

文章编号: 1000-6893(2002)03-0226-05

基于传动误差设计的弧齿锥齿轮啮合分析

方宗德, 刘涛, 邓效忠

(西北工业大学 机械系, 陕西 西安 710072)

TOOTH CONTACT ANALYSIS OF SPIRAL BEVEL GEARS BASED ON THE DESIGN OF TRANSMISSION ERROR

FANG Zong-de, LIU Tao, DENG Xiaozhong

(Department of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

摘要: 提出了基于传动误差设计的弧齿锥齿轮啮合质量控制的新概念。首先分析了传动误差所反映的弧齿锥齿轮传动的动态特性、强度性能等众多信息,包括设计重合度、实际重合度、振动激励、边缘接触、载荷齿间分配和齿面印痕相对于误差的敏感性。在此基础上,提出了高重合度传动误差曲线的设计,通过齿面接触路径方向的倾斜,重合度能够高至2.0~3.0,有效地改善了齿轮动态特性,提高了强度。进一步又提出了几何传动误差曲线幅值的设计,结合承载传动误差,使齿轮在不同载荷条件下既能具有高的重合度,又保证了相对低的误差敏感性。其后提出的四阶传动误差曲线的设计,除上述优点外,还改进了齿轮的轻载振动和噪声。最后论述了基于传动误差设计的弧齿锥齿轮的相应制造方法。该研究为高性能弧齿锥齿轮的开发开辟了途径。

关键词: 弧齿锥齿轮; 传动误差; 重合度

中图分类号: V261

文献标识码: A

Abstract: The traditional design, manufacturing and examination of spiral bevel gears depend frequently on the position and size of the contact pattern on tooth surfaces. In this paper, a new designing concept based on the transmission error is presented. Firstly, the information on dynamic characteristics and strength behavior reported by the transmission error, such as designed contact ratio, real contact ratio, vibrating excitation, load share between tooth pairs and sensitivity of the contact pattern to the error, is analyzed. Based on the analysis mentioned above, three types of designs on transmission errors are presented. They are: (1) A parabolic transmission error curve with a designed width between two ends, which is obtained by inclining the direction of the contact path on the tooth surface. It results in a contact ratio of 2.0-3.0 and the improved dynamics and strength behavior. (2) A parabolic transmission error curve with the designed amplitude, which is obtained by controlling the relative curvature of tooth surfaces along contact path. It results in a low sensitivity of contact pattern to error, as well as a high contact ratio under operating and maximum loads. (3) A fourth order transmission error curve with the designed width between two ends and amplitude, which can be obtained by CNC machine. It results in an improved dynamic behavior under light load, as well as the superiorities mentioned above. An approach to designing the spiral bevel gear drives with high performance is advanced.

Key words: spiral bevel gear; transmission error; contact ratio

弧齿锥齿轮广泛用于机械传动中,如航空动力传输中无偏置距角度传动,汽车动力系统中偏置距(即准双曲面齿轮)传动。由于弧齿锥齿轮齿面几何拓扑结构非常复杂,加之传统设计方法及制造手段的落后,其啮合质量的控制非常困难。

传统齿轮制造业中,包括航空齿轮制造,最常

见的弧齿锥齿轮设计、制造及检验方法,基本上依赖于齿面印痕的位置及尺寸,原因是印痕控制比较直观,设计、制造和检验也相对容易。齿面印痕反映了部份啮合信息,主要是部分强度状况,但对动态性能的反映是远远不够的。因此随着技术的发展与对齿轮转速、载荷的要求提高,传动过程中的振动噪声问题已日益成为影响产品质量的瓶颈问题。

相对于传统的基于齿面印痕的弧齿锥齿轮设计与制造技术,作者提出了基于传动误差的弧齿

收稿日期: 2001-06-18; 修订日期: 2001-09-20

基金项目: 航空科学基金(00C53017)、国家自然科学基金资助项目(50175090)

