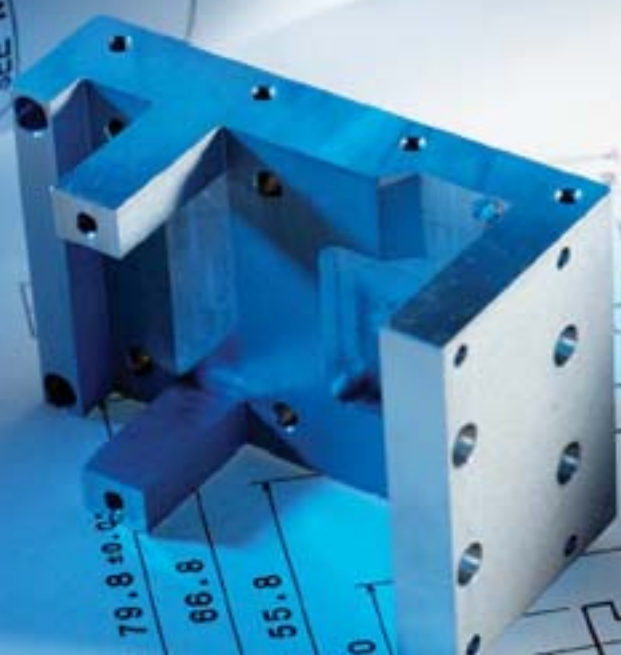


测量的良好实践指南

设计及工程图纸转换为
测量过程的良好实践基础

作者：大卫·弗兰克
编译：诸锡荆



摘要

此测量实践指南主要讲述了产品设计与测量之间的关系，适用于设计工程师和测量工程师。在阅读此指南后，设计工程师应当能更好地理解测量，测量工程师应当能更好地理解设计工程师的意图。

2005 年7 月

声明

根据合同GBBK/C/0817(由海克斯康测量技术公司与贸易部及国家计量局共同签订) 的要求，编写了此文档。非常感谢海克斯康测量技术公司、Tesa 技术公司及Renishaw 公司，他们提供了许多照片；同时也要感谢NPL 的Richard Leach 博士及Taler Hobson 公司的Paul Scott 教授对此指南提出的改进意见。

目录

	前言	6
	序言	8
	此指南是什么，不是什么	9
	生产的整体分析	9
	产品几何量规范与认证	9
	为了制造对图纸进行的转换	12
	为了测量对图纸进行的转换	13
	标准参考温度	14
	设计	15
设计者的角色——应用现代设计手段	CAD、有限元(FEA)及数学模型	16
	转换设计以更易于制造和测量	17
	为什么尺寸要求公差？	19
	设计零件时对于测量的考虑	19
	我是否能设计一个较易测量的零件？	19
	制造	22
	零件制造介绍	23
	基本制造及加工工艺概览	24
	监测工艺过程	26
	趋势监测及统计控制	26

过程控制及测量反馈	27
图纸	28
概览：什么信息被传递——尺寸、形状、位置和表面粗糙度	29
建立坐标系（基准）	44
基准是否容易测到？	46
虚拟基准	46
为什么局部圆弧是坏基准？	47
用坐标测量机测量局部圆弧存在的问题	47
公差真的要求那样小吗？	48
最小二乘法还是最小条件？	48
检测	50
保证零件符合要求	51
取样对比100% 检测	51
选用合适的检测工具	51
检测图纸上规定的尺寸是否符合公差要求？	51
已出版的标准	57
已出版的标准清单	58
名词词汇	59
名词词汇(解释略)	60
附录	61
附录A 与测量有关的信息资源	62

A.1	国家和国际组织	62
A.2	网络	62
A.3	国家和国际标准	63
A.4	溯源性	63
A.5	国家测量伙伴(NMP)	64
A.6	培训教程	64
A.7	进一步的读物	65
附录 B	进一步的读物	67
B.1	最大实体条件示例	67
B.2	统计过程控制	68

工程图转换的实践基础

前言

作者希望读者在读完此测量实践指南后，在测量尺寸和形位公差时可以做得更好。此书的内容比一般“工程设计”的教科书更为简单，希望能让更多的读者更容易理解。

我们并不希望此测量实践指南去替代现有教科书、操作手册和标准规范的全部内容，而是用作工程实践及技术的概览。

Richard Leach 博士在2003年就说过“计量不仅仅是最终产品的测量过程，而且在设计阶段就应考虑它。在设计、制造和检测的各个阶段，均应按照产品几何量规范(GPS)的模式、公差及不确定度要求考虑公差的合理性。最根本的原因在于：若产品难于测量而须重新设计产品，比在开始设计时就考虑了计量，则要付出更高的代价。”

测量实践

由 NPL 制订的六个良好测量实践原则

这些是

正确的测量：测量仅应当满足已经认可的而且进行完善定义的要求。

正确的工具：应当应用合适的设备和方法进行测量，这些都经过论证并适合于工作的目的。

正确的人员：测量人员应当是能胜任工作的、合格的和熟悉了解工作的。

定期的回顾：应当有内部的独立部门对所有测量设施和过程的技术性能作出评估。

论证的一致性：在一个地方测量应当与在其他地方进行测量一致。

正确的过程：所有的测量过程应当经深思熟虑并与国家或国际标准相一致。

第一章

序言

在此章内

- 此指南是什么，它不是什么
- 生产的整体分析
- 几何量产品规范的介绍
- GPS 标准链
- 作测量准备而对系统的转换，标准检测温度。

此测量实践指南考虑了从设计、制造到检测的生产全过程，并且从全局上综述了如何在现代化制造中优化生产。

此指南是什么，不是什么

此指南将尽可能地给出足够的信息，使测量工程师了解设计工程师的规范与要求，同时让设计工程师了解一些现代化测量方法以及测量背景知识。但是，此测量实践指南并不打算作为工程图规范的权威指南。

生产的整体分析

在产品的生产全过程中，只有每个人都能正确地交流与有效地沟通，才能完成对生产过程的整体分析。在生产过程中，目前沟通的主要工具就是工程图。它是所有生产过程中的核心参与者，在设计的一开始就决定了他们能否正确的介入。

Richard Leach 博士在2003年就说过——“计量不仅仅是最终产品的测量过程，而且在设计阶段就应考虑。在设计、制造和检测的各个阶段，均应按照产品几何量规范(GPS)的模式、公差及不确定度要求考虑公差的合理性。其最根本的原因在于：若产品难于测量而须重新设计产品，比在开始设计时就考虑了计量，则要付出更高的代价。”

目前制造业面临的问题是，它的发展趋势是要把人培养成专家。因为现代化的生产是如此复杂，以至于很少人了解它的全部过程。

产品必须满足其设计要求和标准规范，而且应在所处环境下，选用适当、经济的方法生产。产品生产必须从设计到装配的每个阶段都考虑且量化质量，而不仅仅是检测最后成品。面对市场激烈的竞争环境，制造方法必须柔性化，这样，才能对市场需求、产品类型、数量及生产率迅速做出反应；还必须考虑使用新材料、新制造方法以及计算机辅助制造。整个生产组织是一个庞大且复杂的系统，它们要求从所有的层次做出反馈，来保证优化使用所有的原材料、机器、能源、资金、劳动和技术资源。

产品几何量规范与认证的简介

在深入了解工程图之前，你需要了解一点儿“产品几何量规范与认证”（简称为GPS）。GPS 是根据产品的性能要求给出其基本几何特征的规范要求。

功能性
安全性
可靠性
互换性

GPS由一系列的标准组成，GPS 标准根据作用域的大小，可分为以下四大类：

- 基本的GPS 标准(尺寸及公差的基本原则)
- 全局的GPS 标准(影响几个或所有的通用和补充的GPS标准，例如，ISO 1 -关于标准参考温度)
- 通用的GPS 标准(是GPS标准的主体，为不同的基本几何特征制定了关于图样标注、公差定义和检验要求的规则。可用一个二维矩阵（2X2）表示，根据几何特征的种类划分矩阵的行，根据其相应的技术规范和要求划分矩阵的列)
- 补充的GPS 标准(是对通用的GPS标准的补充，即对组成要素在特定范畴的应用规范。例如，特定工艺（车、铸造等）的公差标准)

这一节将简要地介绍GPS，更为详细的GPS介绍，您可以参考附录A.7 提到的文献《产品几何量规范与认证》。工程图是目前生产中主要的沟通工具，GPS给出了明晰的、无歧义的基本几何特征的定义，而且规定了此几何特征的误差极限，这个极限称为公差。



图1 成品

在零件的第一步设计阶段，设计工程师设想所有的零件在形状和尺寸上都是完美的。但是，在生产过程中，由于各种因素将造成零件的误差。例如，它们在尺寸、形状、表面粗糙度等方面存在不可避免的误差，这些误差可能引起零件的功能失效。

为此，引进了“极限”这个公差术语，并且给出了便于理解的、标准的定义，将生产过程中不可避免的误差，纳

入质量可量化的范围。为了控制零件的误差，GPS定义了一系列几何量的公差要求，如尺寸公差、形位公差和表面形貌（例如：表面粗糙度）等，如图2所示。



图2 GPS 公差类型

GPS 是由ISO国际标准化组织编写的几何量规范标准，涵盖了标注在技术图纸上有关几何量（尺寸、距离、半径、角度、形状、方向、位置、跳动、表面粗糙度、表面波度、表面缺陷、边缘等）的公差要求、相关的几何量检测原理、检测仪器以及它们的校准。简单地说，GPS给出了微观和宏观的几何特征的规范要求，以及根据相应的要求选用合适的仪器进行检测和校准。

GPS根据几何要素的作用域空间，将世界划分为以下三种世界（可参考ISO 14660-1:1999 的序言）：

理想世界：设计者想象中的带理想特征参数的产品

实际世界：即实物世界

检测世界，用测量仪器通过对实际特征参数取样得到的产品

正确理解上述三个世界的边界和相互关系，在沟通中显得尤为重要。ISO 14660 给出了在这三个世界中对应的几何要素特征的标准定义，以便各个世界之间相互沟通。由ISO/CD 14659 定义的对偶性原理亦十分重要，一个规范的定义是独立于任何检测过程和仪器的，检测过程和仪器完全受控于规范(规范操作者——检测操作者)，所有规则都是为规范而定——任何计量仅仅应用此规则——**误差将是测量不确定度的组成部分。**

注：在1996年ISO/TC213技术会议“尺寸和几何量产品规范和检测”委员会成立，此技术组织的建立，专为国际标准化组织准备GPS文件(见A.3.2)，此时在欧洲有一个平行的组织叫CEN/TC 290，为了工作的连续性，两个组织达成协议，他们准备关于GPS的同一文件，大部分国家把GPS的标准作为国家标准。

对所有在设计、制造和计量等部门工作的人，熟悉和了解GPS标准的规范是极其重要的。GPS清楚地、无二义性地给出了几何量的公差要求，保证每个部门的人都能了解设计的要求。

GPS 标准主要制定了工程图的基本技术规则，GPS 包含的基本要素和几何公差如图3所示。

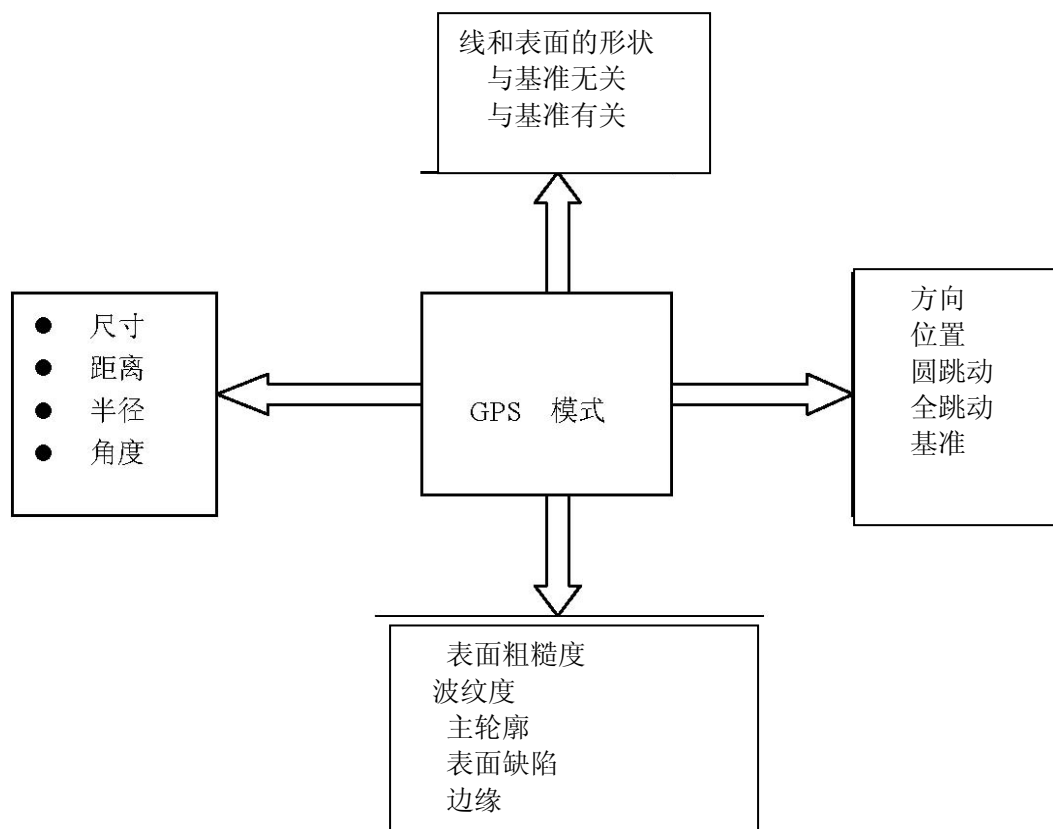


图3 GPS 各公差模块

GPS 标准规范由六个环组成：

1. 图样标注：设计了工程符号作为通用的工程语言，以跨越国家、自然语言的界线。
2. 理想要素的公差定义及规范值：制定了符号如何转换成唯一的数值表达式。
3. 实际要素的特征、参数和定义：实际要素应以数学表达的方式予以定义，以便于计算机计算。
4. 比较认证：当几何量偏离规范，根据测量不确定度判断合格或不合格。
5. 测量仪器：关于测量仪器的性能参数的规范。
6. 标定校准：关于测量仪器的标定、校准的方法和要求的规范。

上述六个环都与设计、制造及检测密切相关。最近，为了充分利用对偶性原理的对偶性，GPS将先前的六个环修订为七个环（列），第一列：图样标注；第二列：公差定义及规范值；第三列：提取要素的特性定义 -规范操作；第四列：比较；第五列：提取测量值的要素特征；第六列：测量仪器的计量特性；第七列：测量仪器的校准和对几何量的检测，只适用于无争议的合同的检测。

