

文章编号 1004-924X(2016)08-1934-06

磨齿机分度误差传递规律

凌四营^{1*}, 李 军², 于佃清³, 贾 颖², 王立鼎^{1,2}, 娄志峰¹

(1. 大连理工大学 精密特种加工及微系统教育部重点实验室, 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;

3. 辽宁省计量科学研究院, 辽宁 沈阳 110004)

摘要:为预测被加工齿轮的齿距加工精度,研究了 Y7125 型大平面砂轮磨齿机系统分度误差的传递规律。采用全闭环测量法对用作角度测量基准的正 36 面棱体进行了高精度标定;基于该正 36 面棱体和相对测量法在机提取机床 36 个等分点系统分度误差曲线;最后在磨齿机上进行精密磨齿实验,通过比较齿轮试件的齿距累积偏差与机床原始系统分度误差的差异,研究机床分度误差的传递规律,并通过实验得到磨齿机分度误差传递过程中的不确定度。实验结果表明:采用全闭环测量法标定正 36 面棱体的测量不确定度达到 ± 0.05 ;磨齿机系统分度误差传递到被加工齿轮后,齿距累积总偏差由 2.1 μm 增大到 2.6 μm ,相对误差增加了 24%;通过磨齿实验得到磨齿机分度误差传递过程中的不确定度为 $\pm 0.6 \mu\text{m}$ 。得到的机床分度误差传递规律可用于预测齿轮的齿距累积加工精度,为制定科学的磨齿工艺提供技术支持。

关键词:磨齿机;分度误差;齿距累积偏差;误差传递规律;全闭环测量法

中图分类号: TG 86; TG 616 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162408.1934

Indexing error transfer law of a gear grinding machine

LING Si-ying^{1*}, LI Jun², YU Dian-qing³, JIA Ying², WANG Li-ding^{1,2}, LOU Zhi-feng¹

(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;

3. Liaoning Research Institute of Metrology, Shenyang 110004, China)

* Corresponding author, E-mail: luckling 168 @163. com

Abstract: To predict the pitch machining accuracy of a gear to be ground, the transfer law of the systematic indexing error of the gear-grinding machine (Y7125) with flat-faced grinding wheel was researched. The normal 36 prism for angle measurement datum was calibrated in high-precision by using the full closure measurement method, then the systematic indexing error curve with 36 equal points was extracted on-machine based on the normal 36 prism and the relative measurement method. Finally, the precision gear-grinding experiment was conducted on the gear-grinding machine. The indexing error transfer law of the machine was studied by comparing the difference between the cumulative

收稿日期: 2016-02-20; **修订日期:** 2016-03-15.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目 (No. 51305059); 国家自然科学基金重点资助项目 (No. U1508211); 国家自然科学基金创新研究群体资助项目 (No. 51321004); 国家科技支撑计划资助项目 (No. 2014BAF08B)

pitch deviation of a gear specimen and the original systematic indexing error of the gear grinding machine, and the uncertainty during the error transfer process of the gear-grinding machine was obtained by experiments. Experimental results show that the measurement uncertainty of the full closure measurement method to calibrate the normal 36 prism reaches to $0.05''$. The total cumulative pitch deviation varies from $2.1 \mu\text{m}$ to $2.6 \mu\text{m}$ and the relative error increases by 24% after the systematic indexing error of the gear grinding machine transfers to the gear to be ground. Moreover, the uncertainty during the error transfer process is $\pm 0.6 \mu\text{m}$. The transfer law of systematic indexing error of the gear-grinding machine from the experiments mentioned above can be used to predict the pitch machining accuracy of the gear to be ground and can provide technical supports for the development of the scientific gear-grinding process.

