

文章编号 1004-924X(2011)03-0605-07

采用标准轴承的光电经纬仪轴系误差修正

冯栋彦^{1,2},高云国¹,张文豹¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院,北京 100039)

摘要:为了满足对小型跟踪架低成本、短周期和高互换性的要求,提出了采用标准轴承轴系代替现有研磨轴系的轴系改造方法。分析了采用标准轴承后的轴系误差源,根据跟踪架的使用多为远距离探测跟踪等特点,给出变轴线晃动为轴线平移的消差方法。设计了水平轴系实验模型,采用 p5 级深沟球轴承进行实验测量,并用傅里叶谐波分析方法对数据进行了分析。实验结果表明:水平轴左右轴承安装时,轴承内圈径向跳动最大方向安装在同一方向时,轴系晃动最大误差为 2.430";轴承内圈径向跳动最大方向相差 180°安装时,轴系晃动最大误差为 6.126",说明第一种安装方法会使跳动误差同步同周期变化,从而较大地减少轴系晃动。实验结果验证了消差方法的可行性,采用高精度等级轴承并采用提出的消差方法可以满足一般中小型跟踪架的精度要求。

关键词:光电经纬仪;跟踪架;标准轴承;轴系误差;傅里叶谐波分析

中图分类号:V556 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111903.0605

Elimination of shafting errors in photoelectrical theodolites with standard-bearings

FENG Dong-yan^{1,2},GAO Yun-guo¹,ZHANG Wen-bao¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

Abstract: In order to meet the requirements of a tracking gimbal for the lower cost, shorter manufacture periods and higher interchangeable property, a new way of shaft transformation by using standard-bearings to replace thrust bearings was proposed. The axis error sources of using standard-bearings were explained, then according to the principles and characters of the tracking gimbal, an error eliminating method to make the axis sloshing become parallel moving was given. Finally, an experiment model of horizontal axis was designed, and the error of axis adopting zero level deep groove ball bearings was tested and analyzed by the Fourier harmonic analysis method. The experimental results indicate that the maximum error of shafting sloshing has been reduced from 6.126" to 2.430", which proves the the feasibility of the proposed error eliminating method. It concludes that the higher level bearings and right fixing plans can meet the precision requirements of small-scale tracking gimbals.

Key words: photoelectrical theodolite; tracking gimbal; standard bearing; shafting error; Fourier harmonic analysis

收稿日期:2010-08-20;修订日期:2010-09-13.

基金项目:中科院长春光学精密机械与物理研究所三期创新工程资助项目(No. 061X20C060)

1 引言

轴系是决定跟踪架整体精度的重要部件。目前跟踪架的轴系主要为水平轴系和垂直轴系,垂直轴系为平面止推型垂直轴系,它由平面止推垂直轴承和径向轴承组成,径向轴承决定旋转轴在水平面的位置,起设备的置中作用;而平面止推轴承由上下两个平面止推环和多排钢球组成,它决定旋转轴在空间的指向,旋转轴线的指向误差即是垂直轴晃动。水平轴系为单端止推的简支结构。平面止推轴承是由钢球和两个止推环组成的,所以钢球和止推环端面的误差(主要是平面度)是轴系晃动的主要误差来源^[1-3]。在研制过程中为了保证较高的精度,止推环断面误差即其平面度主要靠刮研保证,因此其加工周期长、加工费用高且通用性、维修性差。

由于小型化光电仪器(重量在 500 kg 以下)研制周期很短,因此对跟踪架轴系的简单化和维修互换性要求很高。滚动轴承是高度标准化的机械零件,有着多种尺寸规格和精度等级的系列型号,可以在相当广的范围内满足仪器的需求。同时由于其维护方便,并能承受一定的径向和轴向载荷,因而得到了广泛的应用。基于以上的因素,本文提出了用标准轴承代替现有的研磨止推轴承的方法,力求能在保证一定精度要求下较大地降低轴系加工难度,缩短加工周期和降低加工成本。

2 误差消除原理及方法

2.1 误差源分析^[4-6]