更多的GPS资料可参见GPS 研究院的网址: www.ifgps.com。

为了制造对图纸进行的修改或转换

通常来说，设计者并不给出加工零件的细节，但经常根据加工的顺序，给出加工的基准面，并且由此给出加工的尺寸。此基准面可以用作制造过程的装夹面。

注：基准是具有理想形状的理想要素。

在生产中，图纸在各个阶段中所使用的基准可能与设计图的基准不同，例如，使用夹具上的定位孔加工其他要素；加工叶片中的槽，一旦把槽加工出来，原来的孔可能在成品之前被去除。

对于追求高质量的产品来说，在加工之前的设计阶段，必须考虑以下几个方面：

- 选用什么样的加工方法更合适？
- 资源是否具备？例如机床、工具、人员、设备；
- 我们如何装夹零件？
- 是否需要夹具？
- 是否在线检测？是用量规还是测量仪器？
- 选用什么样的仪器最合适？
- 我们是否已考虑了测量不确定度？
- 是否需要培训？

当这些问题得到回答之后，接着需要考虑如何监视加工过程。我们推荐使用统计技术来协助加工。

为了测量对图纸进行的修改或转换

为了测量对图纸进行的修改或转换，不能过高强调其重要性。对测量而言，我们一般采用零件的同一个几何特征作为基准，来建立坐标系。测量基准应当与图纸上的或CAD 模块中的设计基准保持一致。

图纸中的基准一般选用重要的几何特征——定位要素，基准可以是面(表面)、中心线(轴线)或一系列特征。多个基准可构成一个基准系，用传统的测量设备比较容易建立基准系，例如用平台加上角度板，千分表，高度尺及量块(见图4)。

若需使用CAD数字模型，也可以选用数字仪器进行测量，例如三坐标测量机(CMM)，如图5所示。

注：CAD 有时称为计算机辅助绘图，而把CADD 称为计算机辅助绘图及设计，CAD 与CADD 基本上是一样的意思。



图4 量块



图5、坐标测量机

要素的位置可以用两种方法——相对于基准的位置(绝对值)和相互的位置(增量值)来定义。坐标系应当在实际图纸上或CAD 模块上清楚的说明。图纸必须给出测量策略（例如，根据哪几个几何特征建立坐标系），还必须考虑到环境（例如温度）的影响、所用的仪器和对应的不确定度。

标准参考温度

GPS 标准中的ISO 1: 2002“产品几何量规范(GPS) ——产品几何量规范及检测的标准参考温度”定义了标准参考温度为 20°C ”。

这个对于设计人员、制造人员和计量人员意味着什么呢？

对于设计人员来说，图纸上所有的尺寸及公差都是指在标准温度为 20°C 时定义的，若零件实际工作在较高的温度，那么设计人员需要修正此尺寸，把较高温度的尺寸转换为在 20°C 时的尺寸；对于制造人员来说，零件必须在接近 20°C 的情况下测量，接近的程度取决于所用材料及公差值。

最终的检测必须满足下述条件之一：

- . 在温度为 20°C 的房间内
- . 用与零件相同材料制成的标准器在接近 20°C 的情况下进行比较测量
- . 用测量机进行测量，此测量机可以测零件的温度并进行适当的修正
- . 操作者若在其他温度下进行测量,须进行人工修正。

温度

对一个给定的温度变化,零件尺寸变化多少一般称为线热膨胀,一个典型例子是钢,它的热膨胀系数一般表达为 $11.6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。去修正为 20°C 时用下述公式

$$L_{20}=L_T+(20-T) \times a \times L_T$$

此处 L 是长度, T 是测量长度时的温度, a 是膨胀系数,例如一根钢棒,在温度为 23.4°C 测量长度为 300.015 mm , 修正为 20°C 时长度为

$$300.015+(20-23.4) \times 11.6 \times 10^{-6} \times 300.015=300.003 \text{ mm}$$

第二章

设计

在此章内设计工程师的角色——应用现代设计手段CAD、有限元(FEA)及数学模型

- 设计者的角色 - 应用现代设计手段 CAD、有限元(FEA)及数学模型。
- 当设计零件时考虑到制造
- 我是否能设计一个较易制造的零件?
- 当设计零件时考虑到测量
- 我是否能设计一个较易测量的零件?
- 改变设计以便于零件夹持
- 改变设计以便于接近零件
- 改变设计以便于再次定位

设计工程师根据产品的功能要求，制订图纸或模型的技术规范，即针对用户的问题提供一系列的解决方案，并与用户协商，一致确定零件的最终理想形状。

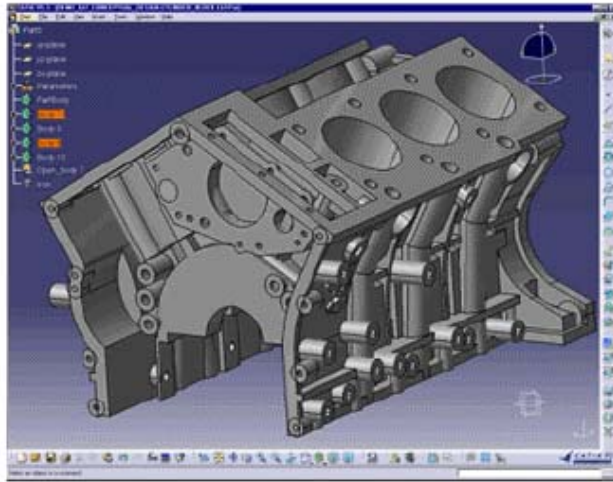


图6 计算机辅助设计(CAD)

设计可以用传统的图纸生成方法，亦可以用计算机辅助设计(CAD)，CAD 是一种电子工具，设计者可用CAD 进行快速作图，而且CAD 可用三维实体形象地表示零件，这样，可以从不同的角度来对零件做功能性及外观的检查(见图6)。高端CAD可以对零件作干涉性检查、模拟零件的运动、计算应力、零件的自振频率和模拟装配。

为了便于零件的制造，设计者必须构造坐标系以标注尺寸，这样才能给制造工程师提供更加详细的信息。坐标系通常采用笛卡尔坐标系，它由两两垂直的三个轴组成，通常用x、y、z 表示；在某些情况下选用圆柱坐标系(径向半径、角度、高)；较少用球坐标系(径向半径、两个角度)。

设计者在用CAD、有限元分析(FEA)及数学模型进行设计的过程中，应充分考虑以下几个方面：

当设计零件时考虑到制造：

- 我是否能设计一个较易制造的零件？

当设计零件时考虑到测量：

- 我是否能设计一个较易测量的零件？
- 改变设计以便于零件装夹
- 改变设计以便于触测零件

不合理的设计会延误生产、在装配时返修，并依赖于转包商。

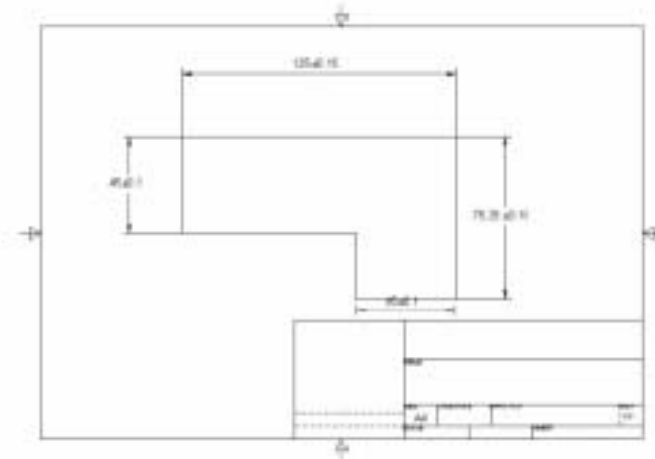


图7 图纸样例

对于图纸上的术语及符号含义，可以查阅相关国际标准或国家标准，此指南并不打算重复它们，而是提供一个概览，指出在交流沟通时，主要沟通什么？如何进行沟通？如何将信息无误地传递到制造当中去？

注：有限元分析常用来分析环境（力、热和振动）对材料的性能的影响。

在设计工程图纸中最基本的问题是：不是所有的设计者、制造者和计量人员都已经读了1700多页的各种图纸标准（例如BS8888、ISO标准、ASME Y14.5，这里还只提了很少的国际和国家标准），因此几乎没有人能全部理解标注在图纸上的符号以及可以得到什么推论，可以肯定当他们坐下来讨论图纸时，每个符号不可能都达成统一的共识。

工程图的目的就是用简明的方法清晰地表达设计功能的要求，这样，产品才可以根据这些明确的要求进行制造和检测。我们应避免含糊不清的设计，使生产中每个人都可以理解设计的要求。

传统的测量仪器有千分尺、卡尺、量块、千分表（如图8~图11）。



图8 千分尺



图9 卡尺



图10 塞规



图11 千分表

如今替代这些传统测量仪器的是坐标测量机(如图5所示)和圆度仪(如图12所示)等现代计量仪器。传统的检测仪器通常只能采很少的样点,并且千分表在物体表面移动时,只能估读出读数。但是,现代的检测仪器几乎能覆盖整个表面,很容易得到更精确的形状误差值,例如平均直径。

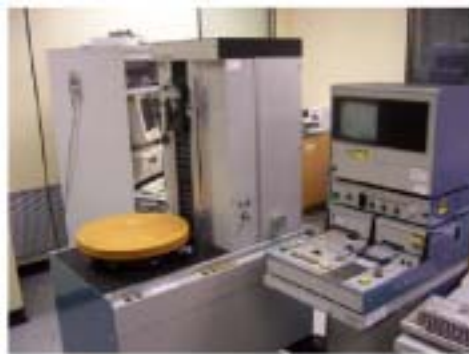


图12 圆度仪

当进入测量阶段,仍有许多特殊问题待解决。例如测量局部圆弧,此时设计图要求测量圆的直径,但只有局部的圆弧可以测量到,测量不到圆的其他部分。因此,局部圆弧对形状的微小变化十分敏感,显示的直径及中心位置都会急剧的变化,我们将在第五章进行深入讨论。

在图纸上标注的直径和公差有时会造成疑惑,假如技术图纸或CAD模型标注出要求直径为20.0 mm,在制造和测量中用什么方法、什么设备呢?这个回答取决于许多因素,但主要考虑公差的小数点后的位数。

例如:你用什么仪器去测量下述直径?

1. 直径 20.0 ± 0.2 mm
2. 直径 20.0 ± 0.02 mm

直径1 可以用卡尺测量,而直径2 得用千分尺,这清楚表明公差的小数位数在选择测量策略时的重要性。

注: 应用 \pm 的极限的规范一般会造成很大的规范的不确定度
必须强调任何用 \pm 表示的规范,一般来说可以按 ISO 1101 的几何尺寸及公差或相关的标准来替代,因此用 \pm 方式表达的公差仅用于表示尺寸。

18

为什么尺寸要求公差

设计图纸或CAD 模块给出了零件模型的理想尺寸，大家知道，制造过程不可避免的产生误差，这些误差是由于机床、刀具、材料、操作者、不好的量规、缺少维护、测量设备或缺少培训所造成的。在制造过程中测量时，减少这些误差显得尤为重要。

满足设计图纸的要求——对公差类型以及其相关检测设备有所了解，而且对测量不确定度有所了解，这样才有助于减少上述误差。

设计零件时对于测量的考虑

设计者在设计时，必须经常问“**这个项目能测量吗？**”。对于设计时给出的公差，若还不存在检测技术，来判断它合格或不合格；若存在此技术，但你所在的公司还没有触及或此测量非常昂贵，超出你的财政预算；是否有足够的几何空间来测量被测要素？公差是否合理？基准是否足够大？对局部要素是否用最恰当的方式表达了公差要求(例如局部圆弧)？在设计的前期阶段，设计者应当与计量室进行沟通，特别当检测不属于自己的组织，在设计阶段的微小变化将防止以后昂贵的测量。

我是否能设计一个较易测量的零件？

这个问题的回答是完全肯定的，可以在不影响零件的功能前提下添加方便测量的辅助要素。设计人员在完成图纸前，应与检测人员谈话，在最终定图前，图纸细微的变化将为以后节约很多时间。

设计时考虑零件的装夹

对于小零件，经常碰到的问题是如何在测量时固定它们又不引起变形或不会妨碍测量。有时在设计阶段简单的加几个孔、一个法兰或一个定位套，以便于测量；有时甚至设计者应考虑测量用的夹具。

设计时考虑要素的可触测性

设计时，设计人员经常要考虑测量仪器是否可触测被测要素，这可能只要加一个小的观察孔或移去不起作用的材料，例如把槽加宽以放下千分尺的砧座。

设计时考虑再次定位

再次定位常用于零件大于特定的测量机行程，而要分两段测量。在零件上设计几个螺纹孔，用于安装标准球，这样，两段测量可以使用同一个坐标系。

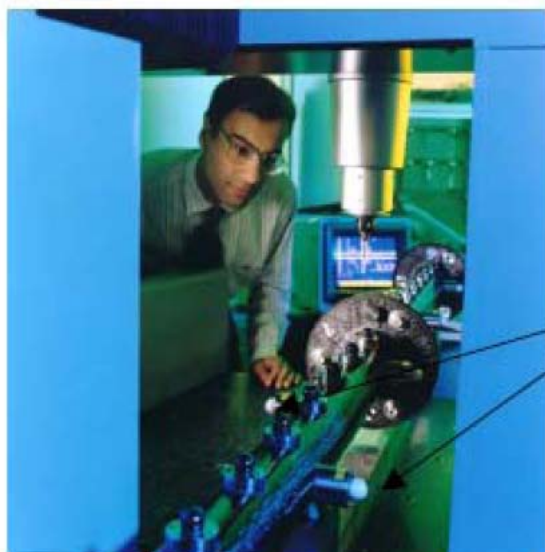
如图15所示，此零件的尺寸大于该测量机的行程。首先，操作者把几个球依次安装在零件上；然后，分几次进行测量；最后把测量数据在同一个坐标系中进行拼合。



图13 标准球



图14 标准球定位安装



重新定位的几个球
(白色)

图15 零件的尺寸大于该测量机的行程，利用再次定位的方法测量（白色球用于再次定位）

对于再次定位的更多信息，可参考Cox M G 1997 在NPL 的报告 CLM2 “利用再次定位方法进行测量”

第三章

制造

在此章内

- 制造者的角色-零件制造介绍
- 加工工艺基础
- 批量加工工艺 - 模铸
- 制造过程中的测量 - 手动和在线
- 监测和统计控制的趋向
- 加工过程中测量的反馈

制造简介

当零件设计完成后，就可以开始准备制造。在零件制造之前，还需要考虑许多事情。不仅要考虑制造方法，而且要量化考虑测量和工艺过程。这一章的目的是为从事不同工艺的加工人员、检测人员给出一个加工工艺概览，通常的加工工艺如表1所示。

表1 通用加工工艺

金	成	碾压
属	型	锻造
铸	工	热挤压
造	艺	板材冲压
		烧结
		快速成型
金	属	车削
	切	铣削
	削	刨削
	工	磨削
	艺	钻削
	连	焊接
	接	胶粘
	工	机械连接
	艺	

