

文章编号 1004-924X(2012)08-1796-06

降低齿轮齿距累积偏差的方法

宋洪侠^{1*}, 赵苏苏¹, 娄志峰¹, 王立鼎^{1,2}

(1. 大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116023;

2. 大连理工大学 微纳米技术及系统辽宁省重点实验室, 辽宁 大连 116023)

摘要: 为了减小齿轮磨削加工中的磨床系统分度误差, 提高齿轮加工精度, 分析了齿轮磨床分度误差、齿轮安装偏心和齿轮齿距偏差之间的关系, 获得了分度误差的计算方法, 并计算出了齿轮磨床的分度误差。依据计算得到的分度误差值调整磨床, 降低磨床分度误差, 减小齿轮齿距累积偏差, 提高了齿轮加工精度。以 Y7125 大平面砂轮磨齿机床为例验证了提出方法的可行性。建立了齿轮安装偏心和齿廓偏差的数学模型, 求出了齿轮安装偏心的幅值和相位角, 然后由齿轮安装偏心、磨床分度误差和齿轮齿距偏差的关系得到磨床的分度误差值。根据计算得到的分度误差值调整磨床分度盘, 使磨床的分度误差从 $17.7 \mu\text{m}$ 减少为 $3.3 \mu\text{m}$, 被加工齿轮的齿距累积总偏差由 $46.9 \mu\text{m}$ 降低到 $11.5 \mu\text{m}$, 齿距精度达到三级。验证结果表明, 按照这种方法调整磨床可以快速有效地降低磨床的系统分度误差, 从而降低齿轮的齿距累积偏差。

关键词: 磨床; 齿轮磨削; 齿距偏差; 齿廓偏差; 安装偏心; 分度误差

中图分类号: TG61; TG580.6 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122008.1796

Reduction of cumulative pitch deviation for gears in grinding machines

SONG Hong-xia^{1*}, ZHAO Su-su¹, LOU Zhi-feng¹, WANG Li-ding^{1,2}

(1. *Key Laboratory for Precision & Non-traditional*

Machining of the Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China;

2. *Key Laboratory for Micro/Nano Technology and System of Liaoning Province,*

Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

** Corresponding author, E-mail: hxsong@dlut.edu.cn*

Abstract: To reduce the system dividing error of a grinding machine in gear grinding and to improve the machining accuracy of gears, the relationship among the dividing error of grinding machine, gear eccentricity installation, and the pitch deviation was analyzed, and the calculation method for dividing errors of the gear was obtained. By adjusting the grinding machine according to the calculated dividing error, the dividing error of grinding machine and the cumulative pitch deviation of the gear were decreased and the manufacturing accuracy was enhanced. The method was verified by taking the flat-faced wheel grinding machine Y7125 as an example. Firstly, a mathematic model on gear eccentricity installation and profile deviation was established to figured out the amplitude and phase angles of gear eccentricity installation. Then, based on the relationship among gear eccentricity installation, the di-

收稿日期: 2012-04-12; 修订日期: 2012-05-30.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50905026); 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2008AA042506)

viding error of grinding machine and the pitch error, the value of dividing error was obtained. Finally, the indexing plate of grinding machine was adjusted and calibrated according to the computed dividing error. The experiment demonstrates that the dividing error has been reduced from $17.7 \mu\text{m}$ to $3.3 \mu\text{m}$, and the cumulative pitch deviation of the machined gear is lowered from $46.9 \mu\text{m}$ to $11.5 \mu\text{m}$. Furthermore, the accuracy of pitch is up to grade three. The results prove that this method can be used to reduce the dividing error of grinding machine effectively, so as to reduce the cumulative pitch deviation.

