钻一个中心孔的方法。（这个项目摘自 Vik Olliver 的博客 <http://vik-olliver.blogspot.com/2010/02/drillingdown-middle.html>）

### 1. 材料清单

- (1) 带台虎钳的钻床（最好是夹爪中间有槽口的那种）。
- (2) 钻头。
- (3) 防护镜。
- (4) 要钻通孔的圆柱形零件。
- (5) WD-40 或其他润滑、冷却剂（如果材料是金属）。

### 2. 操作方法

- (1) 戴上防护镜，清理工作环境。
- (2) 将钻头装在夹爪内，拧紧夹爪。
- (3) 降下钻床，使钻头可以夹在老虎钳内。
- (4) 调整台虎钳，使其能夹住钻头。拧紧台虎钳，用螺栓固定在钻床的底座上（图 9.5）。



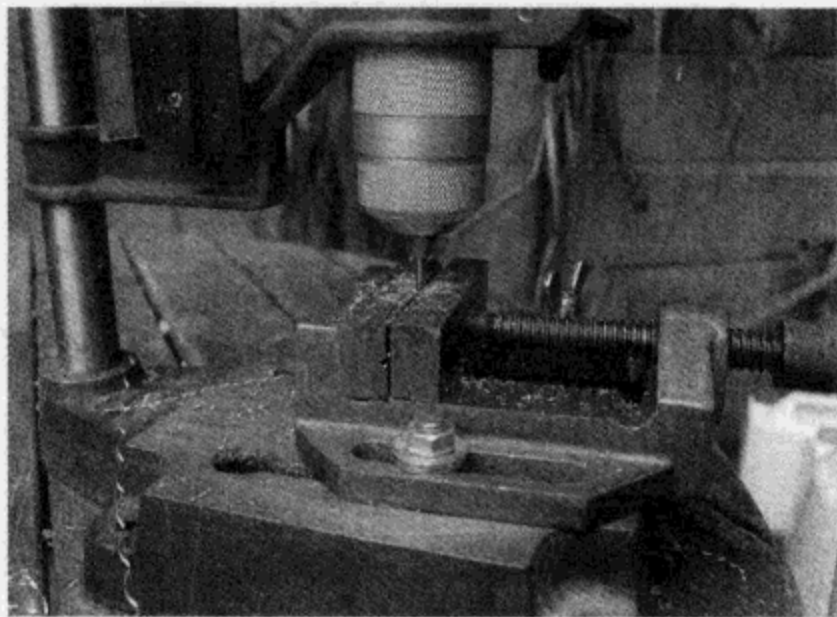


图9.5 夹在台虎钳内的钻头（所有权：Vik Olliver）

(5) 松开夹爪，慢慢升起钻床。

(6) 将杆、轴、螺栓或任何要钻孔的零件放在夹爪的中心。拧紧夹爪，降低钻床，检查材料与钻头是否对齐（图 9.6）。

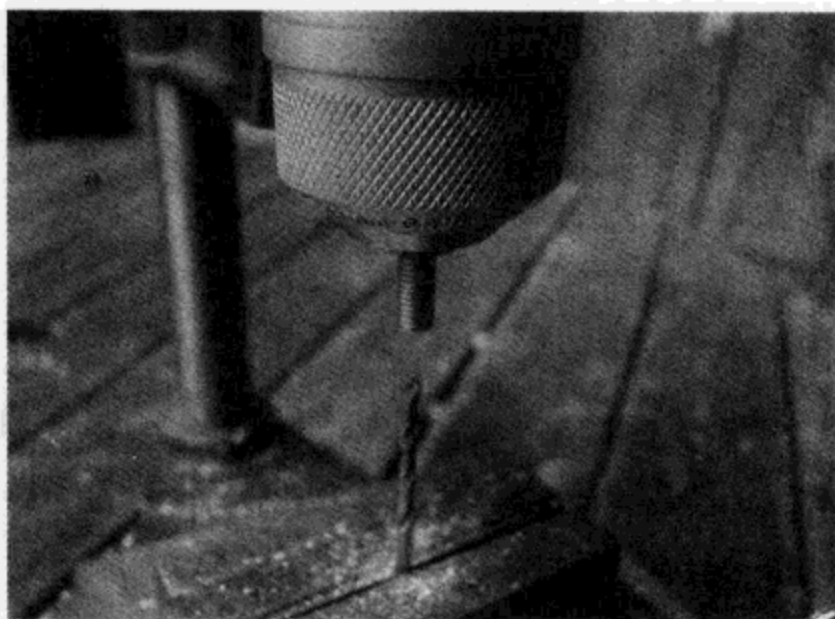


图9.6 准备钻孔的夹爪内的零件（所有权：Vik Olliver）

(7) 如果零件是金属材质，在钻头上涂上少量的 WD-40 或其他润滑、冷却剂。

(8) 打开钻床的电源。使用高速及超低压模式，降低钻床。开始时可能会振动，不过请继续降低钻机，直到钻头对准零件中心，开始钻孔。

(9) 降低钻孔的速度，增加压力。

(10) 关掉钻床，检查工作。

(11) 如果零件比钻头长，从夹爪上取出零件，掉个头再装在夹爪上。一定要仔细检查，确保钻头没有偏心。再重复前边的步骤，完成一个通孔的加工。

**注意** 如果零件较长，需要退出钻头进行清理，一定不要用手清理，因为这样可能会划破或被钻头烫着手指。

## 2. 加工圆形工件

用管刀切割管件是一种最经济的方法了，而且用这种工具还不会使管件产生变形。如果说C型夹和披萨刀有孩子的话，肯定就是管刀了。C型夹保证管件或杆件相对锋利、旋转的刀片是固定不动的，这样才能切割管件。切割时甚至不会产生挤压，切割边也会很干净。

如果要加工的圆形零件和轴的数量多，用车床会让你的工作轻松得多。专业车床价格可能会高达好几万元，不过小型的业余级车床可能花上700美元就可以买到（在Micro-Mark公司的网站[www.micromark.com/MICROLUX-7X14-MINI-LATHE,8176.html](http://www.micromark.com/MICROLUX-7X14-MINI-LATHE,8176.html)就可以查到），这种机床能很容易地加工多数小的圆形零件。在杆件和轴的中心钻孔，或为了使轴能够与轮子或轴配合完好，需要在轴的表面去除少量的材料时，车床的作用就很明显了。金属车床主要用来加工高精度的零件，木头车床主要用来加工更有艺术气息的零件，如篱笆柱和棒球棍。

## 3. 切割

有好多种切割工具。除了剪刀外，排行第二的就是美工刀了，接下来就是多刃刀具上的那些刀（如Leatherman）。带切割轮的Dremel刀可以加工木头、塑料，还有软金属，如黄铜和铝。金属切刀如McMaster的3902A1，用于切割薄金属件时特别好，钢锯可用来切割又大又厚的板材。若要切割更厚的板材，可以用锯床，一般的工具店都会有这种锯床。锯床有立式的与卧式的两种，只要你会调整速度和刀片，这种锯床可用来切割任何材料。

**注意** 切纸或纸板或其他任何东西时，一定注意不要让身体的任何部位在刀行进的路径上。很明显，如果你大拇指外翻，摁着纸张切纸时，就不安全。生物课上解剖时，或在切割任何东西前，首先要考虑的都就安全问题。

## 4. 铸造成型

铸零件时，必须首先做一个把原零件包起来的内有零件压印的模具，用刀切开模具，或采用其他脱模的方法取出原零件。往模具腔内充填物料，就会做出一个与原零件相同的零件，这种铸造方法称为阳铸造。一般是往模具腔内充填液体塑料化合物，等塑料硬化后再从模具里取出零件。要复制一个现成的零件或3D打印机成型的零件时，铸造就特别有效。如果要做几个小零件的复制品，这种方法会特别经济。

用硅胶做模具就不错（如[www.smooth-on.com](http://www.smooth-on.com)网站上的Mold Max硅胶），然后用液体塑料铸造化合物（如Smooth-Cast 300）就可以做阳铸造。Smooth-Cast的成型时间非常短，用1比1的混合比操作起来很容易。也可以用染料把原料染成任何喜欢的颜色，成型后还可以再进行喷漆和加工。Compleat Sculptor([www.sculpt.com](http://www.sculpt.com))提供很多这种材料，在纽约的店里还经常会有这方面的课程。

做阴铸造时，最重要的是要确保材料中没有气泡，而且模具必须可以按一定的顺序分离出来。在硅胶包裹原零件之前，可在零件上粘一些小木销，这样就可以做出让气泡溢走的通路。也需要在原零件中部某个位置粘一个大的主木销，留出浇注孔。

## 5. 加工木材

可以用前边提到的许多工具加工木材，不过还有一些专门用于木材加工的工具。刨床有手动与电动两种形式，可以剔除粗糙的木片，削平木材的上表面，让上表面与下表面平行。

**注意** 一定不要锯或刨已用过的或腐烂了的木材，里边可能会有余下的钉子和螺钉，会有危险。

尽管可以用钢锯和手弓锯来手工加工一些小零件，不过用一些电动工具，如桌锯、线锯、槽刨机、斜切锯、圆锯等，来加工一些大零件或做重复加工时会更简单。低档的电动工具既不会伤着手，也不会占太多空间，甚至桌锯的体积也特别小。

切割完一定要用锉刀或砂纸进行打磨，避免留有尖刺。

## 6. 加工金属

有几种主要的工具与机床可用来加工金属。前边已经提到过钻床，钻床可以加工多种材料。与钻床相似的更高级的机床叫铣床。

第7章提到过，铣床是豪华版的钻床，基座可以沿X、Y、Z轴运动，所以它就不仅仅是只能做垂直钻孔的工作了。虽然你从来没有用过这种机床（因为它又大又贵），但是在设计需要定制的零件时，应该想到这种机床。可以在铣床上装上一般的钻头，也可装端铣刀。端铣刀与钻头类似，只不过是把钻头尖去掉了，这样就可以加工平底孔，也可以沿着刀具的侧面进行切削。如果想在铣床上试试身手，可以从LittleMachineShop.com买到一种功能强大的小型铣床，加上一些基本的刀具，总价约为650美元。

就如我们可以很简单把纸卷在铅笔上一样，如果有合适的工具，我们也可以不同的方法将金属弯成不同的形状、尺寸和厚度。所有的金属成型的原理都是如此。只需要金属板和一些可以弯曲金属的工具就可以了。夹具可以将金属板固定，橡皮锤或其他非破坏锤都可以用来帮助弯曲金属板。若要弯一个90°的角，需将金属板夹在台虎钳内，用手或用锤子折金属板即可。

## 7. 加工塑料

加工金属和木材的工具和方法也同样适用于加工塑料。许多电动工具（如线锯和圆锯）都有专门用于加工塑料的刀片。

如果要在塑料件上钻孔，尤其是特别脆的塑料，可以用专门用来钻塑料的钻头，

这样可以减小塑料脆裂的可能。切割薄塑料时，用小刀或其他锋利的刀片先在零件上划出标记，然后沿着线把零件掰开即可。

## 9.4.2 数字制作

有越来越多的用数字文件进行加工的方法了，这些方法既有2D的，也有3D的。

### 1. 2D 方法

每个人都熟悉的2D数字加工方法是台式喷墨打印机或激光打印机，可以将设计文件打印在纸上，从其他材料上割出零件，或将设计文件打印在厚卡片上，直接做零件。

高级一些的刻印方法是用机器直接切割，可以用乙烯刻字机对乙烯材料加工。这种机器大小是一般家用喷墨打印机的两倍，价格则是好几倍。

更高级一些的2D数字加工方法是计算机数字控制CNC槽刨机。你可以用CAD软件创建一个数字文件，然后下载到CNC槽刨机，这个槽刨机就会沿着你设计模型的线与轮廓进行切割。ShopBot ([www.shopbottools.com](http://www.shopbottools.com)) 为小公司和发烧友生产了低价格的槽刨机，主要用来加工木材，不过即使是入门价格，多数个人也无法承受。你家附近的社区商店可能会有这种设备。

如果在项目7.1中加工过齿轮，你应该已经熟悉一种常用的2D加工方法了——激光切割。在那个例子中，我们用Ponoko来切割齿轮。不过，我们仍然会发现很多网上商店做类似的定制工作。你能切割的材料类型与厚度取决于激光的长度。在图9.7中，会看到Ted Southern用Eyebeam激光切割机切割的模板，最后用这些模板装配成一个太空服上的手套（参见[www.finalfrontierdesign.com](http://www.finalfrontierdesign.com)）。

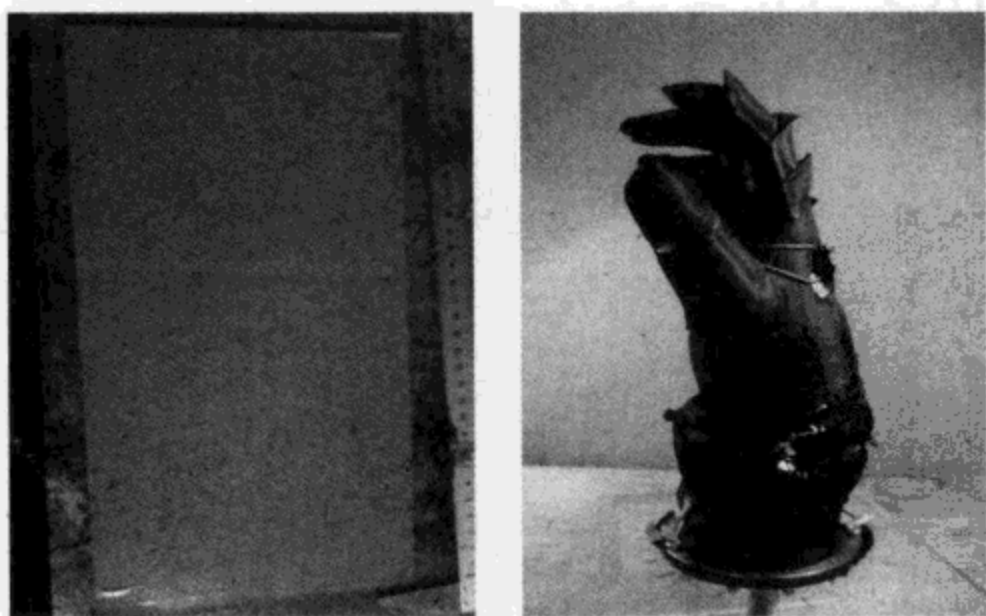


图9.7 用Eyebeam的V-660万用激光切割机加工的太空服手套零件（左）及组装后的模型（右）（所有权：Nikolay Moiseev 和 Ted Southern）

## 2. 3D 方法

除了进行 2D 的加工外，CNC 槽刨机和 CNC 铣床还可以用来做 3D 加工。槽刨机主要用来做 2D 工作，不过它们也有第 3 个轴可以加工厚一点的零件。CNC 铣床可以将许多材料加工成任何形状、任何大小的零件。

快速成型方法中，3D 打印是一种新的发展趋势。不同的系统与机床用不同的方式完成 3D 打印，不过最后的成品均是一个 3D 成品。工程与产品设计公司用这些机器使零件与装配可视化，用来在正式生产前检查设计上的错误，并且吸引潜在的投资人。在项目 10.1 和项目 10.3 中就用这些机器加工了真正的有用零件。

在开源、低价的 3D 打印机中，MakerBot 实业公司 ([www.makerbot.com](http://www.makerbot.com)) 是领头羊。这家公司的机器加工时，将超薄的塑料粉一层一层堆积在一起，来完成零件的加工。工业级的机器（如 Stratasys）可完成相同的任务，不过价格可就不止 1000 美元了。

如果你没有用过真正的 3D 打印机，你可以试着用虚拟的。比如，你若需要加工一两个零件，在上载一个模型后，很多公司会有一个在线的即时报价（如 [www.solidconcepts.com](http://www.solidconcepts.com) 和 [www.shapeways.com](http://www.shapeways.com)），不失为一种不错的解决方法。

另一种快速成型的方法是立体光固化成型法。这种方法采用光将一种特殊的塑料逐层固化，最后实体零件就会从液槽的糊状物中加工出来。由于基材需要光固化，所以最后加工成的零件颜色为白色或微黄色。还有一种 3D 快速打印机是用黏合剂将各种粉状物按层粘在一起，或将粉状物熔化后按层喷出，最后固定成型。Z Corp 就是商业应用的一个例子。还有一个更了不起的例子是 Evil Mad 科学实验室的 CandyFab，它可以将糖逐层熔化，最后加工成一个 3D 实体。

## 9.5 集成阶段

集成就是将成堆的零件，用现成的电机、螺钉、螺栓装配在一起，做成一个运动机构。这一步通常是最有趣、最困难的一步。 $\pi$  法则同样适用。

**注意** 有一些建议一定要牢记在心——如果不应该动却动了，就用胶带；如果应该动却没有动，就用 WD-40。

### 9.5.1 模拟集成

对手动装配的工具我们已经很熟悉了，所以螺丝刀、锤子、钳子、扳手，诸如此类的工具不需要再介绍了。正如第 7 章中所讨论的那样，手头最好有各种材质、

各种尺寸的薄片，在填补缝隙时可以用到。

### 9.5.2 数字集成

通过 3D 建模软件可以数字化地模拟装配，在装配一个实体零件时，唯一的数字化的方法是用机器人。因为我们没有足够的钱来买装配机器人或者取放机，所以通常就只能做模拟装配了。如果设计过程中采用了 CAD 软件，可以用装配爆炸图来自动完成这个过程。

## 9.6 分享阶段

在此阶段可将你所做的东西进行分享。向其他人展示，或者教其他人设计，收集反馈意见、卖掉你的作品、进行改良，然后进行下一个循环，或鼓励其他人来做，这样就完成了一个 CTFIP 循环周期。

有些东西可以受版权或专利的保护，有些则不能。图 9.8 就是一个版权保护的概图（这张图是在 TEDx USC 会议上，受 Johanna Blakely 的一幅图的启发而设计的，参见 [www.boingboing.net/2010/05/26/why-the-absence-of-c.html](http://www.boingboing.net/2010/05/26/why-the-absence-of-c.html)）。不过，越来越多的人和组织正在开展开源文化的运动，其他人可以几乎没有限制地分享他们的作品。

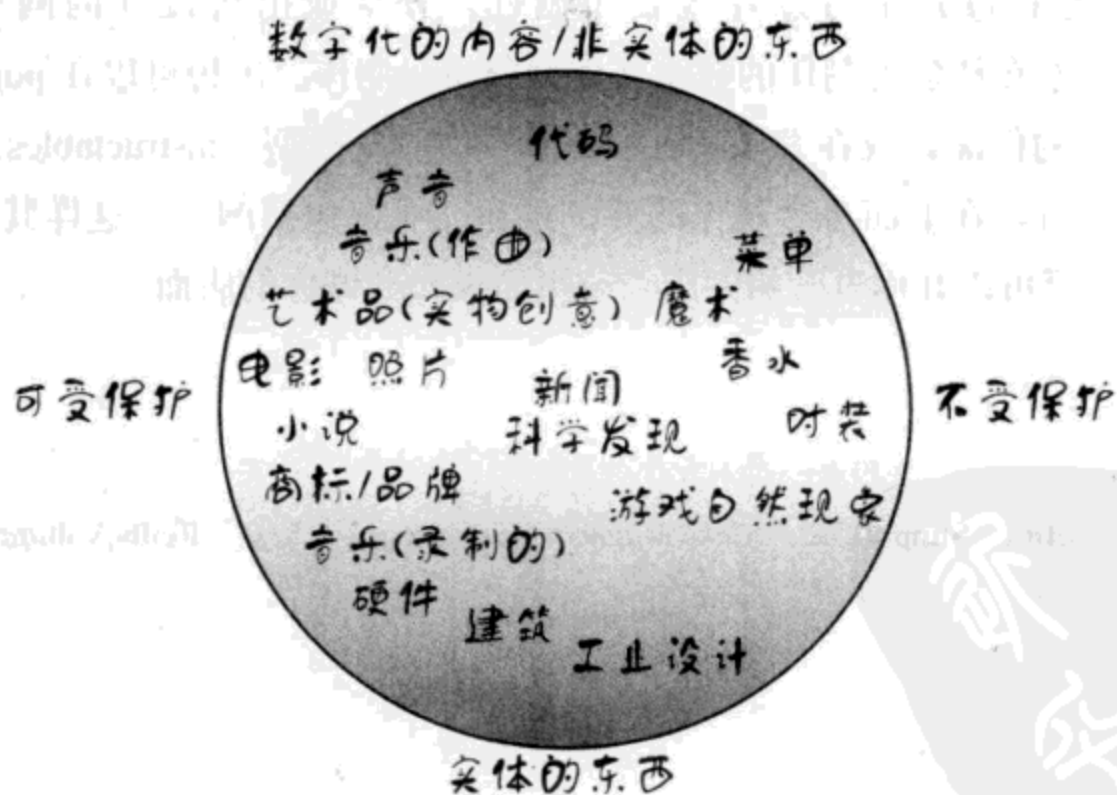


图9.8 成果分享的类型

如果用过 Mozilla 的 Firefox 浏览器，你会熟悉开源软件项目的内容。Creative Commons 是一个非营利组织，它的目的是促进数字文件，如照片和在线信息的共享

与协作。在你的作品上使用 Creative Commons (CC), 而不是版权声明中的 ©, 就可以合法地分享、重组、使用其他人的成果了。在往 Thingiverse([www.thingiverse.com](http://www.thingiverse.com)) 上上传一个 3D 模型时, 你可以为你的作品选择 CC, 鼓励共享。

关于硬件的版权保护与软件不同。专利法保护设计与实物, 但还没有一个 CC 版的专利允许你对你的作品保留一些权利, 却同时鼓励分享。不过还好, Creative Commons 组织正在努力达到这个目的。围绕开放硬件的合法问题的总结在 <http://eyebeam.org/events/opening-hardware> 上, 这个总结是由 Ayah Bdeir 与 Creative Commons 牵头, 在 Eyebeam 艺术与科技中心举办的研讨会的总结。第一个提出开源硬件和定义硬件开源的“开源硬件峰会”是于 2010 年 9 月 23 日举行的。

### 9.6.1 模拟分享

在国际展览与交易会上, 如 Maker Faire, 你可以分享你的作品, 并且得到一些灵感。也有很多地区级的展览与交易会, 如创客空间、展览馆、大学计划、表演空间等鼓励你分享或展示你的作品。在 [www.makezine.com/groups](http://www.makezine.com/groups) 上就可以查到 Maker 社区团体与空间。

### 9.6.2 数字分享

我已经提到过几个可以在线发布设计、分享或出售设计的网址。可以在 Thingiverse 上发布任何可制作的数字文件, 分享、制作、出售可以在 [ponoko.com](http://ponoko.com) 用激光切割加工的作品, 或在 [Shapeways.com](http://Shapeways.com) 分享 3D 模型。[instructables.com](http://instructables.com) 是一个友好的网站, 可以在上面写出制作的详细过程, 可以包括图片, 这样其他人就可以照做了。你甚至可以开你自己的网店, 或用 [etsy.com](http://etsy.com) 做你的店面。

## 参考资料

- [1] Saul Griffith, "Simply Cad," *Make Magazine* (Sebastopol, CA: O'Reilly, Volume 6).