当处理生产工艺时，须加考虑——是否小批量生产。例如，对于摩托工业用的单个零件生产，每20个零件，属于中批量生产；对于航空工业用的成千的紧固件，属于大批量生产。

在制造过程中测量，可采用最基本的手动工具(卡尺、千分尺、塞规等)、在线量仪(在线量仪可以用硬量规来测量被测尺寸)进行测量，如图16和图17所示；也可以用坐标测量机利用传送装置或机械人在检查站进行检测。(手动量仪如图18所示)



图16 机床上的量仪



图17 机床上的量仪



图18 量仪

基本制造及加工工艺概览

切削加工技术

切削加工方法主要有车削、铣削、刨削、磨削四种。以车床加工为例，如图19所示，车床用卡盘夹持零件并带动零件旋转，移动滑座及小溜板带动相对于静止的刀具作轴向或径向运动，从而实现了车削。

一般来说，车床宜加工回转类零件，零件若用掉头的方法（用卡盘夹住零件的另一端）加工内孔，内孔的同轴度公差不可能要求得很高；同样地，用两次装夹的方法加工的法兰盘其厚度亦会变化。



图19 典型车床

三轴铣床

三轴铣床一般利用刀具旋转实现铣削。三轴铣床有不同的性能参数，如图20所示，此三轴铣床垂直安装刀具，工作台可在两个垂直方向的水平面内移动。

零件可以用虎钳、卡盘或压板装夹在工作台上，还可以用转台或倾斜的工作台来加工零件，但是，不是在任何方向都可以加工到零件。



图20 三轴铣床

五轴数控机床

五轴数控铣床是在三轴铣床的基础上又加了两个互相垂直的旋转轴。它们在计算机控制下，可以加工出更为复杂的空间三维形状，例如，离心压缩机叶轮或螺旋推进器。五轴数控铣床可以在一次装夹中同时加工零件的五个表面。

线切割

线切割应用电化学工艺，用可导电的细丝来加工导电的材料，被加工零件装在两轴工作台上，此工艺适于加工二维的复杂外形的表面。如图21和图22所示，线切割机床在加工内表面零件时，须预加工一个孔，用来穿钼丝。更高级的线切割机床的头还可以倾斜，以加工外锥体及内锥孔，此工艺适用于高精度要求的薄壁零件，它不会由于机床承载及变形造成工件加工失败。



图21 线切割机床

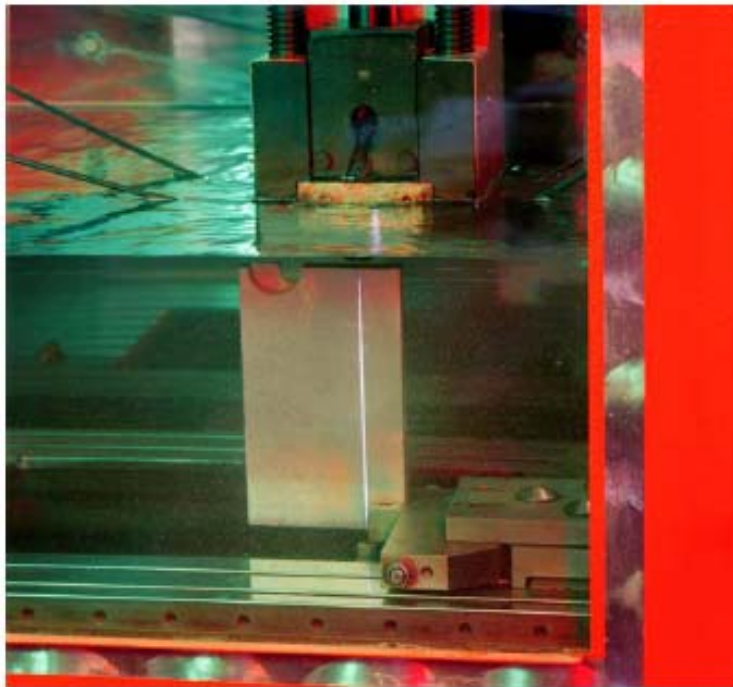


图22 正在运转的线切割机床

电火花机床(EDM)

电火花机床的工作原理与线切割机床类似，但选用石墨或青铜电极而不是用钼丝作为切削工具，利用电化学反应去除材料。一般先用粗加工电极，然后再用精加工电极，电极本身亦在消耗，不过比零件慢得多。

此技术对制造注塑模具的模子非常有用，详情可参考 **Airfix** 塑料模具系列。

批量生产工艺

铸造

模铸技术适于中、大批量生产，而且若零件有接近于成品的尺寸，则可大大减少了机械加工工作量。设计人员可以设计一些要素以利于装夹，设计人员亦可以设计一些要素以利于检测。例如三个小平面可以用作建立基准平面——假如它们不是功能性要素，则它们可以在检测时作为三维的最佳拟合时的完全浮动要素。(例如SmartfitTM 5 软件可以检测铸造件是否可以加工出合格的成品)

监测工艺过程

如何从工艺中得到持续改进产品质量的信息？有许多为此设计的方法、质量工具和技术。根据工艺的不同，可以使用测量仪器，包括传统的手动工具、坐标测量机或专用的量仪，监测整个工艺过程。真正了解要监测什么是很重要的。

若以**500** 件为一组批量检测，从中取**50** 件进行抽样检测，你可依据这些测量中的统计参数——例如取样的平均尺寸和标准偏差，选用的采样计划及相应标准，接收或拒收这一批零件（用这种方法，并不会告诉你制造工艺的详情）。假如我们现在改变检测工艺，从生产线中抽出每第十个零件检查，那么不但能得到平均值、标准偏差，而且能确定误差的趋势。这种对趋势的监测有益于工艺控制，使得操作者可以定期地调整机床，使零件不会超差。



图23 批量检测

趋势监测及统计控制

零件使用不同的加工方法，对应着不同的生产决策。正如在生命的过程中有不同的事情，我们周边充满了变化，例如人的高度、汽车的类型、颜色和形状。对于控制批量生产的误差，可采用趋势监测及统计分析以控制误差。例如：为什么零件的尺寸会变化？在某种制造方法中，什么是引起误差的原因？用统计的技术去监测误差，能帮助我们在工艺过程中减少误差，并且把统计、制造和检测过程联系起来。不同的监测过程，采用不同的描述或技术术语，比如：均值、范围、标准偏差、直方图、控制图、6 σ 原则(见附录B.2)。

统计过程控制（SPC）这一术语是关于工业过程控制的统计，它的最简化形式是测量生产线上每第十个零件的尺寸，测量并记录在使用上下偏差标识的图形上(如图24所示)。SPC能预测加工何时可能产生超差品，以便及时采取相应的措施，例如调整刀具等。

过程控制及测量反馈

当在制造阶段或检测阶段进行测量时，可以使用包括趋势监测和SPC技术的质量管理工具建立一个误差控制系统。其工作原理是使用测量仪器（诸如千分尺、卡尺、在线量仪、坐标测量机）进行监测，同时使用SPC应用软件来统计分析测量数据（测量数据以图形显示），并且给出测量值的趋势，以及把数据反馈给工艺过程，可参考附录B.2。

从测量仪器所得到的数据，SPC可以反馈给生产过程，以便对机床作相关的调整，预防产品超差。如图24所示，SPC的图形反映了随时间变化的误差。

USL 表示规定的上偏差极限

UCL 表示上偏差控制极限

LSL 表示规定的下偏差极限

LCL 表示下偏差控制极限

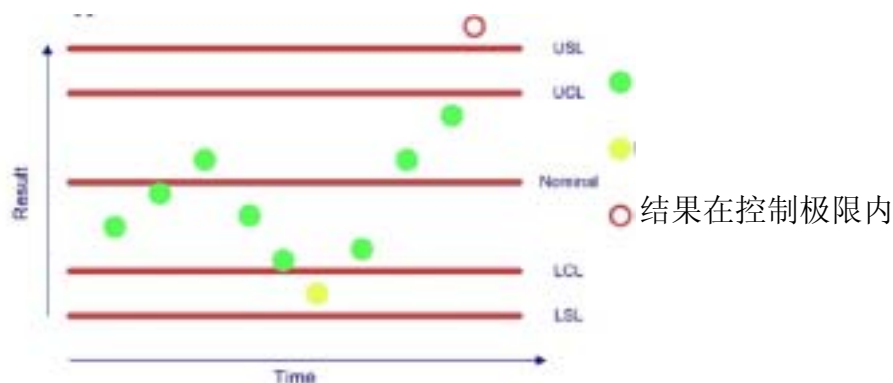


图24 基本的控制图形

第四章

图纸

在此章内

- 所传递的信息概览-尺寸、形状、表面粗糙度
- 坐标系统-笛卡尔坐标系、圆柱坐标系、球坐标系，局部坐标系与全局坐标系
- 尺寸、建基准，基准要易于测量，虚拟基准
- 为什么局部圆弧是一个坏的基准？
- 是否公差值应规定得这么小？
- 最小二乘法还是最小条件？加工工艺基础

工程图是将设计者的思想传递给制造工程师和检测工程师的最主要通讯工具，本章将简要地介绍图纸标注。

概览：什么信息被传递——尺寸、位置、形状和表面粗糙度

引言

实际零件存在误差，且误差种类是多样的，例如尺寸误差（如内孔直径、长度），形状误差（如圆柱形变成桶形），表面纹理不平滑。造成误差的原因也是多样的，例如，由于制造机床的重复性而造成的形状误差。但是这些误差若在规定值之内，那么可以认为它们是合格的。

坐标系

首先我们简要的介绍图纸上常见的几种坐标系——笛卡尔坐标系、圆柱坐标系、球坐标系。任何一种坐标系都可能是局部坐标系或全局坐标系。

坐标系统——笛卡尔坐标系、圆柱坐标系、球坐标系

最常见的坐标系是传统的笛卡尔坐标系，它由三个互相垂直的轴组成（两两正交），常用小写字母 x 、 y 和 z 表示(如图25所示)。

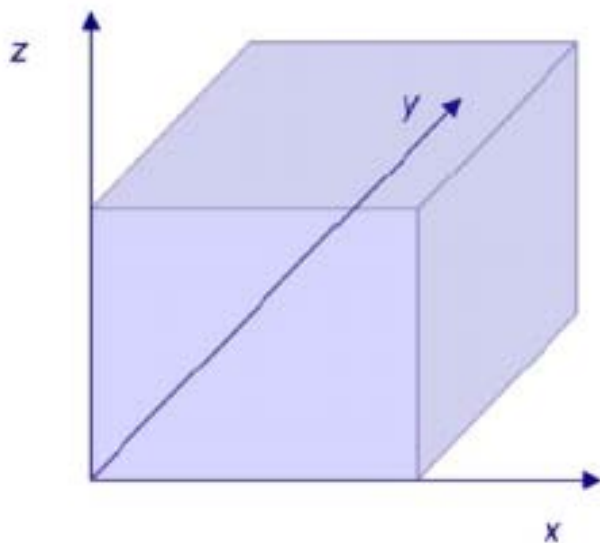


图25 笛卡尔坐标系

在某些情况下，可选用圆柱坐标系(极半径、夹角和高)，球坐标系(极半径和两个夹角)一般很少使用。笛卡尔坐标 x 、 y 和 z 也可以用球坐标系表示，方位角及俯仰角是角位移（投影在 xoy 平面内并与 $+x$ 轴向的交角）， R 是坐标原点到点的距离。

全局坐标系又可以称为绝对参考坐标系。有时你可能想构建自己的坐标系，它的原点位置与全局坐标系原点不同，它的方向亦与全局坐标系不同，这种由用户自定义的坐标系被称为局部坐标系。这两种坐标系都可以是笛卡尔坐标系、圆柱坐标系或球坐标系。比如，对于图纸上的飞机，其全局坐标系可以在飞机的**鼻锥**建立，但各个零件可以有局部坐标系。

通用公差

为了描述制造误差的变动量，引进了“偏差”这个术语。若理想直径为100 mm 的圆柱的偏差为 ± 0.1 mm，这亦就是说，此圆柱任何直径须介于99.9 mm 到100.1 mm之间，才为合格。把直径规定正好是100 mm 是没有意义的，因为这样的理想圆柱是加工不出来的。

关键要素在图纸上应标注公差要求，没有标注公差要求的要素公差，称为通用公差，通用公差值一般在图纸的特定区域标注。例如，可以标注为若无特别标注，则尺寸公差为 ± 0.250 mm，或角度公差为 $\pm 1^\circ$ 。

下一节将介绍形位公差。

形位公差

形位公差旨在于描述产品的几何性质与零件功能或装配时的关系。形位公差与传统的制图方式有关，形位公差有通用的符号语言，就像路标的国际系统，它们告诉驾驶者如何选择道路，形位公差符号允许设计工程师合理地描述零件的要素，使这些要素能够被统一地制造和检测。合理选用形位公差，能改善加工工艺，并保证产品的质量以及降低成本。

在CAD 和CMM 的发展过程中，质量的保证由GPS标准负责，GPS将提供一个面对设计、制造和检测全过程的通用的、统一的规范。

使用形位公差可能带来许多好处：

- 统一的参考基准；
- 统一的符号及术语，减少混淆；
- 尺寸及相关公差建立在功能的基础之上；
- 尺寸公差的方法减少了累积误差；
- 提供了信息，比如，**控制工具及装配的接口**。

在选用形位公差时，首先要界定公差的类型，公差的类型如图26所示，从有无基准要求可分为有基准要求的，无基准要求的；从几何要素特征可分为形状公差，方向公差、位置公差和跳动公差。单一的形状公差与基准无关，例如直线度。