Key words: grinding machine; gear grinding; pitch error; profile deviation; eccentricity installation; dividing error

1 引言

齿轮作为机械零件中重要的基础件被广泛应用于各种机电产品中。齿距偏差和齿廓偏差主要影响齿轮传动过程的平稳性和准确性,是齿轮精度测量中重要的检测项目。

目前,齿轮精度参数测量主要采用齿轮测量中心进行。该类仪器采用电子展成原理,具有自动化程度高、效率高、精度高等优点^[1-3]。

对于经过磨削加工得到的齿轮,影响齿轮齿距偏差的误差源主要有齿轮安装定位误差,磨床系统分度误差等^[4];影响齿廓偏差的误差源主要是齿轮安装定位误差。减小系统分度误差是提高齿轮加工精度的一个重要途径。本文以 Y7125 大平面砂轮磨齿机床为例,通过分析齿轮的齿廓偏差和安装偏心(齿轮的安装定位误差)的关系,利用齿廓偏差的测量值计算出安装偏心的幅值和相位;进一步分析齿轮安装偏心对其齿距偏差的影响,并将其从齿距偏差的测量值中剔除,最终得到系统分度误差,并通过实验验证该理论的正确性。

2 Y7125 大平面砂轮磨齿机床的工作原理

Y7125 大平面砂轮磨齿机采用展成法加工齿轮^[5-6]。磨齿机工作原理如图 1 所示。

磨齿时,砂轮位置固定不动,磨削节圆和节线 W-W 的纯滚动关系是由渐开线凸轮和挡板来实现的,分度运动主要由分度盘实现。因此,影响被加工齿轮齿廓偏差的误差源为齿轮安装偏心和渐开线凸轮误差,其中渐开线凸轮误差对齿轮每个

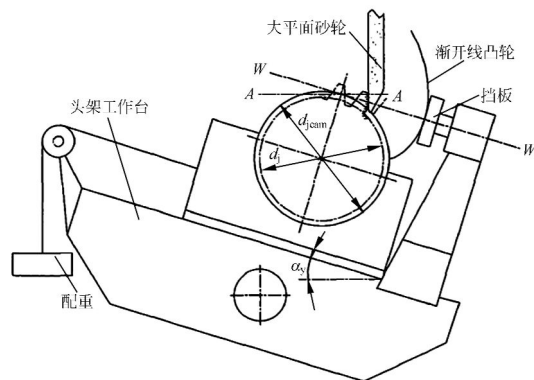


图 1 大平面砂轮磨齿机的工作原理

Fig. 1 Working principle of flat-faced wheel grinding machine

齿的齿廓偏差影响是相同的;影响被加工齿轮齿距偏差的误差源为齿轮安装偏心和磨床系统分度误差。

3 安装偏心与齿廓偏差的关系分析

根据齿轮磨床的磨削原理建立几何关系模型,如图 2 所示。O 为齿轮磨床主轴回转中心,若齿轮存在安装偏心,则 O_1 为被加工齿轮的几何中心,将安装偏心 OO_1 用矢量 e 表示。砂轮与齿面在 C 点接触,接触点的法线为 AC; D 点和 BD 分别为对应于渐开线 2 的接触点和接触点法线。由几何关系可知线段 OO_1 , AB 和 CD 的长度相等且等于安装偏心的幅值 e 。由于 e 的大小为微米级的,所以 CE 可近似为与渐开线 1 相切于 E 点。渐开线 1 上任意一点 C 对应的展开角为 φ_x , 渐开线起始点的展开角为 0, 则齿轮安装偏心对其齿廓偏差的影响为:

$$\Delta = e[\sin(\theta - \varphi_x) - \sin \theta], \quad (1)$$

式中: e 为齿轮安装偏心的幅值; θ 为齿轮安装偏心的相位角; φ_x 为渐开线上任意测量点对应的展

开角; Δ 为齿轮安装偏心对其齿廓偏差的影响值。

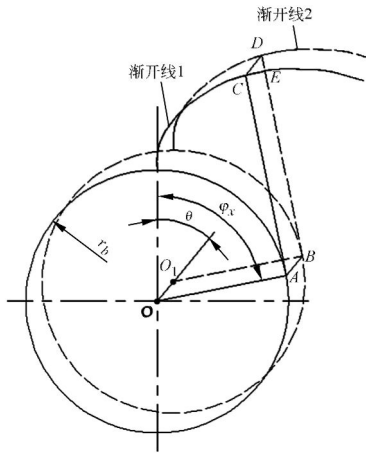


图 2 安装偏心对齿廓偏差的影响

Fig. 2 Influence of eccentricity installation on profile deviation

在齿轮磨削加工前, 首先将齿轮的各齿依次编号。磨削加工后, 任意测量 3 个同侧齿面的齿廓偏差。由齿廓偏差测量曲线得到对应齿的齿廓倾斜偏差。对于模数一定的圆柱直齿轮, 渐开线评定长度的起始点和终止点对应的展开角是定值, 分别用 φ_1 和 φ_2 表示。由于产生齿廓形状偏差的原因很多, 齿轮安装偏心主要影响齿廓倾斜偏差, 所以忽略齿轮安装偏心对齿廓形状偏差的影响。由测量曲线得到的齿廓倾斜偏差值由两部分组成: 齿轮安装偏心对齿廓倾斜偏差的影响值和渐开线凸轮误差对齿廓倾斜偏差的影响值。式 (1) 中的 Δ 为齿轮安装偏心对其齿廓倾斜偏差的影响值, 所以:

$$\Delta = -(f_{Ha} - f_{Ha}') = f_{Ha}' - f_{Ha}, \quad (2)$$

其中: f_{Ha}' 为渐开线凸轮误差对被加工齿轮齿廓倾斜偏差的影响值; f_{Ha} 为被加工齿轮齿廓倾斜偏差的测量值。

由式 (1) 和式 (2):

$$f_{Ha}' - f_{Ha} = e[\sin(\theta - \varphi_2) - \sin(\theta - \varphi_1)]. \quad (3)$$

对于齿数为 z 的齿轮, 齿号为 i 的左齿面评定长度起始点和终止点对应的展开角 φ_{1i} 和 φ_{2i} 为:

$$\begin{cases} \varphi_{1i} = \varphi_1 + (i-1) \times 360/z \\ \varphi_{2i} = \varphi_2 + (i-1) \times 360/z \end{cases}. \quad (4)$$

根据以上推导过程可得安装偏心与齿廓倾斜偏差的关系为:

$$f_{Ha}' - f_{Ha} = e[\sin(\theta - \varphi_{2i}) - \sin(\theta - \varphi_{1i})], \quad (5)$$

其中: $i=1, 2, \dots, z$, 为齿轮的齿号; f_{Ha} 为对应于齿号 i 的齿廓倾斜偏差的测量值。

任意测同一齿轮 3 个齿的齿廓偏差, 将数据代入式 (5), 得到一个方程组, 解此方程组可求得被加工齿轮安装偏心的幅值 e 和相位角 θ 。

4 安装偏心与齿距偏差的关系分析

根据齿轮磨床的磨削原理建立几何模型, 如图 3 所示。O 为被加工齿轮的几何中心, O_1 为齿轮磨床主轴回转中心, 将安装偏心 OO_1 用矢量 e 表示。将安装偏心 e 沿 OD 和 O_1D (与 OB 垂直) 方向分解。由几何关系得, OD 与 AB 相等。由于 AB 的长度为微米级的, 所以近似的认为 BF 与渐开线 CBFE 相切于 B 点, 则直线 AB 与 BF 的夹角为 α , AF 垂直于 OA。将渐开线 CBFE 定义为 1 号齿的左齿面, 则齿轮安装偏心对其齿距累积偏差的影响值为:

$$F_{pk} = e \cdot [\sin(\theta - \theta_1 + j \times 360/z) + \cos(\theta - \theta_1 + j \times 360/z) \cdot \tan \alpha] - e \cdot [\sin(\theta - \theta_1) + \cos(\theta - \theta_1) \cdot \tan \alpha], \quad (6)$$