采用标准轴承后,影响跟踪架轴系回转精度的因素有:

(1)配合表面不圆度的影响:与标准轴承配合的轴等相关零部件的制造精度要达到要求。

(2)配合间隙的影响:轴承与相关零件的配合间隙要满足实际工作要求。

(3)滚动轴承径向跳动的影响:径向跳动对回转轴系来说影响较大,分为轴承内圈的径向跳动和轴承外圈的径向跳动。

轴承外圈的径向跳动。在跟踪架轴系中内圈

转动、外圈固定,滚动轴承外圈没有径向跳动;对于内圈转动、外圈固定的情况,轴的安装中心线为内径中心线,而轴的回转中心线为滚道中心线。若滚道为理想圆,但滚道圆与内径圆之间存在偏心,在回转时轴将有径向跳动。若滚道圆与内径圆没有偏心,但滚道圆有椭圆度误差时,轴在回转时仍会产生径向跳动。

(4)滚动轴承轴向跳动的的影响。

(5)轴承游隙的影响:标准轴承的游隙使得轴和轴承有偏心,使用时可以通过预紧等措施调整游隙。

(6)滚动体直径差的影响:滚动体的直径差会影响滚动轴承的跳动。

在跟踪架轴系研制过程中,与轴承配合件需要精密加工,并采取过盈配合、调整游隙等方法来减少配合表面不圆度的影响、配合间隙的影响和轴承游隙的影响。而对于所选用的标准轴承,其本身的径向跳动、轴向跳动和滚动体直径差是在出厂时就确定的,它们对系统精度的影响在特定条件下就很明显。因此,采用标准轴承轴系后,如何减少标准轴承自身误差带来的影响将成为提高跟踪架轴系精度的重要问题。

2.2 消差方法^[7-9]

光电仪器工作时,跟踪架的回转精度是整个系统精度的重要部分,轴系的回转精度包括置中精度和方向精度。置中精度指轴线的平移误差,方向精度指轴线的晃动(倾斜)误差。光电仪器多用于远距离探测,跟踪架轴系晃动经过距离的放大对光电仪器的工作精度影响最大,而回转轴线的少量平移对光电仪器的工作精度影响可以忽略不计。从误差源的分析中可以得出轴承内圈的径向跳动对经纬仪轴系精度影响比较大,而根据滚动轴承制造工艺学可知,同一批工件的表面形状是连续、单值、以 2π 为周期的封闭曲线^[10]。据此本文提出使跟踪架的轴线晃动误差部分变为轴线平移的方法,从而减少晃动误差,提高轴系精度。

具体方法为:测量出轴承内圈的径向跳动最大的位置并做标记,然后把轴承的径向跳动误差最大处对正安装在轴的同一条母线上,使得轴承的径向跳动误差同步同周期性变化。

轴承安装方法 1(正装):轴承内圈径向跳动

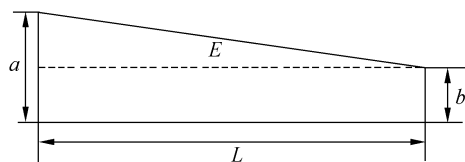


图 1 轴承按方法 1 安装时轴线晃动示意图
Fig. 1 Schematic diagram of shafting error when bearings fixed as method 1

最大方向安装在轴的同一条母线上,如图 1 所示,此时轴线倾角为:

$$E_{\text{method 1}} = \arctan \frac{a-b}{L} \quad (1)$$

轴承安装方法 2 (反装):如图 2,轴承内圈的

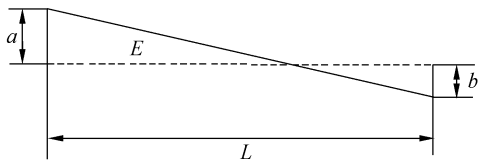


图 2 轴承按方法 2 安装时轴线晃动示意图
Fig. 2 Schematic diagram of shafting error when bearings fixed as method 2