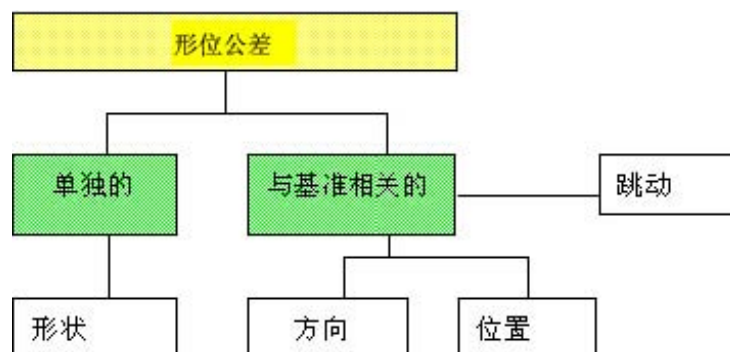


图26 形位公差分类

下几节将给出形位公差的基本要求

形位公差种类如图27所示。

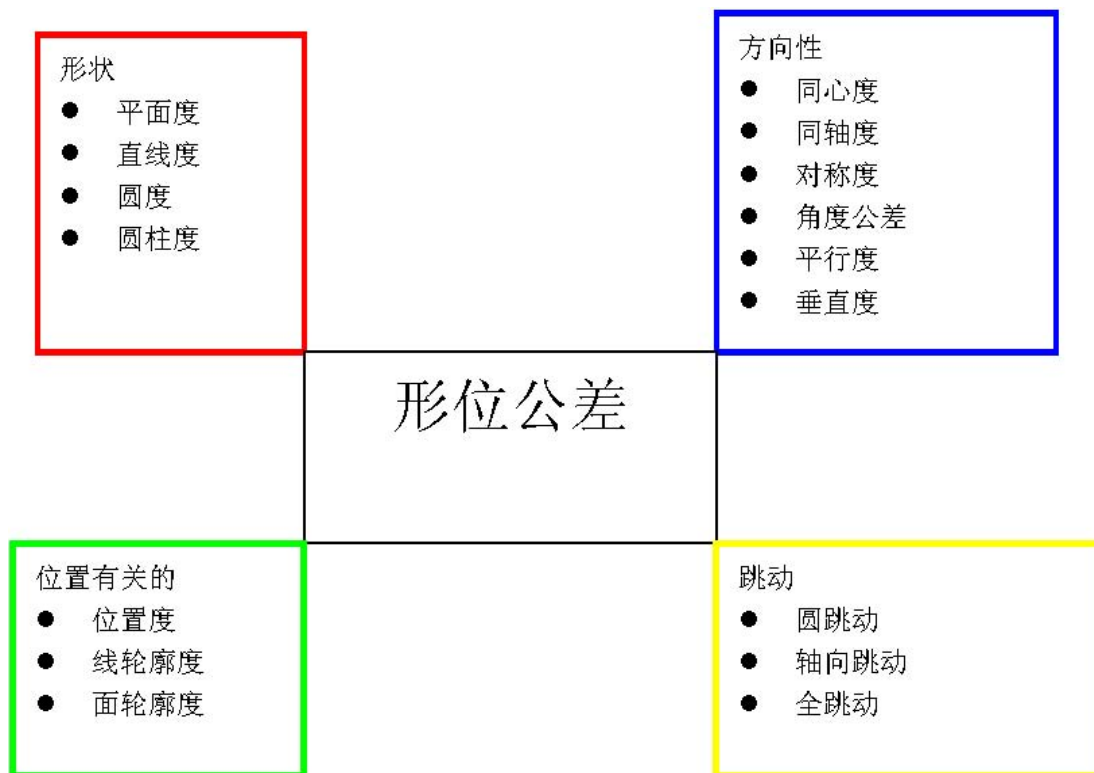


图27 形位公差概览

在图纸上标注形位公差应包括以下几个参数：

- 基准（几何参考）
- 要素控制框
- 几何特征(符号)
- 公差形状
- 公差带

上述参数现在加以详述：

- 基准（几何参考）

基准应在图纸上或CAD 模块上明确标注，在图纸上往往用填充了颜色或没填充的三角形表示，框内的大写字母表示基准A，如图28 所示，此字母A还与形位公差控制框关联，如图33所示，要素控制框内应标注出与此公差相关联的所有基准。

当测量时，首先要创建坐标系。基准又可分为主基准、第二基准和第三基准。

主基准（第一基准）：可以用单一要素或组成要素来定义，一般为表面或轴线。它主要用来找正零件。

第二基准：可以用单一要素或组成要素来定义，用来确定相对于主基准的旋转；

第三基准：可以用单一要素或组成要素来定义，相对于主基准及第二基准用来完成坐标系的建立。



图28 基准符号

基准在图纸上的标注位置，取决于要素或组成要素的特定功能要求。首先要分析功能要求，才不至于在制造或测量此零件时造成原则性或功能性错误。例如，基准可以是一条轴线、平面的延长线、基准目标。如图29所示的基准是零件的轴线，如图30所示的基准是表面或表面的延长线。



图29 基准轴



图30 基准表面或表面延长线

当进行粗加工时，可用多个基准目标来建立基准，基准目标框用来表示目标所在的区域，在制造或测量时，均应从此点来定义坐标系。如图31所示的基准目标的标注，它给出了制造及测量的基准位置须处于直径为8mm的圆区域内，此理论中心距离零件的两侧距离分别为15mm和15mm。A1是基准名称，基准目标所指向的区域应画上剖面线。

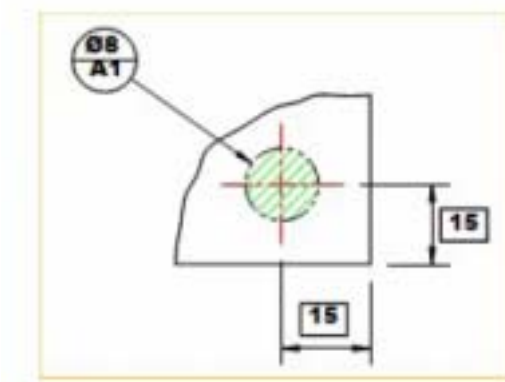


图31 基准目标框示例

要素控制框

要素控制框(或公差框)呈长方形，可分成许多小格，它们提供了适用不同技术要求的制造及测量的尺寸信息，此要素控制框包括公差代号、公差值以及基准。

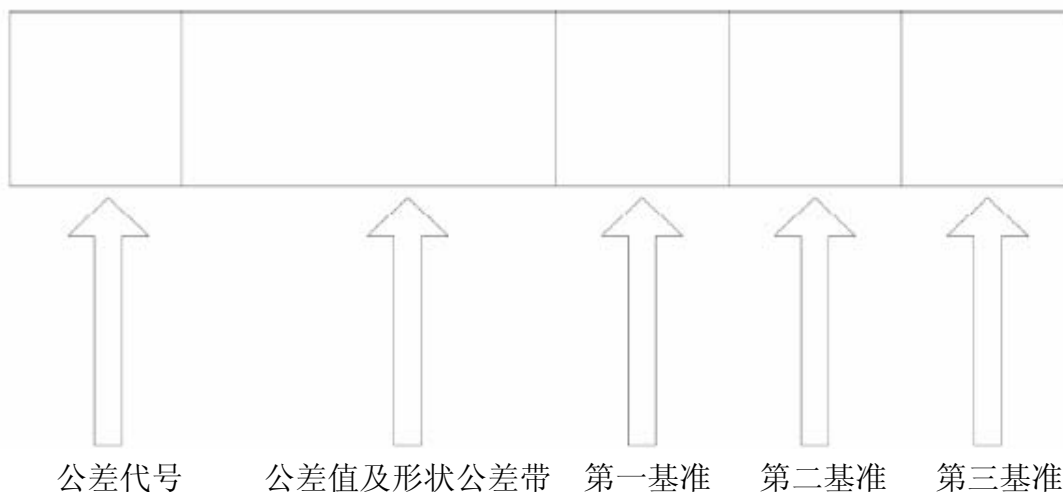


图32 公差框

要素控制框（公差框）对框格数没有限制，这取决于公差类型，有无基准要求、遵循的公差原则要求。简单的要素控制框可如图33 所示。

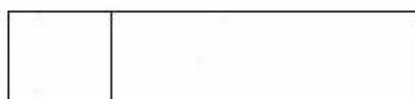


图33 要素控制框(公差框)

几何特征

要素控制框的第一格应标注公差符号或代号，它们用于描述被测要素的设计要求。对它们如何测量，我们将依序举例进行说明。

CMM 的几何量测量
当用坐标测量机测量形状，所用测点的密度应当反映在加工过程中的典型的形状误差。

形状公差

圆度

圆度公差符号或代号如图34所示，圆度公差带是指两同心圆之间的区域。如图35所示，轮廓线必须位于半径差为0.038mm的同心圆之间的区域。圆度可用圆度仪(如图12所示)或坐标测量机进行测量。圆度仪测量时，传感器与零件表面接触，零件做旋转运动时，传感器记录相对于理想圆的偏差；坐标测量机测量时，将绕圆周表面按照适当的间距采多个样点，并用圆来拟合这些数据然后评价圆度。两种方法均使用用滤波器，并且其滤波算法须得到大家的一致认可，而且采点的密度应反应出加工过程中的典型形状误差。

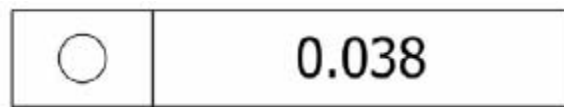


图34 圆度符号

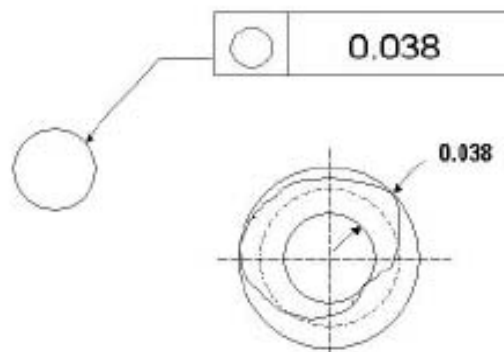


图35 圆度定义

直线度

直线度公差符号如图36所示，直线度公差带是指两平行线之间的区域，如图37所示。直线度可用千分表与其他的基本测量工具一起进行测量，也可以用坐标测量机在表面上测线。

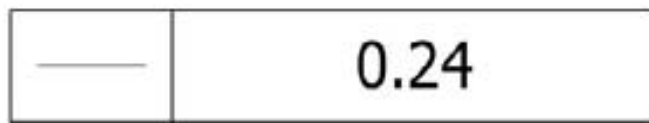


图36 直线度符号

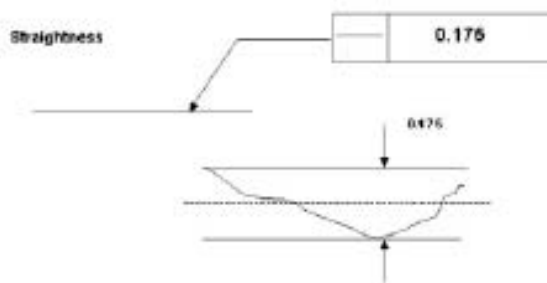


图37 直线度定义

平面度

平面度公差符号如图38所示，平面度公差带是指两平行平面之间的区域，如图39所示。平面度可用光学平镜、精密水平仪或千分表与其他的基本测量工具一起进行测量，也可以用坐标测量机在表面上测点阵。

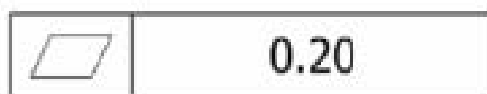


图38 平面度符号

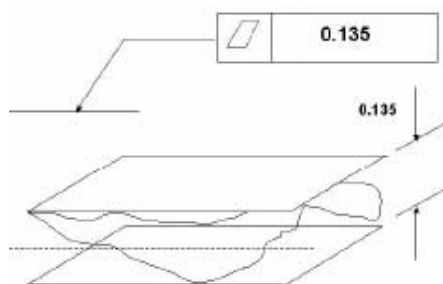


图39 平面度定义

圆柱度

圆柱度公差符号如图40所示，圆柱度公差带是指两同心圆柱之间的区域，如图41所示。圆柱度可用圆度仪或用坐标测量机按一定的点阵测量。

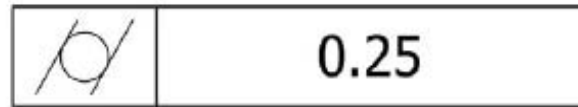


图40 圆柱度符号

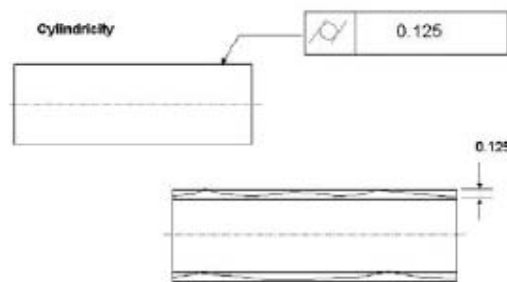


图41 圆柱度定义

轮廓度

轮廓度一般用来控制不规则的面和线。轮廓度公差带是指位于一系列的直径为给定公差值的圆或球的两包络曲线之间的区域。轮廓度可用千分表、样件及其他基本测量工具进行测量，也可以用轮廓投影仪、轮廓测量仪或坐标测量机进行测量。



图42 轮廓度符号

轮廓度公差可以是双向或单向的，取决于箭头相对名义尺寸的方向和公差带（如图43所示）

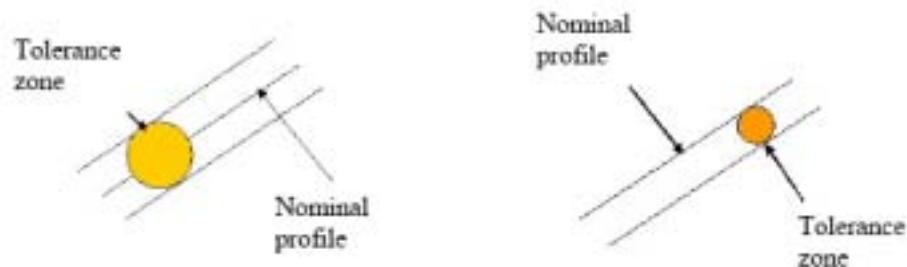


图43 轮廓度公差可以是双向或单向的

如图43 的左图所示，线轮廓的公差带总是在两包络线之间，此两包络线由一组直径为 t 的圆的公切线构成，且此组包络圆的中心位于名义轮廓线上。

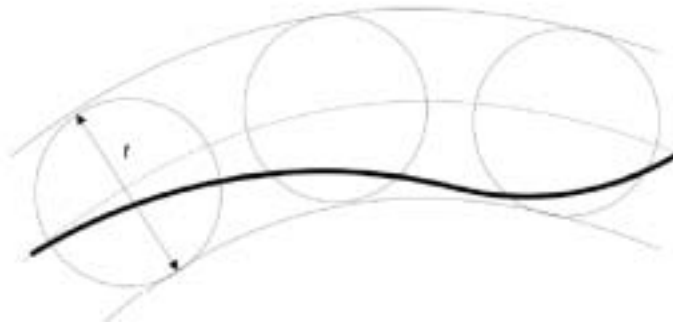


图44 线轮廓公差

如图44所示，实际轮廓线 (用粗实线表示)应位于圆的公切线形成的公差带内，理想轮廓 (用虚线表示) 位于包络圆的中心线上。

位置度公差

位置度公差表示一个几何要素的位置相对于另一个要素或基准的变化量，基本尺寸建立了要素相对于基准的位置关系，如图45所示，被测孔相对于基准B 和C 的基本尺寸分别为15mm和42mm。