其中: F_{pk} 为齿轮安装偏心对其齿距累积偏差的影响值; $\theta_1 = \tan^{-1} \alpha$; α 为分度压力角; z 为被测齿轮的齿数; $j=0, 1, 2, \dots, z-1$; $k=1, 2, \dots, z-1$ 。

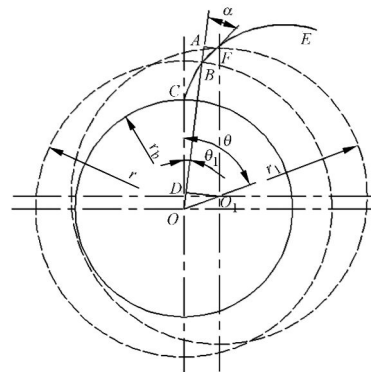


图 3 安装偏心与齿距偏差的关系

Fig. 3 Relation of eccentricity installation and pitch error

5 磨床分度误差的分析

使用齿距偏差测量仪测量被测齿轮得到其齿

距累积偏差 F_{pk} ,由式(6)可求得齿轮安装偏心对齿距累积偏差的影响值,则系统分度误差对被加工齿轮齿距累积偏差的影响值为:

$${}^d F_{pk} = F_{pk} - {}^e F_{pk}, \quad (7)$$

其中: ${}^d F_{pk}$ 为系统分度误差对被加工齿轮齿距累积偏差的影响值; F_{pk} 为被加工齿轮的齿距累积偏差; $k=1, 2, \dots, z-1$ 。

将系统分度误差对被加工齿轮齿距累积偏差的影响值进行一定的转换得到磨床的系统分度误差。

6 实验验证

为了验证该理论的正确性,在加工齿轮前,首先将齿轮磨床的主轴和分度盘调出一定的安装误差,在后续的加工中,在根据上述理论计算值的指导下调整分度盘和主轴的安装位置,减小分度误差和齿轮安装偏心,从而提高齿轮的加工精度。

文中使用的齿廓偏差数据均由大连理工大学研制的双盘式渐开线测量仪(见图 4)测得^[7],它是基于“滚动法”^[8]的渐开线测量仪,测量过程完全符合渐开线展成原理,测量误差源少且精度高。齿距偏差的测量采用大连理工大学研制的超精密齿距偏差测量仪^[9],该仪器采用绝对法的测量原理。

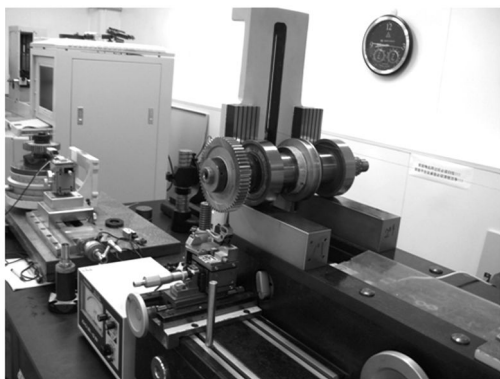


图 4 双盘式渐开线测量仪

Fig. 4 Double-disc involute measuring instrument

按照常规的磨削工序加工完成齿轮,其基本参数为: $m=3.5 \text{ mm}$, $\alpha=20^\circ$, $z=36$ 。

使用双盘式渐开线测量仪测量该齿轮任意 3 齿的齿廓偏差(为了便于计算,本文选择相差 90° 的 3 个齿),齿廓偏差曲线如图 5 所示,其中 1, 10, 19 号齿对应的齿廓倾斜偏差分别为 $4.0, 2.8,$