文章网址: <http://www.hkxb.net.cn/hkxb/2002/03/0026/>



锥齿轮设计方法, 借助于加工设计、啮合仿真等精确计算方法及先进的计算机技术, 全面控制齿轮在各种载荷下的动、静态啮合性能。

传动误差对于齿轮动态特性的影响, 已为前人的大量研究成果所证实^[1,2]。弧齿锥齿轮的传动误差, 更是包括了动态性能和强度性能等大量信息。本文中所谓“基于传动误差的设计”是指以传动误差控制为主, 综合传动误差与齿面啮合印痕的设计思路。事实上, 传动误差与齿面印痕之间也有深刻的内在联系。本文通过揭示和运用上述信息、关系, 借助于现代设计方法和手段, 进行了高质量弧齿锥齿轮传动设计的研究。

1 弧齿锥齿轮传动的传动(运动)误差

1.1 定义

理想的齿轮传动是共轭的, 即当小(主动)轮转过一个角度时, 大(被动)齿轮也转过相应角度, 角度比为两轮齿数之反比。但实际上由于多种因素的影响, 此规律不能严格成立, 因此, 定义传动误差为: 当小轮转过一角度时, 大轮于理想位置之偏离, 即

$$\delta\Phi_2 = (\Phi_2 - \Phi_2^{(0)}) - \frac{z_1}{z_2} (\Phi_1 - \Phi_1^{(0)}) \quad (1)$$

式中: Φ_1 , Φ_2 为小轮和大轮的实际转角; $\Phi_1^{(0)}$, $\Phi_2^{(0)}$ 为两轮初始位置。

1.2 产生传动误差的因素

(1) 弧齿锥齿轮的准共轭特性 理论上, 弧齿锥齿轮在参考点上是非共轭的, 在其余啮合位置是非共轭的, 因而, 在除参考点外其它位置均存在传动误差。此种非共轭特性是齿面展成机理决定的, 也为我们提供了通过加工设计进而控制传动误差的可能性。

(2) 变形 在齿轮的转矩传递过程中, 齿轮及其支撑系统的变形使齿轮偏离理论位置, 产生附加的传动误差。精确计算这部分传动误差, 是传动误差设计方法的基础和前提条件。

(3) 制造误差 加工过程中机床、刀具、轮坯等各方面产生的误差, 必然反映到齿轮转角上, 产生传动误差。此部分误差一般具有随机性, 只能通过提高加工精度来减小, 本文的设计方法中暂不予考虑。

1.3 传动误差反映的啮合信息

本文的分析以一对无偏置距的航空弧齿锥齿

轮传动为例。图1为这对齿轮的一种设计及啮合

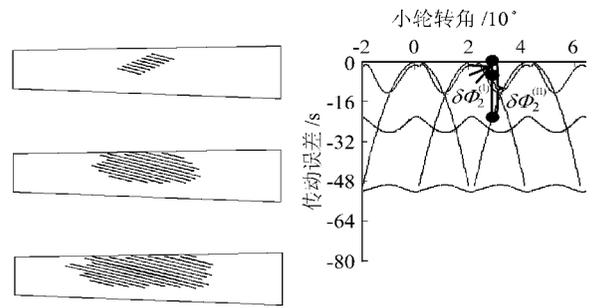


图1 不同载荷下的传动误差和接触印痕

Fig. 1 Transmission errors and contact patterns under different loads

分析, 右图是传动误差曲线, 最上是无载时的传动误差, 由齿面几何决定, 下部是由小到大3种载荷下的传动误差, 左图是这三种载荷下的齿面印痕, 图中横坐标是小轮转角。传动误差反映的重要信息主要有:

(1) 动态性能 主要由工作载荷时的传动误差曲线波动幅值决定, 波动幅值愈大, 振动愈大。承载传动误差的幅值与几何传动误差有关, 当其设计幅值较大时, 轻载传动误差波动大, 而重载时变形补偿作用使波动减小; 反之, 当设计幅值较小时, 轻载振动小, 重载时传动误差波动增大。

