

Logix 齿轮的强度研究*

□李荣刚 □李剑峰 冯显英

摘要 分析 Logix 齿轮的接触强度,并利用有限元法对渐开线齿轮和 Logix 齿轮的弯曲强度作对比计算。

关键词: 齿轮 接触强度 弯曲强度 有限元法

中图分类号: TH132 **文献标识:** A **文章编号:** 1671—3133(2003)05—0007—03

Study on strength of logix gear

□Li Ronggang □Li Jianfeng, Feng Xianying

Abstract Contacting strength of Logix gear is analyzed briefly. Bending strength of involute gear and Logix gear has been calculated for comparison by means of FEM.

Key words: Gear Contacting strength Bending strength FEM

一、前言

20 世纪 80 年代后期,为了满足对齿轮高速重载和小型化的要求,日本学者小守勉用新的齿形理论,提出了名为 Logix 齿轮的新型齿轮。它的齿形由许多微段渐开线连接而成,采用对称的凸、凹啮合形式,并且使微段渐开线的结合点在啮合时的相对曲率为零。和渐开线齿轮相比,Logix 齿轮的承载能力和耐磨性显著提高,并且还克服了圆弧齿轮的缺点,能制成直齿轮。Logix 齿轮的另一优点是可以设计成少齿数齿轮,易于实现产品的小型化。

二、Logix 齿轮的接触强度计算

影响接触疲劳强度的因素很多,如接触应力、齿面接触速度、齿面润滑状态及材料的性能和热处理等。其中,接触应力是影响齿面接触疲劳强度的主要因素,其它因素的影响可以用各种系数加以修正。所以,计算接触应力是计算齿轮接触疲劳强度的主要内容。要使齿面在预期的使用寿命内不出现点蚀,强度条件是齿面上任何部位的计算接触应力 σ_H 都不大于轮齿的许用接触应力 $[\sigma_H]$,即 $\sigma_H \leq [\sigma_H]$ 。

齿面接触应力的计算公式是以两圆柱接触的接触应力公式为基础,结合齿轮的参数导出的。按赫兹公式,得接触应力为:

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{F_n}{\pi L \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right)} \frac{\rho_1 \pm \rho_2}{\rho_1 \rho_2}} \dots\dots (1)$$

式中 F_n ——法向压力(N)

L ——接触线长度(mm)

E_1, E_2 ——两圆柱体材料的弹性模量

μ_1, μ_2 ——两圆柱体材料的泊松比

ρ_1, ρ_2 ——两圆柱体的曲率半径

当圆柱体与平面接触时,则式(1)中的 $\rho_2 = \infty$;当圆柱体与凹圆柱体接触时, ρ_2 前取减号,否则取加号。由式(1)计算 Logix 齿轮的接触应力时,因 Logix 齿轮的啮合为凸、凹啮合方式,所以式(1)变为:

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{F_n}{\pi L \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right)} \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 \rho_2}} \dots\dots (2)$$

在 Logix 齿轮齿廓曲线上微段渐开线的接合点处(即 $N-P$ 点处), $\rho_1 = \rho_2$,代入式(2)可得 $\sigma_H = 0$ 。所以从理论上讲,在 $N-P$ 点处的接触应力为零,即在该点处实现了滚动摩擦。因此,若齿廓曲线上的接合点越多,则滚动摩擦点越多,Logix 齿轮的接触强度越高。当然在实际生产中,因制造、安装等各方面的误差和传动时的弹性变形等因素的影响,接触应力不可能为零,但与渐开线齿轮的凸、凹啮合形式相比,Logix 齿轮的凸、凹啮合形式显然要好得多。对于 Logix 齿轮齿廓曲线上非微段渐开线结合点处的接触应力的计算,由于比较复杂,可通过实验作进一步的研究。