最大径向跳动处安转在相差 180°的轴线上,此时轴线的倾角(晃动误差)最大,为:

$$E_{\text{method 2}} = \arctan \frac{a+b}{L} \quad (2)$$

轴承正装后的轴系误差为轴线倾斜量 $E_{\text{method 1}}$ 和轴线平移量 b ,而轴线平移对系统精度影响很小。采用同一精度等级同一批次的标准轴承,其径向跳动误差 a 和 b 相差不大,故轴系晃动量会减少很多。

3 实验平台设计

如图 3 所示,设计了采用标准轴承 61910 的水平轴系实验平台。轴承支撑跨距为 120 mm,在轴的一端安装带有可调装置的平面反射镜,利用步进电机驱动轴,可用自准直光管测量轴承在不同安装状况下与轴在不同转角时的轴系晃动误差。

为使轴承在测量过程中保持安装时的相对位置,轴承内圈用螺母固定在轴上,外圈用轴承盖压紧。

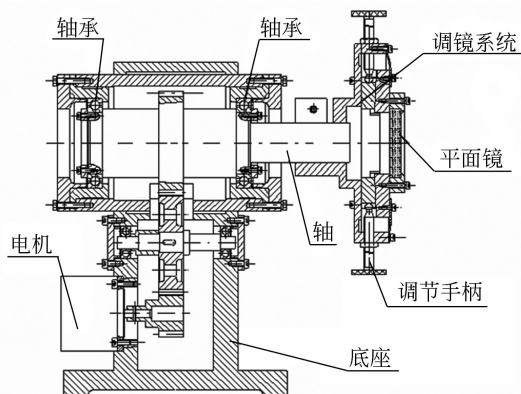


图 3 实验平台结构设计图
Fig. 3 Design scheme of experiment equipment

4 实验结果及分析

用 0.1" 自准直仪对准反射镜进行测量。水平轴从 0~360° 旋转两周后再反转两周,每隔 18° 读数一次,取 4 次读数的平均值作为测量值,用傅里叶谐波函数对数据进行分析。

表 1 为采用 p5 级深沟球轴承在正装和反装情况下,每隔 18° 测量得到轴系晃动误差 y_i 在水平方向的分量 X_i 和高低方向的分量 Y_i 。

表 1 在不同状况下的实验测量数据
Tab. 1 Test data in different states (")

$\alpha / (^\circ)$	轴承正装		轴承反装	
	X_i	Y_i	X_i	Y_i
0	-2.8	-0.3	4.0	3.4
18	-2.9	0.1	2.9	6.0
36	-3.0	0.7	1.2	3.2
54	-3.2	-0.1	-1.1	2.0
72	-4.4	-1.8	-3.9	-0.4
90	-5.7	-1.0	-5.6	-2.5
108	-6.0	-0.4	-3.0	-5.6
126	-5.6	0.2	-1.4	-3.0
144	-5.1	1.0	0.6	-0.4
162	-4.8	2.3	2.7	1.0
180	-3.7	1.4	4.6	1.8
198	-2.3	0.5	3.0	2.7
216	-1.2	-0.8	1.1	1.0
234	-3.6	-1.4	-0.5	0.4
252	-4.9	-3.2	-2.3	-1.0
270	-5.8	-2.0	-3.8	-2.8
288	-5.5	-0.5	-5.5	-5.6
306	-5.2	0	-2.9	-3.4
324	-4.6	-0.5	-0.5	-1.5
342	-4.1	-0.8	1.7	0.8

在工程上,谐波是误差的构成分量,它包含了误差的 3 个要素:大小、方向和频率。对这 3 个要素深入研究,非常有利于解决许多轴承领域的诸如回转精度、寿命、振动和噪声等难题^[11]。

一个以 2π 为周期的周期性函数展开成傅里叶级数为:

$$f(\alpha_i) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n a_k \cos(k\alpha_i) + b_k \sin(k\alpha_i), \quad (3)$$