(2) 重合度 重合度有设计重合度和实际重合度, 设计重合度由设计几何传动误差曲线下端宽度与啮合周期之比决定, 由图1可见, 这时齿轮的设计传动误差接近20。实际重合度由承载传动误差在纵坐标上的平均位置决定, 即在此位置几何传动误差宽度与啮合周期之比, 由图1知, 3种载荷下的实际重合度分别为1.0, 1.5和2.0。当承载传动误差超出几何传动误差下端时, 出现边缘接触, 即齿面与相啮合齿的齿顶刃接触, 产生振动与强度问题, 因此设计重合度也称最大重合度。重合度对齿轮动态性能和强度性能有重要影响。

(3) 载荷分配 在图1中, 几何传动误差相邻2条曲线上同一横坐标处的 $\delta\Phi_2^{(1)}$ 和 $\delta\Phi_2^{(2)}$, 反映了可能同时接触的两对齿的初始相对位置, 由于 $\delta\Phi_2^{(1)} < \delta\Phi_2^{(2)}$, 因此第1对齿先接触, 若载荷足够大, 使第1对齿的变形补偿了第2对齿间隙, 则第2对也开始接触, 但载荷在两对齿间的分配既取决于齿对刚度(变形), 也取决于初始间距 $\delta\Phi_2$ 。载荷分配对强度性能有重要作用, 也影响到瞬时啮合刚度的变化, 即齿轮的动态性能。

(4) 齿面接触特性 传动误差曲线的形状,

幅值与齿面接触特性及印痕有密切的内在关系。当几何传动误差曲线向上弯曲或呈S形时,齿面产生桥式接触,伴随严重的振动;各齿对传动误差曲线不连续时,产生边缘接触。因此,理想的几何传动误差曲线应向下弯曲,齿对间连续且两下端尽量对称,此时产生边缘接触的可能性相对小。传统上理想的几何传动误差曲线呈抛物线形状,它的幅值反映了接触印痕在接触路径方向上相对于制造和安装误差的敏感性。图2所示是两种不同

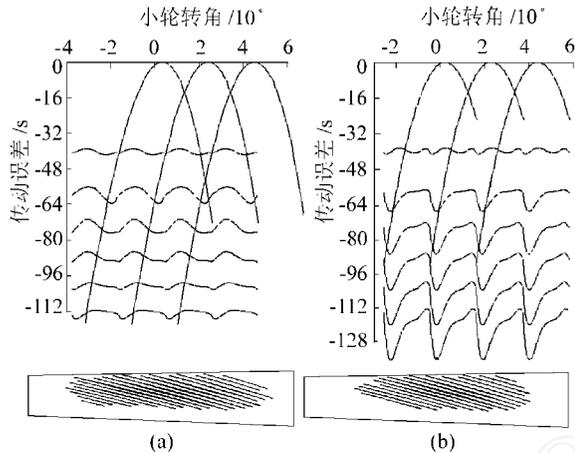


图2 啮合质量相对于误差的敏感性

Fig 2 Sensitivity of meshing behavior to errors

的传动误差设计,在相同的安装误差条件下的接触分析结果。由图可见,传动误差及印痕均因误差而发生变化,几何传动误差曲线明显不对称。下面是6种载荷的传动误差。当几何传动误差的幅值较小时,在较轻载荷下即开始出现边缘接触;反

之,对于大幅值传动误差设计,载荷较大时才出现边缘接触,因此对于制造、安装误差的敏感性低。

2 齿轮传动误差的设计

2.1 高重合度设计

齿轮重合度于其动态性能、强度性能有显著的影响^[3,4]。作者利用弧齿锥齿轮齿面拓扑结构的可控性,改变齿面接触路径方向使之倾斜,增加几何传动误差曲线的横向宽度,获得高重合度。图3所示是重合度分别为(a)1.38、(b)2.0、(c)3.0的3种设计,图中上部是几何传动误差与承载传动误差,中部是接触路径与齿面涂色印痕,下部是齿面载荷分布。由图可见,通过增加接触路径方向的倾斜,获得了高至3.0的设计重合度。从图3(a)到图3(c),承载传动误差的波动幅值减小。此时在理想条件下,齿面载荷更趋均匀,同时承载齿对也增加,动态与强度性能都得到提高。

