

文章编号:1000-8055(2013)03-0597-06

齿距啮合偏差对准双曲面齿轮传动误差的影响

邓效忠, 徐爱军, 张 静, 李聚波, 杨建军
(河南科技大学 机电工程学院, 河南 洛阳 471003)

摘 要: 由齿轮机构的总体传动误差概念引申出含有齿距啮合偏差的单齿传动误差, 并根据齿面的几何关系, 给出齿距啮合偏差对单齿传动误差曲线影响的偏移式; 然后, 在 Y9550 型滚动检验机的基础上搭建传动误差检测平台并进行测量试验, 得到准双曲面齿轮副两种传动误差的测量结果; 最后, 利用 JD45+ 型齿轮测量机所测的齿距偏差数据对理论传动误差曲线进行修正, 进而分析了轮齿的啮合状态. 通过对理论与实际传动误差曲线的对比, 验证了齿距啮合偏差对传动误差的影响方式. 试验结果表明: 在轻载条件下, 实际单齿传动误差可近似由理论设计曲线和齿距啮合偏差组成的综合仿真曲线来替代, 从而为进一步研究实际工况下齿轮传动的运动精度和工作平稳性奠定了基础.

关 键 词: 齿轮机构; 传动误差; 单齿传动误差; 齿距啮合偏差; 齿轮测量

中图分类号: V232.8; TH132

文献标志码: A

Effect of meshed pitch deviation on transmission error in hypoid gears

DENG Xiao-zhong, XU Ai-jun, ZHANG Jing, LI Ju-bo, YANG Jian-jun

(School of Mechatronics Engineering,

Henan University of Science and Technology, Luoyang Henan 471003, China)

Abstract: One measurement approach of tooth-tooth transmission error (TE) containing the meshed pitch deviation (MPD) was derived from the concept of the total transmission error in gear driving, and the TE offset formula of the effect of the MPD was proposed with the geometric relationship of the gear surface and the MPD. Then, the TE result of hypoid gears was obtained through the measurement experiments built on the platform of Y9550 type rolling tester. Finally, the TE curve was simulated by the MPD data gained by the JD45+ gear measurement center, and the meshing state of gear teeth was analyzed. The effect of MPD on TE was verified by the contrast of the theory and practical TE curve. Experimental results show that the actual tooth-tooth TE curve can be replaced by the theoretical curve which includes the meshed pitch deviation at light loads, so as to lay the foundation for further study of the movement accuracy and stability of the gear transmission under actual working condition.

Key words: gear; transmission error; tooth-tooth transmission error (TE); meshed pitch deviation (MPD); gear measurement

收稿日期: 2012-04-06

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130326.1743.201303.597_018.html

基金项目: 国家自然科学基金(50675061, 51205108)

作者简介: 邓效忠(1957—), 男, 河南洛阳人, 教授、博士生导师, 博士, 主要从事机械传动理论及先进制造技术研究.

徐爱军(1976—), 男, 江苏盐城人, 博士生, 从事机电系统的智能检测及控制技术.

准双曲面锥齿轮广泛应用于交通运输、工程机械等领域中,以实现机械系统中扭矩的传递,是现代机械结构里不可缺少的重要部件;但因其齿面形状复杂、设计与制造过程中质量控制困难、接触区评定方法受主观因素的制约等问题,传动机构的动态性能受到限制,使得传动过程中的振动与噪声问题尤为突出^[1-2]。随着对齿轮啮合精度要求的不断提高,相对于传统的齿面接触区印痕的评价方式,在应用层面上结合齿轮副实际啮合时的传动误差曲线和齿轮印痕来评定齿轮副的运动平稳性及描述传动链的动态性能,突破齿轮制造中末端滚动检查环节中人为因素的影响,提高螺旋锥齿轮产品的啮合传动质量,已成为传动机构分析的一个重要的研究方向。而齿距偏差与动态传动误差作为评定齿轮运动精度和工作平稳性的重要参数^[3-4],两者之间存在着紧密的联系。本文试图利用齿轮测量中心检测齿距偏差、采用单面啮合法^[5-6]构建传动误差曲线,并通过在轮齿上作标号所记录的轮齿配对相对齿距来分析传动误差曲线中受齿距啮合偏差的影响程度。同时,通过齿轮加工过程中的滚检与齿面测量环节,可为数字化齿面修形与机床反调提供反馈依据,实现齿轮副的数字化闭环制造,从而提高齿轮的运动精度与啮合平稳性。