三、Logix 齿轮的弯曲强度计算

齿轮轮齿的弯曲应力和变形计算大致有三种方法,即材料力学方法、弹性力学方法和数值方法。和传统的解析法相比,采用数值方法分析轮齿变形,可以处理复杂的边界条件及多种实际工况,能够求得更加接近实际情况的位移场,从而详细地描述其变形分布及综合刚度,为工程应用提供大量的重要数据。工程中

* 国家自然科学基金资助项目(E59905018)

试验研究

的数值方法通常包括有限差分法、有限元法、数学规划法、变分方法以及边界元法。在齿轮传动应力应变分析中有限元法应用最广,本文将用有限元法来分析 Logix 齿轮的齿根弯曲强度。

轮齿弹性有限元分析早已广泛用于确定齿根弯曲应力,并用于校正齿根圆角应力集中系数。目前其应用范围不仅已扩大到应力应变分析的各个方面,而且轮齿弹性有限元分析也已成为轮齿综合刚度分析、理想修形曲线及齿形设计的基础。这种分析方法和传统的计算方法、实验方法相比,具有使用方便、求解快速、修改模型方便、计算精度较高等一系列优点。

在用有限元法计算直齿轮时,外载荷作用于与端面平行的平面内,假设沿齿厚方向载荷均匀分布,或齿宽较小时,可简化为平面应力问题进行处理。

当对轮齿进行应力分析时,当然最好是对整个齿轮划分网格,建立计算模型。但由于一个齿轮齿数很多,这样即使受载轮齿应力集中部位网格划分不很密,也会使整个齿轮的单元数和节点数明显增加,计算时间和整个工作量都会明显增加。而整个齿轮中实际只有 1~2 个轮齿受载,因此只有齿轮的一小部分区域产生应力应变,这就为缩小求解区域提供了条件。可以选取恰当的边界,以便在保证求解精度的前提下尽量使问题简化。

当一个轮齿受载时,和该轮齿相连的部分也有变形,一般认为,当离开齿根的深度达到 $1.5m$ (m 为齿轮的模数) 以上时,基本上不再受到变形的影响,可近似认为实际位移为零。另外两侧齿向中点处的位移很小,可忽略不计。这样就划定了用有限元法计算轮齿弯曲强度的求解范围和零位移约束边界。因为有限元法规定只在节点处受到约束,所以在零位移边界的各节点处安置一个铰支座,使边界位移为零。图 1 所示为边界约束条件示意图。

图 1 中, $AB = CD = 1.5m$, $BC = 3m$ 三个边界均为刚性约束。

在用有限元法计算时,可选择合适的计算机通用程序,或自行编制计算机程序。本文应用通用有限元分析软件 ANSYS 来对 Logix 齿轮的齿根弯曲应力进行分析。

在此以某减速器中使用的一对齿轮为例来比较渐开线齿轮和 Logix 齿轮的齿根弯曲应力。在该减速器中使用的一对

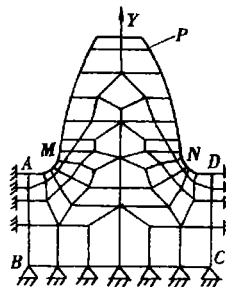


图 1 计算齿轮弯曲应力时的边界约束条件

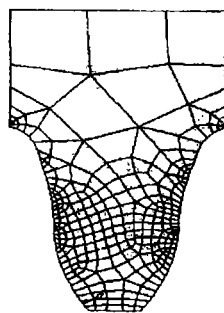


图 2 渐开线齿轮的网格划分

齿轮,小轮齿数为 20,大轮齿数为 60,小轮转速为 $n_1 = 1000\text{r/min}$,名义功率为 20kW。两齿轮均为 45 钢制造,材料的弹性模量 $E = 2.14 \times 10^5\text{MPa}$,泊松比 $\mu = 0.3$,模数 m 为 5mm。下面用 ANSYS 对渐开线齿轮传动和 Logix 齿轮传动时的小轮的齿根弯曲应力进行分析比较。

