

文章编号: 1000-8055(2010)08-1888-06

弧齿锥齿轮传动误差曲线优化的半变性法

刘光磊¹, 樊红卫¹, 谷霁红¹, 江平²

(1. 西北工业大学 机电学院, 西安 710072;

2. 中国航空工业集团公司 中国航空动力机械研究所, 株洲 412002)

摘 要: 以预置的传动误差曲线为目标, 提出了弧齿锥齿轮传动误差曲线优化的半变性法。以局部综合原理为基础, 先初步确定小轮加工参数并进行齿面接触分析(TCA), 将结果曲线与预置曲线对比后, 再微调切削速比和三阶变性系数以缩小两者之间的差距。采用半变性法对某航空弧齿锥齿轮副的传动误差曲线进行了优化, 研究发现: 切削速比与传动误差曲线开口大小有关, 三阶变性系数与传动误差曲线整体歪斜程度有关。优化后的传动误差曲线与预置曲线吻合度较好, 且接触印痕满足设计要求, 证明了半变性法的有效性。

关 键 词: 弧齿锥齿轮; 传动误差曲线; 优化; 半变性法; 局部综合; 切削速比; 三阶变性系数
中图分类号: TH132.4 **文献标识码:** A

Half-modified roll for the optimization of transmission error function of spiral bevel gears

LIU Guang-lei¹, FAN Hong-wei¹, GU Ji-hong¹, JIANG Ping²

(1. School of Mechanical Engineering,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. China Aviation Powerplant Research Institute,

Aviation Industry Corporation of China, Zhuzhou 412002, China)

Abstract: A half-modified roll (HMR) method for the optimization of transmission error function of spiral bevel gears was proposed. Based on local synthesis, the pinion machine tool settings were firstly obtained, then tooth contact analysis (TCA) was carried out and a contrast was made between the predesigned transmission error function with that of TCA. In order to narrow the differences between these two transmission error functions, the cutting ratio and the third order modified roll coefficient were slightly adjusted. By applying HMR to optimize the transmission error function of a pair of spiral bevel gears in aviation, the researches find that the cutting ratio of the pinion has some influence on the magnitude of transmission error function, and the third order modified roll coefficient has influences on the whole deflection of transmission error function. The optimized transmission error function agrees very well with the predesigned curve, and the contact pattern meets the design requirement, so the validity of HMR is proved.

Key words: spiral bevel gears; transmission error function; optimization; half-modified roll (HMR); local synthesis; cutting ratio; third order modified roll coefficient

收稿日期: 2009-06-24; 修订日期: 2009-08-15

基金项目: 航空推进技术验证计划

作者简介: 刘光磊(1962-), 男, 江西安义人, 副教授, 博士, 主要从事机械系统及其关键零部件工作能力分析与评价。

传动误差曲线是衡量弧齿锥齿轮制造质量的重要指标之一。设计弧齿锥齿轮时, 一般应根据齿轮传动系统的动力学要求, 并兼顾啮合稳定性, 提出齿轮副所要求实现的传动误差曲线。根据 Litvin F L 教授的研究^[1-3], 对称抛物线型的传动误差曲线能够有效吸收弧齿锥齿轮传动过程中的线性误差, 从而降低传动过程中的振动与噪声。但此种传动误差曲线尚需通过合理设计小轮加工参数来得以保证。

局部综合法^[4-8]较好地控制了弧齿锥齿轮齿面参考点处接触椭圆的位置、大小和形状, 啮合迹线的倾斜方向以及传动误差曲线的弯曲程度。但该方法仅仅控制齿面参考点处传动误差曲线的形状, 并未有效地预控整个轮齿的啮合过程。当使用按照该方法得到的齿轮副加工参数进行齿面接触分析(tooth contact analysis, 简称 TCA) 仿真时, 有时会出现传动误差曲线开口过大或过小以及整体歪斜等情况, 无法满足齿轮传动系统低振动、低噪声的基本要求。