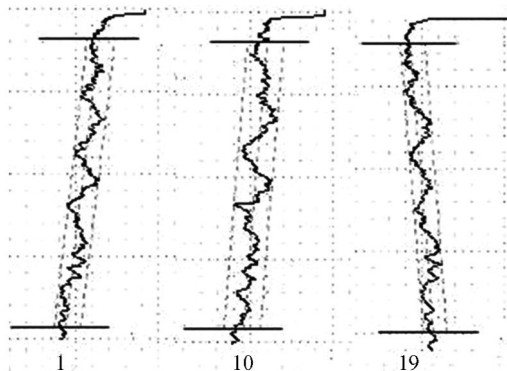


图 5 1, 10 和 19 号齿左齿面的齿廓偏差曲线

Fig. 5 Tooth profile deviations on left flanks No. 1, 10, and 19

$2.7 \mu\text{m}$; 齿廓形状偏差分别为 $3.3, 4.3, 2.9 \mu\text{m}$; 齿廓总偏差分别为 $5.5, 5.3, 4.6 \mu\text{m}$ 。渐开线评定长度起始点和终止点分别为 11.3 和 22.8 mm 。将齿廓倾斜偏差的测量值代入式(5),联立方程组可求得齿轮安装偏心的幅值为 $13.5 \mu\text{m}$, 相位角为 -40.08° 。

使用齿距偏差测量仪(见图 6)测量该齿轮的齿距偏差。将计算得到的安装偏心的幅值和相位角代入式(6),即可得到安装偏心对齿距累积偏差的影响值。将计算结果代入式(7)计算得到系统分度误差对齿距累积偏差的影响值。三者之间的对比关系如图 7 所示。

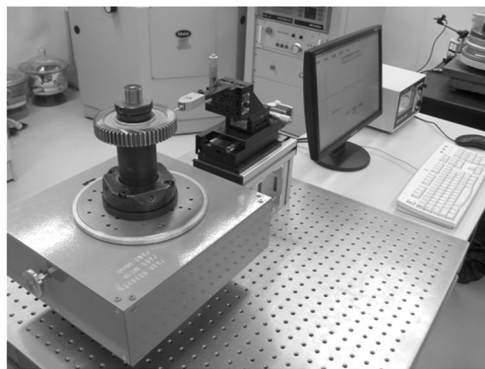


图 6 齿距偏差测量仪

Fig. 6 Pitch measuring instrument

系统分度误差主要由分度盘安装偏心引起(忽略分度盘自身的制造误差),分度盘为超精密齿轮,其齿距累积偏差和安装偏心的关系同样满足式(6),通过计算得到分度盘安装偏心的幅值为 $17.7 \mu\text{m}$, 相位角为 -32.95° 。