1 齿距偏差与传动误差的关系

1.1 传动误差的描述及分析

在齿轮传动机构中,理想的啮合齿面是完全共轲的,其传动比为一个固定的常数。但在实际应用中,由于齿面加工机理而产生除参考点外的其余啮合位置是非共轲现象,再结合制造误差、受力变形等因素影响,使得实际传动比在理论值附近上下波动。在主动齿轮转动某一角度后,从动轮的实际转角与理论转角之间的偏差即为传动误差(transmission error, TE),亦称总体传动误差或累积传动误差(total transmission error, TTE)^[7],写作

$$\Delta\phi_2 = (\phi_2 - \phi_2^{(0)}) - \frac{Z_1}{Z_2}(\phi_1 - \phi_1^{(0)}) \quad (1)$$

式中 $\phi^{(0)}$ 为参考点处的初始转角; Z 为齿数;下标 1, 2 分别表示小轮与大轮(下同)。

对式(1)离散后,引申出单齿(瞬时)传动误差式(tooth-tooth transmission error)

$$\delta\phi_2^{(k)} = (\phi_2^{(k)} - \phi_2^{(k-n)}) - \frac{Z_1}{Z_2}(\phi_1^{(k)} - \phi_1^{(k-n)}) \quad (2)$$

式中上标 k 表示第 k 次测量的角度数据; n 为采用滑动计算方法的跨点数步长,其值可根据角度传感器的分辨力来选取适当值,一般不得跨越半齿所对应的脉冲数^[8]。

若将齿轮的各个轮齿理论传动误差曲线分别标记为 $\Delta\phi'_i$ ($i=1, \dots, Z_1$),如图1所示,则其顶部实线部分为齿轮啮合时的理论传动误差曲线,底部虚线部分为该对齿轮可能啮合的区间;其中横坐标为主动轮的齿数^[9](亦有用小轮的转角^[10]),纵坐标为传动误差的幅值 $\Delta\phi_2$ 。

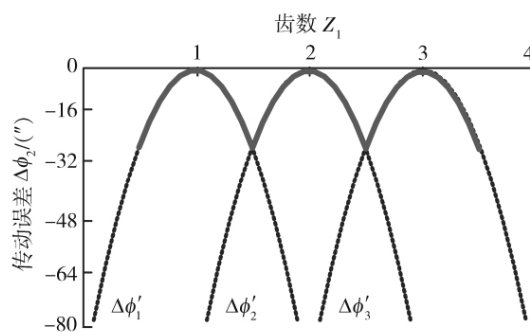


图1 理论传动误差曲线的构成

Fig. 1 Structure of theory transmission error curve

1.2 齿距啮合偏差对传动误差的影响

齿距啮合偏差,指一对齿轮啮合时两轮配对轮齿的法面齿距偏差之和。当考虑轮齿配对后齿距偏差后^[10-11],其法向齿距啮合偏差 Δt (meshed pitch deviation, MPD) 为

$$\Delta t = t_2^m - t_1^n \quad (3)$$

式中 t 为齿距; m, n 分别为配对的大小轮轮齿编号。

由齿距啮合偏差 Δt 所引起的大轮转角偏移量 $\Delta\phi'_2$ 为

$$\Delta\phi'_2 = \Delta t / R \quad (4)$$

式中 R 为齿面啮合点的旋转半径。

由于齿距啮合偏差的存在,将引起单一轮齿传动误差曲线在参考点附近偏置,考虑不同齿距啮合偏差的传动误差示意曲线如图2所示^[10]。当齿距啮合偏差为正时,表示当前轮齿滞后退出现啮合状态;为负值时,则代表当前轮齿提前进入啮合状态。图2中,若指定中间的2号齿为当前啮合齿,则1号轮齿将滞后退出现啮合和3号轮齿将提前进入啮合状态。

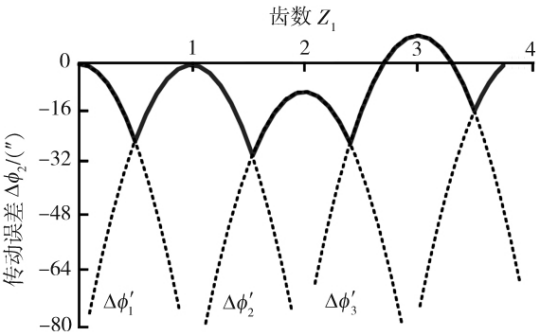


图 2 不同齿距啮合偏差下的传动误差示意曲线
Fig. 2 TE sketch curve under different MPD

2 齿距偏差与传动误差检测试验

现以一对 8 : 41 的准双曲面齿轮副为例,进行齿距偏差与传动误差的测量试验.