式中常量:

$$a_0 = \frac{2}{n} \sum_{i=0}^{n-1} X_i, \quad (4)$$

第 k 次谐波函数系数:

$$a_k \approx \frac{2}{n} \sum_{i=0}^{n-1} X_i \cos(k\alpha_i), \quad (5)$$

$$b_k \approx \frac{2}{n} \sum_{i=0}^{n-1} X_i \sin(k\alpha_i), \quad (6)$$

则第 k 次谐波函数:

$$y_k = a_k \cos(k\alpha_i) + b_k \sin(k\alpha_i). \quad (7)$$

把以上测量值代入上述各式中得到各次谐波函数的系数,如表 2 和表 3:

表 2 谐波系数 a_k 计算值

Tab. 2 Harmonic modulus a_k

a_k	轴承正装		轴承反装	
	X_i	Y_i	X_i	Y_i
$a_0/2$	-4.220	-0.330	-0.435	-0.195
a_1	0.072	-0.398	-0.496	0.633
a_2	1.156	1.109	4.079	3.113
a_3	-0.021	-0.586	0.438	0.146
a_4	-0.330	-0.235	0.067	0.063

表 3 谐波系数 b_k 计算值

Tab. 3 Harmonic modulus b_k

b_k	轴承正装		轴承反装	
	X_i	Y_i	X_i	Y_i
b_1	-0.165	0.624	0.077	0.551
b_2	1.250	-0.513	0.689	2.399
b_3	-0.334	0.362	0.342	0.594
b_4	0.231	0.369	-0.105	-0.435

4.1 轴系晃动水平方向分量分析

把轴承正装时水平方向晃动量谐波系数值代入计算公式(7)中,可以得到前四次的谐波函数如下:

第一次谐波函数:

$$y_1 = 0.072 \cos(\alpha_i) - 0.165 \sin(\alpha_i);$$

第二次谐波函数:

$$y_2 = 1.156 \cos(2\alpha_i) + 1.250 \sin(2\alpha_i);$$

第三次谐波函数:

$$y_3 = -0.021 \cos(3\alpha_i) - 0.334 \sin(3\alpha_i);$$

第四次谐波函数:

$$y_4 = -0.330 \cos(4\alpha_i) + 0.231 \sin(4\alpha_i).$$

各次谐波函数的曲线如图 4:(图中 τ 代表晃动量, ω 代表方位角)

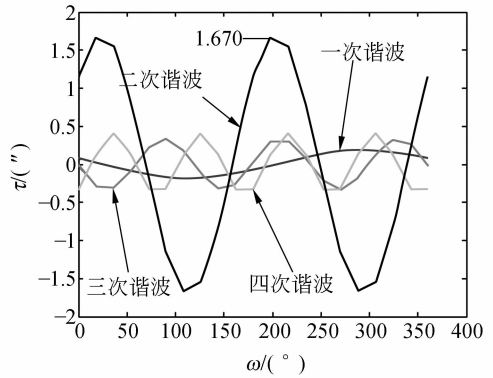


图 4 轴承正装水平方向晃动分量前四次谐波曲线
Fig. 4 Harmonic curves of wobbling components with bearings fixed as method 1 in horizontal directions

同理可得轴承反装时水平方向晃动分量前 4 次谐波函数曲线如图 5:

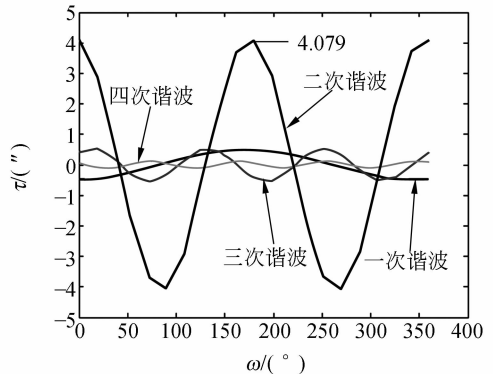


图 5 轴承反装水平方向晃动分量前四次谐波曲线
Fig. 5 Harmonic curves of wobbling components with bearings fixed as method 2 in horizontal directions