第10章 项目

# 第10章 项目

第10章 项目

第10章 项目

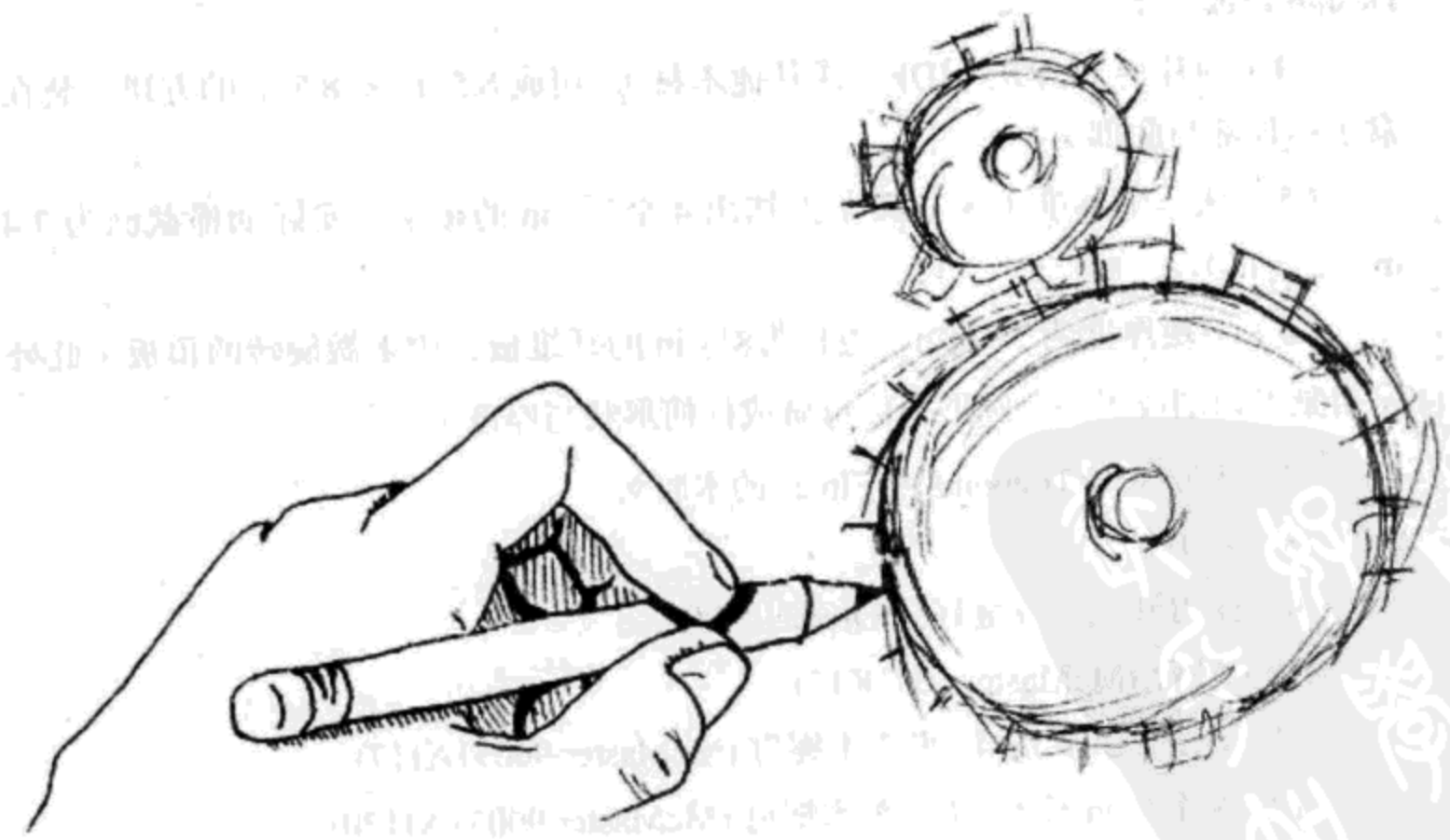
第10章 项目

第10章 项目

第10章 项目

第10章 项目

第10章 项目



知识 船 网 PDG



下面的项目使用了本书前几个章节提到的技巧与方法。

## 项目 10.1 不懒惰的苏珊

在本项目中，我们会用转盘（懒惰的苏珊）来做一个旋转台。为了让做出来的作品更有趣，使用红外 LED 和光敏三极管，当你挥手时，桌子就转了<sup>[1, 2]</sup>。你可以用这个桌子来像玩魔术一样来招待客人，或在下一个你设计的婚礼中，作为一个娱乐互动的中心装饰物。

如果在项目 6.7 中用过三极管，在项目 6.8 中用过光敏电阻，做起来就容易多了。如果没有做过，也不用担心，我们会一步一步地教你如何来做。先做盒子，然后做电路，最后将两者集成在一起。像以往一样，在开始之前，最好先浏览一下制作步骤，看看照片。

### 1. 材料清单

- (1) 防护镜。
- (2) Solarbotics 的 GM 系列塑料轮（与 GM9 电机配合）。
- (3) 联轴器（参见 [www.makingthingsmove.com](http://www.makingthingsmove.com)，下载一个可 3D 打印的文件，或买一个这种零件；为了能与特定的电机、轮和材料厚度配合，必要时用 Alibre Design 修改一下）
- (4) 两片  $\frac{1}{2}$  in 厚的 MDF（或其他木材），切成 8.5 in  $\times$  8.5 in 的方块（装在盒子的顶部与底部）
- (5) 从一个标准 1  $\times$  3 板子上切出 4 个  $7\frac{3}{4}$  in 的板子（实际的横截面为  $3\frac{1}{4}$  in  $\times$   $2\frac{1}{2}$  in）。
- (6) 一块厚度为  $\frac{3}{16}$  in，边长为  $8\frac{1}{2}$  in 的纤维板，用来做旋转的顶板（此处是用激光切割成了一个圆形，你可做成任何形状与厚度）。
- (7) 木胶（如 Titebond 或 Elmer 的木胶）。
- (8) 夹子。
- (9) 锉刀砂纸，或最好是 Dremel 电磨。
- (10) 转台 (McMaster 6031K17)。
- (11) 6 个 1 in 长的 4# 平头木螺钉 (McMaster 90031A117)。
- (12) 8 个  $\frac{1}{2}$  in 长的 #4 平头木螺钉 (McMaster 90031A1170)。
- (13) Phillips 螺丝刀。
- (14) 钻（便携式的或钻床）及  $\frac{1}{2}$  in、 $\frac{1}{4}$  in、 $\frac{1}{8}$  in、及  $\frac{1}{16}$  in 的钻头。
- (15) 环氧灰泥。
- (16) 直流减速电机，接线端子上焊 12 in 长的电线（此处用的是一款

Solarbotics 的旧 GM9)。

(17) 对应的电池 (此处为 9 V), 带接线头的电池扣 (RadioShack 270-324)。

(18) 4 块 AA 电池和电池座 (如 SparkFun 的 PRT-00552)。

(19) 面包板 (如 All Electronics 的 PB-400)。

(20) 跳线 (如 SparkFun 的 PRT-00124) 或自制跳线。

(21) 黑色的电工胶带 (McMaster 和其他任何五金店都提供)。

(22) 达林顿三极管 (如 Digi-Key TIP120-ND 或 Jameco 32993)。

(23) 光敏三极管 (All Electronics 的 PTR-1)。

(24) 红外 LED (All Electronics 的 ILED-8)。

(25) 拨动开关 (如 SparkFun 的 COM-09276) 或其他单刀单掷开关, 引脚上焊 4 in 长的连接线。

(26) 二极管 (SparkFun 的 COM-08589)。

(27) 22 k $\Omega$  电阻 (RadioShack 的 271-1339)。

(28) 100 k $\Omega$  电阻 (RadioShack 的 271-1311)。

## 2. 盒子的制作

(1) 用钢锯、环形锯或圆锯, 或请本地的木材店或五金店将木材加工成方形, 用砂纸、锉刀或 Dremel 锉掉带刺的边。

(2) 如图 10.1 所示, 安装 4 个木边, 在配合面上涂上木胶, 在胶干之前, 用夹子夹住两个 L 型组件, 进行固定。此时, 你应当有两个 L 型组件。

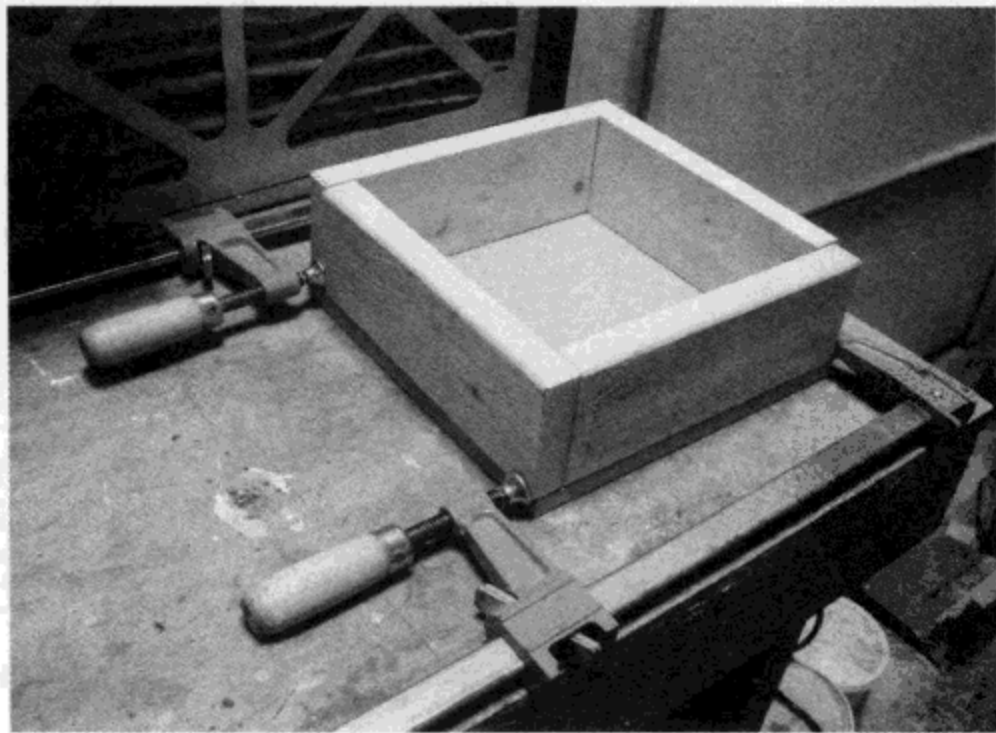


图10.1 胶干之前夹住盒子的边

(3) 将木胶涂在露出的端面上, 将两个 L 型组件夹在一起, 做成一个盒子。如果你做的板子不是标准的方形, 可能还需要额外的夹子, 如图 10.2 所示。在胶

干之前，夹住盒子。

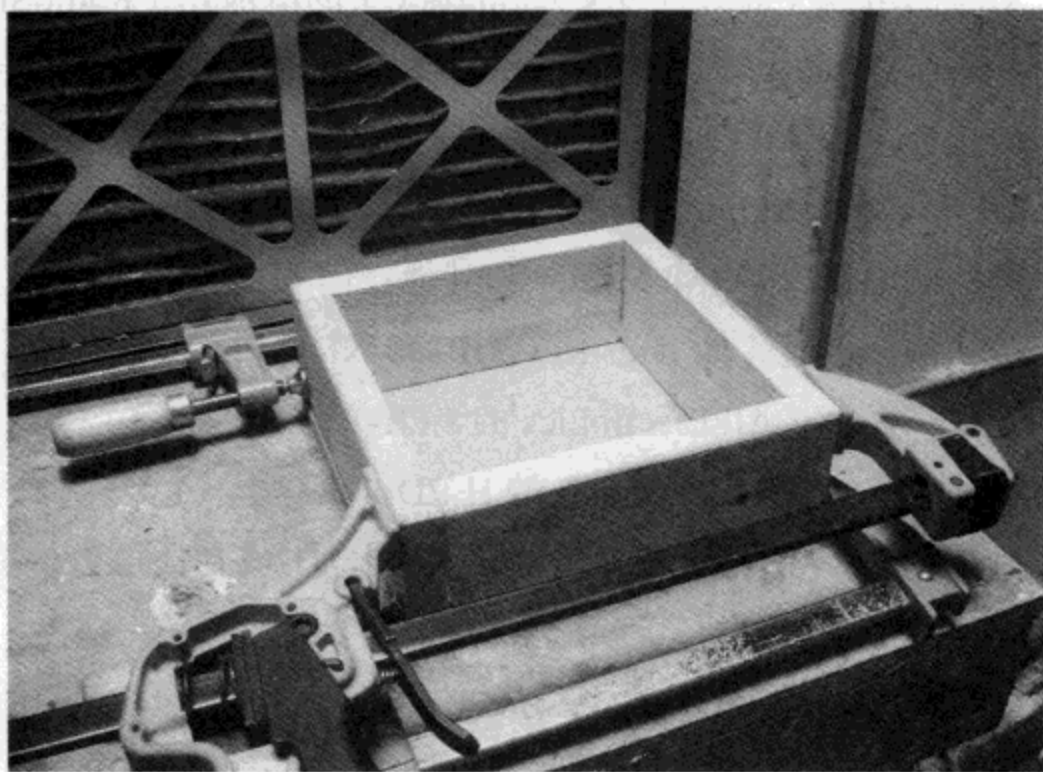


图10.2 胶干之前用额外的夹子夹住盒子的侧面

(4) 胶干后，用木胶涂沫盒子的底部，把它粘在作为底面的另外一个方形木板上。

(5) 戴上防护镜。在另外一个方形木板的4个角上，各钻1个 $\frac{1}{8}$  in的通孔，用来配合最后密封盒子的4#木螺钉。将这块方板放在盒子的顶部，用铅笔标出钻孔的位置。参见图10.3，看看这些孔的位置。用一块废木料垫在方形木板的底部，避免钻到桌子上，或者使用一个钻床也可以。同样，钻孔时最好用夹子将木板固定。

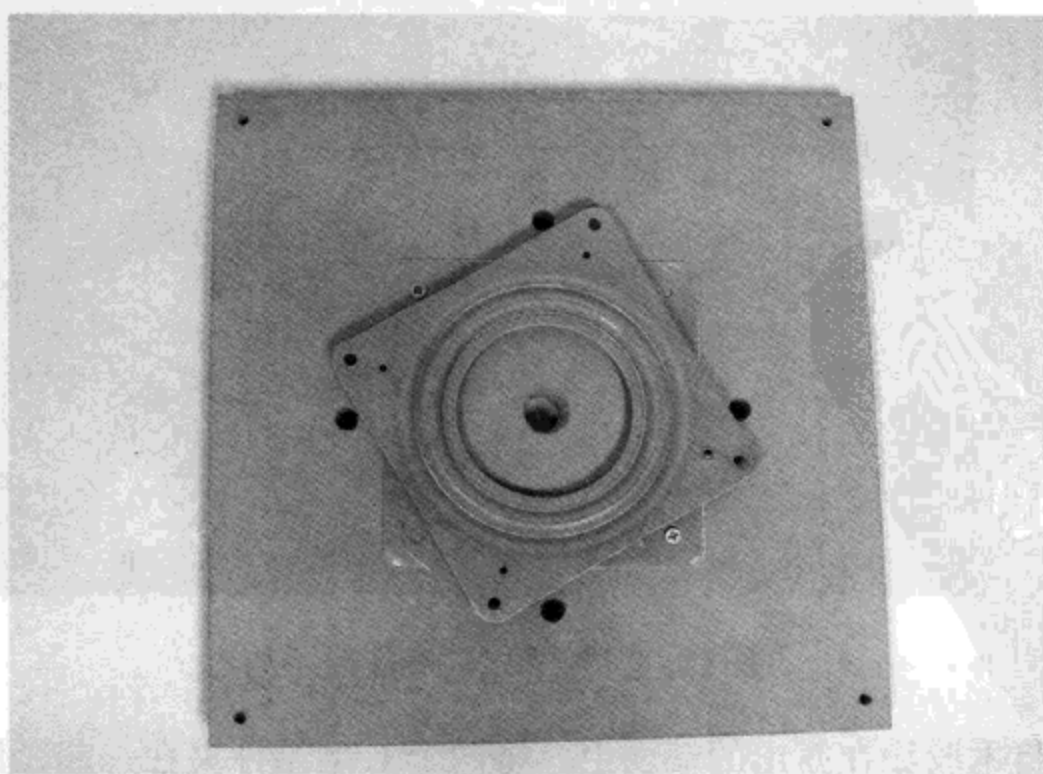


图10.3 安装转盘的轴承

(6) 找到并标出木板的中心。用 $\frac{1}{8}$  in 的钻头钻 1 个孔，再用 1 个 $\frac{1}{2}$  in 的钻头扩大（有了导孔，钻大一点的孔会很容易）。

(7) 找到顶部的方形木板的中心，用 4 个 $\frac{1}{2}$  in 长的 4# 木螺钉将轴承装在转台的中心，轴承闪亮的环形面朝下。如果用改锥手动拧螺钉时有困难，可以先钻 $\frac{1}{16}$  in 的导孔。带两个螺钉的装好的轴承如图 10.3 所示。

(8) 要完成转台的安装，需要使用转盘的角上还没有用过的 4 个安装孔。要钻检查孔，需要将轴承转约 $45^\circ$ ，直到可以通过孔看到下面的木头。标出需要钻孔的位置，用 $\frac{1}{4}$  in 的钻头钻这些孔。这些检查孔是图 10.3 中转盘的边上没有用过的 4 个孔。