在理论计算值的指导下调整磨床分度盘的安

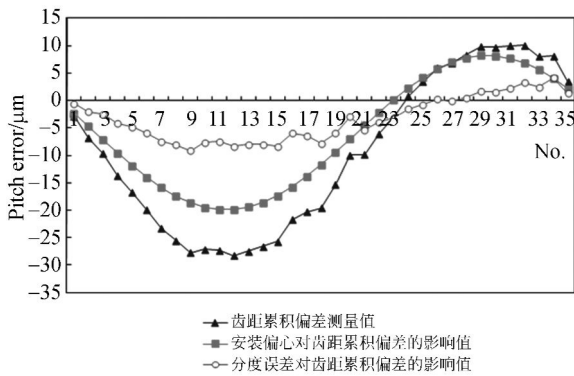


图 7 齿距累积偏差测量值

Fig. 7 Measured values of cumulative pitch deviation

装位置(见图 8),再次加工该齿轮。分度盘调整前后,被加工齿轮的齿距累积偏差测量值对比见图 9。

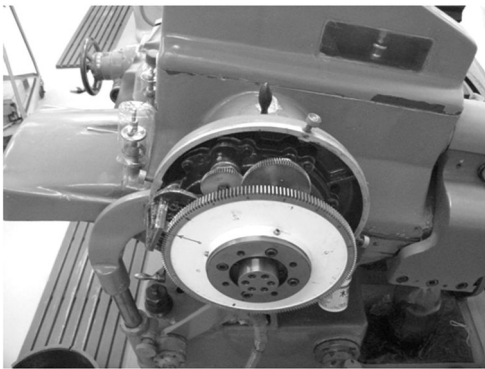


图 8 磨床分度盘

Fig. 8 Indexing plate of grinding machine

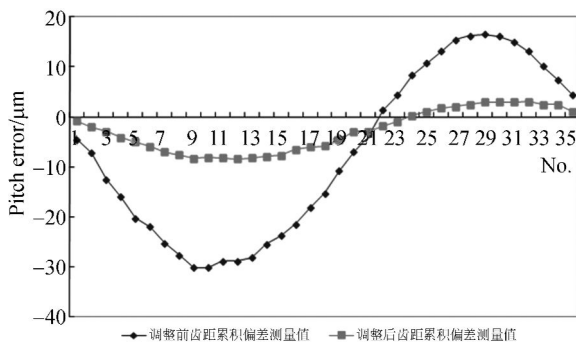


图 9 分度盘调整前后齿轮的齿距累积偏差

Fig. 9 Cumulative pitch deviations before and after adjustment

调整后分度盘安装偏心的幅值为 $3.3 \mu\text{m}$, 相位角 -57.78° 。分度盘调整前后系统分度误差对被加工齿轮的齿距累积偏差影响值如图 10 所示。

由以上结果可以看出,分度盘调整前后被加工齿轮的累积总偏差由 $46.9 \mu\text{m}$ 降为 $11.5 \mu\text{m}$ 。

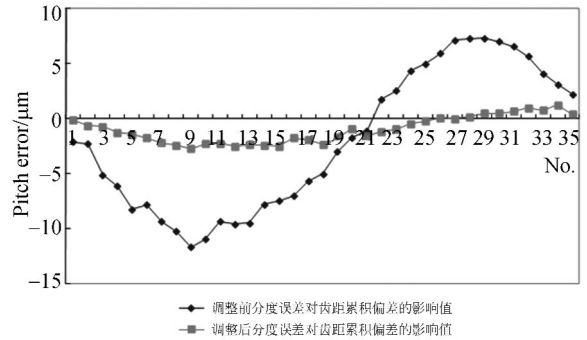


图 10 分度盘调整前后对齿距累积偏差的影响值

Fig. 10 Cumulative pitch deviations effected by dividing errors before and after adjustment

7 结 论

在齿轮磨削加工中,减小磨床的系统分度误差是提高齿轮加工精度的重要途径之一。本文通过分析齿轮磨床分度误差,齿轮安装偏心 and 齿轮齿距偏差之间的关系,计算出了齿轮磨床的分度误差。根据分度误差的计算值调整磨床的分度盘,减小磨床的系统分度误差,从而降低了被加工齿轮的齿距累积偏差,提高了齿轮加工精度。

实验结果表明,按照计算得到的分度误差值调整磨床分度盘,分度盘安装偏心的幅值由 $17.7 \mu\text{m}$ 降为 $3.3 \mu\text{m}$, 齿轮齿距累积总偏差由 $46.9 \mu\text{m}$ 降到 $11.5 \mu\text{m}$ 。这种方法显著地减小了磨床的分度误差,提高了齿轮加工精度,从而为加工出高精度齿轮提供可靠的理论支持和快速有效的调整方法。

8 致 谢

向研究过程中给予无私帮助的老师凌四营、李克洪、王晓东等表示衷心的感谢。

参考文献:

[1] 王立鼎, 姜志峰, 王晓东, 等. 超精密渐开线齿形的

测量方法[J]. 光学精密工程, 2006, 14(6): 980-985.
WANG L D, LOU ZH F, WANG X D, et al..
Measuring methods of ultraprecision involute tooth