从图 4 和图 5 中可以看出第二次谐波函数曲

线幅值在轴承正装后有很大变化,最大值从 4.079"减少到 1.670",其他曲线幅值没有明显变化。说明第二次谐波曲线代表的误差可以通过轴承正装的方法减少,从而减少水平方向的晃动误差。

4.2 轴系晃动高低方向分量分析

同样可以得到轴系晃动在轴承正、反装下的高低方向分量的谐波函数曲线图 6,7。

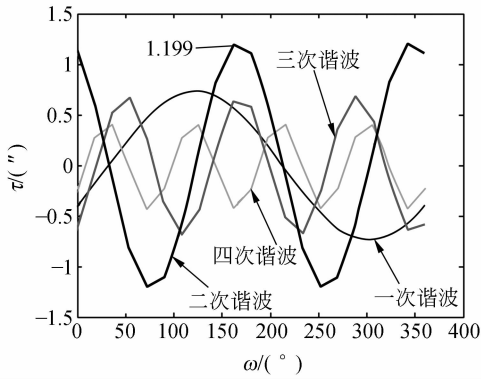


图 6 轴承正装高低方向晃动分量前四次谐波曲线
Fig. 6 Harmonic curves of wobbling components with bearings fixed as method 1 in high and low directions

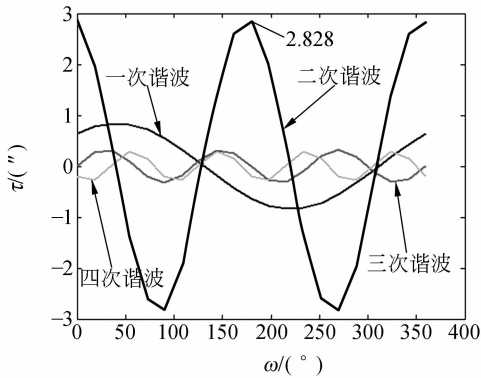


图 7 轴承反装高低方向晃动分量前四次谐波曲线
Fig. 7 Harmonic curves of wobbling components with bearings fixed as method 2 in high and low directions

从图中可以看出高低方向分量在轴承正反装情况下,除了第二次谐波函数外其他谐波曲线也都没有明显的变化。第二次谐波函数幅值的最大值由反装时的 2.828"减少为 1.199",可见轴承正装也可以减少高低方向分量二次谐波函数所代表的误差。

参照轴系误差源的分析,傅里叶级数的常数项 $a_0/2$ 反映平面反射镜与水平轴不垂直量。一次谐波以 2π 为周期,反映滚道圆与内径圆存在偏心。二次谐波周期为 π ,表明轴承滚道椭圆度误差和水平轴的弹性变形,以及与轴承配合的轴的椭圆度误差。也有一部分是由于预紧力施加不均匀导致滚道歪斜而带来的径向跳动。三次谐波反映轴的刚度或轴承内环在加工时由装夹带来的三角形状误差。四次以上的谐波为轴系的随即晃动误差,如滚动物体直径差的影响等。

根据以上分析可知,轴承正装可以在不增加其他误差的情况下较大地减少二次谐波代表的误差,即减少轴承内圈径向的跳动误差。

4.3 轴系晃动量分析

轴系晃动在高低和水平方向的分量可近似表示为:

$$f(X_i) \approx y_{x_1} + y_{x_2} + y_{x_3} + y_{x_4}, \quad (8)$$

$$f(Y_i) \approx y_{y_1} + y_{y_2} + y_{y_3} + y_{y_4}, \quad (9)$$

轴系晃动量 y_i 为:

$$y_i = \sqrt{f^2(X_i) + f^2(Y_i)}. \quad (10)$$

图 8 和 9 就是轴承正装和反装下的轴系晃动曲线。

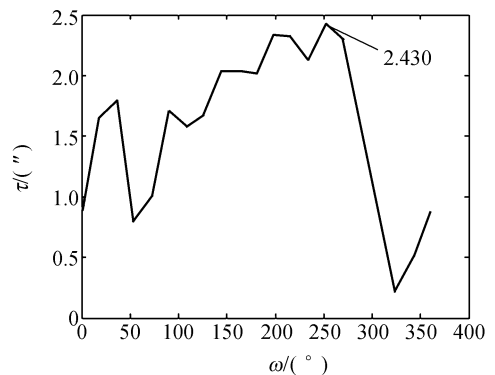


图 8 轴承正装时轴系晃动曲线
Fig. 8 Shafting error curves with bearings fixed as method 1

从图中可得知,轴系晃动最大误差在轴承反装时为 6.126",而在轴承正装时最大晃动误差较小,为 2.430"。证明了使用正装方法可以减少轴承径向跳动对轴系晃动的影响,轴系晃动精度有较大的提高。

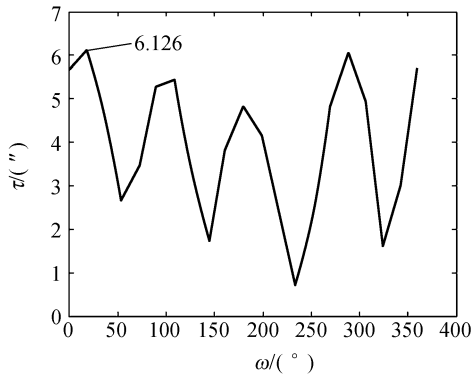


图 9 轴承反装时轴系晃动曲线

Fig. 9 Shafting error curves with bearings fixed as method 2

5 结 论

本文针对中小型经纬仪的需求,提出了采用标准轴承轴系的思想。为了满足经纬仪高精度的要求,根据经纬仪的工作特点,给出变轴线晃动为轴线平移的误差消除方法。建立了水平轴系实验平台并进行实验测量,通过傅里叶谐波分析方法对测量数据进行了分析。分析显示,轴系晃动最大误差由反装时的 $6.126''$ 减少到正装时的 $2.430''$,表明轴系晃动误差在轴承正装时可以大大减少。若采用高精度等级的标准轴承并使轴承对正安装,轴系精度可以进一步提高,满足一般中小型经纬仪的精度要求,并大大降低轴系加工难度、缩短加工周期、降低成本。

参考文献:

- [1] 李德江. 旋转机械轴心轨迹的理论计算、提纯和自动识别研究[D]. 济南: 山东大学, 2007.
LI D J. *Calculation, Purification and Automatic Recognition of the Rotating Machinery's Orbit of Shaft Center-line* [D]. Jinan: Shandong University. (in Chinese)
- [2] 陆国英. 778 光电经纬仪水平轴系的设计、安装与检测[J]. 光学工程, 1989(4): 51-60.
LU G Y. Design, assembly and testing of horizontal axial series for 778 photoelectric theodolite[J]. *Optical Engineering*, 1989(4): 51-60. (in Chinese)
- [3] 杜俊峰, 李正周. GD-220 光电经纬仪轴系的精度分析[J]. 光学精密工程, 2002, 10(4): 416-419.
DU J F, LI ZH ZH. Analysis of the axial accuracy of the GD-220 photoelectric theodolite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(4): 416-419. (in Chinese)
- [4] 李艳平, 李岩, 郭立红. 对经纬仪静态精度检测中星校技术误差源的分析[J]. 光学精密工程, 2004, 12(4): 79-83.
LI Y P, LI Y, GUO L H. Error analysis of star calibration technique in theodolite static precision detection[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(4): 79-83. (in Chinese)
- [5] 李增, 吴志勇, 佟刚, 等. 车载经纬仪的静态指向误差补偿[J]. 光学精密工程, 2010, 18(4): 921-927.
LI Z, WU ZH Y, TONG G, *et al.*. Pointing error correction for vehicular platform theodolite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(4): 921-927. (in Chinese)
- [6] 赵勇志, 张景旭, 吴小霞, 等. 1m 望远镜俯仰轴系精度检测误差的修正[J]. 光学精密工程, 2009, 17(10): 2401-2405.
ZHAO Y ZH, ZHANG J X, WU X X, *et al.*. Modification of altitude axis errors for 1 m aperture telescopes [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(10): 2401-2405. (in Chinese)
- [7] 张宁, 沈湘衡, 杨亮, 等. 利用动态靶标谐波特性评价光电经纬仪的跟踪性能[J]. 光学精密工程, 2010, 18(6): 1286-1294.
ZHANG N, SHEN X H, YANG L, *et al.*. Evaluation of tracking performance of photoelectric theodolite by using harmonic property of dynamic target [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(6): 1286-1294. (in Chinese)
- [8] 张宁, 沈湘衡, 杨亮. 应用跟踪误差等效模型评价光电经纬仪跟踪性能[J]. 光学精密工程, 2010, 18(3): 677-684.
ZHANG N, SHEN X H, YANG L. Evaluation of tracking performance of photoelectric theodolite using equivalent model of tracking error [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(3): 677-684. (in Chinese)
- [9] 高策, 乔彦峰. 光电经纬仪测量误差的实时修正[J]. 光学精密工程, 2007, 15(6): 846-851.
GAO C, QIAO Y F. Real-time error-correction method for photoelectrical theodolite[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(6): 846-851. (in Chinese)
- [10] 夏新涛, 马伟, 顿谭成, 等. 滚动轴承制造工艺学