(9) 准备一个转台，自己做或在网上订购都可以。如果要下载一个制作模板的数字文件，可以在 [www.makingthingsmove.com](http://www.makingthingsmove.com) 上查找相关内容。

(10) 安装电机。首先在电机上套上联轴器，把它粘在之前钻好的中心孔中。弄完后，应该如图 10.4 所示。

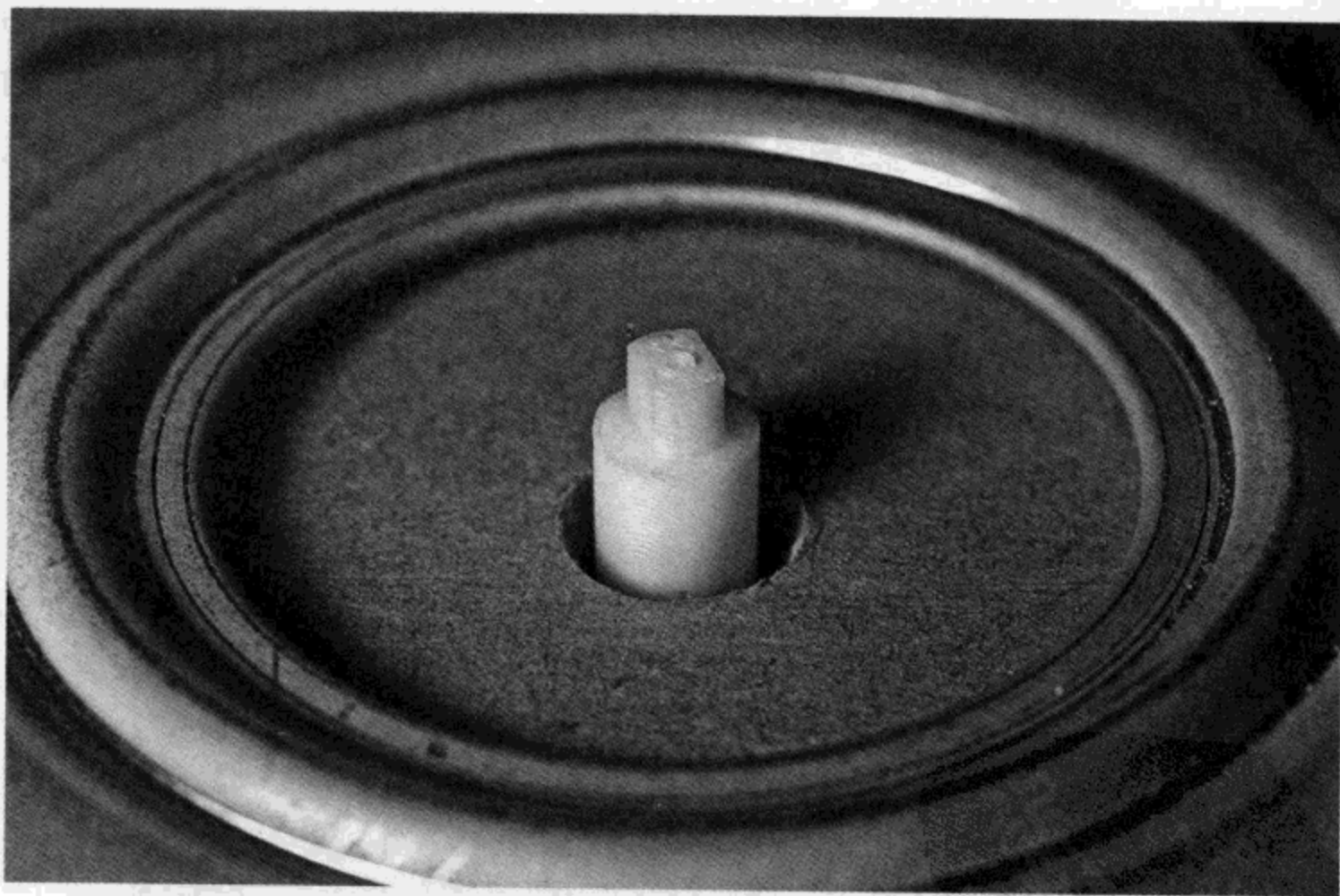


图10.4 盒子顶部中心的联轴器

(11) 把塑料轮装在联轴器上。塑料轮应装在轴承（和联轴器）的中心顶部的位置上，如图 10.5 所示。把轮子调整到中心位置，保证联轴器不与之前钻好的 $\frac{1}{2}$  in 的孔发生摩擦。

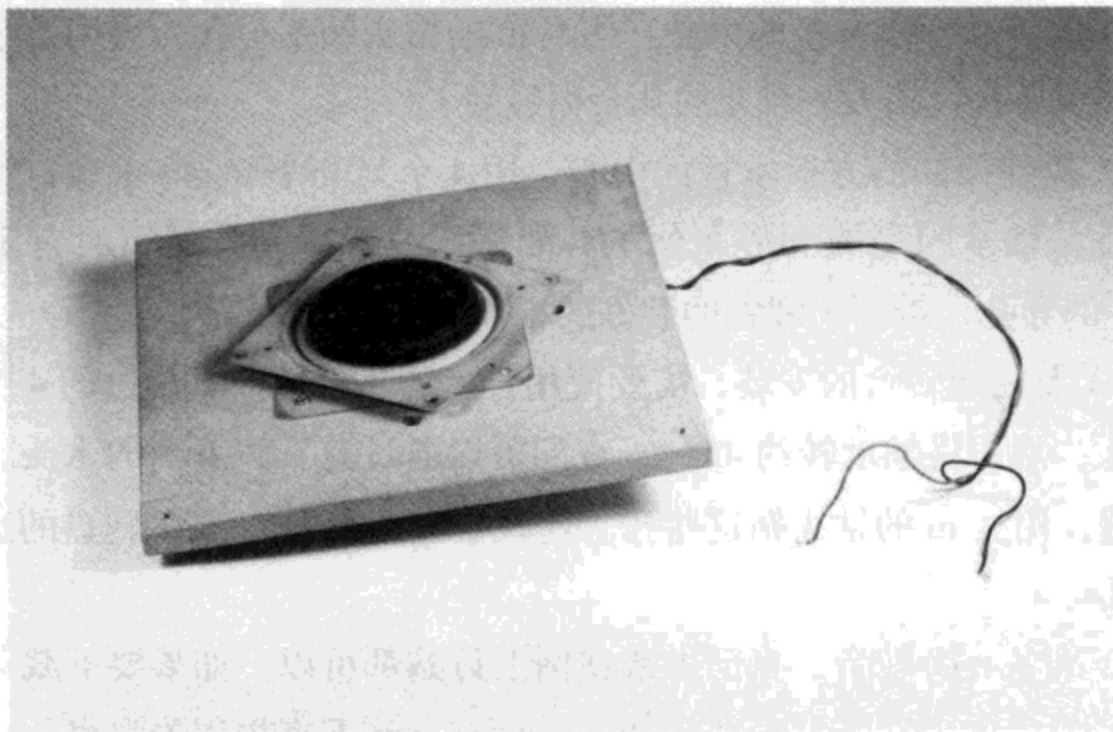


图10.5 层层安装的同轴轮子、轴承、联轴器、电机

(12) 把盒子顶部的方形木板倒过来，用两个 $1\frac{1}{4}$  in 长的 4# 木螺钉安装电机。标好孔的位置后，先在木板上钻 $\frac{1}{16}$  in 的导孔。电机应当平贴在木板上，如图 10.6 所示。为了达到这个目的，我们去掉电机上的扎带，用斜嘴钳弄掉连接扎带的扣。同时要注意用热熔胶对电线绝缘，以及电线的应力缓冲。在这个项目中，这点非常重要。

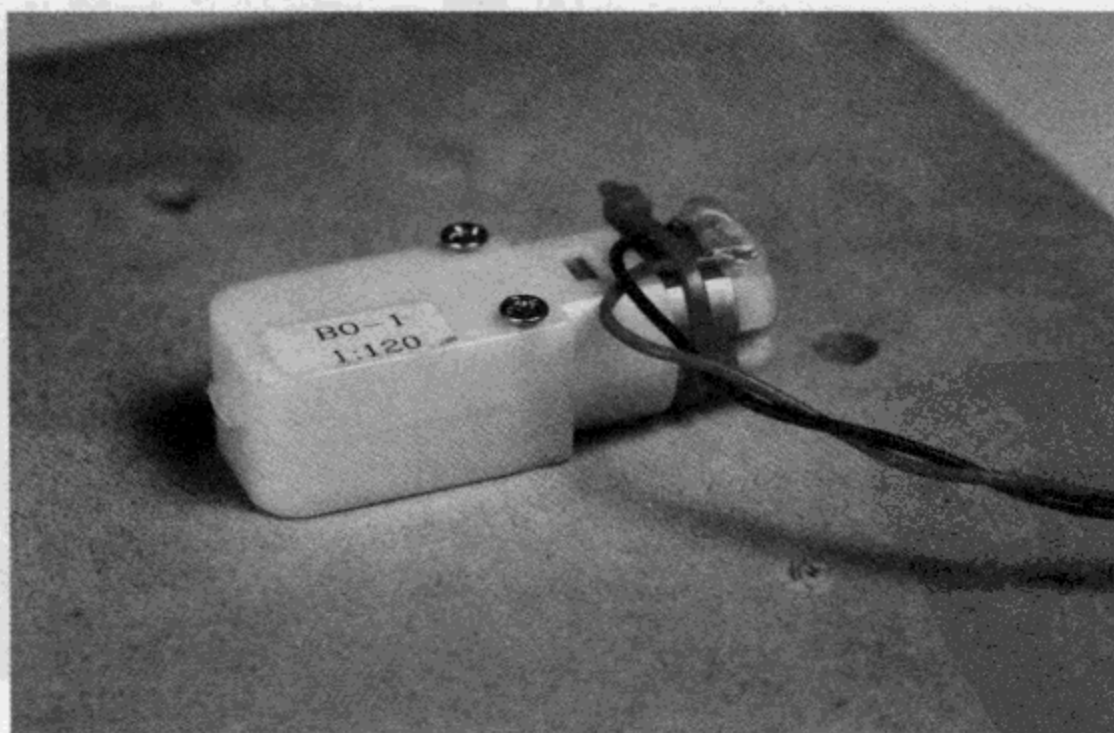


图10.6 安装在盒子顶板下的电机

(13) 检查一下，确保电机、联轴器、轮子依然同轴。将旋转台放在安装面上。转动盒子上部的轴承与轮子，这样就可以通过 $\frac{1}{4}$  in 的检查孔看到之前钻好的，用于安装转台的暴露孔。

(14) 如果用的是激光切割的纤维板，可以用 $\frac{1}{2}$  in 长的 4# 木螺钉来装转台。

装完后应如图 10.7 所示。如果自己切割转台，你可能会先作标记，然后钻  $\frac{1}{16}$  in 的导孔，这样安装起来会容易些。轮流地拧 4 个螺钉，确保塑料轮的受力均匀，同时不要使轴承偏离中心位置。

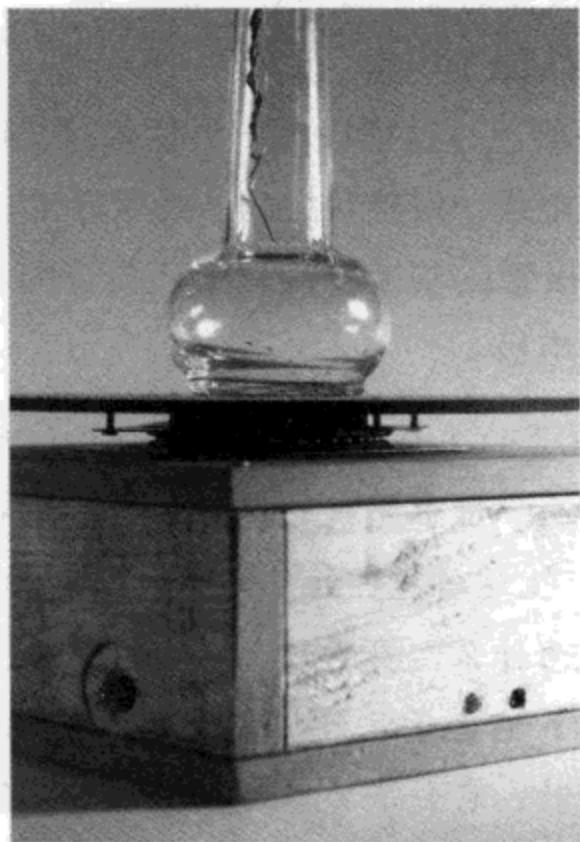


图10.7 装在盒子顶部的转台

(15) 好了，现在可以先把转台与盒子先放起来，来做电子方面的工作了。

### 3. 电子部分的制作

(1) 将 5 V 电源与“地”接在面包板一侧的孔中，另外一侧接 9 V 的电源与“地”。确保面包板的上两个“地”是短接的。完成后的电路应如图 10.8 所示。在做项目的过程中，要记住这种连接方式。在机械部分与电子部分集成以前，在桌子上先搭电路。

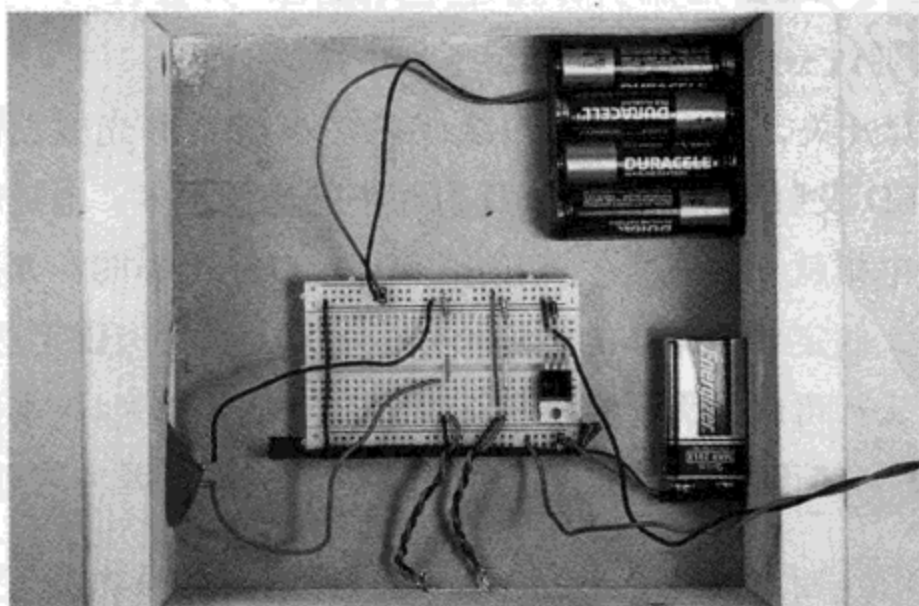


图10.8 完成的电路

(2) 将 TIP120 三极管插在面包板上，确保各引脚在不同的行上。

(3) 将 TIP120 三极管的集电极（中间的引脚）能过二极管连接到“地”。确保二极管的极性连接准确，银条标记应靠近面包板的中部。

(4) 将 TIP120 三极管的发射极接在“地”上。

(5) 将光敏三极管插在面包板上，弯一下引脚，使光敏三极管面向侧面。最好将电线焊在光敏三极管上，这样以后调整位置时会比较方便。在图 10.8 中，应该能看到光敏三极管的电线（螺旋状的两条线靠近 TIP120 三极管）。

(6) 将 TIP120 三极管的基极连接光敏三极管的长引脚。这是光敏三极管的发射极，短的引脚是集电极。

**注意** 光敏三极管的工作原理与 TIP120 三极管相似，只不过光敏三极管没有基极上的第 3 个引脚。红外光就起到了基极的作用。红外光是人看不见的光。用红外 LED 很快就会产生这种光。红外光照射到光敏三极管上时，电流就从集电极流向发射极。这就是为什么需要两种三极管的原因。即使 TIP120 三极管的工作原理与光敏三极管相似，它也无法直接驱动电机。所以，我们用光敏三极管作为一个传感器，当光照射时，它会给功率大一些的 TIP120 三极管一个信号，来驱动电机旋转。

(7) 将光敏三极管的长引脚（发射极）通过一个  $22\text{ k}\Omega$  的电阻接到“地”上。

(8) 将光敏三极管的短引脚（集电极）直接接到 5 V 电源。

(9) 将电机的一根线连接到 TIP120 三极管的集电极（中间的引脚），另外一根线接到 9 V 电源。

(10) 将红外 LED 接到面包板上，弯一下引脚使 LED 的朝向与光敏三极管相同。最好将引脚焊上电线，再接面包板。这样以后调整 LED 的位置就会方便。红外 LED 的连线应该拧在一起，如图 10.8 底部的中间位置所示。

(11) 将红外 LED 的短引脚通过开关接地，开关打到“关”的位置。红外 LED 的长引脚通过一个  $100\ \Omega$  电阻接 5 V 电源。

(12) 打开开关，用手或一张白纸放在红外 LED 和光敏三极管的前面。手离得越近，从 LED 发射出来的光经手反射回去的光就越多，电机转得就越快！如果离得足够远，电机就不转了。怎么相信红外 LED 是工作的？如果你手头有一个带摄像头的手机，假定要给你搭的电路拍一张照片，虽然肉眼无法直接看到红外光，手机上的摄像头却可以，你会在屏幕上看到一点微弱的光。（本章当中的照片，我都用白色 LED 来替代红外 LED，这样看得更清楚些，因为红外 LED 看起来不会那么亮）

#### 4. 集成制作

(1) 把整个电路放在盒子里。在盒子前方用铅笔标出 LED 与光敏三极管的位置。同样，打开开关，试一下电机随手的移动距离转动的情况，再取出电路板。

(2) 用  $\frac{1}{4}$  in 的钻头为 LED 和光敏三极管钻孔（图 10.9）。把盒子支撑在桌子的角上，用便携式手钻钻这两个孔，用砂纸或 Dremel 电磨剔掉毛刺。

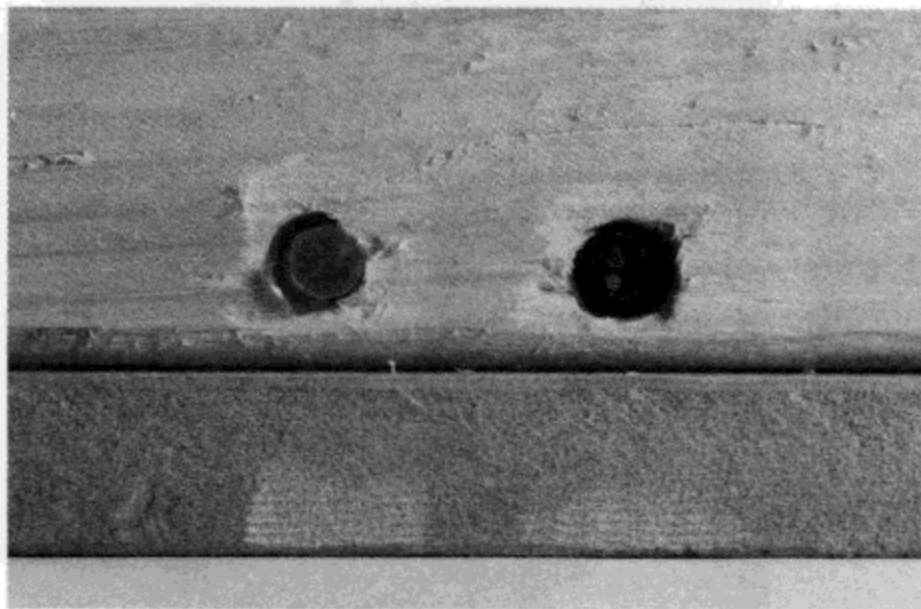


图10.9 在钻好的孔中装上的红外LED（左）和光敏三极管（右）

(3) 用  $\frac{1}{2}$  in 的钻头给开关钻一个孔。最好先钻一个  $\frac{1}{8}$  in 的导孔。用 Dremel 电磨或锉刀剔除孔中的材料，孔的大小要能使开关可以从外面拨动（图 10.10）。