2.2 传动误差幅值设计

通过增大接触路径倾斜来获得高重合度的方法,使得接触路径几乎横贯过整个齿面(见图3(c))。因此当制造和安装误差较大时,接触区可能移至大端或小端,造成强度问题。本文1.3节中已分析了传动误差幅值对误差敏感性的影响,因此控制传动误差幅值是保证齿面接触区位置的一条

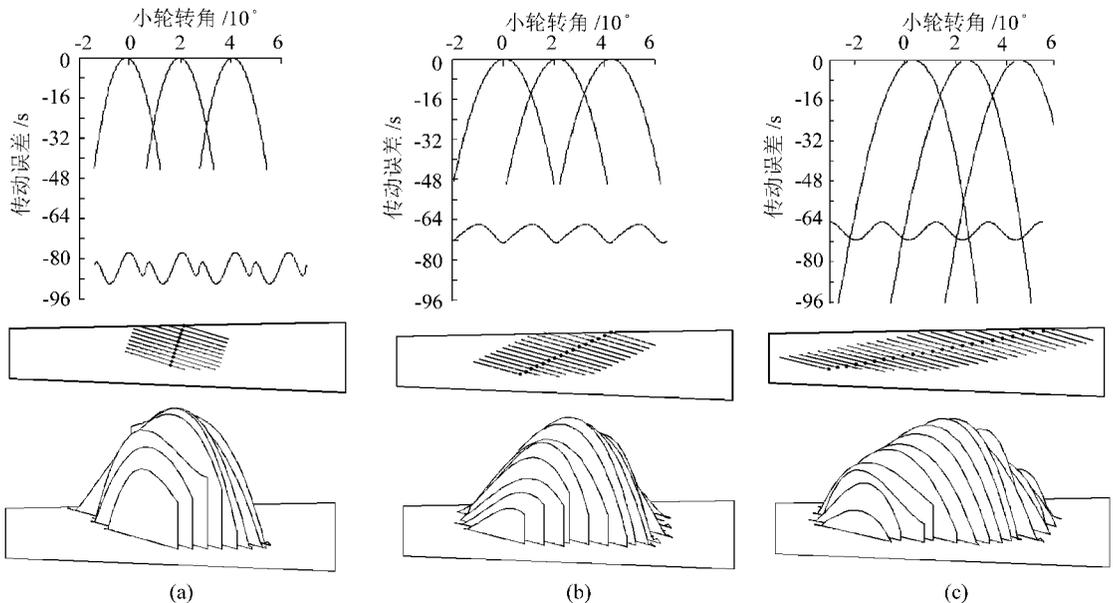


图3 不同重合度的传动误差设计

Fig 3 Transmission error designs with different contact ratios

途径。图 4 所示,是具有较小幅值(图 4(a))和较大幅值(图 4(b))的两种传动误差设计,其最大重合度都近似为 3。图中上部是几何传动误差和 6 种载荷下的传动误差(6 条曲线中第 3 条为工作载荷,第 6 条为最大载荷)。图中部是工作载荷下的齿面印痕,下部是工作载荷下的载荷分配系数(即一对齿从进入到退出啮合各位置上的承载比例)。由图 4 可见,各承载传动误差的波动幅值(a)比(b)略小,最大载荷也是(a)略小于(b)。由于(b)的传动误差幅值较大,沿接触路径相对曲率增大,载荷向齿中部集中,接触区略窄于(a),对于误差敏感性也相应降低。同时,图中承载传动误差的水平位置反映了在工作载荷时,(a)已出现较为明显的边缘接触,因此(b)的设计合理性是显而易见的。