Key words: gear-grinding machine; indexing error; cumulative pitch deviation; error transfer law ; full closure measurement method

1 引言

齿轮作为机械零件中重要的基础件之一,尤其是圆柱渐开线齿轮被广泛应用于常规机械、地面交通、船舶、航空航天、兵器、精密机床与仪器等领域。2014 年我国生产齿轮 400 万吨,销售收入 2 180 亿元。中国齿轮的产量居世界首位,但主要以中低端产品为主,高端关键齿轮还依赖进口。标准齿轮的制造水平是国家精密齿轮制造水平的重要标志。我国标准齿轮检定规程 JJG 1008-2006 中规定:标准齿轮的精度等级是根据单个齿距偏差 f_{pt} 、齿距累积总偏差 F_p 、齿廓总偏差 F_α 、螺旋线总偏差 F_β 和径向跳动 F_r 的检定结果划分的^[1]。其中,与机床分度精度相关的单个齿距偏差 f_{pt} 和齿距累积总偏差 F_p 即是齿轮国家标准 GB/T 10095.1-2008 中规定的必检项目^[2],也是齿轮国际标准 ISO1328-1:2013 中的默认检查项目^[3]。可见提高齿轮齿距加工精度的重要性。

与齿轮的齿距累积加工精度和单一齿距加工精度密切相关的是机床分度系统精度。目前,高精度的分度系统分为电子直驱分度系统和机械分度系统。其中,机械分度系统根据分度元件的不同,又分为蜗轮蜗杆分度系统、马氏槽轮分度系统、分度盘式分度系统和端齿分度系统等^[4]。其中,端齿分度系统的分度精度最高,一般可达到 $0.5''$,最高可达到 $0.1''$,是机械分度系统中分度精度最高的分度元件^[5];其次是分度盘式分度系统,其分度精度可达 $5 \sim 10''$ 。本文选用的磨齿机床(Y7125)的分度系统为分度盘式分度系统。

为提高被加工齿轮的单个齿距偏差 f_{pt} 和齿距累积总偏差 F_p , 本文通过精确提取磨齿机床系统分度误差曲线,研究了磨齿机床系统分度误差的传递规律,预测齿轮的齿距加工精度,并对制定科学的磨齿工艺提供技术支持。

2 系统分度误差的提取

2.1 分度系统工作原理

Y7125 型大平面砂轮磨齿机的分度系统为分度盘式分度系统,分度工作方式为间歇分度,分度示意如图 1 所示。

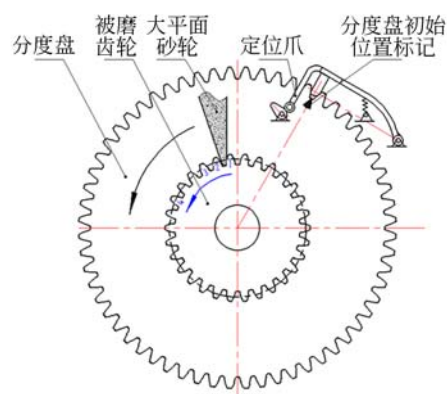


图 1 分度示意图

Fig. 1 Sketch map of index

被加工齿轮和分度盘同轴安装,因此,齿轮的齿距偏差和机床分度系统的误差值一一对应。只需要提取点数等同于被加工齿轮齿数的离散分度误差值即可。高精度的全微机化齿轮机床精度检测分析系统(FMT)和圆感应同步器可满足磨齿

机床系统分度误差的提取^[4,6,7]。根据 Y7125 磨齿机床的特性与实验条件,选用经过精确标定的正 36 面棱体和自准直仪,在机提取磨齿机的 36 个均布离散点的系统分度误差值来研究磨齿机分度误差传递规律。

由于 1 级精度的正 36 面棱体的分度误差和磨齿机系统分度误差在同一数量级上(4~10"),因此,1 级精度的正 36 面棱体不满足磨齿机系统分度误差的测量要求。对实验室的正 36 面棱体进行了精确标定,以分离出正 36 面棱体的系统分度误差^[8],提高正 36 面棱体的测量精度。