鉴于此, 作者提出了优化弧齿锥齿轮传动误差曲线的半变性法。该方法介于传统的变性法^[9-10]与不变性法之间, 可以从变性法或不变性法出发来获得半变性法的计算结果。本文从变性法出发, 以预置的传动误差曲线为设计目标, 先采用局部综合法初步确定小轮加工参数, 并在此基础上进行 TCA 仿真, 将 TCA 仿真结果与预置传动误差曲线相对比, 再微调加工小轮时的切削速比(摇台与小轮的转速之比)和三阶变性系数以消除两者之间的差异, 从而有效地控制传动误差曲线的形状。这种方法较好地解决了面向传动误差曲线优化的弧齿锥齿轮加工参数设计问题。

1 预置传动误差曲线

弧齿锥齿轮传动因制造误差、安装误差和运转中的轮齿拍击等, 不可避免地会出现冲击、振动和噪声。为了减小这些因素对齿轮副运转过程的不良影响, 可将弧齿锥齿轮的传动误差曲线设计成一条向下弯曲且对称的抛物线。这样设计的传动误差曲线使得从动弧齿锥齿轮在运转过程中经历一个由慢到快再由快到慢的啮合过程, 并且其啮入时的加速程度和啮出时的减速程度基本一致。

当弧齿锥齿轮的小轮作为主动轮时, 通常用小轮凹面推动大轮凸面, 这样可以使小轮具有离开大轮的趋势, 保证了齿侧间隙不致减小^[11]。

在进行弧齿锥齿轮副设计时, 预置的传动误差曲线通常如图 1 所示。图中横坐标 φ_1 表示某一瞬时小轮的啮合转角, 纵坐标 $\Delta\varphi_2$ 表示大轮的转角误差。

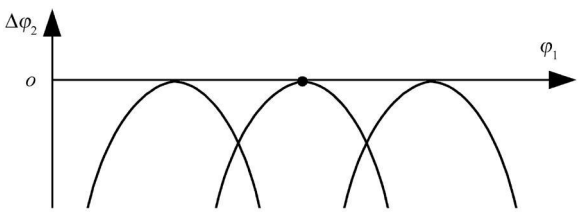


图 1 预置的传动误差曲线
Fig. 1 Predesigned transmission error function

预置传动误差的数学表达式为

$$\varphi_2 - \varphi_{20} = \frac{1}{2} m'_{21} (\varphi_1 - \varphi_{10})^2 \tag{1}$$

式中 m'_{21} 为传动比函数的一阶导数, 一般在设计时根据齿轮副对传动性能的具体要求给定, $\varphi_i (i = 1, 2)$ 其中 1 表示小轮, 2 表示大轮) 为两轮当前啮合转角, φ_{i0} 为两轮在参考点处啮合时的转角。

2 半变性法的基本原理

2.1 局部综合法的基本原理

局部综合法依据弧齿锥齿轮副的设计参数首先计算大轮的加工参数, 进而确定大轮齿面参考点处的齿面几何参数; 再根据弧齿锥齿轮副的齿面接触印痕和传动误差曲线具体要求, 按照点接触局部综合法的原理计算小轮在该参考点处的齿面几何参数, 进而求得小轮的加工参数。局部综合法较好地控制了弧齿锥齿轮副在齿面参考点附近的微分邻域内的啮合特性, 是弧齿锥齿轮加工参数设计的最先进方法之一。

2.2 变性法的基本方程

利用局部综合法计算小轮加工参数时, 需要根据刀具与小轮齿面的关系, 求解如下方程:

$$a_{22} = \frac{a_{23}^2}{a_{33}} \tag{2}$$

式中 a_{22} , a_{23} 和 a_{33} 详见参考文献[4]。

方程(2)中含有小轮的切削速比 m_{σ_1} 及其导数 m'_{σ_1} 。小轮的垂直轮位、轴向轮位和床位均由切削速比 m_{σ_1} 唯一确定。根据切削速比的导数 m'_{σ_1} 是否等于零, 可以将方程(2)进一步细分为 m'_{σ_1} 等于零的不变性法和 m'_{σ_1} 不等于零的变性

法. 变性法需要采用专门的切削滚比(切削速比的倒数)修正机构来实现. 本文首先按照凸轮导板机构^[9-10]的方式求解出变性法的小轮加工参数.