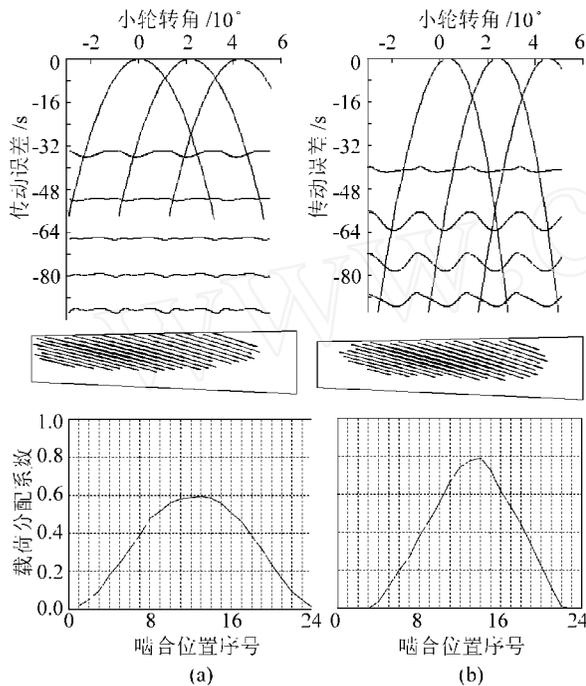


图 4 不同传动误差幅值的设计

Fig. 4 Designs of different transmission error amplitudes

2.3 高阶传动误差曲线设计

降低误差敏感性须增大几何传动误差的幅值,几何传动误差最大波动幅值取决于齿对转换处,即两条几何传动误差曲线交点处的幅值,理论上在空载条件下齿轮副按此连续曲线规律运动。由于此波动幅值的增大,齿轮在轻载时动态性能不良,易产生大的振动,甚至脱啮,而某些齿轮如汽车齿轮,正是规定在轻载下进行噪声测试。同时,最新的研究提出两条传动误差曲线交点处两切线的夹角也会影响振动和冲击,夹角减小则冲

击增大,夹角至 180 则齿对平滑过渡,为此,一种高阶传动误差曲线形状被提出^[5]。图 5 所示,是抛物线状(图 5(a))和四次曲线形状(图 5(b))的 2

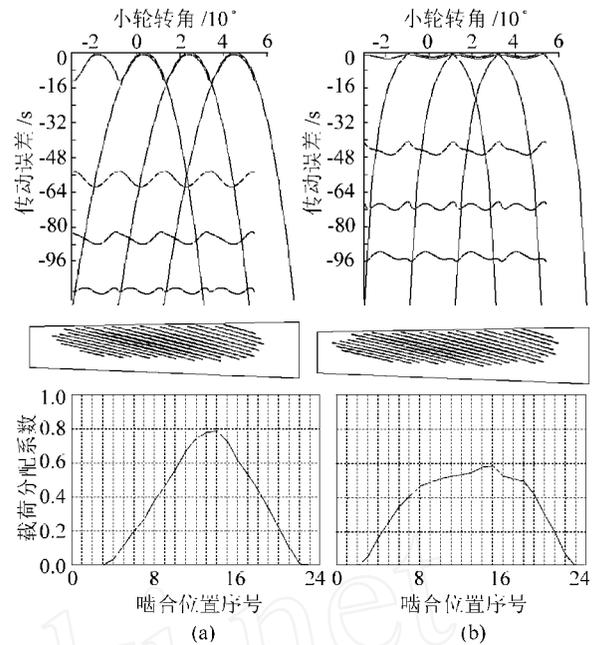


图 5 高阶传动误差曲线设计

Fig. 5 Design of high order transmission error curve

种传动误差设计。图中上部是几何传动误差与轻载、工作载荷和最大载荷作用下的传动误差,图中中、下部是工作载荷下的齿面印痕和载荷分配系数。由图 5 可见,在几何传动误差交点处,(b)的幅值与夹角显著优于(a),因此,轻载下的传动误差波动幅值也明显减小,轻载动态特性得到改善。此外,在无误差时齿面接触区基本相同,但由于四阶曲线中部平坦,因此(b)的负荷较小,但在两端部传动误差曲线急剧下降,说明即使在误差条件下,接触区也不致移至太靠近小端或大端。因此,四阶传动误差曲线在动态及强度性能上均有优越之处。