2.2 正 36 面棱体的标定

利用自准直仪和端齿自动分度台,采用全闭环测量法标定正 36 面棱体^[9-11]。参考多面体检定规程^[12],搭建正 36 面棱体标定平台如图 2 所示。

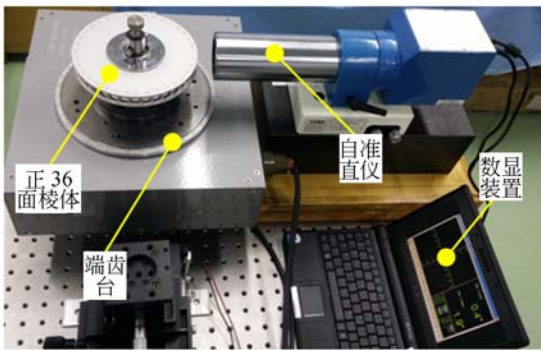


图 2 正 36 面棱体的标定

Fig.2 Calibration of 36 angular prism mirror

采用全闭环测量法采集端齿自动分度台和正 36 面棱体的组合数据矩阵 $\mathbf{M}(36 \times 36)$,如图 3 所示。

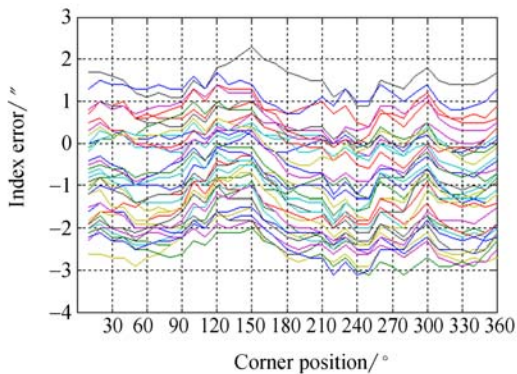


图 3 原始测量数据

Fig.3 Initial measuring data

分离出正 36 面棱体的系统分度误差柱状图如图 4 所示。最大分度误差为 4.1"。

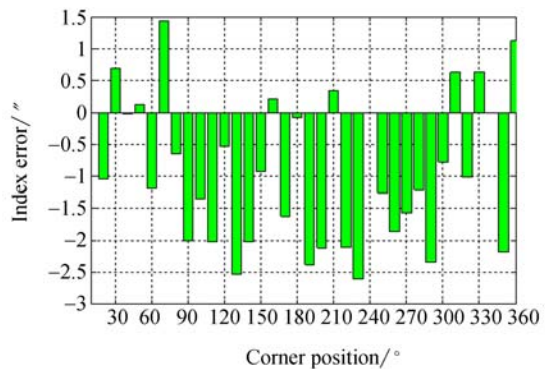


图 4 正 36 面棱体的系统分度误差柱状图

Fig.4 Bar graph of indexing error of 36 normal prism

原始测量数据分离出正 36 面棱体和自动端齿台的系统误差后得到的残差 $v_{i,j}$ 如图 5 所示。根据残差计算出全闭环测量法的测量不确定度。

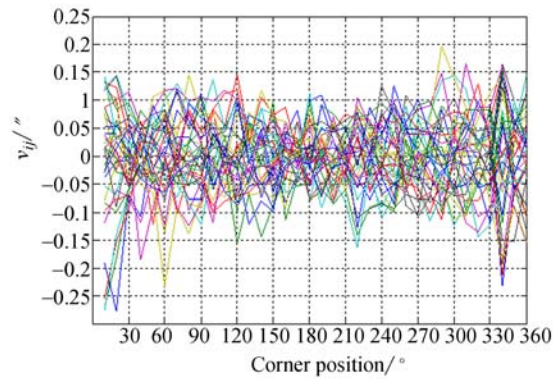


图 5 全闭环测量法的残差

Fig.5 Residual error of closure method

根据残差计算出全闭环测量法的测量不确定度 $U_{99} = \pm 0.05''$ 。可见,经过全闭环测量法标定的正 36 面棱体具有较高的测量精度,满足分度盘式分度系统的测量要求。

2.3 系统分度误差的提取

直接使用 1 级精度的多面棱体、自准直仪和全闭环测量法能够实现高精度分度系统的误差曲线的提取。在机测量时,考虑到数据量(36×36)较大,采集周期较长,温湿度的变化及仪器零位的漂移等因素会影响测量结果的准确性。为此,采用经过精确标定的正 36 面棱体和相对测量法直接在机提取磨齿机的系统分度误差。测量时,断开机床的展成系统,利用机床间歇自动分度的特点,在磨齿工作状态下,间歇采集机床分度系统的

分度误差值;正 36 面体棱体的安装位置即为齿轮试件的加工位置。正 36 面棱体的 0°与磨齿机床分度的 0°和 180°两个对称位置分别对齐,多次测量取平均值,以消除棱体安装偏心对测量结果的影响。磨齿机床系统分度误差在机测量平台如图 6 所示。