2.1 齿轮副主要设计参数

在齿轮加工现场,选取某汽车后桥驱动轮作为研究对象,设计时的基本参数见表 1,其余参数略.利用齿面接触(TCA)仿真分析得到的理论传动误差曲线及接触区如图 3 所示:图 3(a)中 2 条传动误差曲线交叉点的理论设计幅值为 43.68";图 3(b)为大轮凹面仿真接触区.

表 1 准双曲面齿轮基本参数

Table 1 Base parameters of hypoid gears

项 目	小轮	大轮
旋向	左旋	右旋
齿数	8	41
模数/mm		4.162
齿宽/mm		25.00
螺旋角/(°)	50	26.82
偏置距/mm		30.00
轴交角/(°)		90

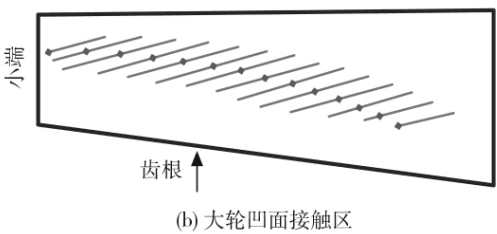
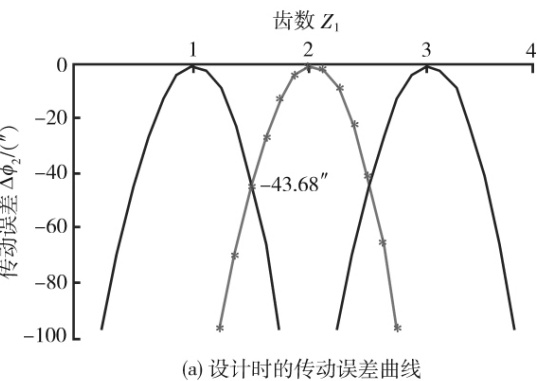


图 3 理论传动误差曲线及接触区
Fig. 3 Theory TE curve and contact pattern

2.2 齿距偏差的测量过程

哈尔滨精达测量仪器有限公司的 JD45+ 齿轮测量中心是由 3 个直线运动轴与一个回转轴所构成的四轴联动的三维坐标测量系统.测量时,将待测对象置于回转工作台上作回转运动,其中,大轮则通过百分表检测其回转中心,经微调后测得其径向跳动小于 0.01 mm;小轮则通过测量中心的上下顶尖进行夹紧定位.测量机的球形测头由 3 个直线轴驱动到齿面测量点的位置,通过测量软件读取测头示值而判定当前位置坐标值,从而得到被测齿轮相应测量项目的偏差值,以大轮为例的齿距偏差测量过程如图 4 所示.

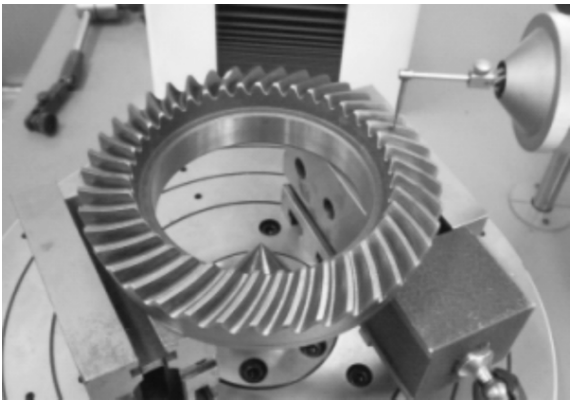


图 4 齿距偏差测量的过程
Fig. 4 Pitch deviation measurement

由齿轮测量中心所测得的准双曲面齿轮副实际齿距偏差数据如图 5 所示,图 5(a)为小轮凸面的齿距偏差,图 5(b)为大轮凹面的齿距偏差;图中横坐标为齿数,纵坐标为齿距偏差(单位为 μm).