3 传动误差曲线的加工实现

传动误差的形状、幅值取决于齿面几何,而弧齿锥齿轮的齿面几何特性完全决定于加工。笔者所研制的决定加工参数和齿面几何关系的局部综合、TCA (Tooth Contact Analysis) 和 LTCA (Loaded Tooth Contact Analysis) 软件已经能够相当精确地进行齿面展成、啮合分析、承载分析、应力分析等数值仿真,使设计得到的传动误差和其它啮合性能直接反映到齿轮加工参数的选择上来,并最终得到实现。

由第 1.3 节的分析知,传动误差曲线的设计

有许多相互矛盾的因素须要慎重抉择,有许多影响因素如载荷、误差、安装条件等需要考虑,因此,这一设计事实上是一多目标、多约束的非线性优化过程。为此,将上述设计软件,嵌套在一优化迭代过程中,组成具有反馈的且有人机对话功能的计算机辅助设计系统,来获得最优的传动误差设计。

还要指出的是,高阶传动误差曲线的加工,在计算机控制的 Free-Form 机床上已完全能实现。在传统机床上的实现,将进行进一步的研究。

4 结论

(1) 提出了基于传动误差设计的弧齿锥齿轮啮合质量控制的新概念。

(2) 分析了传动误差曲线所反映的齿轮动态性能和强度性能等众多信息。

(3) 进行了有典型意义的几种传动误差曲线的设计,可获得高质量的弧齿锥齿轮传动。

(4) 论述了弧齿锥齿轮传动误差设计加工实现的可能性和方法。

参 考 文 献

- [1] Litvin F L. Local synthesis and tooth contact analysis of face milled spiral bevel gears[R]. NASA, CR4342, 1990 23- 48
- [2] Smith J D. 齿轮振动与噪声[M]. 吴佩江, 等译. 北京: 中国计量出版社, 1989. 87- 100
(Smith J D. Gears and their vibration[M]. Wu P J, et al translated. Beijing: Chinses Measuring Publishing House, 1989. 87- 100.)

- [3] Falah B. Experimented and numerical investigation of the meshing cycle and contact ratio in spiral bevel gears[J]. Mech Mach Theory, 1998, 33(1/2): 21- 38
- [4] 方宗德. 高速弧齿锥齿轮动态质量优化[J]. 航空学报, 2001, 22(1): 15- 18
(Fang Z D. Optimization of dynamic meshing behavior of high speed spiral bevel gears[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2001, 22(1): 15- 18.)
- [5] Stadtfeld H J. The ultimate motion graph[J]. ASME J of Mechanical Design, 2000, 122(3): 317- 322

作者简介:



方宗德(1948-) 男,西北工业大学教授、博士生导师,于1982,1984,1986年分别获清华大学学士、硕士、博士学位,1994年~1995年在美国 Illinois U. 和 Michigan U. 作高级访问学者。在国内外发表学术论文80余篇,获国家和省部级奖励8项。

联系电话: 029-8493958

E-mail: fauto@nwpu.edu.cn



刘涛(1965-) 男,西北工业大学机械制造及自动化学科在校博士生。主要研究领域: 齿轮传动的啮合分析与信息处理。



邓效忠(1957-) 男,洛阳工学院机电工程系教授,西北工业大学博士生。研究成果曾获得年国家科技进步三等奖,发表论文集15篇。主要研究方向: 先进传动件的设计与制造。

(责任编辑: 蔡 斐)