计算渐开线齿轮的弯曲应力主要步骤如下:

1. 将渐开线齿轮的齿形数据输入到 ANSYS 中,产生几何模型。

2. 确定材料的性质。此处齿轮材料为 45 钢,其弹性模量 $E = 2.14 \times 10^5\text{MPa}$,泊松比 $\mu = 0.3$ 。

3. 定义单元的类型及选项。单元类型的选择对计算精度和计算时间有很大的影响,常用的二维单元主要有以下几种:三角形 3 节点单元是一种线性位移模式单元,是一种常应变单元。其特点是适应性强,可以方便地模拟曲线边界,不会出现单元畸变,求解所需时间较短,但缺点是计算精度较低,在应力集中部位误差较大。三角形 6 节点单元采用二次多项式的位移模式,其应力应变不再是常数,而是线性分布,从而提高了计算精度。矩形单元是一种双线性单元,即位移模式中除包含 x 和 y 项以外,还包含 xy 项,从而使计算精度高于三角形单元,但缺点是模拟曲线边界的灵活性差。8 节点任意四边形等参单元采用二次位移模式,即某一坐标为常数时,位移是另一坐标的二次函数。它可以模拟曲线边界,计算精度较高,所需单元数和节点数较少,边中节点可自动生成,减少了输入信息准备工作量。在此,经过全面的比较以后,选择了 8 节点等参单元。

4. 划分网格。ANSYS 程序具有较好的前处理能力,网格的划分可自动生成,同时也可以通过主动干预来控制生成的单元的数目和尺寸。

5. 根据边界条件在几何模型上加上约束和负载,并进行计算。齿轮在传动时所传递的力矩为: $T_1 = 9.55 \times 10^6 P / n_1 = 19.1 \times 10^4 \text{N} \cdot \text{mm}$,所传递的力为: $F = T_1 / r_A = 3473\text{N}$ 。若齿宽 $b = 50\text{mm}$,则单位齿宽上的法向载荷为: $p = 69.5 \text{N/mm}$ 。

6. 对计算结果进行后处理。ANSYS 本身具有较强的后处理功能,可以方便地读入计算结果,画出轮齿的变形图和应力分布图。

图 2 所示为渐开线齿轮轮齿

的网格划分图。图中单元总数为 204 个,节点总数为 701 个。图 3 所示为渐开线齿轮轮齿的应力分布图,计算所得最大拉应力为 48.76MPa,最大压应力为 59.85MPa 分别位于第 45 节点和 15 节点处(图中标出)。其最大应力发生在齿根的过渡曲线处。

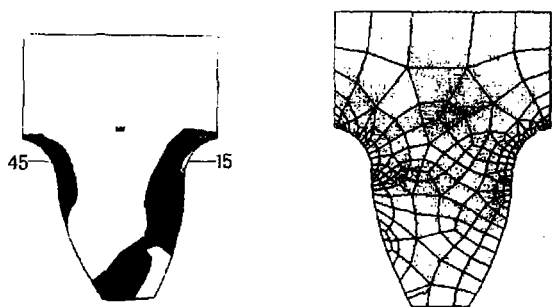


图 3 渐开线齿轮的应力分布 图 4 Logix 齿轮的网格划分

相同参数的 Logix 齿轮轮齿的弯曲应力的计算过程同渐开线齿轮的计算过程基本相同。其主要的计算结果如下:网格划分后单元总数为 281 个,节点总数为 950 个。最大拉应力为 31.33MPa,其最大压应力为 46.11MPa,分别位于第 69 节点和第 7 节点处(图中标出)。Logix 齿轮轮齿的网格划分如图 4 所示,其轮齿弯曲应力的分布如图 5 所示。