2.3 传动误差的检测试验

利用齿轮滚动检查时使用的 Y9550 型机床作为传动误差测量试验的载体,在大小轮心轴的末端固联一对空心增量式光栅旋转编码器,其输出的脉冲信号经信号调理电路修整与滤波后送往安装在计算机内部的同步数据采集卡^[12]中进行

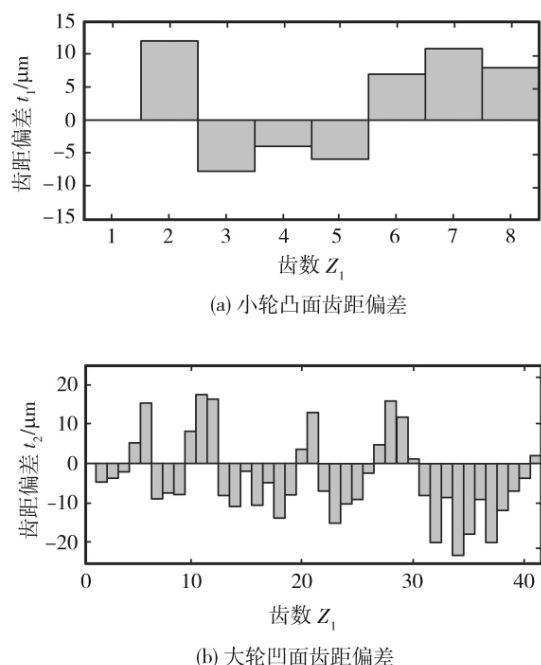


图5 齿距偏差的测量结果

Fig. 5 Measurement result of pitch deviation

数据记录,由此构成齿轮的传动误差测量平台,如图6所示,实际安装的准双曲面齿轮副的大轮与小轮的径向跳动分别为0.09 mm和0.11 mm.在制动手柄上通过悬挂法码法加载约20 N·m力矩,待电机运转稳定后,对双路旋转编码器输出的脉冲信号进行同步采集,此时主动轮的平均转速约为741.88 r/min.停机后,在轻载模式下,图7大轮凹面接触区位于中间偏小端状态,接触面从小端齿顶走向大端齿根,略微有少量内对角接触,与图3(b)理论接触区趋势基本一致,从而使得汽车齿轮副在行驶过程中传动更平稳.

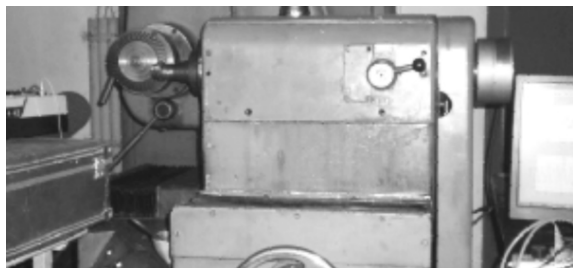


图6 传动误差测量试验平台

Fig. 6 Experimental platform of TE measurement

计算机处理软件按照式(1)~式(2)计算并进行显著异点剔除与滤波^[13]后所得的总体传动误差与单齿传动误差曲线如图8所示.其中,图8(a)中的曲线反映了总体传动误差状态,含有以大轮的齿数为长周期的分度特性及曲线上的以单齿

跨度为周期的波动特征,其纵向坐标单位为($^{\circ}$),因径向跳动及其传动比放大作用而出现径向综合总偏差 F_i 约为7.35 $^{\circ}$;图8(b)中实际测量的单齿传动误差曲线是以小轮的齿数作为周期的分量,其幅值比理论设计的传动误差曲线的幅值略大,且明显地含有齿距偏差所引起的偏移量,其曲线形状与图3(a)的理论曲线形状基本保持一致,略呈抛物线状.单齿传动误差曲线横坐标跨度的不均匀性以及曲线的上下波动直接反映出:由于准双曲面齿轮副的实际齿距啮合误差、齿形误差、轮齿冲击等因素而导致当前啮合轮齿将提前(或滞后)进入或退出啮合状态.