[M]. 北京:机械工业出版社,2007.

XIA X T, MA W, JIE T CH, *et al.*. *Rolling Bearings Manufacturing Technology* [M]. Beijing: China Machine Press, 2007. (in Chinese)

[11] 高福晖. 大型经纬仪轴系晃动的傅里叶谐波分析

方法[J]. 光电工程, 1998, 25(5): 1-10, 15.

GAO F H. Fourier harmonic analysis method for axial system wobbling of the Large-Scale theodolite [J]. *Optic-Electronic Engineering*, 1998, 25(5): 1-10, 15. (in Chinese)

作者简介:



冯栋彦(1981—),男,山东菏泽人,博士研究生,2004年于吉林大学获得学士学位,主要从事光机电仪器总体设计的研究。E-mail: fdyra@163.com

张文豹(1967—),男,黑龙江绥化人,副研究员,1989年于齐齐哈尔大学获得学士学位,主要从事光机结构设计方面的研究。E-mail: zhangwb@126.com

通讯作者:



高云国(1955—),男,山东乳山人,研究员,博士生导师,1982年于哈尔滨科技大学获得学士学位,1991年于中科院院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事光电仪器总体设计的研究。E-mail: gaoyg_gjs@163.com.cn

● 下期预告

Wolter-I 型掠入射反射镜的加工

王永刚^{1,2}, 崔天刚^{1,2}, 马文生¹, 陈斌¹, 陈波¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

针对 Wolter-I 型掠入射反射镜柱面内表面的特殊结构,研究了弹性球状小磨头以旋偏方式运动逐环带修正面形时的去除函数模型,分析了相关工艺参数,如磨头-工件旋转角速度比、旋偏角的大小、磨头中心压强以及磨头和工件的趋近距离对去除函数的影响。通过实验获得了驻留时间和去除函数中心去除深度的关系。采取两步加工法控制研抛后表面质量,分析表明:当磨头-工件角速度比为 1.41 时,表面的质量最好。介绍了 CCOS 法加工 Wolter-I 型掠入射反射镜的过程。选择微晶玻璃为反射镜的镜胚,在自研的研抛设备上,以不同粒径的氧化铈作为抛光液,对金刚砂砂轮粗磨后的工件进行抛光。通过改变磨头相对工件的压入深度,获得不同大小的磨头去除区域,实现了对上一个抛光周期后的残留误差的有效去除。最终获得的反射镜面形精度为 $1.39 \mu\text{m(PV)}$ 和 $0.34 \mu\text{m(RMS)}$,圆度均方根误差优于 $0.1 \mu\text{m}$ 。实验结果表明:提出的两步法旋偏加工方案在工程中完全可行,为进一步加工符合设计要求的掠入射反射镜奠定了基础。