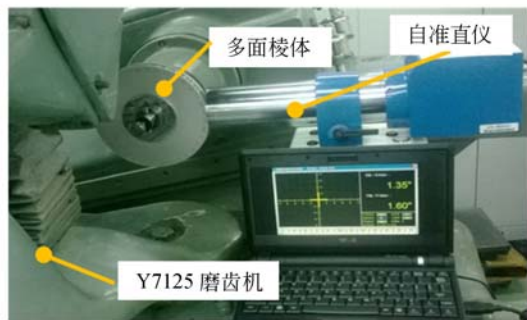


图 6 磨齿机床系统分度误差的在机提取

Fig. 6 Extraction the systematic indexing error of gear grinding machine

最终提取 Y7125 磨齿机 36 点系统分度误差 E_0 曲线如图 7 所示。分度系统 36 点的最大累积分度误差为 6.8''。

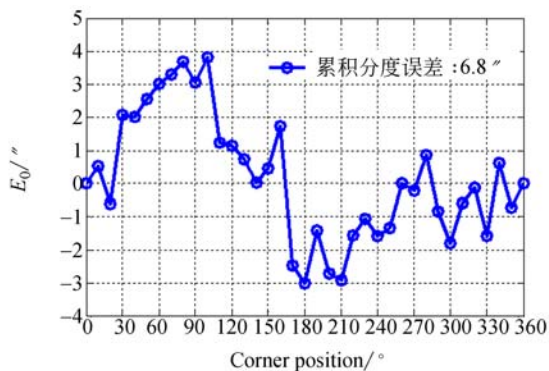


图 7 磨齿机分度系统误差曲线

Fig. 7 Systematic indexing error curve of the gear grinding machine

3 误差传递规律研究

3.1 磨齿实验

Y7125 磨齿机分度系统如图 8 所示。

被磨齿轮和分度盘都安装在加工主轴上,如果没有安装偏心误差,分度盘、加工芯轴和被磨齿

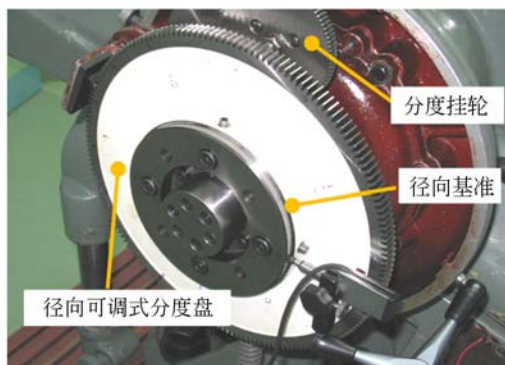


图 8 磨齿机分度系统

Fig. 8 Indexing system of gear grinding machine

轮将具有统一的回转轴线。理论上分度系统的误差将 1:1 的传递给被加工齿轮。为了减小齿轮试件安装偏心对齿距偏差的影响,试验中采用径向可调式芯轴及密珠轴套定位。

选择如表 1 所示参数的齿轮试件,在 (20 ± 1) °C 的恒温室里进行精密磨齿实验,如图 9 所示。

表 1 试件齿轮参数

Tab. 1 Parameter of gear Specimen

模数 m/mm	齿数 z	压力角 $\alpha/^\circ$	螺旋角 $\beta/^\circ$	齿宽 b/mm
3.5	36	20	0	25

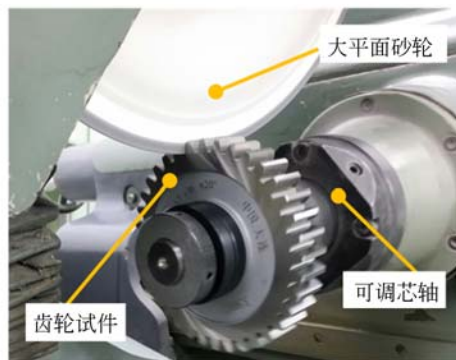


图 9 磨齿实验

Fig. 9 Experiment of gear grinding

然后在 (20 ± 1) °C 的恒温室,在自行设计的超精密齿距测量装置上进行精密对试件的齿距偏差进行精密测试^[13-14]。得到的试件齿距累积偏差 (F_{pi}) 曲线与机床原始系统误差曲线进行比较如图 10 所示。为了便于比较,将单位 (") 转换成齿轮分度圆 ($d=126 mm$) 上的位移 μm 。