2.3 切削速比的微调

求解方程(2)得到小轮的切削速比 m_{σ_1} 及其他加工参数,并进行TCA仿真,可得实际传动误差曲线,但有时它与预置传动误差曲线在曲线开口大小和对称性等方面会出现较大偏差. 其原因在于局部综合法仅仅控制了齿面参考点附近的啮合接触特性,并未控制整个轮齿的啮合过程. 为此,还需要调整加工参数.

经分析发现,切削速比 m_{σ_1} 具有调节传动误差曲线开口大小的作用. 为此,将TCA仿真得到的传动误差曲线和预置传动误差曲线相对比,通过微调切削速比 m_{σ_1} 的值来改变实际传动误差曲线的开口大小,使之与预置传动误差曲线尽可能完全吻合.

2.4 三阶变性系数的选择

针对传动误差曲线的不对称问题,经分析发现,加工小轮时的三阶变性系数 D 能够有效地纠正传动误差曲线的歪斜,而其他高阶变性系数的影响相对较小. 为此,需要选择合适的三阶变性系数 D ,并将其他各阶变性系数置为0. 这种灵活选择变性系数的做法需要在数控加工机床上实现. 当采用半变性法加工弧齿锥齿轮的小轮时,摇台转速与小轮转速之间满足如下关系:

$$\phi_1 = \frac{\phi_{r_1} - D\phi_{\sigma_1}^3}{m_{\sigma_1}}$$

(3)

式中 ϕ_1 为小轮的转角, ϕ_{σ_1} 为摇台的转角.

3 TCA 基本方程组

根据局部综合法得到齿轮副的加工参数后,按照配对齿面连续相切接触的条件,可以建立如下弧齿锥齿轮啮合接触分析基本方程组:

$$\begin{cases} \mathbf{r}_h^{(1)}(\theta_p, \phi_{\sigma_1}, \varphi_1) = \mathbf{r}_h^{(2)}(\theta_g, \phi_{\sigma_2}, \varphi_2) \\ \mathbf{n}_h^{(1)}(\theta_p, \phi_{\sigma_1}, \varphi_1) = \mathbf{n}_h^{(2)}(\theta_g, \phi_{\sigma_2}, \varphi_2) \end{cases}$$

(4)

式中 $\theta_p, \phi_{\sigma_1}$ 和 $\theta_g, \phi_{\sigma_2}$ 分别为小、大齿轮刀具切削锥面的曲面坐标, φ_1 和 φ_2 分别为小、大齿轮啮合时转过的角度, $\mathbf{r}_h^{(i)}$ ($i = 1$ 表示小齿轮, $i = 2$ 表示大齿轮)为在啮合坐标系 S_h 中两齿面上任一点的径矢, $\mathbf{n}_h^{(i)}$ 则为在 S_h 中两齿面上任一点的法矢.

进行TCA仿真时,使弧齿锥齿轮副从参考点处进入啮合,并使小轮按照等步距匀速转动,大轮则按照连续相切接触条件随之转动,在每一个啮合位置两轮的齿面都满足方程组(4),如此即可得到齿轮副的齿面啮合迹线和传动误差曲线.

TCA仿真时的传动误差^[12]按照如下公式计算:

$$\delta(\varphi_1) = (\varphi_2 - \varphi_{20}) - \frac{z_1}{z_2}(\varphi_1 - \varphi_{10})$$

(5)

式中 z_1 和 z_2 分别为小轮和大轮的齿数.