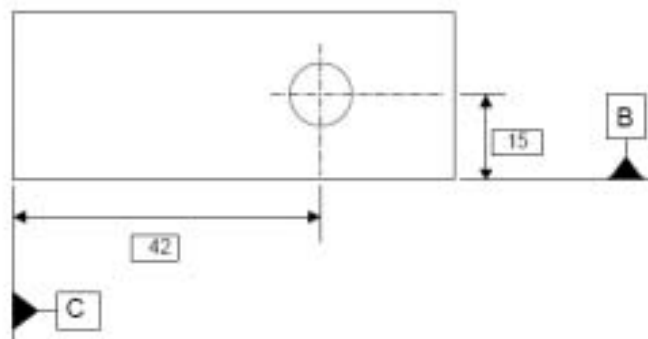


图45 位置公差

位置度公差描述要素相对于基准理论位置的变化量。对于圆柱类要素，例如孔和外直径，位置公差带呈圆柱形。



图46 圆柱形公差带

如图46 所示，圆柱的公差带是直径为0.375 mm 的圆柱，且其轴线是相对于基准B 和C 定义的。

最大实体条件

最大实体条件(MMC)对应着材料最多的状态，这对零件的装配是极其重要的。如果最大实体条件作用于内孔，对应孔的最小尺寸；如果对于外尺寸，对应轴的最大尺寸。

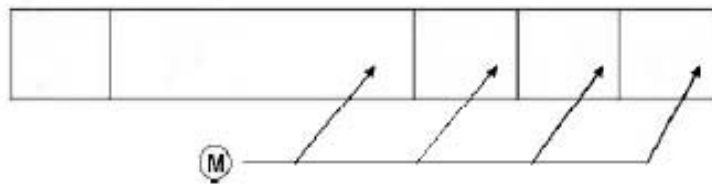


图47 最大实体条件符号的位置

最大实体条件符号放在如图47 所示的公差框内，可放在所要求的公差值或基准符号之后。MMC定义的虚拟条件指孔和轴的最差装配条件。图48 的最小实体条件，对应轴的最小尺寸；反之，对应孔的最大尺寸。

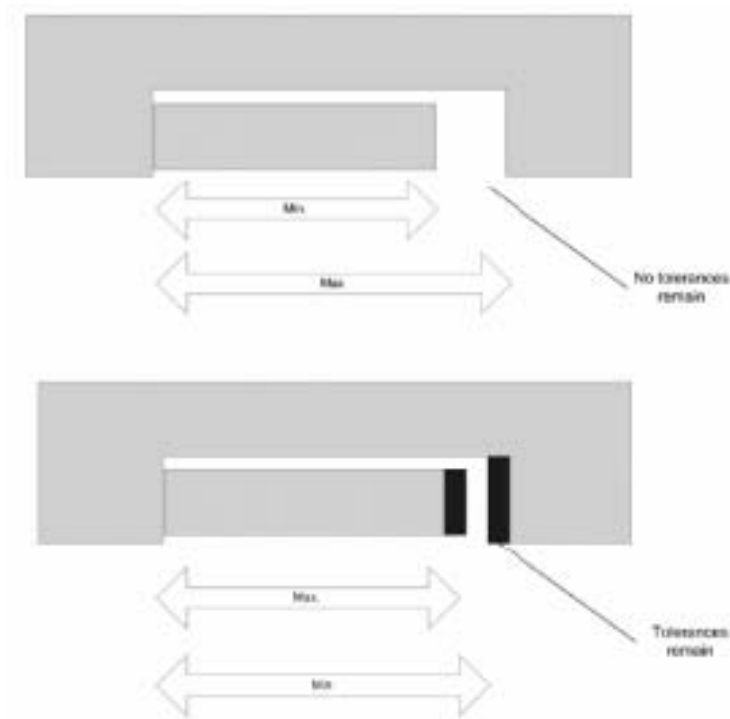
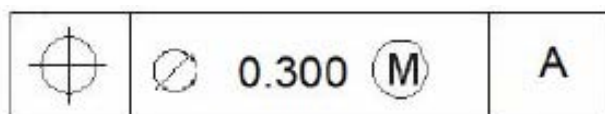


图48 最小实体条件

当两个零件处于**虚拟**条件时，它们仅仅能装配在一起，若偏离此条件，则两个要素更容易装配在一起，请牢记这原理只有误差小于公差才有效。

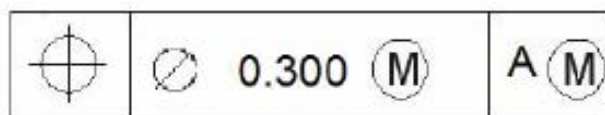
此虚拟条件是由最大实体条件和公差叠加形成的，若作用于内孔尺寸，虚拟条件将是最大实体条件减去形位公差；反之，若作用于实体外尺寸，虚拟条件将是最大实体条件加上形位公差。更多信息请参考BS ISO 2692:1988 工程制图.形位公差.最大实体原理。最大实体条件符号的应用示例如图49所示。



最大实体条件应用于被测要素



最大实体条件应用于基准



最大实体条件应既用于被测要素，亦用于基准

图49 最大实体条件公差框示例

同心度/同轴度

同心度/同轴度公差符号如图50和图51所示，同心度/同轴度可用圆度仪或坐标测量机进行检测，对于同心度，应测两个圆；对于同轴度，应测两个圆柱，即相对于一个圆柱面的轴线，测量另一个圆柱面。

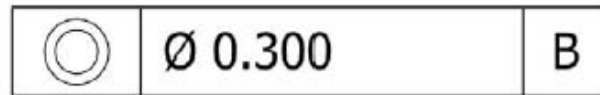


图50 同心度/同轴度符号

如图50所示，被测要素的实际轴线须位于直径为0.3mm，轴线与基准直线B重合的圆柱面内。

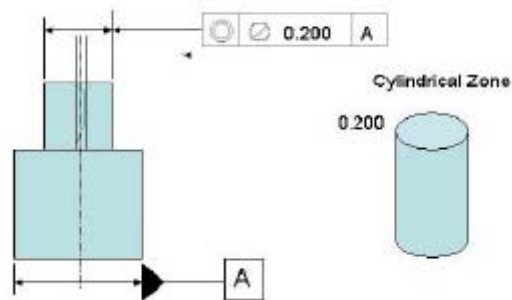


图51 同轴度定义

对称度

对称度公差符号如图52所示，对一些非圆柱形的元素，例如槽，位置公差可以是公差带的总宽度，而被测要素的中心平面必须位于公差带内。在检测时，可以用千分表与其他的基本测量工具一起进行测量，也可以用坐标测量机进行测量。

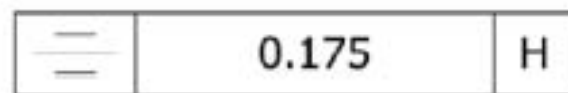


图52 对称度公差控制框

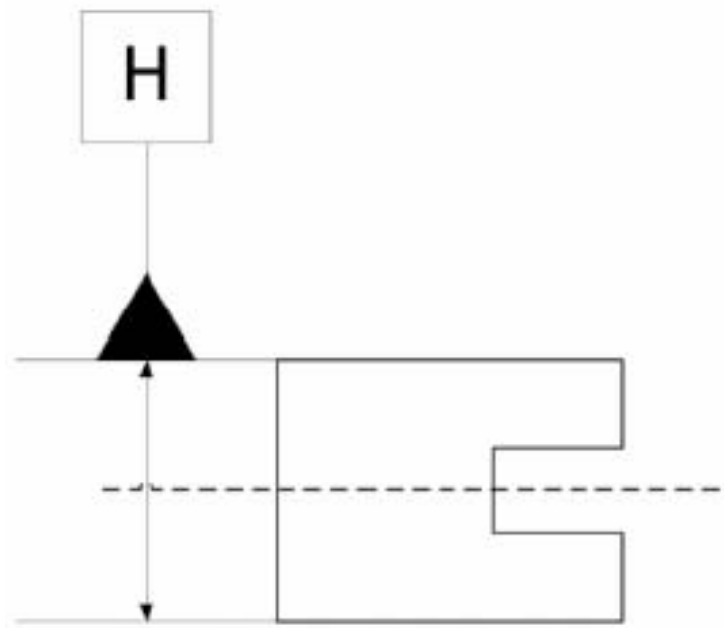


图53 槽的对称度

如图53 所示的槽，若给出图52 的对称度公差要求，槽的中心平面须位于相距为0.175mm的两平行平面之间，且两平行平面相对于基准平面H对称分布。

方向性公差

平行度公差符号如图54所示，平行度公差带是指平行于基准平面的两平行平面或两平行线之间的区域。平行度可用千分表与其他的基本测量工具一起进行测量，也可以用坐标测量机进行测量，如图55所示。

注：平面A对基准平面B的平行度公差要求不同于平面B对基准平面A的平行度公差要求。

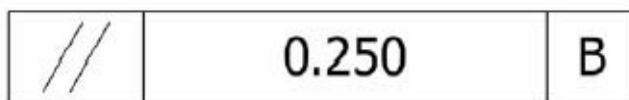


图54 平行度符号

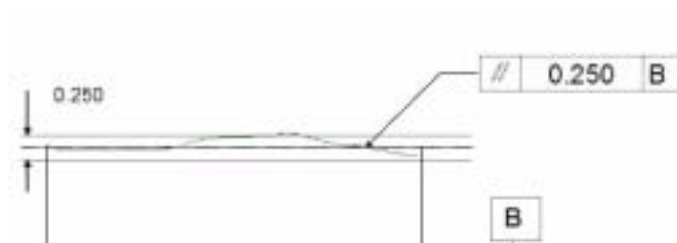


图55 平行度公差示例

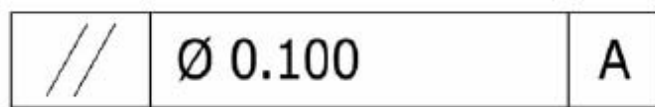


图56 平行度的圆柱形公差带

垂直度

垂直度公差符号如图57所示，垂直度公差带是指垂直于基准平面或轴线的两平行平面之间的区域，如图58和图59所示。垂直度可用千分表与其他的基本测量工具一起进行测量，也可以用圆度仪或坐标测量机进行测量。

注：平面A 对基准平面B 的垂直度公差要求不同于平面B对基准平面A 的垂直度公差要求。

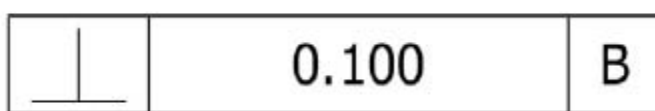


图57 垂直度符号

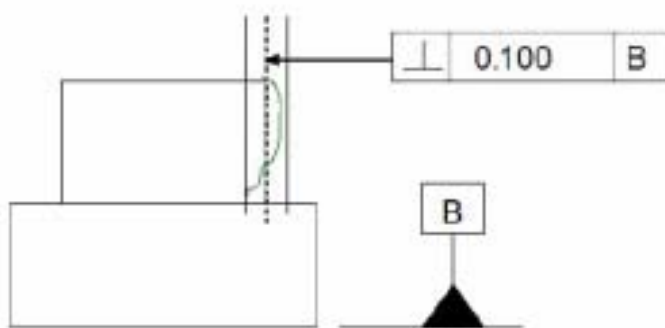


图58 垂直度公差示例

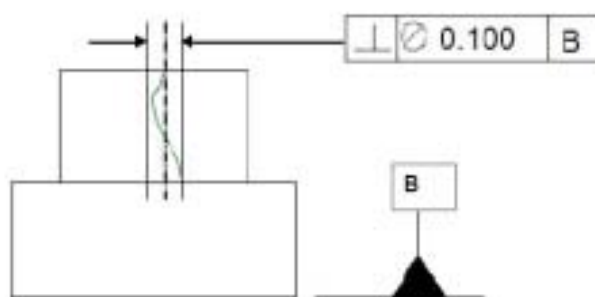


图59 垂直度公差示例

角度公差

角度公差符号如图61所示，角度公差带是指相对于基准平面或轴线（基准B）成给定的角度（除90度之外）的两平行平面或两平行线之间的区域，如图62所示。角度公差可用千分表、正弦规与其他基本测量工具进行测量，也可以用坐标测量机进行测量。

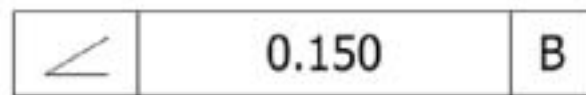


图61 角度公差符号

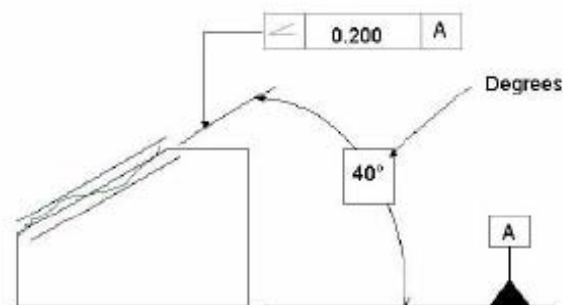


图62 角度公差定义

跳动公差

跳动公差符号如图63所示，跳动公差是针对回转特征的公差要求。此类公差进行的圆周测量，完全独立于任何在直径或表面区域的测量，因为进行此项测量时，工件要转360度。在检测时，可以用千分表、V形块与其他的基本测量工具一起进行测量，也可以用圆度仪、坐标测量机测量。如图64所示，跳动又可分为径向跳动和轴向跳动两种。

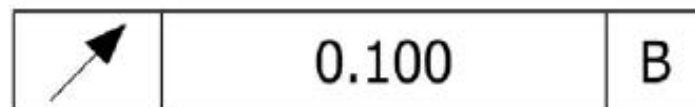


图63 跳动符号

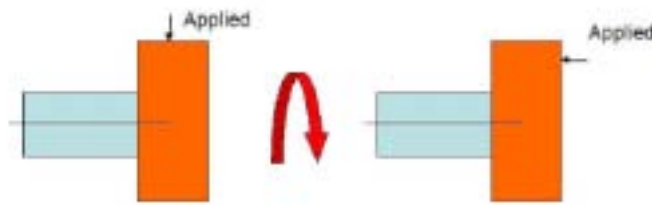


图64 径向跳动和轴向跳动

全跳动如图65所示。

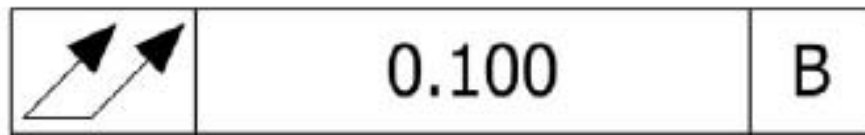


图65 全跳动符号

不同截面的跳动公差是相互独立的，这与全跳动不同；全跳动要求各截面是相互关联的，例如，所有的截面都有相同的零点。全跳动的应用场合与跳动类似，但它更为复杂，因为它要控制多个几何特征，如图64所示，被测外径的全跳动包括圆度、圆柱度和同轴度。

表面粗糙度

不仅所有已讨论的公差影响到零件的功能，而且表面粗糙度特征亦大大影响零件及装配件的总体性能。

零件太光滑或太粗糙都会影响零件的功能，我们该怎样选择所需的功能参数？与表面粗糙度有关的参数有很多（例如：Ra, Wa, Rq, Rsk）。讨论这些问题超出了本指南的范畴。