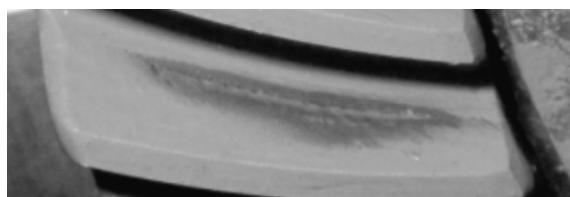


图7 大轮凹面实际接触区

Fig. 7 Concave contact pattern of real gear

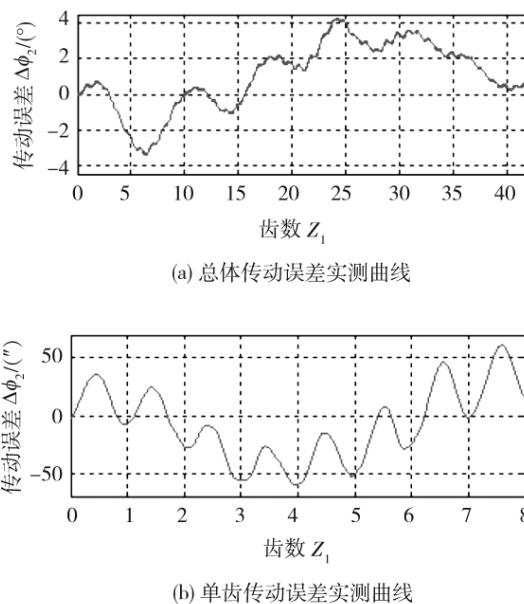


图8 准双曲面齿轮副的实际传动误差曲线图

Fig. 8 Real TE measurement curve of hypoid gears

3 齿距啮合偏差的仿真及对比分析

利用齿轮测量中心所测的齿距偏差数据,根据实际啮合轮齿接触情况重构小轮01#轮齿与大轮05#轮齿配对的平均相对齿距偏差,如图9.

依据图9数据,结合图3(a)的理论传动误差

曲线,利用式(3)~式(4)重新构建含有相对齿距偏差的传动误差仿真曲线如图10。

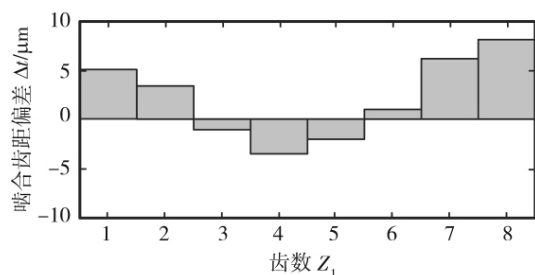


图9 P01-G05 配对的相对齿距偏差

Fig. 9 Relative pitch deviation with P01-G05

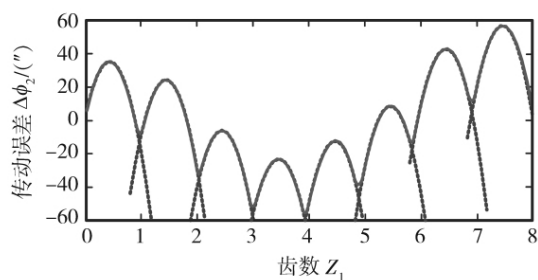


图10 含有齿距偏差的传动误差仿真曲线

Fig. 10 Simulation TE with pitch deviation

对比图10的仿真曲线与图8(b)中的实测曲线,两者之间的曲线形状及周期趋于一致,传动误差曲线的跨度也基本相似。但因加工过程中实际齿面与理论齿面存在形状误差,实测的单一轮齿啮合的传动误差曲线所包含的信息量远比仿真的曲线丰富得多;如通过图8(b)曲线中约1.6齿位置的曲线变化程度,反映轮齿冲击、侧隙、振动等因素对传动误差曲线的影响。利用单面啮合法测量传动误差时,相对于传统的传动误差曲线数值滤波法,通过式(2)测量及绘制的传动误差曲线,基本消除初始转角所引起的累积效应,但保留齿距偏差、齿形误差、侧隙等因素对传动误差的影响,并使得实测的单齿传动误差曲线与理论设计曲线保持一致。当载荷增加时,实际的单齿传动误差幅值增大^[14],振动与噪声愈大,为分析齿轮运动的平稳性奠定基础;并为齿面的设计、加工、修形提供反馈^[15-16],在设计及制造阶段,可通过减小传动误差幅值或使用高阶传动误差、提高重合度、增大螺旋角等一系列的方法优化轮齿的切齿参数,或在齿轮的安装阶段,通过修正安装距、调整齿面的径向跳动以及安装角度偏心差等措施达到传动机构减振降噪的目的,进而实现准双曲面

齿轮的闭环加工制造过程。

4 结 论

1) 齿轮副的传动误差与啮合接触区密切相关,且与齿距啮合偏差之间存在必然的联系。

2) 齿距啮合偏差在单齿传动误差曲线上表现为配对轮齿误差曲线局部峰值的上下波动,在齿轮传动的动作上呈现为指定轮齿将提前或滞后进入啮合状态。

3) 在轻载条件下,实际齿轮副单齿传动误差的测量结果与理论分析结果的趋势一致,使用实测的齿距偏差与理论传动误差重新构建的曲线,可近似代替实际齿轮的传动状态。

参考文献:

- [1] 邓效忠,方宗德,杨宏斌,等.高重合度弧齿锥齿轮的强度分析[J].航空动力学报,2002,17(3):367-372.
DENG Xiaozhong, FANG Zongde, YANG Hongbing, et al. Strength analysis of spiral bevel gears with high contact ratio[J]. Journal of Aerospace Power, 2002, 17(3): 367-372. (in Chinese)
- [2] Smith J D. Gear noise and vibration[M]. 2nd ed. New York: Marcel Dekker Inc., 2003.
- [3] 邓效忠,方宗德,魏冰阳,等.高重合度弧齿锥齿轮加工参数设计与重合度测定[J].机械工程学报,2004,40(6):95-99.
DENG Xiaozhong, FANG Zongde, WEI Bingyang, et al. Design and experiment of spiral bevel gears with high contact ratio [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(6): 95-99. (in Chinese)
- [4] 杨建军,邓效忠,魏冰阳,等.弧齿锥齿轮激励研齿的动态研磨分析与试验[J].航空动力学报,2010,25(12):2839-2845.
YANG Jianjun, DENG Xiaozhong, WEI Bingyang, et al. Study and experiments of dynamic mechanism of excited gear lapping of spiral bevel gear[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(12): 2839-2845. (in Chinese)
- [5] 石照耀,张旭.齿轮单面啮合测量技术的发展及其应用[J].工具技术,2008,42(3):10-15.
SHI Zhaoyao, ZHANG Xu. Development and application of gear single-flank testing technology[J]. Tool Engineering, 2008, 42(3): 10-15. (in Chinese)
- [6] 徐爱军,邓效忠,徐恺,等.基于时钟细分法的弧齿锥齿轮传动误差测量研究[J].机械传动,2012(8):1-5.
XU Aijun, DENG Xiaozhong, XU Kai, et al. The research of the transmission error measurement of spiral bevel and hypoid gears based on the clock subdivision[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2012(8): 1-5. (in Chinese)
- [7] Litvin F L. Gear geometry and applied theory[M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1994.
- [8] Michael F P. Troubleshooting gear noise[J]. Gear Solu-

- tions, 2011(1):39-44.
- [9] AGMA. ANSI/AGMA 2009-B01 Bevel gear classification tolerances, and measuring methods[S]. Alexanria, Virginia, USA: AGMA, 2001.
- [10] 邓效忠, 方宗德, 任东锋, 等. 弧齿锥齿轮的齿距误差对传动性能的影响研究[J]. 航空动力学报, 2002, 17(2): 268-271.
DENG XiaoZhong, FANG Zongde, REN Dongfeng, et al. Study on contact ratio of spiral bevel gears and influence of pitch error[J]. Journal of Aerospace Power, 2002, 17(2): 268-271. (in Chinese)
- [11] 周彦伟, 邓效忠, 方宗德, 等. 齿距误差对弧齿锥齿轮齿间载荷分配和强度的影响[J]. 中国机械工程, 2002, 13(7): 1518-1520.
ZHOU Yanwei, DENG Xiaozhong, FANG Zongde, et al. Influence of pitch error on load share between teeth and bending strength of spiral bevel gears[J]. China Mechanical Engineering, 2002, 13(7): 1518-1520. (in Chinese)
- [12] XU Aijun, DENG Xiaozhong, ZHANG Jing, et al. Design of multichannel card oriented to hypoid gear measurement [J]. CSSS US: IEEE Computer Society, 2011(4): 3164-3167.
- [13] XU Aijun, DENG Xiaozhong, ZHANG Jing, et al. A new numerical algorithm for transmission error measurement at gears meshing [R]. Germany: Trans Tech Publications, 2012.
- [14] Gosselin C, Guertin T, Bremond D, et al. Simulation and experimental measurement of the transmission error of real hypoid gears under load[J]. Journal of Mechanical Design, 2000, 3(122): 109-122.
- [15] 李天兴, 邓效忠, 李聚波, 等. 螺旋锥齿轮齿面误差分析与自动反馈修正[J]. 航空动力学报, 2011, 26(5): 1194-1200.
LI Tianxing, DENG Xiaozhong, LI Jubo, et al. Automatic feedback correction and deviation analysis for tooth surface of spiral bevel and hypoid gear[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(5): 1194-1200. (in Chinese)
- [16] 唐进元, 卢延峰, 周超. 调整参数误差对齿面接触质量的影响[J]. 航空动力学报, 2008, 23(9): 1718-1723.
TANG Jinyuan, LU Yanfeng, ZHOU Chao. Effect of machine tool adjustment parameter errors on spiral bevel gears tooth contact quality[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(9): 1718-1723. (in Chinese)