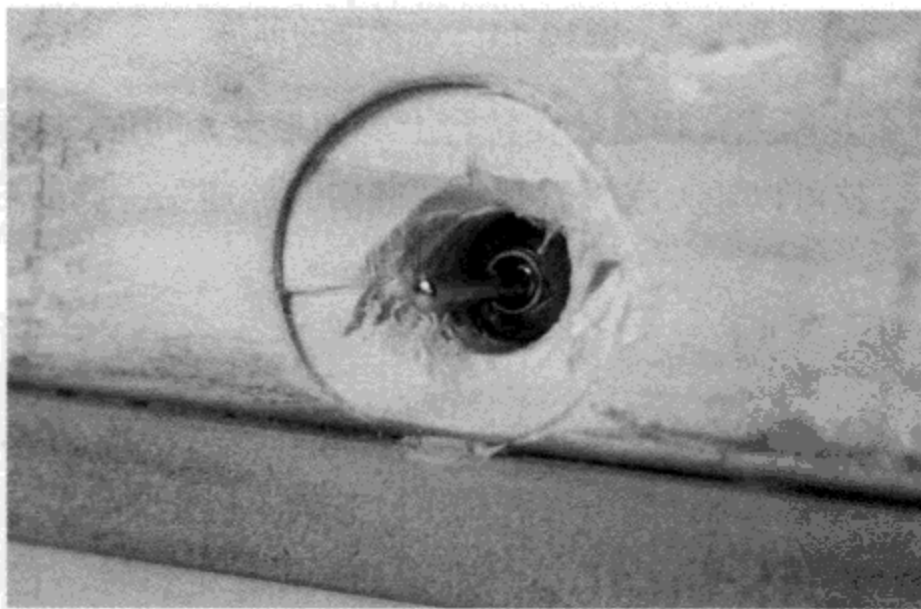


图10.10 从外边看开关的安装情况

(4) 孔钻好后，再把整个电路放进盒子里，确保电机及其他连接线没有松动。

(5) 将红外 LED 和光敏三极管粘在各自的孔中，检查一下电路的工作情况。我们做的过程中，把光敏三极管用黑色的电工胶布缠了缠，然后把它推到孔中，使光敏三极管与盒子外表面平行。同时，我们也磨了一下红外 LED 的表面，使光能产生散射，LED 灯粘贴的位置也超出盒子外表面很多（图 10.7）。



(6) 用环氧灰泥固定开关, 可以把电工胶布粘在任何需要固定的元件下面。

(7) 如果每个功能都能实现, 就可以把顶盖装上了。在木盒子的角上用4个 $\frac{1}{4}$  in 长的4#木螺钉将转台装好, 做完的成果应如图10.11所示。



图10.11 不懒惰的苏珊

(8) 找一个花瓶或食物盘放在转台上。如果有人问你: 这是一个旋转餐桌吗, 只需要挥挥手, 就可以让大家看看其实“懒惰的苏珊”一点都不懒。

## 项目10.2 风 灯

这个项目中, 我们会做一个小的立式风轮, 或者简称VAWT。这种风轮的工作效率不如卧式的高, 不过却可以利用市区方向不确定的风。

通常, 通电时电机会转。反之亦然, 如果你让电机转, 它的作用就如一个发电机, 可产生电能。风轮就是利用风的能量带动电机转, 产生的电能可以点亮基座上的LED灯。风轮用这种电能可以使灯闪烁, 表明风的存在<sup>[3, 4]</sup>。

我们已经知道LED和二极管可以使电流单方向流动。我们也知道双极的步进电机有两组线圈。此处的任务是设计一个电路, 使不管风车转动的方向如何, 每个线圈中产生的电流能够向正确的方向流动。为了达到这个目的, 需要为双极步进电机做一个整流电路(参见图10.18)。

## 1. 材料清单

- (1) 步进电机 (SparkFun 的 ROB-09238)。
- (2) 插针 (SparkFun 的 PRT-00116)。
- (3) 面包板 (如 All Electronics 的 PB-400)。
- (4) 跳线 (如 SparkFun 的 PRT-00124) 或自制跳线。
- (5) 8 个二极管 (SparkFun 的 COM-08589)。
- (6) 一个或多个 LED (此处用的是 SparkFun 的黄色 COM-09594, 可以选择任何颜色的灯)。
- (7) 一个或多个 1000  $\mu$ F 的电容 (SparkFun 的 COM-08982)。
- (8)  $\frac{1}{4}$  in 厚, 大小为 15 in  $\times$  30 in 的丙烯酸塑料板 (尺寸是根据 Ponoko P3 的模板确定的), 用于安装齿轮、圆盘以及帆固定器等。

**注意** 在 [www.makingthingsmove.com](http://www.makingthingsmove.com) 查找资料, 找一个可以下载的文件, 可以用激光切割机切割, 或作为模板用。也可以通过这个链接买材料。

- (9) 10 in 宽的铝制防雨板 (通常是成卷卖的, 本项目大约需要 2 ft)
- (10) 带 5 mm 安装螺钉孔的轴环 (McMaster 的 57485K65)。
- (11) 带  $7\frac{1}{2}$  in 安装螺钉孔的轴环 (McMaster 的 6166K25)。
- (12) 18 in 长的外径为  $\frac{1}{2}$  in 的铝管 (McMaster 1658T45 的长度为 8 ft, 可以想办法锯下一段, 用钢锯就可以)。
- (13) 两个安装直径为  $\frac{1}{2}$  in 轴的法兰滑动轴承 (McMaster 的 2938T12)。
- (14) 用于安装直径为  $\frac{1}{2}$  in 轴的推力轴承 (McMaster 的 5909K31), 带两个配套的垫圈 (McMaster 的 5909K44)。
- (15) 3 个母螺纹柱, 4 in 长, 螺纹尺寸为  $\frac{1}{4}$ -20 (McMaster 的 92230A350)。
- (16) 6 个沉头螺钉,  $\frac{1}{4}$ -20 的螺纹, 长度为  $\frac{3}{4}$  in (McMaster 的 92196A540)。
- (17) 6 个  $\frac{1}{4}$  in 弹簧垫圈 (McMaster 的 92146A029)。
- (18) 6 个  $\frac{1}{4}$  in 平垫圈 (McMaster 的 92141A029)。
- (19) 4 个 M3 螺钉, 40 mm 长 (McMaster 的 91292A024)。
- (20) 4 个 M3 弹簧垫片 (McMaster 的 92148A150)。
- (21) 4 个 M3 垫片 (McMaster 的 91116A120)。
- (22) 一套英制和公制的内六角扳手 (如 McMaster 的 7324A18)。
- (23) 钢锯 (如 McMaster 的 4077A1)。
- (24) 剔毛刺的工具 (如 McMaster 的 4289A35) 和圆锉。
- (25) 粗砂纸。
- (26) 环氧灰泥。

## 2. 操作方法

(1) 要做齿轮、圆盘和帆固定器, 可从 [www.makingthingsmove.com](http://www.makingthingsmove.com) 下载模板, 或从网站上订购。

(2) 戴上防护镜, 用钢锯割一段 18 in 长的铝棒。用剔毛刺的工具或锉把杆的里外都磨平, 注意别伤着自己。

(3) 确保铝杆正确与法兰滑动轴承、推力轴承、垫圈及轴环配合。还记得第 2 章中学过的公差问题吗? 要注意所有零件的公差。

① 铝杆外径的公差为  $\pm 0.025$  in。也就是说, 铝杆的外径范围是 0.475 ~ 0.525 in。

② 轴环的内径没有给出公差。

③ 法兰滑动轴承内径的公差为  $+0.001 \sim +0.002$  in。也就是说, 它的内径的范围是 0.501 ~ 0.502 in。

④ 推力轴承的尺寸为  $\frac{1}{2}^{+0.002}_{-0.007}$ , 取该轴承的内径为 0.502~0.507 in。

⑤ 没有给出推力垫圈内径的公差。

即铝杆的外径比与它配合的最小的零件的尺寸要小, 此处为 0.501 in 的滑动轴承。

(4) 如果铝杆相对于滑动轴承来说太大, 戴上安全镜、防尘面罩、手套 (因为铝粉对身体不好), 用砂纸裹住铝杆, 边压边转, 打磨到铝杆能与所有的组件配合为止。

**注意** 如果你有幸有台车床, 削铝材就会省下不少时间。一个台式磨床比手动打磨要快得多, 不过要保证杆件为圆形就难多了。

(5) 安装基座 (在整个装配过程中, 都可参考图 10.17 的完整装配)。先准备好两个圆盘、六角柱、 $\frac{1}{4}$ -20 螺钉、弹簧垫圈、平垫圈。用  $\frac{1}{4}$ -20 螺钉将丙烯酸圆盘、垫圈和弹簧垫圈依次连接在一起, 如图 10.12 所示。

(6) 在基座圆盘的中心孔中装上一个法兰滑动轴承, 基座是没有预留装电机的 4 个孔的圆盘。

(7) 装上推力垫圈、推力轴承, 基座内的情形如图 10.13 所示。

(8) 把铝杆从顶部滑下来。在碰到底部的滑动轴承前, 应当先滑过另外一个滑动轴承、一个  $\frac{1}{2}$  in 的轴环、一个激光切割的齿轮、两个或更多  $\frac{1}{2}$  in 的轴环, 最后是推力垫圈、轴承、垫圈层。

(9) 轻轻地拔出铝杆, 避免碰到你的工作面。用内六角扳手拧最底下轴环的螺钉。轴环装在推力轴承上, 与铝杆连接, 此时应当能转动铝杆。

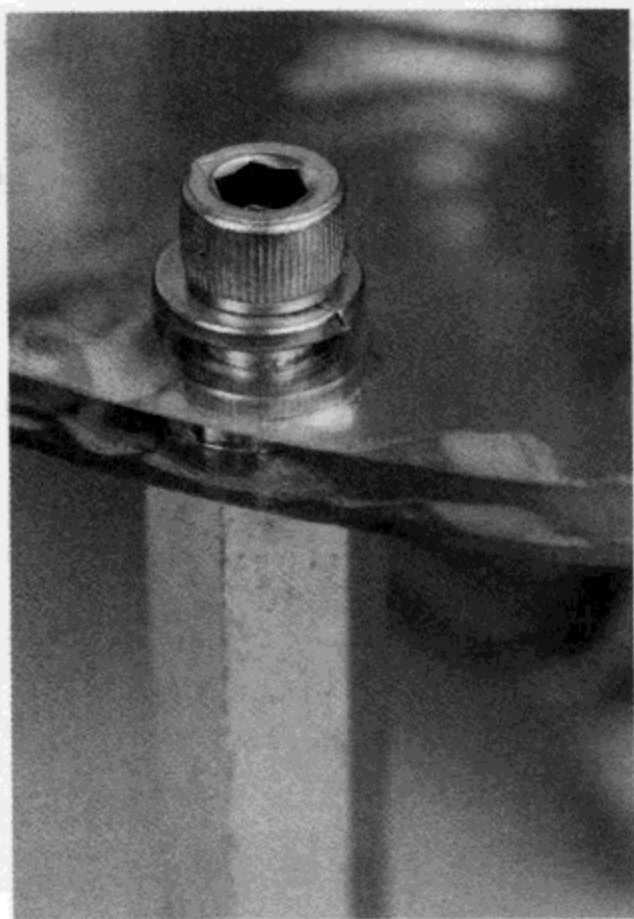


图10.12 六角柱与其他零件的安装

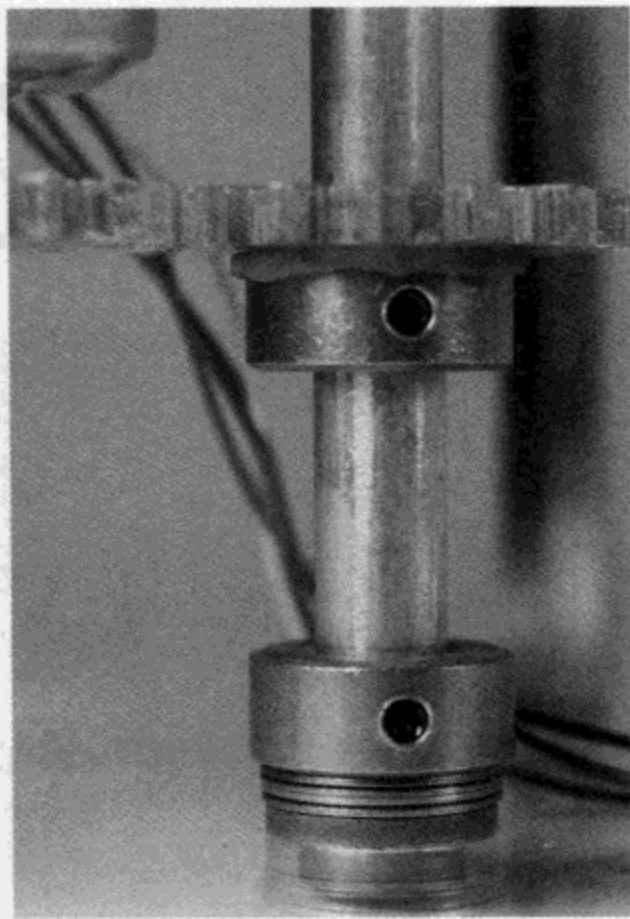


图10.13 基座内零件的排列

(10) 将另外一个轴环与齿轮抬到基座的大约一半的高度，拧紧螺钉。后面会用环氧灰泥将轴环与齿轮连接在一起，但现在还不能这么做。

(11) 将顶部的滑动轴承与顶部的轴环安装在一起，如图 10.14 所示。

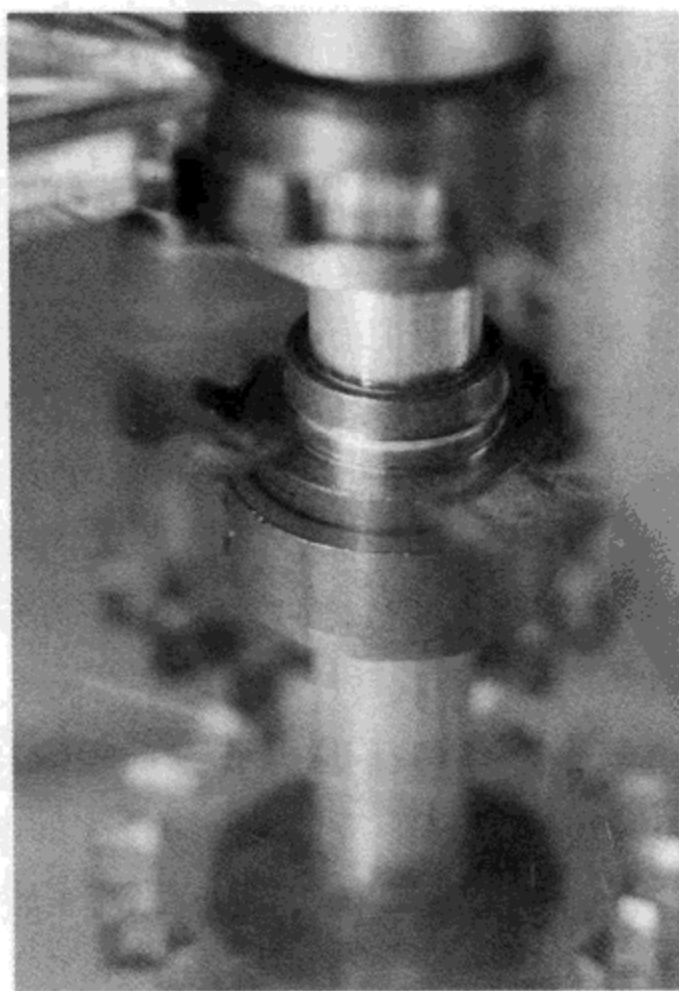


图10.14 顶盘上的滑动轴承与轴环

(12) 在装铝杆之前，最好先装电机。首先，割几段约 8 in 长的电线，焊在 4 pin 插针上（见项目 6.9）。红绿线挨着焊在一侧，蓝黄线在另外一侧。

(13) 取下固定电机的螺钉。用较长的 M3 螺钉从背后安装电机，将电机装在顶部圆盘的下面。把 M3 垫圈、弹簧垫圈用螺钉装在一起（图 10.15）。

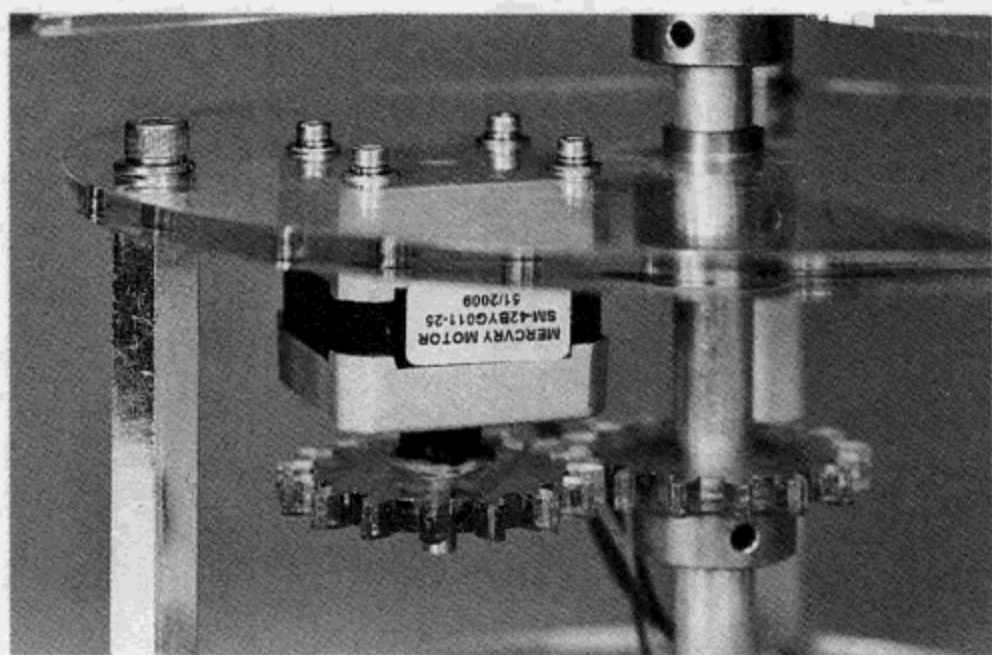


图10.15 安装好的步进电机

(14) 把另一个齿轮装进电机轴中，用 5 mm 轴环临时固定。调整轴环的高度，使齿轮的高度一致，并且相互之间能正确啮合。现在就可以用环氧灰泥将齿轮固定在各自的轴环上了。

(15) 继续装铝杆。将一个  $\frac{1}{2}$  in 的轴环、其中一个塑料帆架及另一个  $\frac{1}{2}$  in 的轴环依次套上。将下面的轴环提起来，不要让它接触基座的顶部，用螺钉将轴环固定在杆上。用上面的轴环拧紧塑料帆架，再用螺钉进行固定。用手转这个轴，它应当能够流畅地转动，帆架应当随着轴转动。

(16) 割 3 个帆来捕风。帆架上有几个不同的槽，用剪刀剪几片铝防水板，长度只要能使叶片顺利转起来就可以。每个帆的角上割出一个  $\frac{1}{2}$  in 的调整片，塞到固定器的槽中。折一下调整片，将帆固定，如图 10.16 所示。

(17) 将轴环、帆架、帆上边的轴环组件再按顺序组装，整个机械部分的工作就做完了。做完的不带面包板的机构应如图 10.17 所示。用手转铝轴时摩擦应该非常小。

(18) 现在该做电子部分了。我们应该搭一个图 10.18 所示电路。用 8 个二极管和跳线搭一个图 10.19 所示电路。每个线圈中产生的电路都会流向同一处——面包板右侧的电源列。确保二极管的方向准确，别忘了将地线列短接。