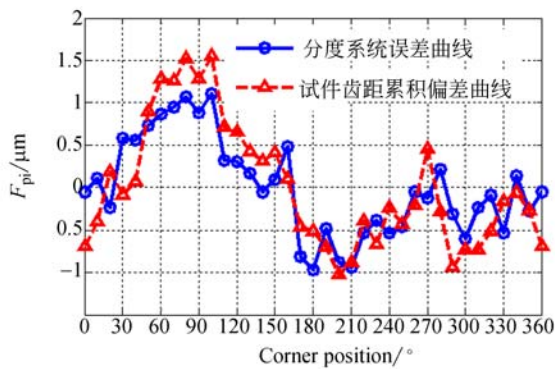


图 10 磨齿机系统分度误差传递规律

Fig. 10 Indexing error transfer law of gear grinding machine

由图 10 可知,被加工齿轮的齿距累积偏差曲线与磨齿机分度系统的误差曲线变化趋势基本一致,但有增大的趋势。磨齿机分度系统 36 点的最大累积误差(6.8")折算到齿轮分度圆为 $2.1 \mu\text{m}$,而被加工齿轮的齿距累积总偏差 F_p 为 $2.6 \mu\text{m}$,齿距累积总偏差增大了约 24%。

3.2 误差传递过程中的不确定度

试件齿距累积偏差曲线与机床原始系统分度误差的差异(如图 11 所示)反映出了磨齿机床分度误差传递过程中的不确定度。

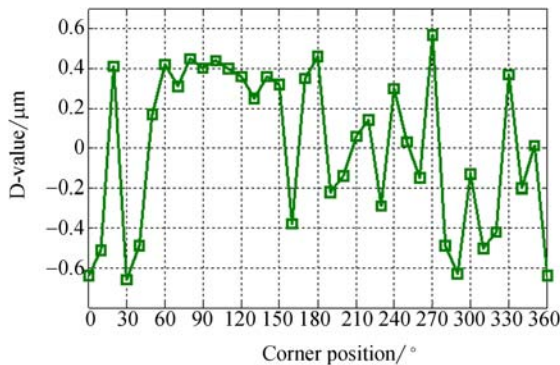


图 11 分度误差传递规律

Fig. 11 Indexing error transfer law

由图 11 可知,分度误差差值曲线在 $\pm 0.6 \mu\text{m}$ 内变化且没有明显的一次谐波分量,说明齿轮试件没有明显的安装偏心误差。也说明采用径向可调式芯轴及密珠轴套具有较高的定位精度。此外,该曲线中的偏差值具有一定的不确定度。测量过程中的阿贝误差、测量系统误差等,加工过程中的精加工时刻的选择、进刀量与进刀时刻的均匀性、砂轮的品质、光整加工周期的长短、定位爪卡入齿槽的状态、加工主轴的扭转振动、加工环境因素、磨齿工艺、工件的表面粗糙度等因素都会影响齿轮的齿距加工精度,致使磨齿机床系统分度误差传递到被加工齿轮上后有变大的趋势。

磨齿机分度误差传递过程中的不确定度是该机床加工齿轮齿距指标的综合体现。该值越小,说明机床的加工性能越优越。通过磨齿机床的原始系统分度误差和磨齿机分度误差传递过程中的不确定度,可预测齿轮的齿距加工精度。并对制定科学的磨齿工艺提供技术支持。

4 结 论

本文采用全闭环测量法对正 36 面棱体进行了高精度标定,标定的测量不确定度 $\pm 0.05''$;采用经过全闭环测量法标定的正 36 面棱体和相对测量法在机精确提取了机床 36 个均布离散点的系统分度误差曲线,最大分度误差为 $6.8''$;通过精密磨齿实验研究磨齿机系统分度误差的传递规律。磨齿机床系统分度误差传递到被加工齿轮后,齿距累积总偏差由 $2.1 \mu\text{m}$ 增大到 $2.6 \mu\text{m}$,相对误差增加了约 24%。通过实验方法得到了特定工况下机床分度误差传递过程中的不确定度为 $\pm 0.6 \mu\text{m}$ 。根据机床原始系统分度误差及磨齿机分度误差传递过程中的不确定度可预测齿轮的齿距加工精度。

参考文献:

- [1] JJG-1008-2006, 标准齿轮[S]. JJG-1008-2006, Master gears [S]. (in Chinese)
- [2] GB/T 10095.1-2008, 圆柱齿轮精度制—第 1 部分: 轮齿同侧齿面的检验[S]. GB/T 10095.1-2008, Cylindrical gears- system of

accuracy-Part 1: Definitions and allowable values of deviations relevant to corresponding flanks of gear teeth [S]. (in Chinese)

- [3] ISO1328-1: 2013, Cylindrical gears-ISO system of flank tolerance classification-Part 1: Definitions and allowable values of deviations relevant to flanks of gear teeth[S].