4 算例及结果分析

采用基于变性法的半变性法对某型航空弧齿锥齿轮副的传动误差曲线进行了优化. 设计要求该对齿轮副具有的传动误差曲线如图1所示,要求的传动误差幅值为 $7''$. 另外,进行局部综合时的齿面压陷量采用Gleason公司的推荐取值,即0.00635 mm.

该航空弧齿锥齿轮副的轮坯基本参数见表1.

表 1 轮坯基本参数
Table 1 Blank data

参数	数值	
	小轮	大轮
齿数	38	43
轴交角/(°)	90	
压力角/(°)	20	
中点螺旋角/(°)	35	
旋向	左旋	右旋
外锥距/mm	52.507	
齿宽/mm	6.7	
全齿高/mm	3.455	
顶隙/mm	0.344	
齿顶高/mm	1.712	1.339
齿根高/mm	1.743	2.056
节锥角/(°)	41.4667	48.5323
根锥角/(°)	39.5258	46.6259
面锥角/(°)	43.3731	50.4732

根据基本参数所确定的大轮加工参数见表2.

表 2 大轮加工参数
Table 2 Gear machine tool settings

参数	数值
刀刃齿形角/(°)	21.1667
刀盘直径/mm	88.9
刀顶距/mm	0.9381
径向刀位/mm	43.4093
角向刀位/(°)	-57.0127
切削滚比	1.3338
垂直轮位/mm	0
轴向轮位/mm	0
床位/mm	-0.3081
机床安装角/(°)	46.6259

局部综合法的预控参数见表 3。其中,传动比函数的一阶导数 m'_{21} 表达了传动误差曲线的弯曲程度。大轮齿面参考点处接触迹线的切线方向与大轮刀具切削锥面的第一主方向之间的夹角表征大轮齿面参考点的接触迹线倾斜方向。

表 3 局部综合预控参数
Table 3 Local synthesis parameters

参数	数值
传动比函数的一阶导数	0.01
大轮齿面接触迹方向/(°)	50
接触椭圆长半轴占宽比	0.2

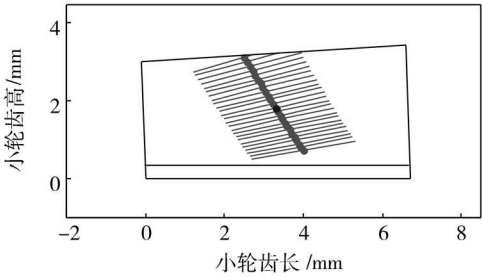
采用基于局部综合法的传统变性病法所获得的小轮加工参数见表 4。在此加工参数基础上进行 TCA 仿真得到的齿面接触印痕和传动误差曲线如图 2 和图 3 所示。图 3 中,三条实线表示相邻三对轮齿所形成的传动误差曲线,中间一条虚线表示预置的传动误差曲线,曲线的最高点即齿面参考点。容易看出,图 3 所示的传动误差曲线出现了严重的不对称现象,且相邻齿对所形成的传动误差曲线几乎脱开。

微调小轮切削速比 m_{σ_1} 和三阶变性病系数 D 后得到的小轮加工参数见表 4。此时,重新进行 TCA 仿真得到的齿面接触印痕和传动误差曲线如图 4 和图 5 所示。其中,实线与虚线的含义与图

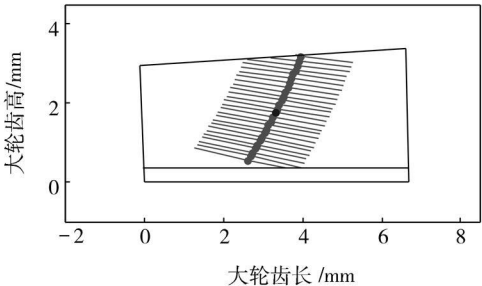
2 和图 3 相同。经 TCA 仿真计算得知,图 5 中的传动误差幅值为 $7.053''$,接触印痕没有明显变化,基本满足设计的要求。