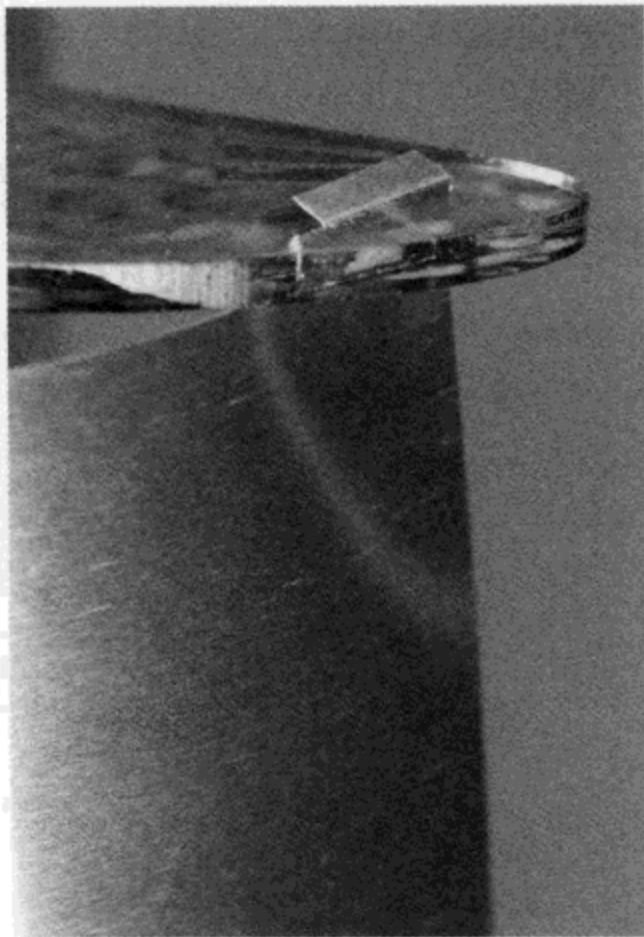


图10.16 折铝防水板上的调整片来固定帆



图10.17 装配完毕的风灯

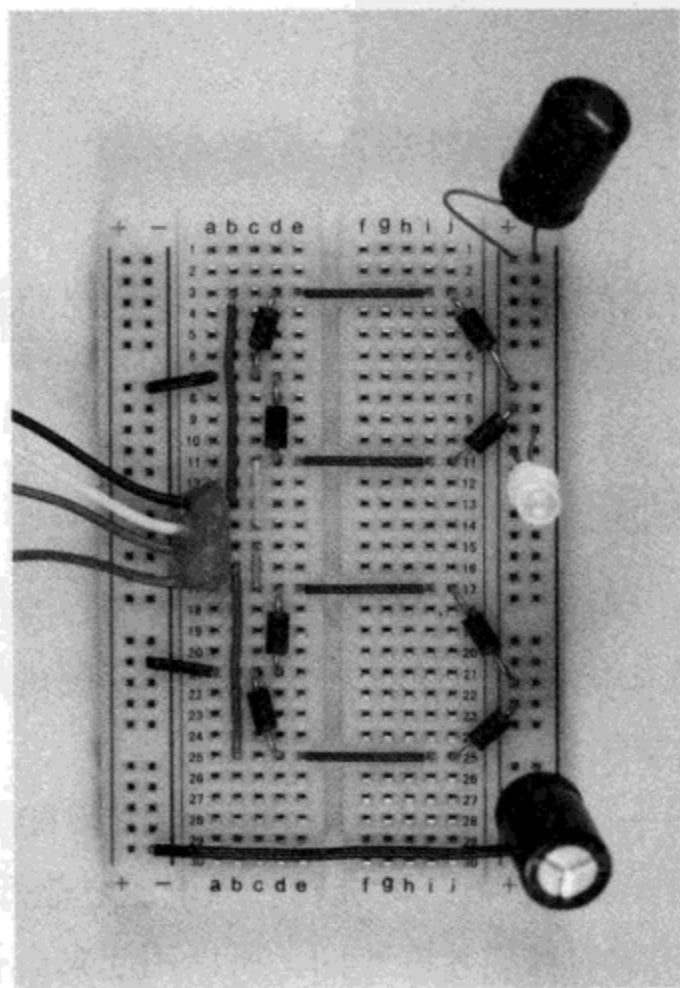


图10.18 双极步进电机的整流电路

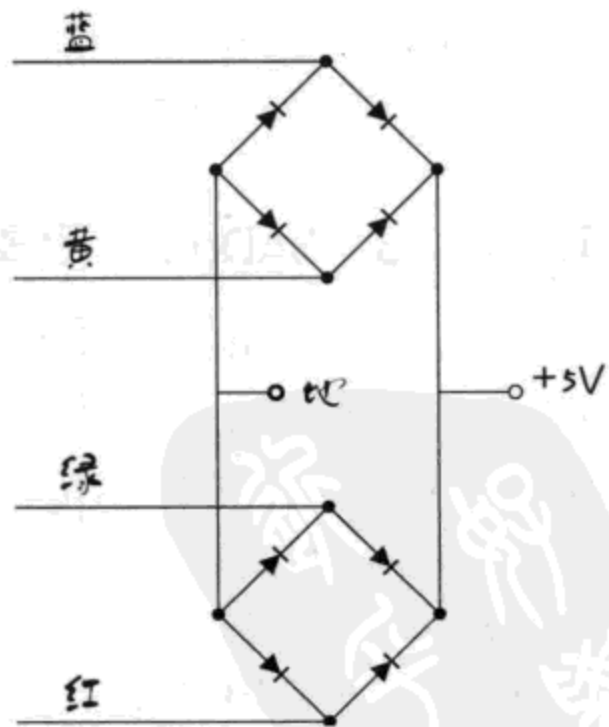


图10.19 整流电路的原理图

(19) 注意面包板中间部分的 LED 和顶部、底部的两个电容。将 LED 的长引脚插在电源列，短引脚接“地”。接电容之前，转一下风灯，看看 LED 是否闪烁。

(20) 试着先接上一个电容，如图 10.18 所示。标“-”的一侧接“地”，另一

侧接电源。当风灯转动的时候，电容会存储电能；当风灯不转的时候，它会释放电能。所以，LED灯闪烁会更流畅些。试着加上更多的LED灯和电容，直到用手转铝杆时，LED灯发出均匀的光。在图10.20中，在风灯的侧面加了散光纸，用了3个LED灯和2个电容，使发出的光更加柔美。

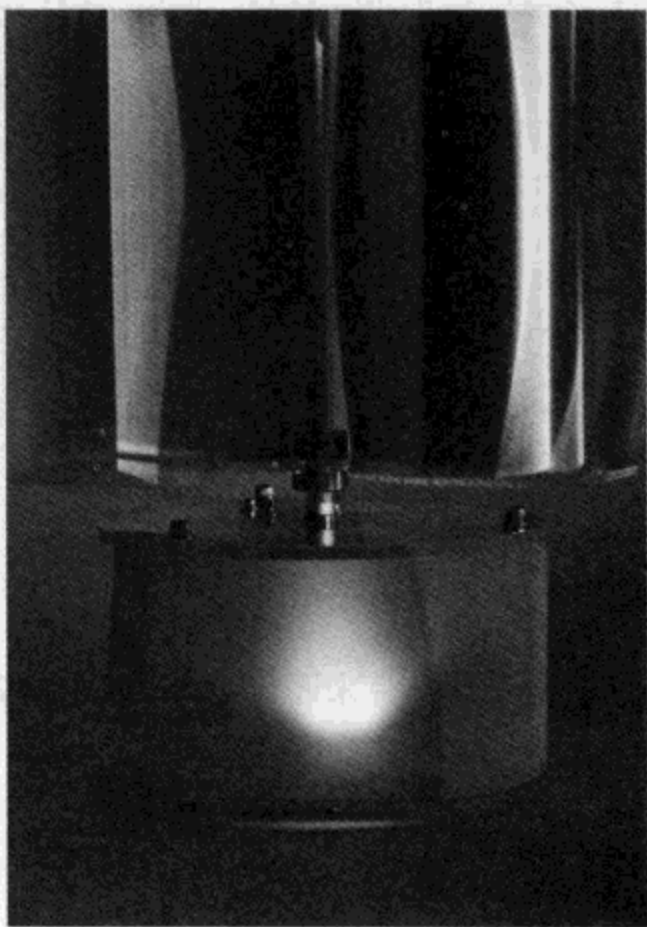


图10.20 工作中的风灯

(21) 现在把风灯拿到外边！看看有风的时候它是否能工作。我们已将这种灯用于曼哈顿的街角和 Eyebeam 艺术与科技中心两层楼的房顶上。

### 项目 10.3 SADbot : 受季节控制的机器人

SADbot 是与 Ben Leduc-Mill 合制的，用在 Eyebeam 艺术与科技中心的窗户走廊上。主要思想是通过传感器，利用太阳能驱动一个绘图机，这个绘图机能与窗口外的人互动。你也可以做一个装在自家窗户上。

SADbot 的名字源于驱动它的能源——太阳能。由于电机是用太阳能驱动的，所以只有光照够强，能在电池中存储太阳能，电机才会转。当电池电能低时，SADbot 的电机就会停转。因为只有有太阳的时候它才能绘图，所以用起来会有点别扭。

#### 1. 材料清单

(1) 万用表。

(2) 带 USB 电线和 AC 适配器的 Arduino 板。

- (3) 电烙铁、焊架与焊锡。
- (4) 3 块小面包板 (如 All Electronics 的 PB-400)。
- (5) 跳线 (如 SparkFun 的 PRT-00124)。
- (6) 连接线: 红色的、黑色的与白色的 (SparkFun 的 PRT-08023, PRT-08022 和 PRT-08026)。
- (7) 两个步进电机 (SparkFun 的 ROB-09238)。
- (8) 两个驱动板 (SparkFun 的 ROB-09402)。
- (9) 插针 (SparkFun 的 PRT-00116)。
- (10) 4 个光敏电阻 (1~10k $\Omega$ : SparkFun 的 SEN-09088)。
- (11) 4 个 1k $\Omega$  的电阻 (SparkFun 的 COM-08980)。

**注意** 也可以用 1~10k $\Omega$  的光敏电阻 (SparkFun 的 SEN-09088)。此时, 应当用 1k $\Omega$  的电阻 (SparkFun 的 COM-08980) 才能得到最好的响应。

- (12) 测试用的台式电源。
- (13) 12 V/5 A·h SLA 电池 (Microbattery 的 PS-1250 F1, 网址: [www.microbattery.com](http://www.microbattery.com))。
- (14) 太阳能充电控制器 (Silicon Solar 的 SKU 06-1024, 网址: [www.siliconsolar.com](http://www.siliconsolar.com))。
- (15) 12 V/7 W 的太阳能充电板 (Silicon Solar 的 SKU 9358)。
- (16) 用来做画布的大纤维板或木板 (约 3 ft  $\times$  2 ft)。
- (17) 8 个 M3 螺钉, 长度为 20 mm (McMaster 的 92095A185)。
- (18) 8 个 M3 弹簧垫圈 (McMaster 的 92148A150)。
- (19) 1 包 M3 垫圈 (McMaster 的 91116A120)。
- (20) 钻 (手钻的或钻床) 与钻头 ( $\frac{3}{8}$  in 及  $\frac{1}{8}$  in)。
- (21) 斜嘴钳 (如 SparkFun 的 TOL-08794)。
- (22) 2 个 3D 打印的皮带轮

**提示** 在 [www.makingthingsmove.com](http://www.makingthingsmove.com) 找一个可以下载的文件, 或从其他地方买皮带轮。

- (23) 弹簧夹子 (如 McMaster 的 5107A1)。
- (24) 黑色记号笔。
- (25) 单股鱼线。
- (26) 大张白纸。

## 2. 操作方法

- (1) 和项目 6.9 一样, 准备两个步进电机、驱动板、面包板。用台式电源提



供 12V 电源和“地”，接到每个驱动板的 GND 和 M+。如图 10.21 所示，将驱动板与 Arduino 板连接。

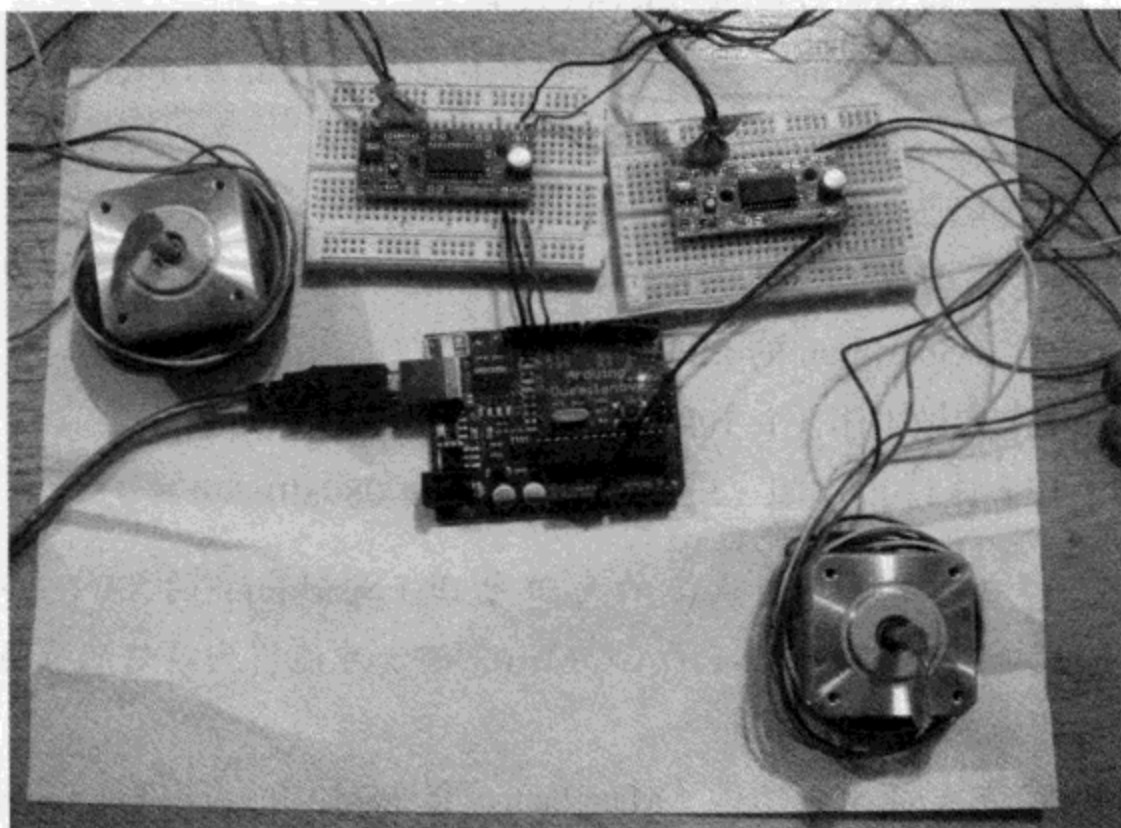


图10.21 驱动两个步进电机的Arduino板的配置

(2) 左边电机的接法:

- ① Arduino 的 GND 接左边驱动板的 GND ;
- ② Arduino 引脚 11 接驱动板 DIR ;
- ③ Arduino 引脚 12 接驱动板 STEP。

(3) 右边电机的接法:

- ① Arduino 的 GND 接右边驱动器的 GND ;
- ② Arduino 引脚 6 接驱动板 DIR ;
- ③ Arduino 引脚 7 接驱动板 STEP。

(4) 确保两个步进电机能工作。输入并修改下面的代码，下载到 Arduino 板。

/\* 用 Arduino 通过 SparkFun 的 EasyDriver v4.3 驱动两个步进电机。程序由 By Ben Leduc-Mills 和 Dustyn Roberts 于 2010 年 6 月编写 \*/

```
#include <Stepper.h> // 导入步进电机头文件库
#define STEPS 200 // 360/1.8 步进角 = 200 步 / 转
// 从步机电机库中申明电机的引脚定义 (每个电机一个函数)
Stepper right_motor(STEPS, 6, 7); //6=DIR, 7=STEP
Stepper left_motor(STEPS, 11, 12); //11=DIR, 12=STEP
void setup()
```

```
// 设置电机速度 (单位为 r/min)
right_motor.setSpeed(200);
left_motor.setSpeed(200);
}

void loop()
{
  // 每个循环电机走 1 步
  right_motor.step(10);
  left_motor.step(10);
  delay(10); // 给电机走 1 步的时间
}
```

(5) 如果代码没问题, 电机应该会转。在电机轴上粘个小旗, 以便能清楚地看到电机的转动情况。

(6) 调整电源的电压值会发现, 当电压远低于 12 V 时, 电机依然能转。实际上, 电机在电压低至 3.7 V 时也可以工作, 空载下消耗的电流为 120 mA。在全电压 12 V 时, 空载电流为 240 mA, 用手堵转时电流仅为 250 mA。由于在本项目中, 我们用太阳能来充电, 所以最好了解电机对电压变化的适应性, 会发现电机对电流的要求其实并不高。

(7) 现在让电机根据光敏电阻的受光情况来转动。首先, 拿出第 3 块面包板, 像项目 6.8 中那样接线。每个光敏电阻应当有一个引脚接电源, 另一个引脚通过一个电阻接地, 如 10.22 所示。

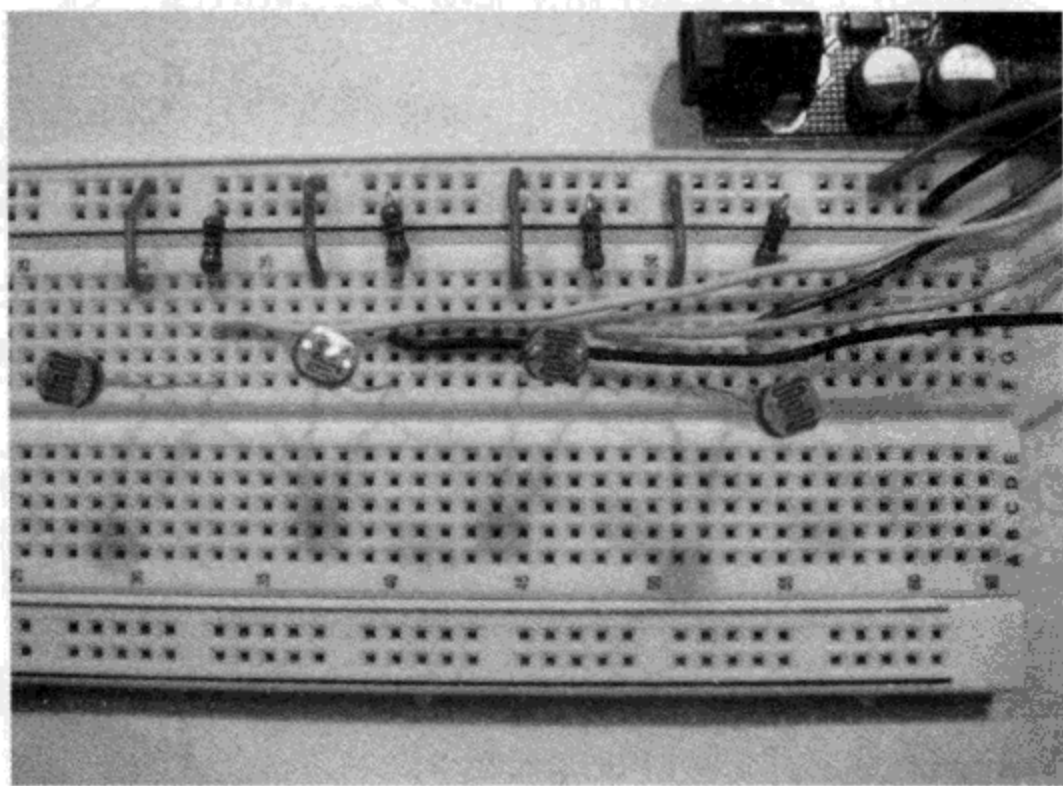


图10.22 接到光敏电阻上的两个步进电机

(8) 接地的引脚同时也应该接到 Arduino 板上的 ANALOG IN。从左往右，将光敏电阻的接地引脚接到 Arduino 的引脚 0、1、2、3 上，分别对应于代码中的 up、down、left、right。