表面粗糙度符号如图66所示。



图66 表面粗糙度符号

在选取表面粗糙度的值时，应对其参数定义和要求有所了解。表面粗糙度可用表面粗糙度仪进行测量，也可以用探针进行测量，如图67和图68所示。



图67 测量表面粗糙度

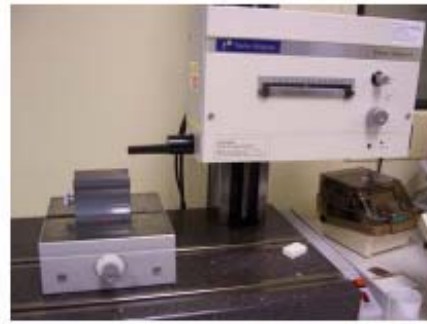


图68 表面粗糙度测量仪

若想进一步了解表面粗糙度的测量、参数定义、滤波及不确定度，可以参考Leach R K 2001 年版的“用探针式仪器测量表面粗糙度指南”。

建立坐标系（基准）

前几节曾讨论过基准和坐标系，此节将简要地讨论——当测量零件时，如何建立基准。

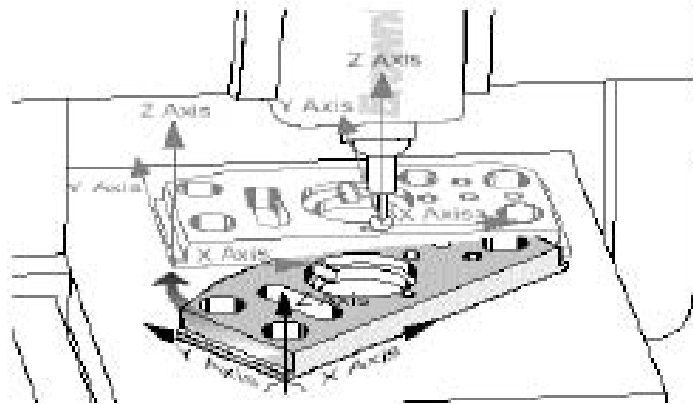


图60 如何找正零件

注：

在机械工程中，自由度（DOF）用来描述运动的灵活性，一个零件若完全自由应当有六个自由度：三个自由度为移动-在三维方向每个方向均可移动（习惯称为 x、y、z），另外三个自由度是绕了三个轴的转动（俯仰、自转及方向）

在开始制造和测量之前，首先须建立坐标系。不同的测量机，不同的测量软件，建立坐标系的方式可能不同，但建立坐标系的基本原理都是一样的。

为什么找正是重要的？

假如你用卷尺去测量墙的长度，你会不加思索的把卷尺大概平行于地板，从墙的一端量到另一端，你不会想从墙的一个上角量到墙的相对的另一侧的下角；你并不感觉到你已经作了一个简单的找正，即平行于地板测量。

坐标系的合理建立，与有一台精密的测量机和探测装置同样重要。理解坐标系对于成功测量是极其重要的，零件在检测时必须设置好坐标系，才能得出正确的检测结果，因此操作者必须正确找正坐标系。

什么是测头标定？

测量机上的探测系统必须用标准球或其他标准器进行标定，因为所有的探测都必须进行探针针头直径的修正，标定包括了探针针头直径和它们间距离的标定，此有效的创建了一个想像直径为零的球测头，可以探测任何点，要注意到针头球的有效直径总小于实际球直径，因为它考虑了探针杆的弯曲。

“3-2-1”建坐标系一般分三步进行：

1. 找正零件
2. 绕轴线旋转
3. 设置原点

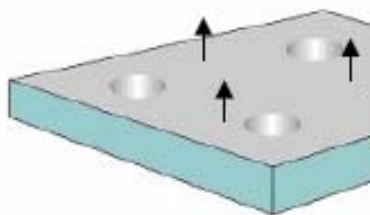


图70 定义旋转轴建坐标系

第一步是找正零件，一般来说，先建立坐标系的Z轴。旨在于使零件的坐标系垂直于零件表面，而不是测量机的轴线。

对于大多数零件来说，首先在上表面采三个或三个以上的点，如图70所示，然后拟合出理想平面。这个理想平面定义了一条垂直于此平面的轴线，作为坐标系的z轴，此轴将成为进一步建坐标系的旋转轴。

零件是平行或垂直于机器的垂直轴，这种认识是错误的。例如，在支持零件下表面的脏物就可能使零件不平行于基准平面。



图71 不直的影响

第二步是绕Z轴旋转。如图71所示，可以用机械的方法找正，亦可以利用软件中的算法来调整。在图纸上一般会标出找正的要素。

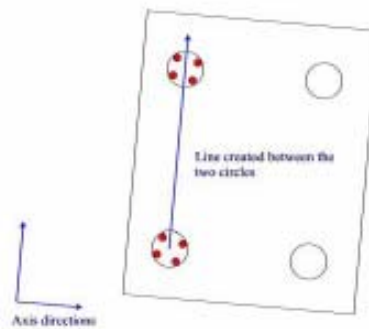


图72 过两孔心建一条直线，绕Z轴旋转

如图72所示，测量两个孔的圆心，通过两圆心连一条直线，测量软件将此直线绕Z轴旋转，直到使两孔间的连线的偏置为0。

第三步是设置原点。如图73所示，将圆的圆心设置为坐标原点（ $x=0$ 、 $y=0$ 、 $z=0$ ）。它可以是位置点或要素的特征点，它也可以是对已知要素的偏置点。

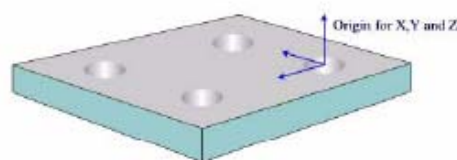


图73 设置原点

通过以上三步建立坐标系的方法，称为3-2-1建坐标系法，如图74所示，通常适用于方形零件。对于圆柱形零件的坐标系，通常先定义轴线然后定原点。

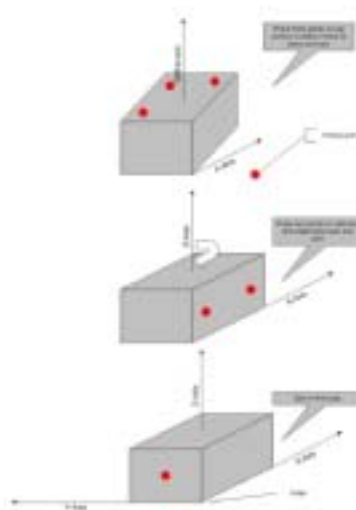


图74 3-2-1 建坐标系

基准是否容易测到？

当设计零件时，设计者应当确信基准表面很容易测量或夹持，基准表面与被测表面相比较，应当大很多，若基准很小，用坐标测量机测得的误差比用大基准面测得的要大得多，基准尺寸与最大被测尺寸的比应当作为一个重要的参考值。

例如，测量直径5mm 长为300mm 的棒，用5mm 的表面作基准建坐标系，不如用棒的轴线，对于300mm 基准测量出的误差比用50mm 作基准的误差要小得多。

虚拟基准

当测量零件时，工程图纸上的虚拟基准不可能被测量到；这是因为虚拟基准不在实际零件上，例如从零件的外侧切除一个圆孔，若这圆孔的中心在实际零件的边界之外，则这圆孔就很难准确测量，这种情况，应尽可能避免选此圆孔作为基准。

为什么局部圆弧是坏基准？

一般来说，测得的局部要素是完整要素的一小部分，出现这种情况，一个可能是真实的要素确实如此，另一可能就是触测它很困难，于是只能测完整要素的一小部分。例如，局部圆弧是圆的一部分，一个面片可能是球的一部分，一个截头圆锥是圆锥的一部分。如图75所示，局部圆弧可能是一个倒角。

测量这样的要素比测量完整的要素要困难得多，由于这种表面不完整的特性，用测量机测得的数据用最佳拟合的办法来定半径及中心位置是会产生较大误差的。因此，尽可能地避免选用这样的局部要素作为基准。

你自己试验一下

局部圆弧的测量可以用测圆来演示，若半径为 25mm 的圆，绕圆弧测 20 个点，得出半径及中心位置；再测一次，这次 20 个点分布在中心角为 45 度的圆弧内，根据圆形状误差的不同，结果会大不相同。

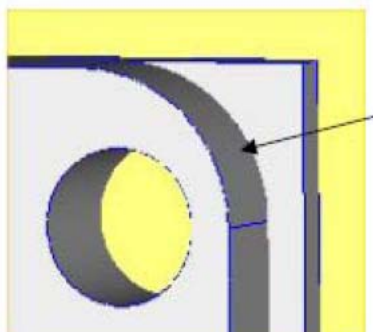


图75 局部圆弧

在坐标测量机上测量局部圆弧存在的问题

若相对于其他基准测量局部要素，较好的办法是用已给定的半径拟合，只求其相对于圆的形状误差。如图76所示，局部圆弧在名义圆弧上采十个测量点（均匀分布）。

注：平截头圆锥是用一平行于底面的平面截掉了上面部分而形成的实体。



图76 在名义圆弧上采十个测量点（均匀分布）

若用最小二乘法去拟合这些点以得到圆的半径及圆心坐标，此时弧仅是此圆上的一局部区域，由于坐标测量机不确定度的影响，这些圆的参数亦会存在相关的不确定度，这时由局部圆弧所决定的不确定度比相对于覆盖整个圆弧的不确定度会大得多。

局部圆弧是圆的某个中心角对应的弧，设想圆弧缩短了一半，那么中心角亦为一半，若仍均匀采十点，但只覆盖了较短的圆弧，此时所计算得到的半径的不确定度增加了四倍，而且中心坐标也有了较大的变化，这种情况在中心角为 80° 以内均是这样。

若一段弧对应中心角为 80° ，另一段弧中心角为 5° ，那么结果非常明显，后者半径的不确定度为前者的250倍。

对局部圆弧在设计时的考虑

在极端的情况下，例如中心角为 5° 的圆弧，我们必须质疑上述圆的参数（圆心坐标及圆弧半径）在实际测量时是否合适？如果给出局部圆弧的半径和圆心位置很小的不确定度的要求，那么就需要很高的坐标测量精度，很显然，这是不现实的。

这样的设计要求可被看作毫无道理的，对于局部圆弧，给出轮廓度要求更加合理些（如图77所示），亦较易于实现；很显然局部圆弧并不适于作基准。

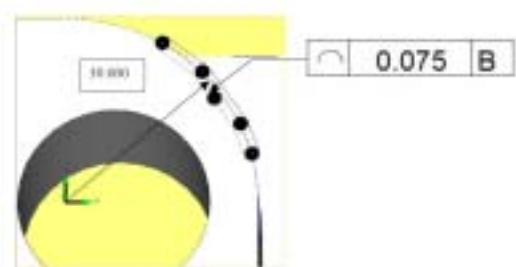


图77 给出轮廓度要求的局部圆弧

公差真的要求那样小吗？

当设计者在图纸上标注尺寸时应当考虑制造及测量，例如要求直径公差为**0.001mm**，那么按惯例测量仪器的不确定度至少为被测件公差的十分之一，即为**0.0001mm**，这样小的不确定度只有在国家测量研究院（如**NPL**）才能达到，因为要达到这样的不确定度，需要很好的表面粗糙度及形状误差（圆度）。设计者应当问自己“为了零件正常工作，公差真的需要这么小吗？”

最小二乘还是最小条件？

对于坐标测量机而言，形状误差的传统评定算法为最小二乘法，在历史上，与最小条件法相比，最小二乘法的计算时间较短。

最小条件？

对圆来讲最小条件就是用两个圆来包容被测圆，而两圆的径向间隔为最小。

按照**ISO 1101:2004**的规定，基准应当用最小条件方法来确定，若基准由其他方法确定（例如最小二乘法），其峰-谷值将大于由最小条件所得的值，最小二乘法仅适用于不具备用最小条件法的情况下（例如旧的坐标测量机）或预先取得同意的情况下。若作公差检测时，没有指定评定算法的情况下，则应当采用最小条件法，特别在作仲裁的情况下更是如此。

第五章

检测

在此章内

保证零件符合要求

取样对比100% 检测

选用合适的检测工具

检测图纸上规定的尺寸是否符合公差要求

用UKAS 规则及 ISO 14253 规则来判定是否合格

检测的目的是检查已制造的零件是否符合图纸上详细规定的要求，本章提出了在检测过程中所需考虑的一些方面。

保证零件符合要求

检测已制造的零件是否符合设计要求，需考虑许多方面。例如，选取测量工具（不确定度、量程等）；但此处只能谈很少方面。

取样对比100%检测

在选用哪种检测方案之前，需要确定是100% 检测还是抽样检查。很明显对某些工业100% 检测是不可行的，因为这些工业生产的速度大大快于检测速度，检测每个零件是不可能的，而且测量每个零件是不必要的，因为它的生产工艺已被实践证明是稳定的，而且它们应用了高质量的工具及技术。

另一方面，某些工业由于安全的原因，去测量每一个零件的每一个尺寸是至关重要的，例如航空零件、医疗器械零件等。

所以，关于取样的争论取决于它的应用及相关的安全要求。

选用合适的测量仪器

当进行特定测量时，应选用合适的测量仪器，有时只有一种选择，有时有多种选择方案。

根据设计图纸或CAD 模块所要求的许多因素来选用测量仪器：

需要考虑测量不确定度：假如我们考虑BS EN ISO14253-1 产品几何量规范——用测量仪器对工件进行检测，我们可以看到根据性能规范判定合格或不合格的决策规则，根据这些规则我们可以基于测量不确定度来选择测量仪器；另外测量速度可能亦是一个因素。

不要毫无道理的在测量时拔高选用昂贵的和精密的仪器，实际上可以更容易的用较便宜和稍低一些精度的仪器来满足所要求的精度，例如公差仅为0.3mm， 那么用千分尺比用坐标测量机更为合适。

注7： 取样是统计实践中的一个部分，就是用部分零件的检测来推论得到其他零件的某些信息。

检测图纸上规定的尺寸是否符合公差要求是可能的。

检测零件合格与否，首先须选用合适的测量仪器。正如前面提到的，还可参考ISO 14253-1 ，在后面还会讨论它。

检查设计者在图纸上给出的公差要求是否合理，这是检测人员的责任。假如这些公差现在还不存在可行的测量技术，那么就会造成无法判断零件是否合格。在设计的前期阶段，在可用的现有的测量仪器的前提下，每个带公差要素的规范与其检测工艺应取得一致意见。

另一种办法是利用外包测量，那么必须事先调查好，假如你的公司不具备所需的测量技术而必须外包，那么必须早日作好财政预算；需要外包的测量是相对困难的，因而成本昂贵。在现有仪器条件下，假如确知按ISO 14253 的规则会很困难，那么与设计者一起检查，看零件在正常工作、不影响性能的前提下，公差是否要那么小，所规定的公差是否合理？正如前面所讨论的，图纸上局部要素的测量可能会成为问题，若在图纸上对局部元素的要求是错的，

那么应当和设计员讨论采用更合适的要求。对于所有测量,基准的选取十分关键,你应确信在设计图上基准应有恰当的尺寸大小,如前面所说,相对于被测元素很小尺寸的基准,它的小小的测量误差会造成很大的影响。最后,有时测量比所需要情况复杂得多,这是由于要素可触及性的问题,最理想的情况是此类问题在设计阶段就被发现和解决。