- [4] 彭东林,郑永,陈自然,等. 基于误差传递理论及误差修正技术的高精度蜗轮母机研制[J]. 机械工程学报,2011,47(9):157-163.
PENG D L, ZHENG Y, CHEN Z R, *et al.*. Research of high-precision worm gear machine tool based on error transmission theory and error correction technique[J]. *Journal of Mechanical Engineering*,2011,47(9):157-163. (in Chinese)
- [5] 王立鼎,凌四营,王晓东,等. 磨齿机用高精度端齿自动分度装置[P]. 中国:ZL200910309243. 2,2011-01-05.
WANG L D, LING S Y, WANG X D, *et al.*. High precision end tooth automatic indexing device for grinding machine[P]. China:ZL200910309243. 2, 2011-01-05.
- [6] 孙世政,彭东林,郑方燕,等. 时栅传感器动态测量误差补偿[J]. 光学精密工程,2015,23(4):1114-1121.
SUN SH ZH, PENG D L, ZHENG F Y, *et al.*. Compensation for dynamic measurement errors of time grating sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015,23(4):1114-1121. (in Chinese)
- [7] 袁辉,刘朝晖,李治国,等. 圆感应同步器系统误差的动态提取与补偿[J]. 光学精密工程,2015,23(3):794-802.
YUAN H, LIU CH H, LI ZH G, *et al.*. Dynamic extracting and compensating of system error for rotary circular inductosyn [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015,23(3):794-802. (in Chinese)
- [8] 卢荣胜,李万红,劳达宝,等. 激光跟踪仪测角误差补偿[J]. 光学精密工程,2014,22(9):2229-2305.
LU R SH, LI W H, LAO D B, *et al.*. Angular error compensation for laser tracker [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014,22(9):2229-2305. (in Chinese)
- [9] KNIEL K, HARTIG F, OSAWA S, *et al.*. Two highly accurate methods for pitch calibration [J]. *Measurement and Science Technology*, 2009, 20(11):115110.
- [10] SATO O, OSAWA S, KONDO Y, *et al.*. Calibration and uncertainty evaluation of single pitch deviation by multiple-measurement technique [J]. *Precision Engineering*, 2010, 34(1):156-163.
- [11] LING S Y, LOU ZH F, WANG L D. Closure measuring technique on the datum of an end-tooth indexing table [J]. *Measurement Science and Technology*, 2012, 23(4):045006.
- [12] JJG-238-2007, 正多面棱体[S].
JJG-238-2007, Angular polygon [S]. (in Chinese)
- [13] LOU Z F, LING S Y, HE H ZH, *et al.*. A kind of multi-step method for measuring pitch deviation of a gear [J]. *Measurement and Science Technology*, 2012, 23(11):115002.
- [14] 姜志峰,贺海钊,凌四营,等. 齿距偏差测量中系统误差的分离方法[J]. 纳米技术与精密工程,2012, 10(6):537-540.
LOU ZH F, HE H Z, LING S Y, *et al.*. Separation method of systematic errors in pitch deviation [J]. *Measurement Nanotechnology and Precision Engineering*, 2012, 10(6):537-540. (in Chinese)

作者简介:



凌四营(1978—),男,山东日照人,副教授,硕士生导师,2002年于山东交通学院获得学士学位,2007年于山东理工大学获得硕士学位,2013年于大连理工大学获得博士学位,主要从事精密机械设计、超精密磨齿工艺与测试技术等方面的研究。E-mail: luckling168@163.com



李军(1993—),男,安徽滁州人,硕士研究生,2015年于南通大学获得学士学位,主要从事齿轮测量仪器的设计与测试技术等方面的研究工作。E-mail: 708849084@qq.com