表 4 小轮加工参数
Table 4 Pinion machine tool settings

参数	数值	
	优化前	优化后
刀刃齿形角/(°)	18.8333	
刀尖半径/mm	63.4645	
径向刀位/mm	56.2939	57.6016
角向刀位/(°)	287.4275	
切削滚比	1.7113	1.751
垂直轮位/mm	1.4357	2.6833
轴向轮位/mm	7.1597	7.6675
床位/mm	-4.5203	-4.8434
机床安装角/(°)	39.5258	
二阶变性病系数	-0.0146	0
三阶变性病系数	-0.0387	0.0001
四阶变性病系数	-0.0081	0
五阶变性病系数	0.0566	0



(a) 小轮凹面接触印痕



(b) 大轮凸面接触印痕

图 2 变性病法齿面接触印痕
Fig.2 Contact pattern of modified roll

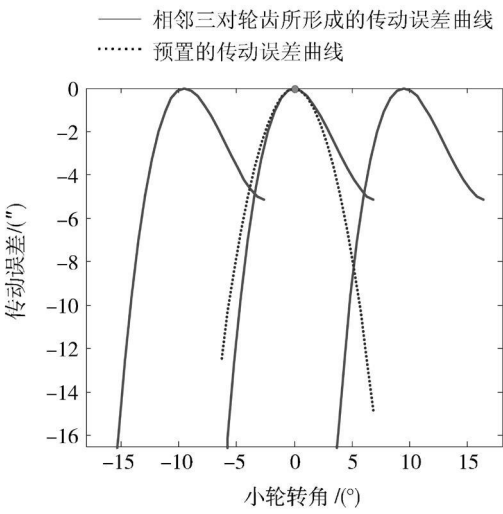


图 3 变性法传动误差曲线

Fig.3 Transmission errors of modified roll

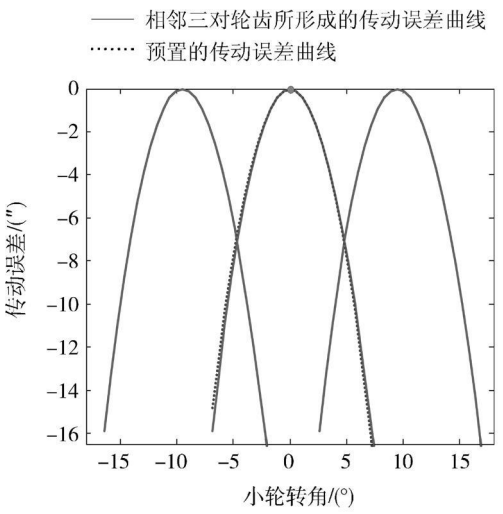


图 5 半变性法传动误差曲线

Fig.5 Transmission errors of half modified roll

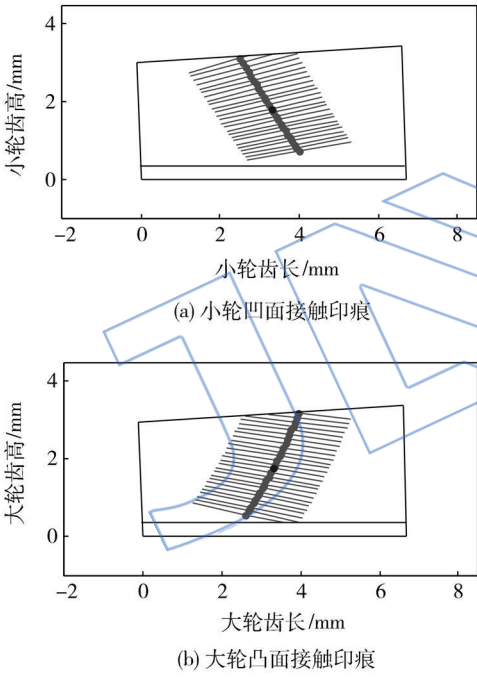


图 4 半变性法齿面接触印痕

Fig.4 Contact pattern of half modified roll

从图 2~ 图 5 中可以看出,半变性法在保持齿面接触印痕基本不变的情况下,较好地纠正了传动误差曲线的畸变问题.经过半变性法优化后的传动误差曲线与预置的传动误差曲线吻合得很好,基本上实现了设计的要求;另外,按照这样的加工参数制造出的弧齿锥齿轮副在配对啮合时能够有效地吸收啮合过程中产生的振动与噪声.

5 结 论

通过以上分析,可以得到如下结论:

- 1) 提出了弧齿锥齿轮传动误差曲线优化的半变性法.半变性法既可以从不变性法出发得到,也可以从变性法出发得到.本文利用基于变性法的半变性法对弧齿锥齿轮的传动误差曲线进行优化,结果表明该方法对传统的变性法有较大改进,是一种相对通用的方法.这种方法适合在现代数控机床上实现.
- 2) 提出了弧齿锥齿轮传动误差曲线优化调整的两个主要参数,即切削速比和三阶变性系数.其中,切削速比影响传动误差曲线的开口大小;三阶变性系数影响传动误差曲线的对称性.
- 3) 半变性法在优化传动误差曲线的同时,依然能够保证齿面接触印痕基本不发生变化.

利用半变性法优化传动误差曲线所获得的齿轮加工参数,可以指导弧齿锥齿轮的实际加工.

参考文献:

[1] Litvin F L. 齿轮几何学与应用理论[M]. 国楷,叶凌云,范琳,等,译.上海:上海科学技术出版社,2008.

[2] Litvin F L, Vecchiato D, Gurovich E, et al. Computerized developments in design, generation, simulation of meshing, and stress analysis of gear drives[J]. Meccanica, 2005, 40 (3): 291-324.

[3] Litvin F L, Vecchiato D, Yukishima K, et al. Reduction of noise of loaded and unloaded misaligned gear drives[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2006, 195(4F 43): 5523-5536.