溯源性的重要性

在开始检测之前,你必须确信你的仪器是可溯源的。

PD 6461-1:1995 溯源性定义:

通过一条具有规定不确定度的不间断的比较链,使测量结果或测量标准值能够与规定的参考标准,通常是与国家测量标准或国际测量标准联系起来特性。在这里很重要的词汇是不确定度,我们马上可以看到:除非你知道测量不确定度,否则你不能确定合格与否。溯源性通常是指通过由UKAS 鉴定合格的实验室、国家实验室或具有溯源标准器的地方来校准你的仪器的过程,溯源性可以保证由不同机构生产的零件能正确的装配在一起。

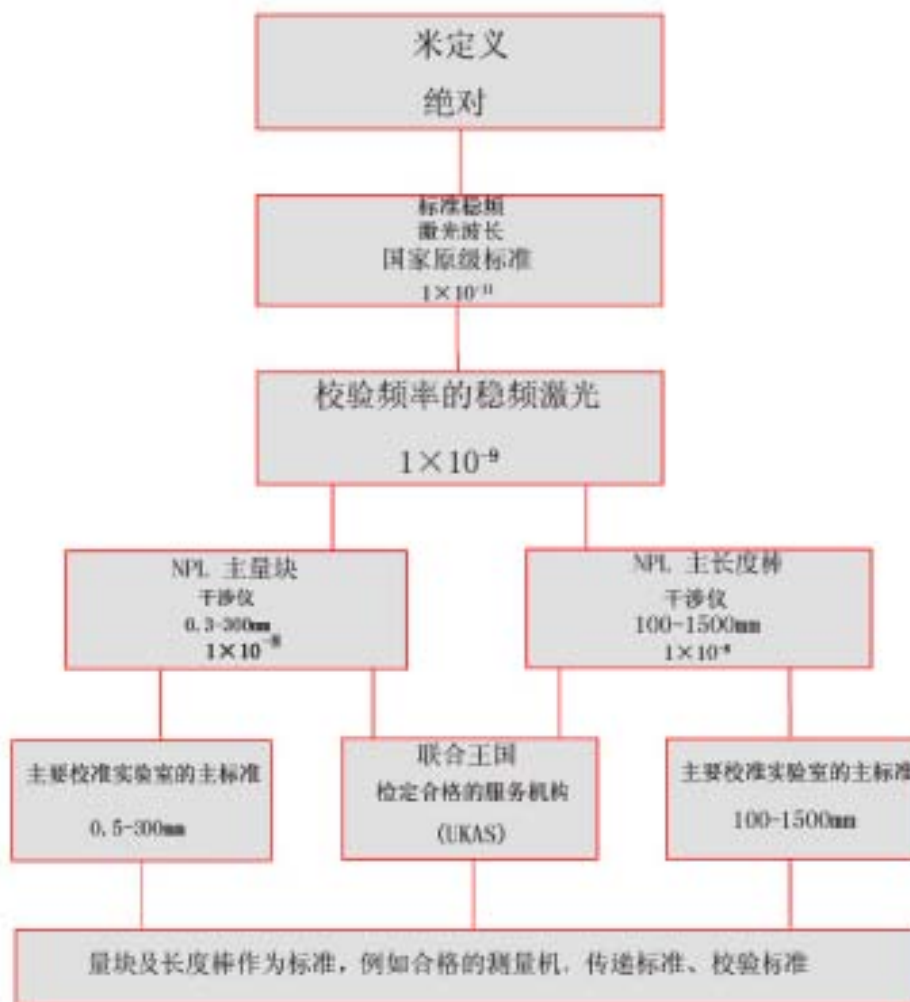
溯源链通常可以采用以下形式:在长度测量溯源性链的最上端是米的定义(1983年):

千分表在由UKAS 鉴定合格的实验室与校准过的量块比对。

UKAS实验室用在NPL 用干涉法校准过的量块与用户的量块进行比对校准。

NPL的量块实验室的激光干涉仪(带温度、压力检测系统)用相应的国家原级标准(基准)进行校准。

量块的溯源链如图78所示。



1米是光在真空中运行 $1/299792458$ 秒时所走的路径长度。

关于溯源性的详细资料见附录A.4。

测量不确定度

测量不确定度在Bell,S A 所著的“不确定度初学者指南-实践指南 No.11(第二版NPL 2001 年3 月)”中作了详细叙述,若读者对测量不确定度不熟悉,那么在阅读本书以后章节之前,最好先读那本指南。

不确定度的定义:

描述被测量值的分散性,与测量结果相联系的参数。(PD 6461-4:2004 计量学测量不确定度实践指南)

按照规范来决定合格——ISO 14253 检测规则

当测量时,只要结果落在公差带内就证明为合格,你可能认为那是一件简单的事,但用下述例子可以看出,并不是这样的情况。

设计者已经规定了一个孔的尺寸为 $50\text{mm}\pm 0.005\text{mm}$ (图79 的上部和底部线表示),第一个操作者用一个有溯

源性的千分尺测量尺寸为50.004mm，然后宣称此孔尺寸符合图纸；工长看到此结果并检查了千分尺的不确定度，千分尺的测量不确定度为0.003mm，然后应用此不确定度，他认识到实际的尺寸可能在50.001mm 和50.007mm 之间，他用不确定度为0.001mm 的内孔比较仪重新测量，测量结果为50.006mm，因而不合格。作为一般的规则，仪器设备的不确定度应当小于被测零件公差十分之一。注意：上述两种结果均在相应的不确定度内，作为第一种测量，测量值是小于所规定的上偏差，因此很难肯定零件的实际尺寸是在所规定的极限值之内还是之外。

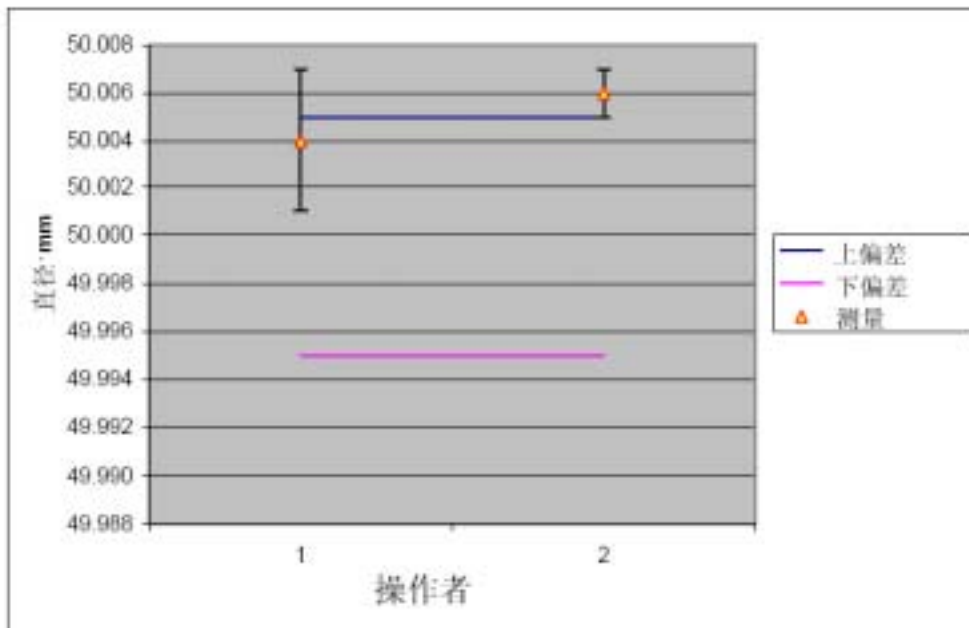


图79 两种结果和它们的不确定度

ISO 14253 推荐对于控制功能要求的尺寸及其检测设备应遵守下述规则：在设计阶段“符合规定”、“不符合规定”由上、下偏差间的区域来确定，或仅用上偏差或下偏差的一个边来确定（见图80 区域1 和2,线C） 当在制造和计量阶段，上、下偏差线均被加上了测量不确定度，由于不确定度，合格或不合格的范围均被减少（图80 线D）。若客户和供应商之间没有其他规则约定时，则应用这些规则，ISO14253 允许客户和供应商之间协议的其他规则，但是这些规则必须以文件形式存在。

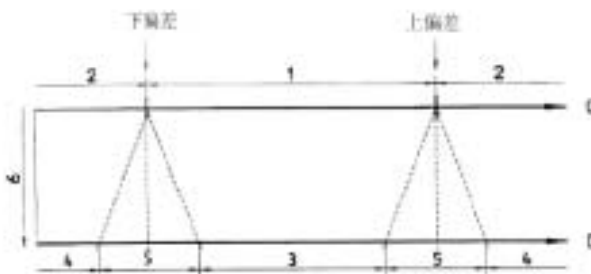


图80 测量不确定度

图上符号：

- C 设计/定义阶段
- D 检测阶段
- 1 规定公差带（设计时规定）
- 2 超出规定
- 3 合格区
- 4 不合格区

5 不确定区

6 所增加的测量不确定度,U

如图80所示，不确定度范围减少了合格和不合格区（摘自 BS EN ISO 14253-1:1999）

当考虑了不确定度后，若测量结果在规定的公差带内或测量设备在它规定的最大允许误差内（例如测量机的最大允许误差）则判为合格；或测量结果落在两边均减去了扩展的不确定度的公差带内，亦可以判为合格；合格区域是与上、下偏差及实际的扩展不确定度有关。

当考虑了不确定度后，若测量结果在规定的公差带外或测量设备在它规定的最大允许误差外，则判为不合格；或测量结果落在两边均加上了扩展的不确定度的公差带外，亦可以判为不合格；不合格区域是与上、下偏差及实际的扩展不确定度有关。

当考虑了不确定度后，测量的结果包含了一条规定的极限线（见图79 及图81 之1），则既不能作合格亦不能作不合格的判断。

要理解此规则背后的原则，就是在处理用户和供应商间关系时，不确定度总对要判断合格或不合格一方（即进行测量一方）不利，亦就是说供应商由于测量不确定度减小了合格区的公差，而用户则由于测量不确定度增加了合格区的公差。

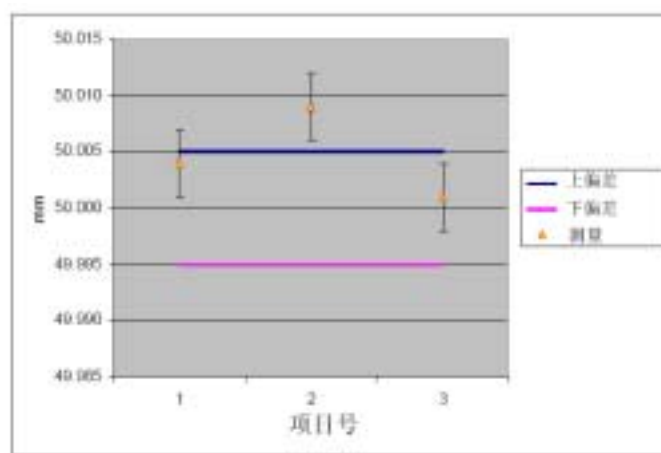


图81 合格或不合格

对应于图81 测量了三个项目，紫色线表示了下偏差，蓝色线表示了上偏差。测量项目1——对于规定公差既不能作合格亦不能作不合格的判断；测量项目2——判为不合格；测量项目3——判为合格。项目1 的情况，考虑了测量不确定度，测量结果跨骑在上偏差线上，那么就无法做出合格或不合格判断；项目2 的情况，考虑了测量不确定度，测量结果大于上偏差，可以做出不合格的判断；项目3 的情况，考虑了测量不确定度，测量结果大于下偏差而小于上偏差，可以做出合格的判断。

对于ISO 14253 所作的小结

ISO 14253 可以作如下的小结：

供应商当要证明产品合格时，可根据BS EN ISO14253 5.2⁹ 节的规定，估算测量不确定度。

用户当要证明产品不合格时，可根据BS EN ISO14253 5.3¹⁰ 节的规定，估算测量不确定度。

当评定测量结果时，不确定度总是不利于证明一方。

过去在确认合格与否时总是忽略了测量不确定度，因为认为它只是公差的1/10，这个观念将不再被接受。

第六章

已出版的标准

在此章内

. 已出版的标准清单

已出版的标准的清单

下面列出与本指南有关的标准清单，在英国可以在英国标准研究院得到（BSI）

ISO 1:2002 产品几何量规范（GPS）——产品几何量规范和检测的标准参考温度
ISO 2692:1998 技术图纸-形位公差-最大实体原则

ISO 406:1987 技术图纸-尺寸和角度公差

ISO 1101:2002 产品几何量规范（GPS）——形位公差-形状、方向、位置和跳动公差

ISO 1302:2002 产品几何量规范（GPS）——在技术产品文件中表面粗糙度的表示

ISO 14253-1:1998 产品几何量规范（GPS）——工件检测和检测设备——第一部分——根据规范判断合格或不合格的规则

ISO 14253-2:1999 产品几何量规范（GPS）——工件检测和检测设备——第二部分——在GPS 检测、设备校准或产品检测时不确定度估算指南

ISO 14253-3:2002 产品几何量规范（GPS）——工件检测和检测设备——第三部分——不确定度协议指南

BS EN ISO 14660-1:2000 产品几何量规范（GPS）.几何元素.通用名词及定义

BS EN ISO 14660-2:2000 产品几何量规范（GPS）.几何元素圆柱和圆锥提取中心线，提取中值表面，提取元素的局部尺寸

第七章 名词词汇

在此章内

名词词汇

名词词汇(解释略)

CAD (计算机辅助设计)
Cartesian co-ordinate system(笛卡尔坐标系,直角坐标系)
CMM (坐标测量机)
Co-ordinate system(坐标系)
Cylindrical co-ordinate system(圆柱坐标系)
Datum(基准)
Datum Feature(基准要素)
Engineering drawing(工程图)
Geometric characteristics(几何特征)
GPS (产品几何量规范)
LSL(下偏差)
MMC(最大实体条件)
Non-contact(非接触式)
Spherical co-ordinate system(球坐标系)
Thermal expansion(热膨胀)
Tolerance(公差)
Traceability(溯源性)
USL(上偏差)
Uncertainty(不确定度)
Uncertainty of measurement(测量不确定度)
Variation(变化量)
Value(值)
Virtual condition(虚拟条件)
Virtual size(虚拟尺寸)

第八章

附录

在此章内

附录A 与其他有用信息资源的联系

附录B 进一步举例

附录A 与其他有用信息资源的联系

A.1 国家和国际组织

A.1.1 国家物理实验室

国家物理实验室(NPL)在高精度测量技术的发展和應用方面处于世界领先地位。

作为英国国家标准实验室，NPL 支撑着国家测量系统 (NMS)来保证全英国测量的一致性及其溯源性，NPL 提供了独有的领域，即测量服务、合同研究、咨询和培训服务，其他的专门领域有设计、工程材料的特性分析和数学软件-特别是在测量和仪器方面的应用软件。