- profile[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(6):980-985. (in Chinese)
- [2] 石照耀,汤洁,魏华亮,等. 基于双面啮合多维测量原理的齿轮在线测量机[J]. *仪器仪表学报*, 2009,30(2):303-307.
SHI ZH Y, TANG J, WEI H L, *et al.*. Gear in line measuring machine based on double-flank gear rolling test with multi-degrees of freedom[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, 30(2):303-307. (in Chinese)
- [3] YANG L, SUN H L, YUAN H J. A study of a gear profile measuring method using gear measurement center[J]. *Proceedings of the 2011 6th International Forum on Strategic Technology*, 2011,1: 366-370.
- [4] 王立鼎. 在用分度盘分度的磨齿机上被磨齿轮周节精度的研究[J]. *精密制造与自动化*, 1981(3): 35-41.
WANG L D. Study on pitch accuracy of being machined gear in grinding machine with indexing plate [J]. *Precise Manufacturing & Automation*, 1981 (3):35-41. (in Chinese)
- [5] 王立鼎,凌四营,马勇,等. 精密、超精密齿轮的加工方法[J]. *光学精密工程*, 2009,17(2):321-325.
WANG L D, LING S Y, MA Y, *et al.*. Processing methods of precision and ultra-precision cylindrical involute gear [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(2):321-325. (in Chinese)
- [6] 刘兵,马勇,凌四营,等. 基于多齿分度改善高精度齿轮齿距精度[J]. *机械传动*, 2010,34(4):6-9.
LIU B, MA Y, LING S Y, *et al.*. The improvement of the high precise gear's pitch accuracy based on multi-tooth indexing method [J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2010, 34(4): 6-9. (in Chinese)
- [7] 姜志峰,王立鼎,王晓东,等. 基圆盘与导轨间滑移对双盘式渐开线测量仪测量精度的影响[J]. *光学精密工程*, 2010,19(10):2450-2456.
LOU ZH F, WANG L D, WANG X D, *et al.*. Analysis of slippage between discs and rail in involute measuring instrument with double-discs [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010,19(10):2450-2456. (in Chinese)
- [8] BEYER W, PAHL W. Advanced strategies for the traceable calibration of cylindrical gears and bevel gears at PTB[J]. *VDI Berichte*, 1996, 1230: 937-945.
- [9] 范烁,王立鼎,马勇. 超精密齿轮齿距累积总偏差测量装置的改进及测量系统的设计[C]. 2005年机械工程学会年会. 重庆:机械工业出版社,2005.
FAN SH, WANG L D, MA Y. Design and improvement of measuring device and measuring system of ultraprecision gear cumulative pitch deviation [C]. *Proceedings of 2005 mechanical engineering annual meeting. Chongqing: Machinery Industry Press*, 2005. (in Chinese)

作者简介:



宋洪侠(1966—),女,黑龙江望奎人,副教授,硕士生导师,1992年于哈尔滨船舶工程学院获得硕士学位,主要从事机械设计及理论、超精密齿轮加工及测量技术的研究。E-mail: hxsong@dlut.edu.cn



赵苏苏(1988—),女,河南南阳人,硕士研究生,主要从事超精密齿轮加工方面的研究。E-mail: susu@mail.dlut.edu.cn



姜志峰(1978—),男,黑龙江肇东人,助理研究员,硕士生导师,1999年、2008年于大连理工大学分别获得学士、博士学位,主要从事超精密齿轮测量技术的研究。E-mail: louzf@dlut.edu.cn



王立鼎(1934—),男,辽宁辽阳人,教授,博士生导师,中国科学院院士,1960年于吉林工业大学获得学士学位,主要从事超精密齿轮加工与测试、精密机械设计 & 微纳机械的研究。E-mail: wangld@dlut.edu.cn