(9) 将 Arduino 的 GND 和 5 V 引脚接到面包板的电源和地，接完的电路应如图 10.23 所示。

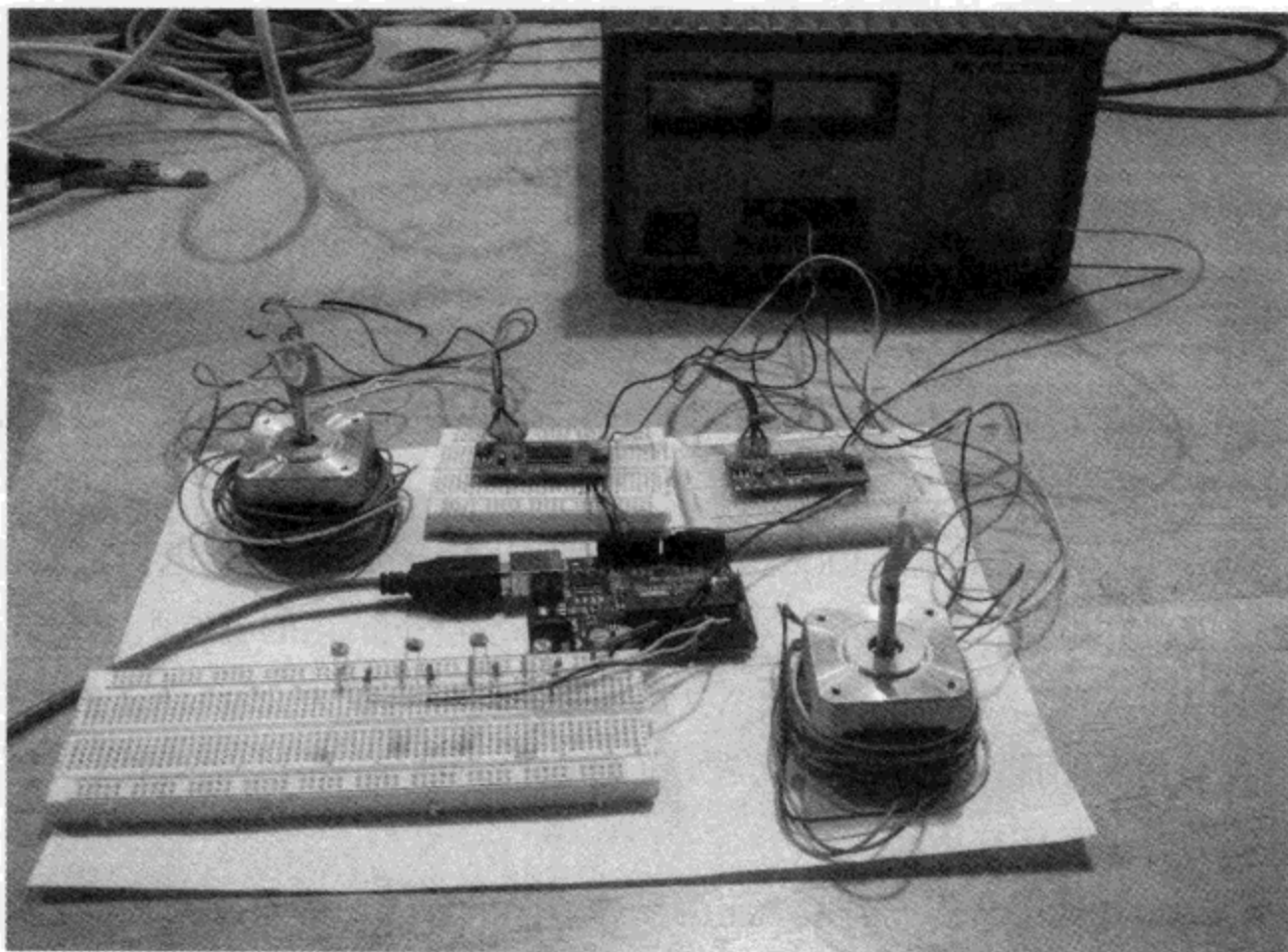


图10.23 所有 SADbot的电路

(10) 现在试一下，用光敏电阻来驱动步进电机的程序代码。输入并修改下面的代码，并下载到 Arduino 板。

/\* 通过 SparkFun 的 EasyDriver v4.3 CC-GNU GPL, 用 Arduino 板和光敏电阻来驱动两个步进电机的程序。程序由 By Ben Leduc-Mills 和 Dustyn Roberts 于 2010 年 6 月编写 \*/

```
#include <Stepper.h> // 导入步进电机程序库
#define STEPS 200 // 360/1.8 (步距角) = 200 步 / 转
// 从步机电机程序库中申明电机的引脚定义 (每个电机一个函数)
Stepper right_motor(STEPS, 6, 7); //6=DIR, 7=STEP
Stepper left_motor(STEPS, 11, 12); //11=DIR, 12=STEP
int distance; // 电机应当转动的角度
int lowest; // 存储光敏电阻的最低值
int i; // 记录循环次数
```

```
// 光敏电阻值的 4 个变量
int photo_up;
int photo_down;
int photo_left;
int photo_right;
void setup()
{
    Serial.begin(9600); // 开始串口输出
    // 设置电机速度 (单位为 r/min)
    right_motor.setSpeed(200);
    left_motor.setSpeed(200);
}
void loop()
{
    // 从引脚 0~3 读取光敏电阻的值
    photo_up = analogRead(0);
    Serial.print("up");
    Serial.println(photo_up);
    photo_down = analogRead(1);
    Serial.print("down");
    Serial.println(photo_down);
    photo_left = analogRead(2);
    Serial.print("left");
    Serial.println(photo_left);
    photo_right = analogRead(3);
    Serial.print("right");
    Serial.println(photo_right);
    delay(1000); // 给监视器读取的时间
    // 用阵列存储光敏电阻的值
    int photoValues[] = {photo_up, photo_down, photo_left, photo_right};
    lowest = 9999; // 此值要设得比光敏电阻可能的值大一些
    // 用于找到光敏电阻最低值的循环
    for(i = 0; i < 4; i++) // 4 = 光敏电阻的数值
```

```
Serial.println(photoValues[i]); // 输出光敏电阻值的阵列
// 如果此时光敏电阻的值较比前面给定的 lowest 小, 则将新的实际值赋给
lowest 变量。
if (lowest >= photoValues[i] )
{
    lowest = photoValues[i];
}
// 为了确定已选择了最低值, 进行输出显示
Serial.print("lowest:");
Serial.println(lowest);
delay(1000);
// 循环开始前等待 1s, 便于我们读值
} // for 循环结束
distance = lowest; // 设置转角值 = 最低值
// 找到最低值对应的传感器, 转到这个传感器方向
// 通过下边的程序, 了解 up、down、left、right 函数的功能
if (lowest == photoValues[0])
{
    up( distance );
}
else if (lowest == photoValues[1])
{
    down( distance );
}
else if (lowest == photoValues[2])
{
    left( distance );
}
else if (lowest == photoValues[3])
{
    right( distance );
}
} // 循环结束
/* 此处是方向函数。循环次数 = 距离。正数表示顺时针转动, 负数表示逆时针转动 */
```

```

void up(int distance) {
    for( i = 0; i < distance; i++){
        right_motor.step(10);
        left_motor.step(-10);
    }
}

void down(int distance) {
    for( i = 0; i < distance; i++){
        right_motor.step(-10);
        left_motor.step(10);
    }
}

void left(int distance) {
    for( i = 0; i < distance; i++){
        right_motor.step(-10);
        left_motor.step(-10);
    }
}

void right(int distance) {
    for( i = 0; i < distance; i++){
        right_motor.step(10);
        left_motor.step(10);
    }
}

```

(11) 试着盖住光敏电阻:

- ① 盖住上边的光敏电阻, 左电机逆时针转, 右电机顺时针转;
- ② 盖住下边的光敏电阻, 左电机顺时针转, 右电机逆时针转;
- ③ 盖住左边的光敏电阻, 两个电机都逆时针转;
- ④ 盖住右边的光敏电阻, 两个电机都顺时针转。

(12) 拿出纤维板, 戴上防护镜。SparkFun 上的步进电机数据表表明, 电机的安装孔是间距为 31 mm 的正方形, 电机轴在正方形的中心。用铅笔在板子的角上标出电机轴的转角, 以电机轴所在的位置为中心, 进行测量, 并用铅笔标出边长为 31 mm 的正方形的顶点。安装好的电机应如图 10.24 所示。

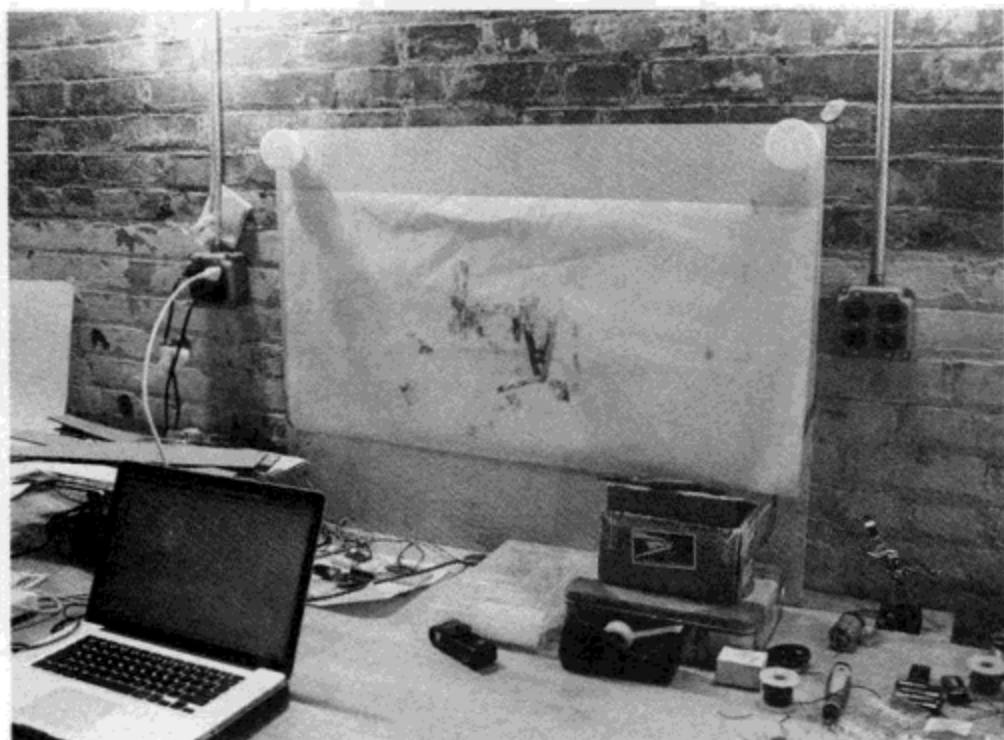


图10.24 装在纤维板顶部两个角上的电机

(13) 用 $\frac{1}{8}$  in 的钻头钻一个安装电机用的 M3 螺钉的通孔。用 $\frac{3}{8}$  in 的钻头钻中心孔。用 M3 螺钉装上电机、弹簧垫圈及平垫圈，如图 10.25 所示。垫圈的数量取决于纤维板的厚度。

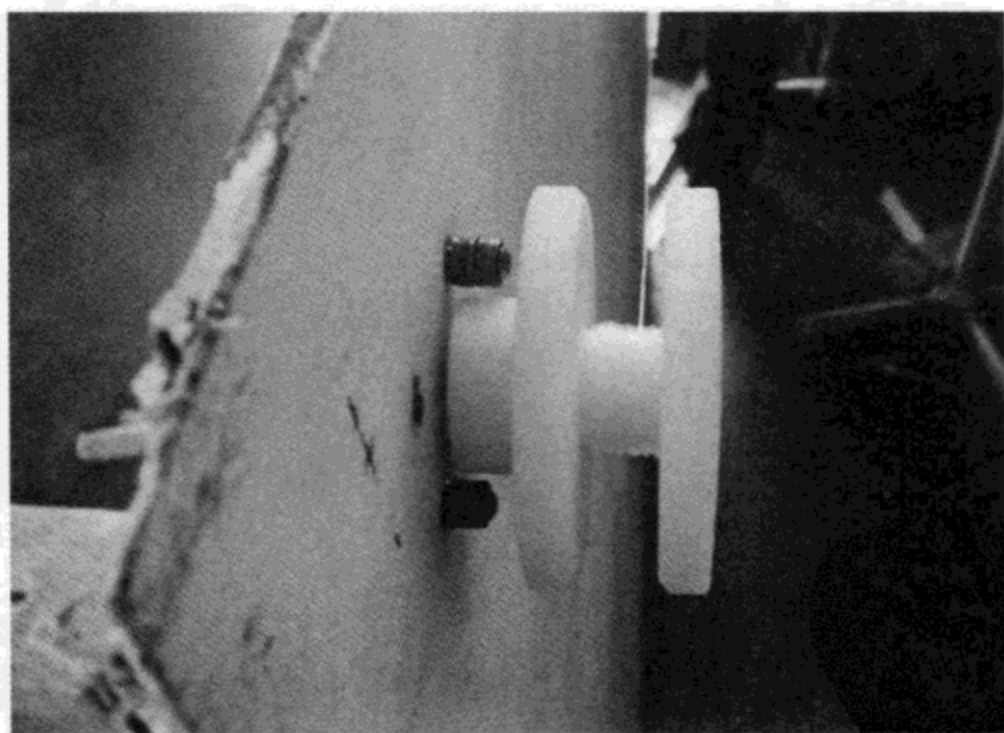


图10.25 电机安装的细节

(14) 装完电机后，确认电机能按要求工作，电路板上的电线没有松动。把皮带轮装在每个电机轴上。

(15) 现在，让 SADbot 脱离太阳能板充电的电池（Arduino 板应当通过 AC 适配器插到墙上）。首先，选择 EasyDriver 驱动板作为电源集线器，如图 10.26 所示。指定面包板一侧作为集线端，然后用短跳线将 EasyDriver 的 GND 和 M+ 引脚接到这个集线端。用长连接线将这个集线端的电源与“地”接到另一个

EasyDriver 的 GND 和 M+ 引脚上。

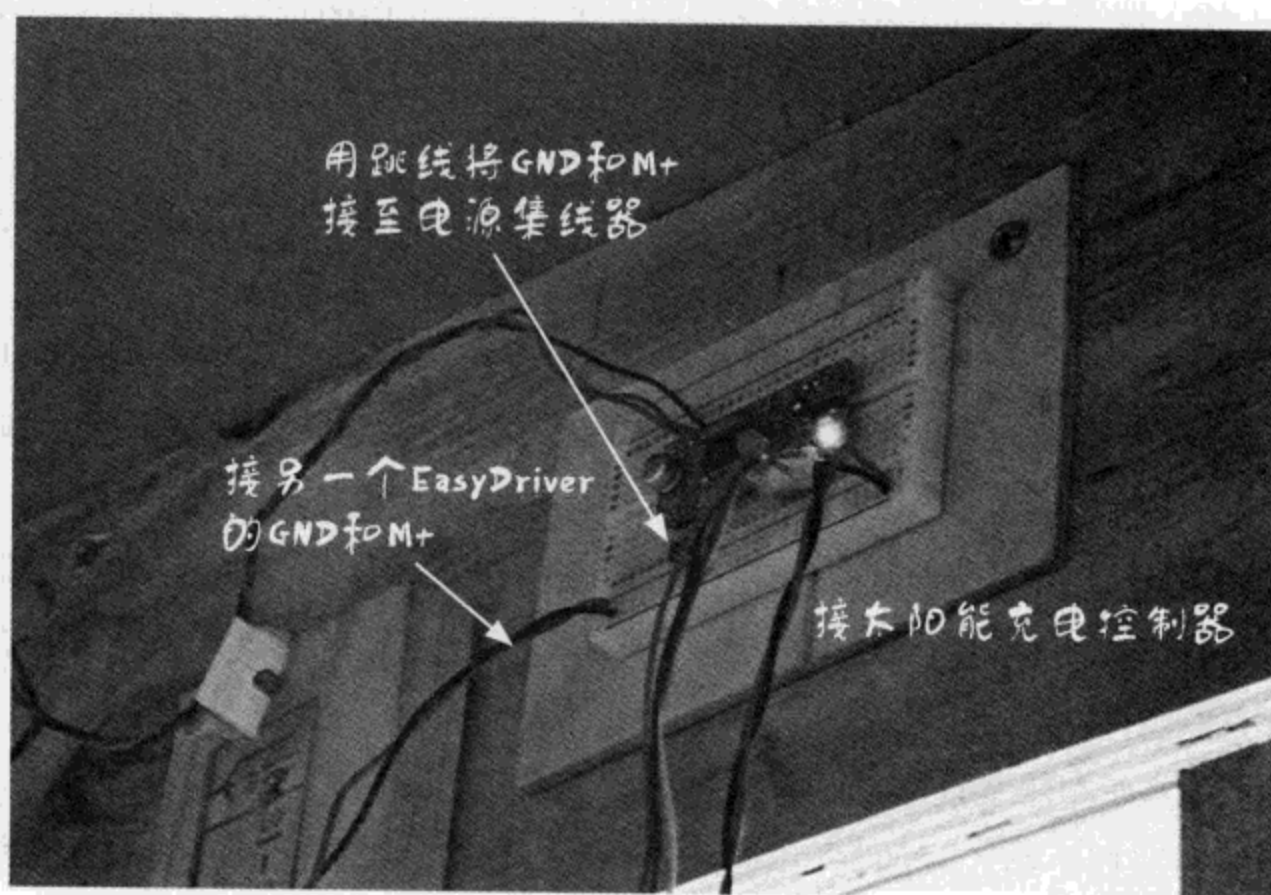


图10.26 简化接线，使电源集线端在一个EasyDriver板上

(16) 取几根连接线，将电源集线端接到充电控制器最左端的端子上(图10.27)。

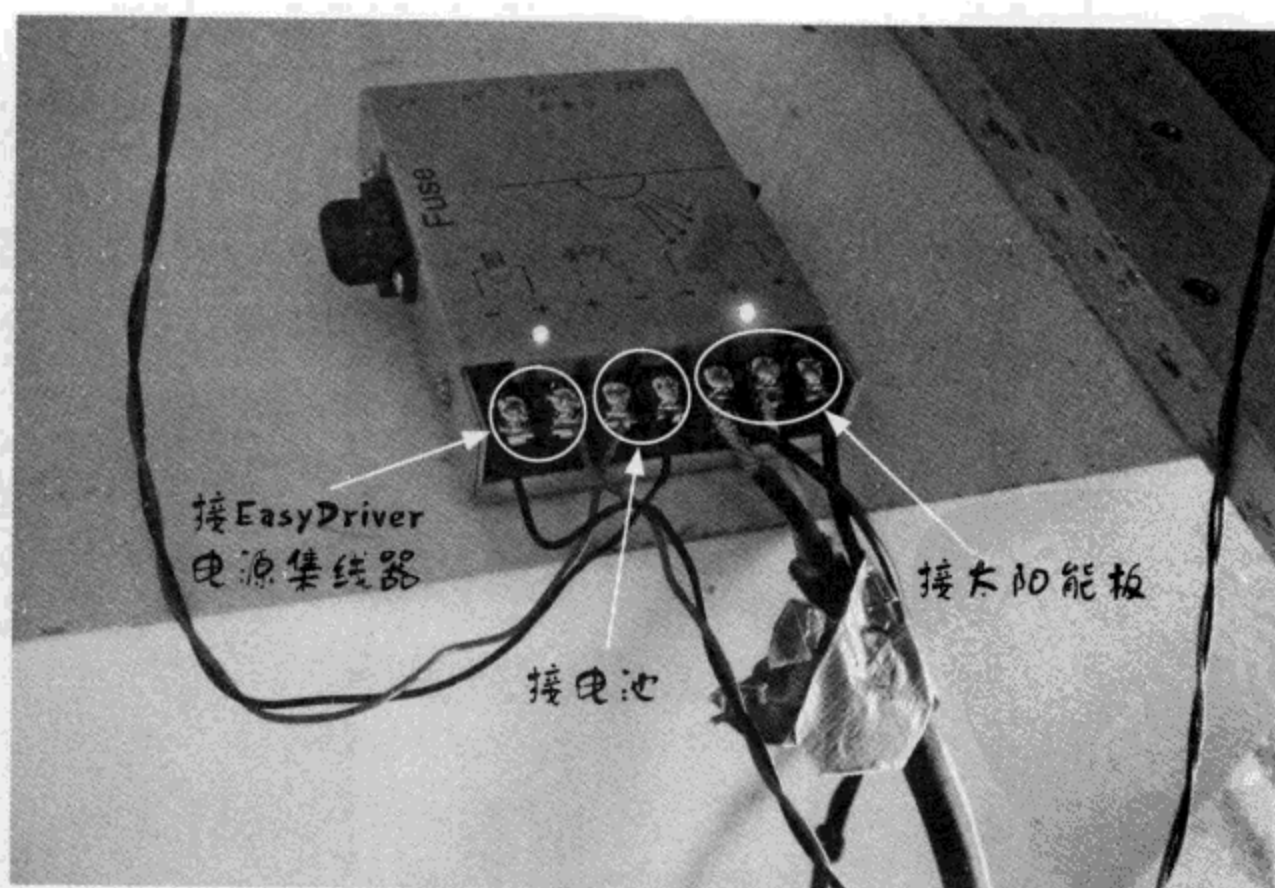


图10.27 充电控制器的接线情况

(17) 将连接线焊在电池端子上，红色接正，黑色接负。用充电控制器中间



的端子扣住这些电线剥了绝缘皮的端子部分。

(18) 取下太阳能充电器电线的 RC 插座。分开这两根线，剥除电线端部的绝缘层，露出  $\frac{1}{4}$  in 的导线。要判断正负极，需要用万用表。就像测量电池一样，黑色接线头应当接 COM 端，红色接线头应当接电压测量端(看第 5 章图 5.1)。现在，红色接线头接太阳能板的其中一根接线，黑色的接另外一根。如果万用表上的读数为正，说明你的猜测是对的；如果不是，你的猜测就是错的。