关于NPL 的计量服务、设备领域、研究工作情况更广泛的信息，可以通过www.npl.co.uk 网页或通过NPL 帮助热线咨询,电话：020 8943 6800, 传真：020 8943 6458, 电子邮件：enquiry@npl.co.uk

A.1.2 科学和技术国家研究院 (NIST)

NIST 是在美国与NPL 同地位的机构，NIST 的网址为www.nist.gov，它经常用pdf 格式登载与本指南相关的文件。

A.1.3 EUROMET

EUROMET 是欧盟各国家计量研究院间的合作组织，包括欧洲委员会、EFTA 和欧盟申请国，参与EUROMET 的目的是提高计量水平和服务以达到更高的效率。

EUROMET 的主要目标是：

- 鼓励在国家标准和测量方法等方面的合作；
- 优化资源的应用及服务；
- 改进测量设施并为所有成员所用。

更多信息请访问EUROMET 网页：www.euromet.ch

A.1.4 产品几何量规范研究院关于GPS 的信息请访问网址www.ifgps.com

A.2 网络

A.2.1 尺寸测量俱乐部(DMAC)

DMAC 是集中关注工业的俱乐部，此俱乐部由NPL 以DTI 的名义管理以及目的在于：

提供一个集中关注的平台，实现跨技术领域的互动，并在“工程测量程序”的规划下活动；使成员在自身及相关

的尺寸计量领域内学习最新的发展；为组织成员提供一个机构去鼓励及提供条件进行互动或交换概念；给成员提供一个机会去输入或影响将来的NMS 程序的规划。

进一步的信息请访问网址：www.npl.co.uk/npl/clubs/dmac

A.2.2 计量程序的软件支持(SSfM)

SSfM 是一个聚焦于计量的程序，是一个为满足按**NMS** 规划要求而制订的项目，**SSfM** 总的目标是抓住通用的事件，其中某些是计量中的问题，这些问题要通过软件工程的实践来建立，而另一些则要借助于数学的、软件工程或理论物理的优势来解决；这样，这个程序包括了计量、数学、软件和理论物理的工作，这些不同学科有很强的联系。

SSfM 俱乐部是针对用户及供应商的计量软件，指导编程的方向，它工作的着重点是传播软件发展的一般信息。进一步的信息请访问网址 www.npl.co.uk/ssfm

A.3 国家和国际标准

A.3.1 英国标准研究院(BSI)

BSI 开始作为一个工程师协会建立于1901 年,当初是为了标准化钢截面的类型和数量以使英国的制造厂家有更高的效率和竞争力。**BSI** 集团目前是世界上资格最老的、无可争议的、最享有声望的国家标准组织，而且是跻身于世界领先的社团及产品检测机构。

A.3.2 国际标准化组织(ISO)

国际标准化组织(ISO)是世界140个国家标准组织的联合体；**ISO** 的任务是在世界范围内推动标准化的发展及相关的活动，有利于国际货物及服务的交换，发展在知识、科学、技术及经济活动方面的合作。基于共识，**ISO** 的工作成果将被出版为国际标准。进一步的信息请访问www.iso.c

A.4 溯源性

溯源性在测量中是一种概念，是为了测量仪器或测量标准建立一个有效的校准。一般来说，应用溯源性时，最终以国家或国际的标准作为基准。

国家物理实验室(NPL)是英国的国家标准实验室，它作为国家测量系统(NMS)的核心; NMS 是最基础的组织，用来保证在全英国每一个物理测量的精度及一致性，溯源性把英国公司的测量直接和NPL 持有的国家标准联系起来。UKAS 是政府认可的唯一的组织，它可以鉴定检测和校准实验室，鉴定颁发许可证及测权的机构；作为一个非赢利机构， UKAS 给授权的能胜任的机构作示范，提供校准、检测、检查及颁发合格证的服务。进一步的信息请访问：www.ukas.com

A.5 国家测量伙伴(NMP)

国家测量伙伴计划是贸易部与工业部的首创行动，它的目标是建立英国国家测量系统的有组织的基础机构。这个计划的目的是：

- 增加在英国授权合格的校准机构；
- 增加对测量的合格判断的技巧
- 增加用户与专家的接触。

为了达到这个计划的目的：

- 建立UKAS 授权的校准实验室的网络；
- 向初入门者提供更多的测量忠告；
- 建立一个国家级的帮助热线；
- 管理滚动式的国家级的假期质量培训；
- 建立国家级的测量论坛去掌握和支持此计划。

国家测量伙伴开发了许多产品去帮助提升测量实践，包括事件历史、实践指南和自我评价检测清单。

详情请见网址www.nmpuk.co.uk

A.6 培训教程

在本指南提到的某些培训教程已经可以得到，培训也可以在本指南的作者之一 Keith Beven 那里进行。

Keith 经营Beven 培训和验收服务(BTAS)，他在工业和培训方面已有二十五年经验,BTAS 集中致力工业培训及验收服务，特别在国家级假期培训的工程产品及技术支持领域表现卓越。进行的方法可以是：

- 计量方面的在线与现场培训

GPS 培训

详情请见网址www.bevantraining.co.uk

A.6.1 E-培训

关于NPL 的 E-培训的详情请见网址：www.npl.co.uk/e-training/(图82)培训集中于坐标测量机(CMM)、探测及检测策略领域。特别注意已更新的资料、培训及验收的方法,这些特别适于推广去作为技术服务(NVQ)的关键知识。图83 是E-培训材料的示例。



图82 NPL 网站的E-培训



图83 模拟式探测系统模块的引言屏幕

A.7 进一步的读物

Bsch T, Harlow R, Thompson R L 1998 *Fundamentals of Dimensional Metrology, Third Edition*, (New York: Delmar Publishers)

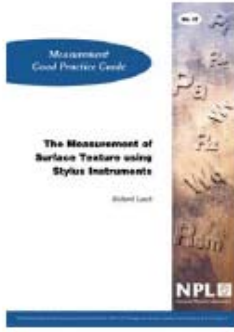
Humienny Z (editor) et al. 2001 *Geometrical Product Specifications-Course for Technical Universities*, (Warsaw: Warsaw University of Technology Printing House)

Green P 2005 *The Geometrical Tolerancing Desk Reference: Creating and Interpreting ISO Standard Technical Drawings*, (Newnes)

Leach R K 2001 *The Measurement of Surface texture using stylus instruments*
Measurement

good practice guide No.37(NPL) Bell S A 2001 *A beginner's guide to uncertainty in measurement*, Measurement good practice

guide No.11 Issue 2(NPL) PD 6461-4:2004 General metrology. Practical guide to measurement uncertainty PD 6461-3:1995 Guide to the expression of uncertainty in measurement(GUM)



附录 B 进一步的读物

B.1 最大实体条件示例

如图84 和图85所示， 举例说明了最大实体条件原理带来的好处， 图上显示了公差带如何被加大， 而孔的位置在不影响设计功能的前提下仍可以被接受。

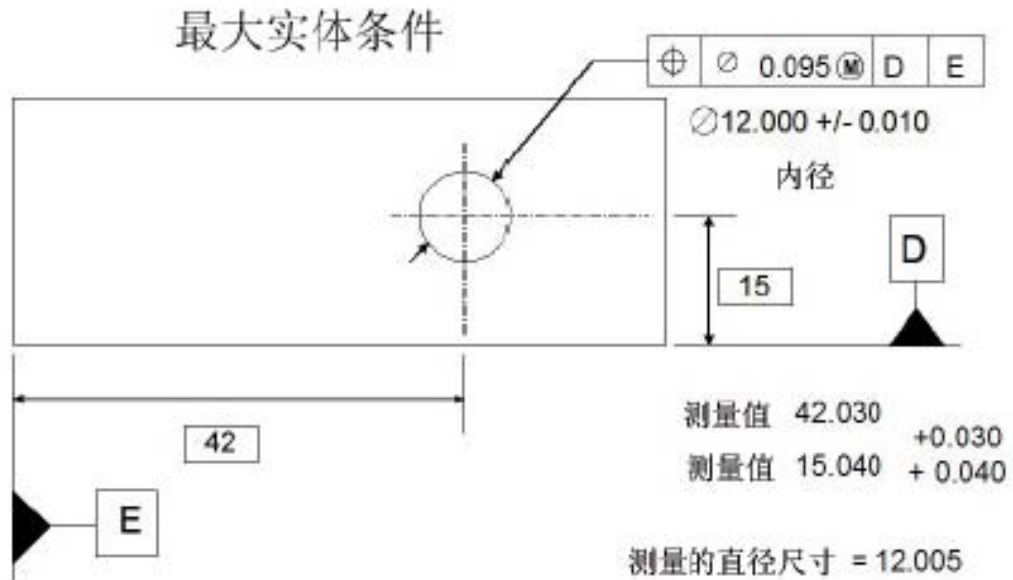


图84 图纸要求及实际得到的测量值

几何尺寸及公差

最大实体条件

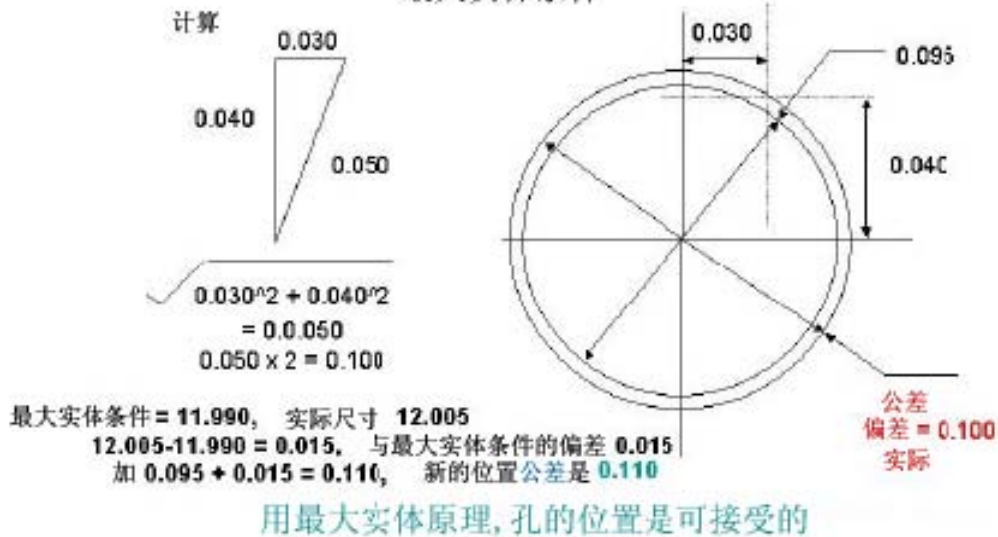


图85 应用最大实体条件前后孔位置的计算

B.2 统计过程控制

在第三章简述了某些SPC 的名词，此节稍进一步解释这些名词的意义。

B.2.1 平均值

平均值是读数的数学平均值，平均值是在对零件尺寸进一步作评价计算时用的，其数学表达式如下：

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + \dots + X_n}{n}$$

其意义为所有值之和除以所取值的个数，注意其中用的符号。

B2.2 范围

在测量时所得最大值和最小值之差

B.2.3 标准偏差

由测量结果经数学计算所得的变化量，变化量增加亦就是标准偏差增加，它受测量结果与平均值差的平方和的平方根的影响，它是评价测量结果可靠性的重要方法。它常用 σ 表示。

B.2.4 正态钟形曲线

有不同的方法来表达随机变量，最直观的是概率密度函数，概率密度函数表示了随机变量的每个值如何分布。

正态分布，亦称为高斯分布，是一个极为重要的概率分布，此类分布总的形状近似，但位置及比例参数不同(即平均值和标准偏差)；此分布图形经常称为正态钟形曲线，因为此分布曲线的形状像钟形(图86)平均值亦称为 X 轴，一个标准偏差分列在平均值的两边，在数学上表示包含了68%变化量，也称为 σ

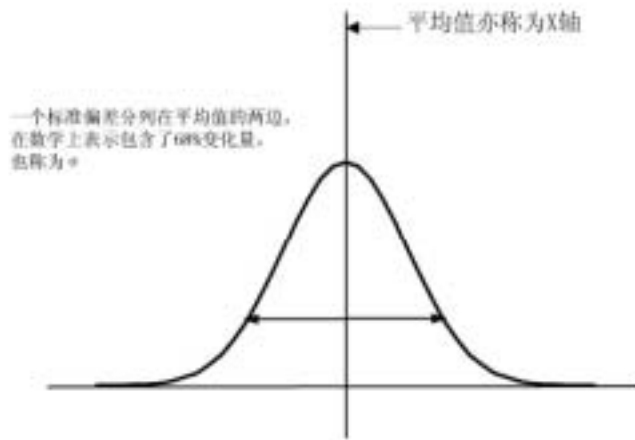


图86 正态或钟型曲线

正态曲线有几个值得注意的量值

密度函数以平均值对称分布

曲线下对平均值的偏差为一个标准偏差的对称区域为整个区域68.27%

偏差为二个标准偏差的对称区域为整个区域95.45%

偏差为三个标准偏差的对称区域为整个区域99.73%

B.2.5 直方图和控制图

直方图和控制图是表示结果的两种不同的图形，如图87所示的直方图含义类似于如图86所示的标准偏差曲线，而且进行了分级，它不仅与公差相关联，而且和能力系数相关联。控制图(图80)是能力已被证实时去控制过程用的。

控制极限定义了在这个过程中在尺寸超出了规定前对问题作出反应的界线，在某一段时间内均按此值画出图来。



图87 直方图



B2.6 能力系数

基于变量及公差来计算能力的方法（CP），而基于变量、公差及位置的方法（CPK），这些参数用来评价生产的能力。Cp=生产能力系数，是一种简单而直接表达生产能力的参数，Cpk 带偏置的生产能力系数，调节Cp 以适应评价非对称分布。Cpk 是一个偏置值用来衡量相对于生产的自然变化，生产对它的极限值如何接近，偏置越大，其超差可能性越小

B.2.7 6σ

用六σ的统计技术来改进生产过程，经典的观点是99.73% 的零件应当合格（3σ），但6σ的观点应当是99.99966% 的零件应当合格(6σ)，加工能力与每百万零件的不合格数关系见表2，6σ的方法是提供一种结构机制，用户由于被提供了近乎完美的产品和服务而感到满意。

表2 生产能力

生产能力(σ)	每百万不合格品的机会 (ppm)
2	308507
3	66807
4	6210
5	233
6	3.4

这6 σ 的概念用减少变化量的方法来进行改进。6 σ 的概念分成两个部分：

- 6 σ 设计。
- 6 σ 加工。

“6 σ 设计”要求新的产品采用6 σ 加工，作为6 σ 加工则要观察现有加工造成的变化量，并且从变化量中得到反馈信息，以减少变化量。这两种技术应并行使用，从厂内到供应链，都要从收集到的反馈信息，尽可能减少变化量。

¹¹ 6 σ 是Motorola 的注册商标