[4] Litvin F L, Zhang Y. Local synthesis and tooth contact analysis of face milled spiral bevel gears[R]. NASA Office of Management Scientific and Technical Information Division, 1991.

[5] Litvin F L, Wang A G, Handschuh R F. Computerized generation and simulation of meshing and contact of spiral bevel gears with improved geometry[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1998, 158(1-2): 35-64.

[6] Argyris J, Fuentes A, Litvin F L. Computerized integrated approach for design and stress analysis of spiral bevel gears[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2002, 19(1-2): 1057-1095.

[7] Litvin F L, Fuentes A, Mullins B R, et al. Computerized design, generation, simulation of meshing and contact, and stress analysis of formate cut spiral bevel gear drives[R]. NASA/CR-2003-212336, ARL- CR- 525, 2003.

[8] Litvin F L, Fuentes A, Hayasaka K. Design, manufacture, stress analysis, and experimental tests of low-noise high endurance spiral bevel gears[J]. Mechanism and Machine Theory, 2006, 41(1): 83-118.

[9] 郑昌启. 弧齿锥齿轮及准双曲面齿轮[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.

[10] 曾韬. 螺旋锥齿轮设计与加工[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1989.

[11] 齿轮手册编委会. 齿轮手册(下册)[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2000.

[12] 方宗德, 刘涛, 邓效忠. 基于传动误差设计的弧齿锥齿轮啮合分析[J]. 航空学报, 2002, 23(3): 226-230.

FANG Zongde, LIU Tao, DENG Xiaozhong. Tooth contact analysis of spiral bevel gears based on the design of transmission error[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2002, 23(3): 226-230. (in Chinese)