(19) 对两个太阳能板做同样的操作，把充电控制器里的负线接在其余的负端子上。每一根正线都有自己的接线螺钉，在充电控制器的最右侧，如图 10.27 所示。

(20) 如果所有的操作都是正确的，电机就应该转了！确保充电控制器上的开关是打开的。你可能想把太阳能板放在阳光下，这样当电机消耗完电量后，可以再充电。

(21) 现在让 SADbot 画点有意思的东西吧。取两根长约 5 ft 的鱼线，穿过滑轮后在一端打个结。线的另一端接在弹簧夹子上，夹在记号笔上。把白纸和胶布或夹子放在绘图板上。

(22) 步进电机在缺省模式下是自由运动的，当有人盖住光敏电阻后，会有特定的运动。就会画出一幅像 Eyebeam 展示窗中的图一样的画，如图 10.28 所示。如果将连接线焊在每个光敏电阻上，而且按你想要的方式固定，你就可以用同样的方式安装 SADbot。

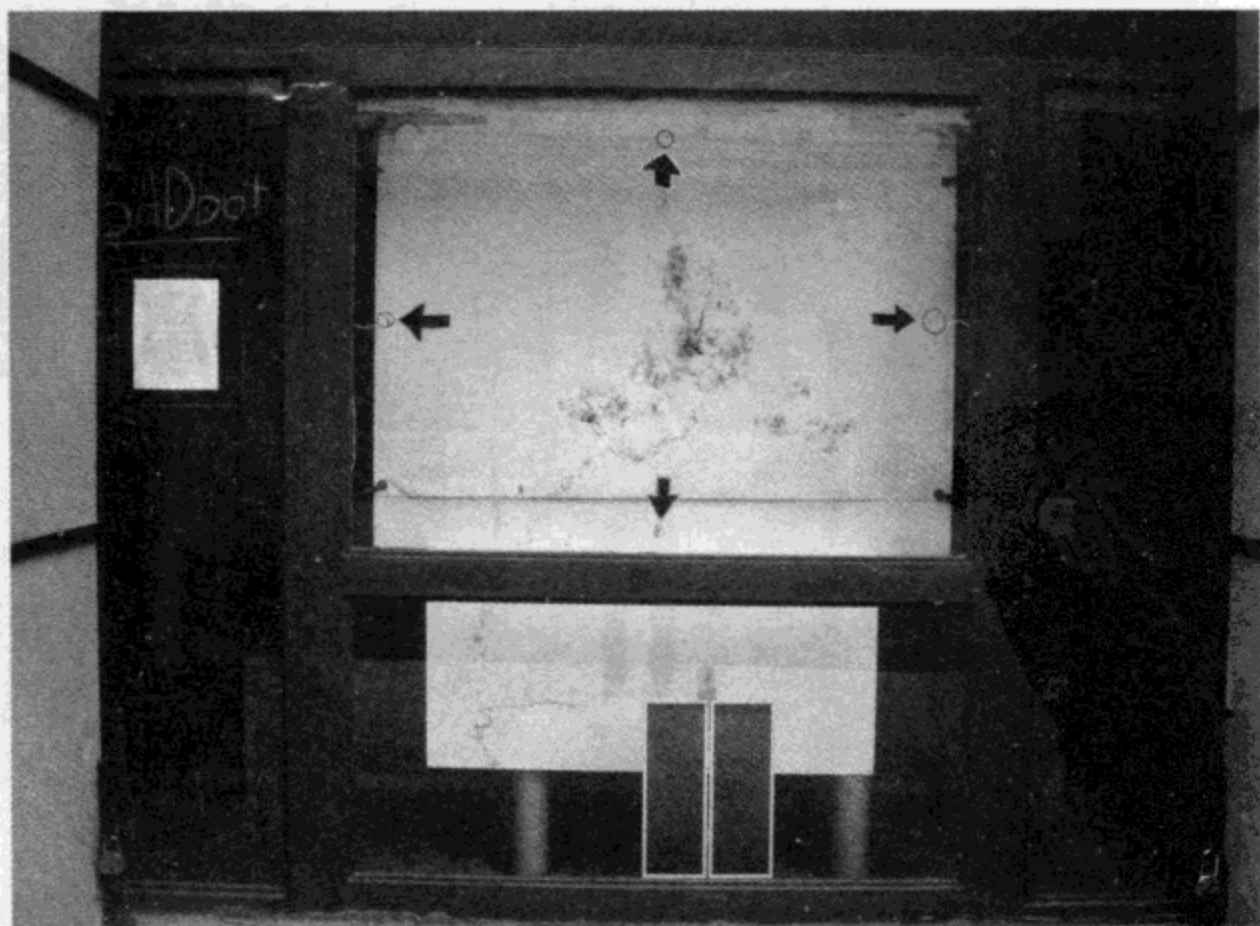


图 10.28 SADbot 在 Eyebeam 展示窗中画的第一幅画

(23) 输入并修改下面的程序，下载到 Arduino 板上。

```
/* SADbot v.03
```

如果不遮挡光敏电阻，SADbot 会随便画线，方向与长度均不确定。当 SADbot 检测到一个光敏电阻被挡住后，会朝着它画线。通过 SparkFun 的 EasyDriver v4.3 CC-GNU GPL 驱动板来驱动步进电机，程序由 Ben Leduc-Mills 和 Dustyn Robert 于 2010 年 6 月编写 \*/

```
#include <Stepper.h> // 导入步进电机程序库
#define STEPS 200 // 360/1.8 (步距角) = 200 步 / 转
// 从步进电机程序库中声明新的步进
Stepper right_motor(STEPS, 6, 7); //6=DIR, 7=STEP
Stepper left_motor(STEPS, 11, 12); //11=DIR, 12=STEP
int distance; // 电机应当转动的角度
int lowest; // 存储光敏电阻的最低值
int i; // 记录循环次数
// 光敏电阻值的 4 个变量
int photo_up;
int photo_down;
int photo_left;
int photo_right;
// 设置画板的尺寸，1000 步为 0.4 in。
#define CANVASWIDTH 32000
#define CANVASHEIGHT 20000
// 跳跃总距离的检测
// SADbot 从中心开始 (画板宽 /2 和高 /2 处)
float totalWidth = CANVASWIDTH /2;
float totalHeight = CANVASHEIGHT /2;
int randomDirection;
int randomDistance;
void setup()
{
  Serial.begin(9600); // 开始串口打印输出，这样我们就可以看见输出结果
  // 设置电机速度 (单位为 r/min)
  right_motor.setSpeed(200);
  left_motor.setSpeed(200);
  // 产生随机数
```

```
// 设到没用过的模拟引脚
randomSeed(analogRead(4));

// 结束设置
void loop()
{
    // 读写从模拟引脚 0 ~ 3 送来的传感器的值
    photo_up = analogRead(0);
    Serial.print("up");
    Serial.println(photo_up);
    photo_down = analogRead(1);
    Serial.print("down");
    Serial.println(photo_down);
    photo_left = analogRead(2);
    Serial.print("left");
    Serial.println(photo_left);
    photo_right = analogRead(3);
    Serial.print("right");
    Serial.println(photo_right);
    delay(1000); // 给出在显示器上读数的时间
    // 绘图前, 检查总高与总宽
    Serial.print("totalHeight:");
    Serial.println(totalHeight);
    Serial.print("totalWidth:");
    Serial.println(totalWidth);
    delay(1000); // 给出在显示器上读数的时间
    // 用阵列的方式存储光敏电阻的值
    int photoValues[] = {photo_up, photo_down, photo_left, photo_right};
    lowest = 9999; // 此值要设得比光敏电阻可能的值大一些
    // 循环找光敏电阻的最低值
    for(i = 0; i < 4; i++) // 4 = number of sensors
    {
        Serial.println(photoValues[i]); // 输出光敏电阻值的阵列
        // 如果实际的值比前边所有的 lowest 值 (从 9999 开始) 都小, 把此值赋给
```

“lowest”

```
    if (lowest >= photoValues[i] )
    {
        lowest = photoValues[i];
    }
    // 输出以确定是否选择了最低值
    Serial.print("lowest:");
    Serial.println(lowest);
    delay(1000); // 等待 1s, 以便读值
} // 结束 for 循环

distance = lowest; // 设置运动距离 = 最低值
// 如果最低值化表被遮挡的光敏电阻, 向最低值移动
if (lowest < 550 )
{
    // 仅在 SADbot 在画板的边界内画图时, 找到值最小的传感器, 并向该传感器移动。
    if ((lowest == photoValues[0]) && ((totalHeight + distance) <
CANVASHEIGHT))
    {
        up( distance );
        totalHeight += distance; // 总高度加 1
    }
    else if ((lowest == photoValues[1]) && ((totalHeight -
distance) > 0))
    {
        down( distance );
        totalHeight -= distance; // 总高度减 1
    }
    else if ((lowest == photoValues[2]) && ((totalWidth - distance)
> 0))
    {
        left( distance );
        totalWidth -= distance; // 总宽度加 1
    }
    else if ((lowest == photoValues[3]) && ((totalWidth + distance
```

```
) < CANVASWIDTH))
{
    right( distance );
    totalWidth += distance; // 总宽度减1
}
} // 结束 if 语句
// 如果所有传感器都没被挡住, 随机画线
else
{
    // 取随机数 1 ~ 9 表明方向
    randomDirection = random(1, 9);
    Serial.print("random direction:");
    Serial.println(randomDirection);
    // 取随机数 1 ~ 200 表明距离
    randomDistance = random(1, 200);
    Serial.print("random distance:");
    Serial.println(randomDistance);
    // 用生成随机数产生方向
    switch (randomDirection)
    {
        case 1: // 向上走
            if((totalHeight + randomDistance) < CANVASHEIGHT)
            {
                up(randomDistance);
                totalHeight += randomDistance;
            }
            break;
        case 2: // 向下走
            if((totalHeight - randomDistance) > 0)
            {
                down(randomDistance);
                totalHeight -= randomDistance;
            }
            break;
    }
}
```

```
case 3: // 向左走
    if((totalWidth - randomDistance) > 0)
    {
        left(randomDistance);
        totalWidth -= randomDistance;
    }
    break;
case 4: // 向右走
    if((totalWidth + randomDistance) < CANVASWIDTH)
    {
        right(randomDistance);
        totalWidth += randomDistance;
    }
    break;
case 5: // 向右上方走
    if(((totalWidth + randomDistance) < CANVASWIDTH) &&
((totalHeight + randomDistance) < CANVASHEIGHT))
    {
        upRight(randomDistance);
        totalWidth += randomDistance;
        totalHeight += randomDistance;
    }
    break;
case 6: // 向左上方走
    if(((totalWidth - randomDistance) > 0) && ((totalHeight +
randomDistance) < CANVASHEIGHT))
    {
        upLeft(randomDistance);
        totalWidth -= randomDistance;
        totalHeight += randomDistance;
    }
    break;
case 7: // 向右下方走
    if(((totalWidth + randomDistance) < CANVASWIDTH) &&
```

```
((totalHeight - randomDistance) > 0))
{
    downRight(randomDistance);
    totalWidth += randomDistance;
    totalHeight -= randomDistance;
}
break;
case 8: // 向左下方走
    if(((totalWidth - randomDistance) > 0) && ((totalHeight -
randomDistance) > 0))
    {
        downLeft(randomDistance);
        totalWidth -= randomDistance;
        totalHeight -= randomDistance;
    }
    break;
default: // case 的缺省
    left(0);
} // 结束 switch 语句
} // 结束 else 语句
} // 结束循环语句
/* 此处是方向函数, Loop size = distance
正数是顺时针工作, 负数是逆时针工作 */
void up(int distance)
{
    for( i = 0; i < distance; i++) {
        right_motor.step(1);
        left_motor.step(-1);
    }
}
void down(int distance)
{
    for( i = 0; i < distance; i++) {
        right_motor.step(-1);
```

```
    left_motor.step(1);
}
}
void left(int distance)
{
    for( i = 0; i < distance; i++) {
        right_motor.step(-1);
        left_motor.step(-1);
    }
}
void right(int distance)
{
    for( i = 0; i < distance; i++) {
        right_motor.step(1);
        left_motor.step(1);
    }
}
void upRight(int distance)
{
    for( i = 0; i < distance; i++) {
        right_motor.step(2);
        left_motor.step(-.2);
    }
}
void upLeft(int distance)
{
    for( i = 0; i < distance; i++) {
        right_motor.step(.2);
        left_motor.step(-2);
    }
}
void downRight(int distance)
{
    for( i = 0; i < distance; i++) {
```



```

        right_motor.step(-.2);
        left_motor.step(2);
    }
}
void downLeft(int distance)
{
    for( i = 0; i < distance; i++) {
        right_motor.step(-2);
        left_motor.step(.2);
    }
}

```

(24)用手遮挡光敏电阻,与 SADbot 互动,画一些有趣的图。

## 参考资料

[1] Tom Igoe, "Phototransistors Photocells" (<http://itp.nyu.edu/physcomp/sensors/Reports/PhototransistorsPhotocells>).

[2] Dan O'Sullivan and Tom Igoe, *Physical Computing: Sensing and Controlling the Physical World with Computers* (Boston: Thomson, 2004).

[3] Jeff Feddersen, NYU/ITP Sustainable Energy class notes, spring 2010.4. Jeff Feddersen, "Anatomy of a Stepper Motor" (<http://itp.nyu.edu/sustainability/energy/texts/Rectification.pdf>).

[4] Jeff Feddersen, "Anatomy of a Stepper Motor" (<http://itp.nyu.edu/sustainability/energy/texts/Rectification.pdf>).



素描是造型艺术的基础，也是设计艺术的基础。素描训练是培养造型能力的重要手段。

素描 素描 素描

素描是造型艺术的基础，也是设计艺术的基础。素描训练是培养造型能力的重要手段。

素描是造型艺术的基础，也是设计艺术的基础。素描训练是培养造型能力的重要手段。

素描是造型艺术的基础，也是设计艺术的基础。素描训练是培养造型能力的重要手段。

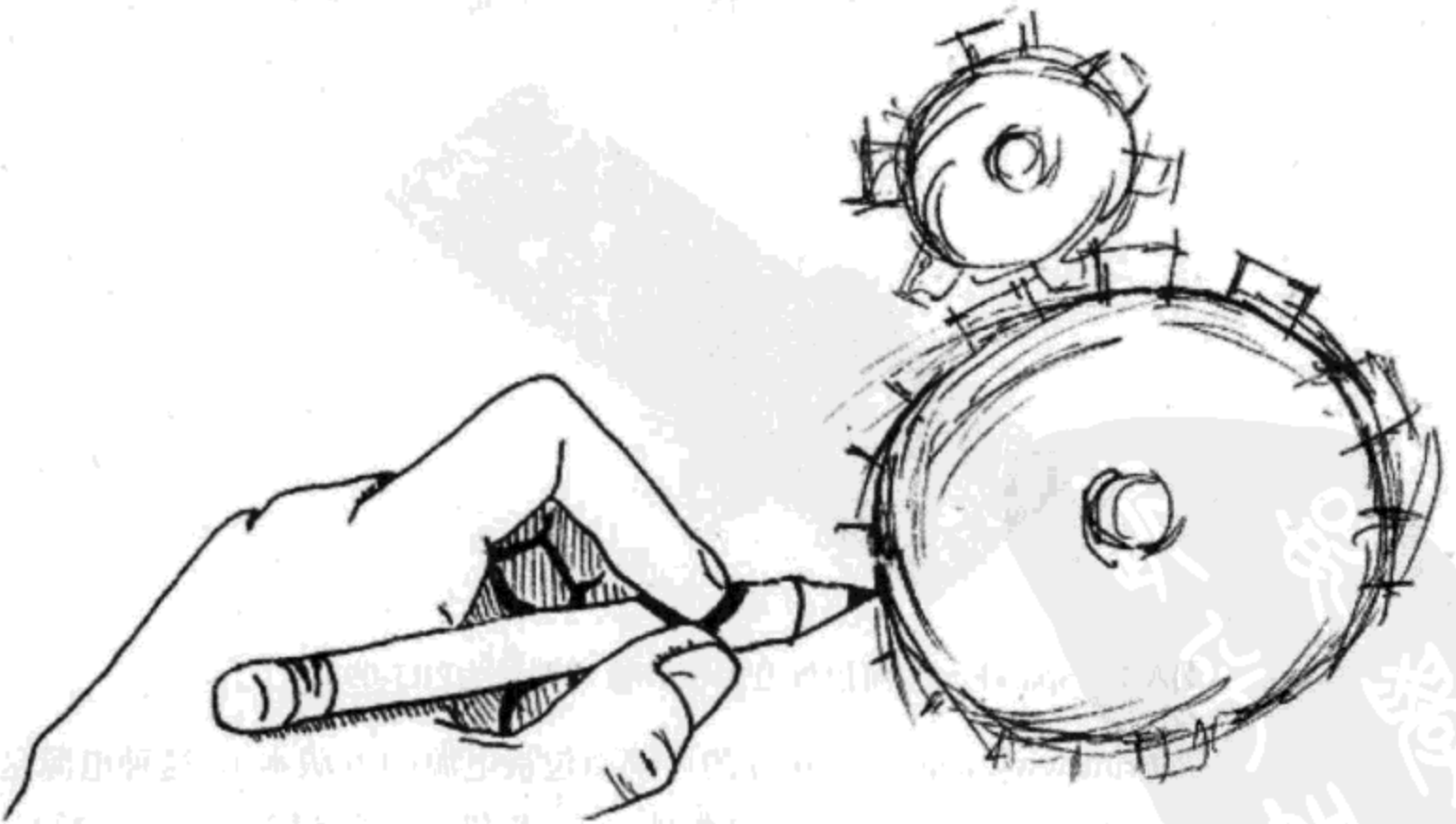
素描是造型艺术的基础，也是设计艺术的基础。素描训练是培养造型能力的重要手段。

素描是造型艺术的基础，也是设计艺术的基础。素描训练是培养造型能力的重要手段。

素描是造型艺术的基础，也是设计艺术的基础。素描训练是培养造型能力的重要手段。

## 附录

# 面包板电源与 Arduino 入门



素描是造型艺术的基础，也是设计艺术的基础。素描训练是培养造型能力的重要手段。

素描是造型艺术的基础，也是设计艺术的基础。素描训练是培养造型能力的重要手段。

素描是造型艺术的基础，也是设计艺术的基础。素描训练是培养造型能力的重要手段。

中国美术学院美术考级教材 素描分册  
PDG

本附录的内容包括如何给面包板供电，以及如何搭建 Arduino 和为 Arduino 设计程序。

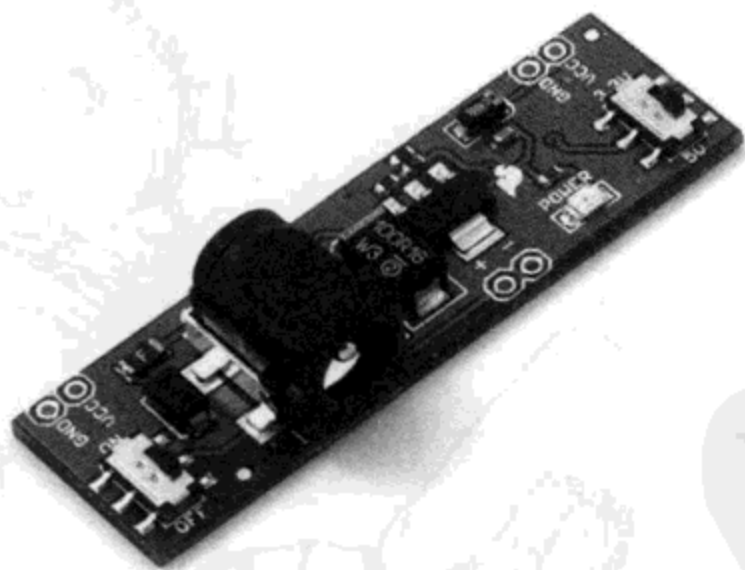
## 面包板电源

给面包板供电的最好方式并不是直接把电池组插在面包板上。这种方法在第 6 章中用得最广泛，电池组中的电池可能是可充电电池，电池也可能会老化，所以 4 节 AA 电池的电压是一个  $4 \sim 6.4 \text{ V}$  之间的一个范围内波动的，不是一个确定的电压值。因此，这种供电方式在实际应用中会产生一些技术上的问题。类似我们在项目 6.5 中用过的 H 桥之类的芯片，当电压在  $4.5 \sim 5.5 \text{ V}$  之间时工作状况会比较好，而且多数电机需要的电压与逻辑电路的电压不同。下面就介绍一些给面包板提供可调电压的方法。