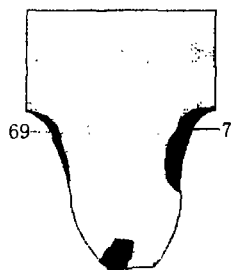


图 5 Logix 齿轮轮齿的应力分布

比较在相同负载下渐开线齿轮和 Logix 齿轮的齿根弯曲应力可知,Logix 齿轮的弯曲强度要高于相同参

数的渐开线齿轮的弯曲强度。而且,在生成 Logix 齿轮的几何模型时所输入的 $N-P$ 点的数据越多,也就是 Logix 齿轮的齿形越精确,则计算所得的齿根弯曲应力值越小,即齿根弯曲强度越高。

四、结论

1. 在 Logix 齿轮齿廓上,微段渐开线的接合点处的理论接触应力为零,即在那些点上实现了滚动摩擦。尽管齿轮的实际接触应力不可能为零,但与渐开线齿轮相比,Logix 齿轮的齿面接触疲劳强度有了显著提高。

2. 利用有限元法对相同工况下渐开线齿轮和 Logix 齿轮的齿根弯曲强度做了对比计算,得到的结果表明,Logix 齿轮的弯曲应力降低,弯曲强度提高。

参 考 文 献

- 1 Komori. T and Nagata. S. A new gear profile of relative curvature being zero at contact points. Proceeding of International Conference on Gearing. China, CMES, 1988(1)
- 2 Komori. T, Ariga. Y and Nagata. S. A new gear profile having zero relative curvature at many contact points. Transactions of the ASME, 1990, 12(3)
- 3 邱宣怀,郭可谦. 机械设计. 北京:高等教育出版社,1989
- 4 李润方. 齿轮传动的刚度分析和修形方法. 重庆大学出版社,1998

作者通讯地址:山东轻工业学院轻化与环境工程学院(济南 250100)

山东大学机械工程学院(济南 250061)

收稿日期:20030128

欢迎订阅《中国模具设计大典》

由中国机械工程学会、《中国模具设计大典》编委会邀请众多著名模具专家、教授,历时三年,编撰的大型模具技术工具书——《中国模具设计大典》已出版发行。

《中国模具设计大典》由现代模具设计基础、轻工模具设计、冲压模具设计、锻模与粉末冶金模设计、铸造工艺装备与压铸模设计等 5 卷 29 篇,共约 1300 万字构成。

《中国模具设计大典》具有如下特点:

《中国模具设计大典》(第 1 卷)——现代模具设计基础:共 7 篇,包括模具计算机辅助设计,材料成形过程的数值模拟,金属塑性成形过程优化设计方法,模具计算机辅助制造,快速成形与快速制模,模具材料及热处理,模具设计通用基础标准等内容。定价:206.90 元。

《中国模具设计大典》(第 2 卷)——轻工模具设计:共 10 篇,包括塑料模设计基础,注射模设计,压模与传递模设计,挤塑模设计,中空吹塑与热成形模具设计,塑料模标准件,橡胶模设计,铝型材挤压模设计,玻璃模设计,陶瓷模设计等内容。定价:312.90 元。

《中国模具设计大典》(第 3 卷)——冲压模具设计:共 5 篇,包括冲压模具设计基础,冲压工艺设计,冲压模具结构设计,冲压自动送料与冲压安全技术,冲压模具标准件等内容。定价:209.00 元。

《中国模具设计大典》(第 4 卷)——锻模与粉末冶金模设计:共 4 篇,包括锻模设计基础,普通锻模设计,特种锻模设计,粉末冶金与粉末锻造模具设计等内容。定价:258.30 元。

《中国模具设计大典》(第 5 卷)——铸造工艺装备与压铸模设计:共 3 篇,包括砂型铸造工艺装备设计,消失模铸造工艺装备设计,压铸模设计等内容。定价:168.00 元。

请购书者将书款(已含邮费)由邮局汇至:北京市右安门内大街 10 号(邮编 100054),《现代制造工程》杂志社发行组收。

电话:(010)83167135,63012618,传真:(010)83167135,务请写清所购书名、册数及购书者姓名、详细地址、邮编。