(1) 用台式电源给面包板提供可调电压（可参考项目 10.3 中的做法）。

(1) 参考 Tom Igoe 写的“如何焊一个可直接插入面包板的电源接口板”（<http://itp.nyu.edu/physcomp/Labs/Soldering>），其中的电源用的是 AC 适配器。

(3) 使用 SparkFun 的面板电源（如图 A.1 所示 PRT-09319），可提供一个稳定的  $5 \text{ V}$  电源。要把这种电源板插进面包板，需要在上面焊几个插针。



图A.1 SparkFun的面板电源接口板（型号为PRT-09319）

(4) 使用 Adafruit([www.adafruit.com](http://www.adafruit.com)) 的可调面包板电源(1.0 版本)。这种电源是一种套件，需要组装，根据你所用的电源的类型，可以提供的电源范围为  $1.25 \sim 20 \text{ V}$ ，电流可达  $1.25 \text{ mA}$ 。

如果找不到你的逻辑电路或电机需要的合适的电源，可以用以下几种方法。线性稳压器可以降低输入的高电压，最常用的是 LM7805  $5 \text{ V}$  稳压器（SparkFun 的 COM-00107），可以将  $8 \sim 15 \text{ V}$  的输入电压降为  $5 \text{ V}$  的输出电压（可查看 <http://itp>。

nyu.edu/physcomp/Labs/Breadboard 上的例子)。升压调节器的作用刚好相反，可以提高输入的低电压，这种调节器用起来稍微复杂一些，所以最好用现成的模块，如 SparkFun 的 PRT-08999，这种稳压器可以将输入的 1 ~ 4 V 电压转换成 5 V。（若要参考升压调节器的应用例子，请登录网站 [www.ladyada.net/make/mintyboost/process.html](http://www.ladyada.net/make/mintyboost/process.html)。）

## Arduino 入门

Arduino 是一种微控制器板，如果我们控制的不仅仅是物体的起动与停止，Arduino 就可以作为我们项目的大脑来使用。有其他几种开发板也可以完成同样的功能，这些开发板都有微控制器、插元件的地方，还有给开发板供电的地方，如 MIT 的 Handyboard，Phidgets Make Controller 等等。本书中用的是 Arduino 板，之所以用这种开发板，有以下几个原因。

(1) 价格：每块板的价格约为 30 美元，软件免费，不需太多投资。

(2) 兼容性：可以在 Windows，MAC 和 Linux 系统下运行。

(3) 便捷性：这种开发板用起来非常灵活，可用于控制电机、LED，还有我无法列举的很多其他功能。如果你的项目不仅仅只需要一个简单的开关功能，而需要更多的智能，那么 Arduino 肯定是任何项目中的最重要的部分。

(4) 持续的技术支持与开发：Arduino 的硬件与软件都是开源的而且可扩展，这就意味着你或其他任何人都可以对 Arduino 进行改进，这种改进可以打包到 Arduino 的下一代产品中。Arduino 系统用得非常广泛，已经销售了 150 000 个模块。所以有大量的在线文档、例程、论坛、示例项目等可供参考。Arduino 的成员应用这个平台，并在这个平台上传授经验，所以他们都致力于 Arduino 的可持续发展的工作。

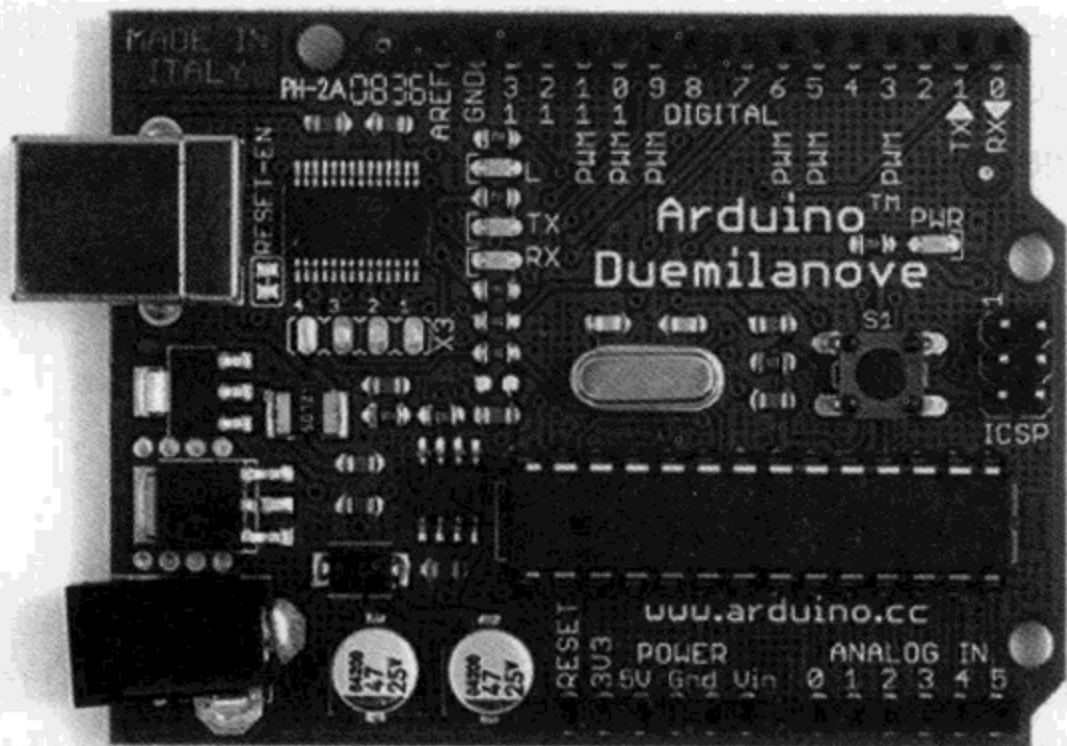
## 如何让 Arduino 更好地与计算机配合

Arduino 系统分为两部分：

(1) 手中的 Arduino 板（图 A.2）；

(2) 计算机上运行的 Arduino 集成开发环境（IDE）。

**注意** 本部分内容摘自在线指南 (<http://arduino.cc/en/Guide/Windows>) 和 Massimo Banzi 写的 *Getting Started With Arduino* (Sebastopol, CA: Make, 2008)。



图A.2 Arduino开发板

按照下面的步骤来搭建一个可在自己的计算机上运行的 Arduino 系统，并且开始自己编一段程序。

(1) 买一块 Arduino 开发板（如 SparkFun 的 DEV-00666）和一根 USB A-B 口线（如 SparkFun 的 CAB-00512）。

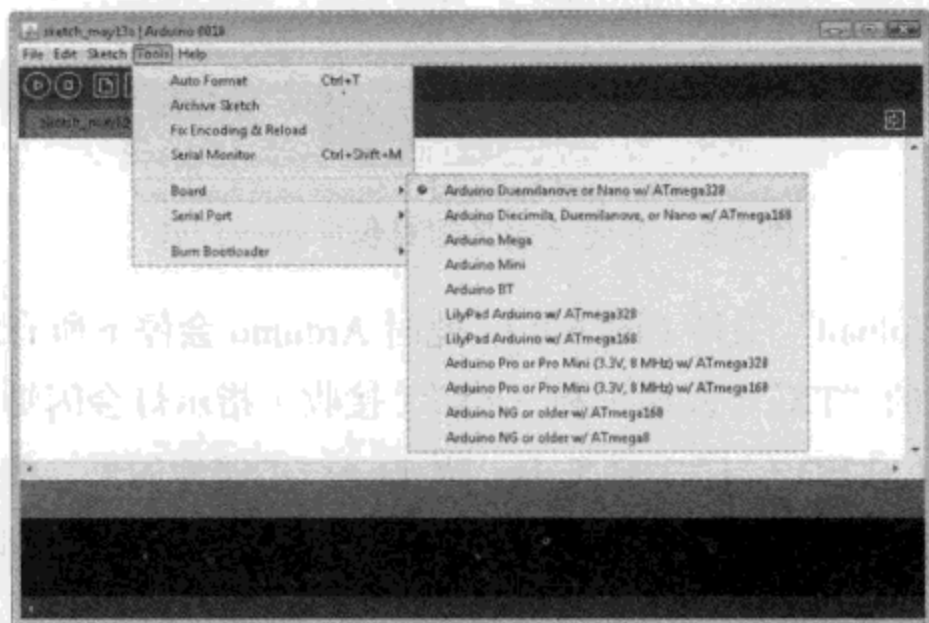
(2) 登录 [www.arduino.cc](http://www.arduino.cc)，点击“Download the Arduino Software”（下载 Arduino 软件）链接，选择与你的操作系统（Windows, MAC 或 Linux）兼容的版本。本章包括在 Windows Vista 系统下如何下载、安装、入门方面的内容（要学习新 Arduino 版本的知识或在其他操作系统下的使用方法，可登录 <http://arduino.cc/en/Guide/HomePage> 网站）。下载文件后，解压缩，然后存到你能记得的地方，如 C:\Program Files folder。

(3) 用 USB 线将 Arduino 接到计算机上。Arduino 板上绿色的电源指示灯（标着“PWR”）会亮，引脚 13 旁边的橙色 LED（标着“L”）开始闪烁，计算机屏幕上会出现“发现新的硬件”的窗口。要安装 Arduino 的驱动程序，点击对应的选项，一步一步安装就可以了。因为 Arduino 与计算机通信需要两项内容，所以需安装两次。

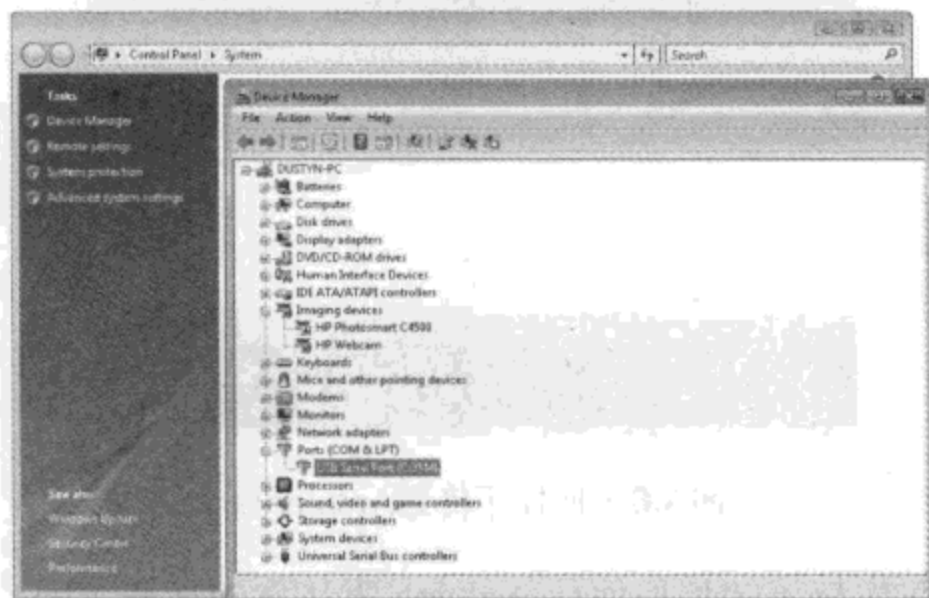
(4) 成功安装 Arduino 的驱动程序后，双击在第 2 步中下载的文件夹打开 Arduino 的应用程序。在菜单栏上选择“Tools / Board/Arduino Duemilanove”，确保 Arduino 的版本是正确的，如图 A.3 所示。

(5) 现在需要确定 Arduino 与计算机上的哪个端口连接。点击“Start”菜单，打开“Device Manager”，右键单击“Computer”，选择“Properties”。单击左上角的“Device Manager”。打开“Ports (COM & LPT)”，会发现 Arduino 是通过 USB 与计算机连接的，名称可能为 COM3 或 COM4，如图 A.4 所示。再返回 Arduino 应用程序，

在“Tools / Serial Port”选择相应的端口。



图A.3 在Arduino应用程序下选择正确的版本



图A.4 识别串口

现在已完成了所有的设置，Arduino 板和计算机可以互相通信了。

## 现在让 Arduino 工作

要让 Arduino 完成我们需要的功能，需要用它能够理解的语言给它发指令。这些指令是用基于 C/C++ 的一种专门的代码编写的。在 IDE 中编写的指令叫做程序或“Sketch”。我们试着写一段程序来熟悉一下这种语言吧。

(1) 按照“File / Examples / Digital / Blink”路径打开“Blink”例程。这个程序会在一个新的窗口中打开。

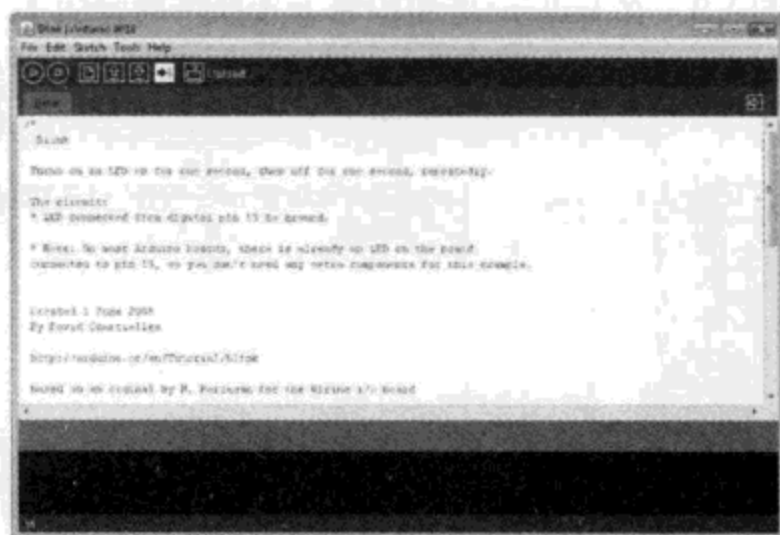
(2) 要把这段程序传送到 Arduino 板上，首先单击“Verify”（图 A.5）。这样做

的目的是检查代码的正确性，并把它转换成 Arduino 能够运行的程序。如果程序无误，屏幕下方会出现“Done Compiling”。



图A.5 下载之前必须对程序进行校验

(3) 单击“Upload”工具(图 A.6)。此时 Arduino 会停下所有的工作来接受指令，Arduino 板上的“TX”(发送)和“RX”(接收)指示灯会闪烁几秒钟。然后引脚 13 旁边小的橙色 LED (“L”) 会亮 1s、灭 1s……不停地闪烁。此时，你的程序已经存储到 Arduino 板上的微控制器中了。这个程序可一直保存在 Arduino 板上，即使 Arduino 板断电或被复位也不会消失，直到你传送一段新的程序。



图A.6 把程序传到Arduino板

祝贺你！现在你应该知道如何让 Arduino 听从你的指挥了吧。如有任何疑问，可参考在线指南 <http://arduino.cc/en/Guide/Troubleshooting>。

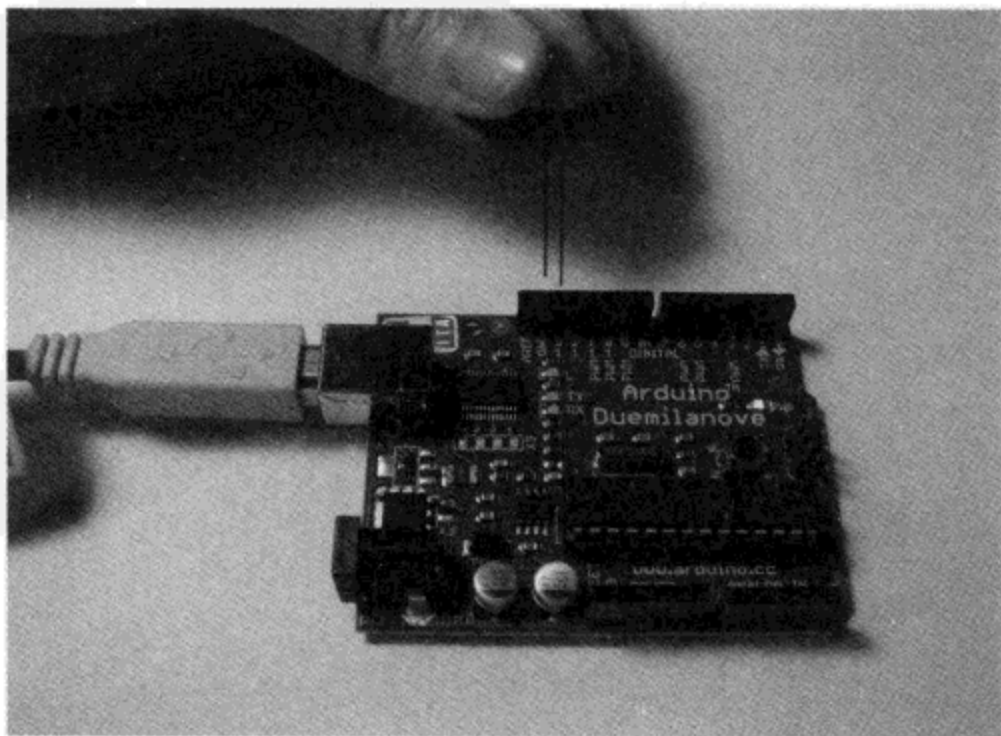
## 让 Arduino 发挥更多的功能

前面的例子中，你可能注意到了在程序的开始部分有一些用“/\*……\*/”包含起来的灰色文字。这些符号用来对程序进行注释，不会在 Arduino 上运行。“//”的功能也是一样的，这个符号后边的内容也不会再在 Arduino 上运行，也是起注释的作用。接下来的程序的作用是声明一个变量，在本例中，这个变量告诉 Arduino 板 LED 插在了哪个引脚上。这个 LED 已经集成在了 Arduino 板，不过也可以在引脚 13 上连接一个外部 LED。

每一段 Arduino 程序都可以进行设置，让这段程序只运行 1 次，或者只要 Arduino 板通电，就让程序循环执行。此处把 ledPin (引脚 13) 设置为输出，所以

Arduino 知道只能向该引脚写数据，而不能从此引脚读数据（如果要读数据，会声明为“INPUT”）。这段循环程序的功能是让 ledPin 引脚为高电平，即 LED 亮 1000 ms（1000 ms=1 s）；然后为低电平，即 LED 灭 1000 ms……如此循环，让 LED 闪烁。

此时，如果将一个 LED 的长引脚插在引脚 13，短引脚插在旁边的“地”（GND，见图 A.7），这个 LED 会和那个小 LED 一起闪烁。除了在引脚 13 上，其他引脚上都不能直接连接 LED。因为引脚 13 上接了一个电阻，所以将电压降到了 LED 需要的电压值。如果将 LED 直接接在其他任意管脚上，可能会烧掉 LED 灯。



图A.7 接了外部LED的Arduino板

**注意** 在 Arduino 通电时，一定不要插拔任何电子元件。这样做非常不好，可能会让 Arduino 产生一些特别奇怪的错误，最糟糕的可能是让你的微控制器（Arduino 的大脑）无法正常工作。虽然这个芯片更换起来容易，但如果你能听从这个建议的话，可能就永远不需要换芯片了。

我们已经知道用 Arduino 上的程序来控制外部的器件了，所以现在你应该能够做第 6 章及其他项目了。本书不会深入讨论如何写程序代码，读者可通过 Massimo Banzi 写的 *Getting Started with Arduino* 来学习 Arduino 的编程知识。



2008