

文章编号:1004-4213(2010)12-2194-6

复合式光电编码器精密轴系设计及准确度分析*

梁立辉^{1,2}, 万秋华^{1,†}, 余容红¹

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要: 为了提高复合式光电编码器的轴系准确度, 运用一个径向密珠轴承与两个轴向止推密排轴承相结合的结构设计了大空心轴精密轴系, 并对轴系误差进行分析. 通过该方法设计的精密轴系径向跳动 $\delta < 3 \mu\text{m}$, 解决了大空心轴轴系准确度差的问题, 提高复合式编码器的测角准确度, 应用该轴系研制的复合式光电编码器准确度 $\sigma < 2''$.

关键词: 复合式光电编码器; 密珠轴系

中图分类号: TP336

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103912.2194

0 引言

光电编码器是集光机电为一体的数字化位移测量装置. 由于它结构简单、分辨力高、准确度高、易形成绝对代码, 因此被广泛应用于国防、工业和科技领域的动态测量及实时控制系统中. 传统的编码器分为绝对式编码器和增量式编码器, 但在某些控制系统中要求编码器在输出位置信息的同时, 还要输出相位相差 90° 的两路正余弦信号, 用于伺服系统的控制. 为此设计了既能输出角度位置信息又能输出正余弦伺服信号的复合式光电编码器.

德国的 Heidenhain 公司为伽利略(意大利)望远镜控制系统设计的增量式与绝对式复合的光电编码器已达 27 位, 分辨力 $0.01''$, 准确度为 $0.036''$, 是当今准确度最高的编码器. 目前, 国内的编码器分辨力已由 8 位提高到 25 位, 但还没有绝对式和增量式复合的编码器的研制.

轴系是高准确度复合式光电轴角编码器的重要部件之一, 其主要作用是支承码盘、并带动码盘进行精密分度和作精确、灵活、均匀的旋转, 从而使码盘和狭缝之间产生相对运动, 形成莫尔条纹, 以便实现机械转角变成光电信号的转换. 光电轴角编码器的性能和准确度在很大程度上依赖于轴系的工作准确度. 为了提高复合式光电编码器的轴系准确度, 本文设计了大内孔高准确度轴系, 对轴系径向跳动进行了估计, 并对设计结果进行分析和检测.

1 复合式光电编码器工作原理

复合式光电编码器的结构包括: 1) 发光管, 2) 复合式码盘, 3) 精密轴系, 4) 接收狭缝, 5) 光电接收元件, 6) 信号处理电路, 7) 外基座.

编码器工作时, 码盘随主轴旋转, 发光管发出的光经复合式码盘和读数狭缝照到光电接收管上, 光电接收管产生的光电信号实时送入编码器处理电路. 一部分电路采用通用的绝对式光电编码器处理电路方法将光电信号处理为 21 位自然二进制角度代码输出, 另一部分电路则将采集到的莫尔条纹信号处理为相位相差 90° 两路正余弦信号输出, 用于伺服系统的控制. 编码器工作原理如图 1.

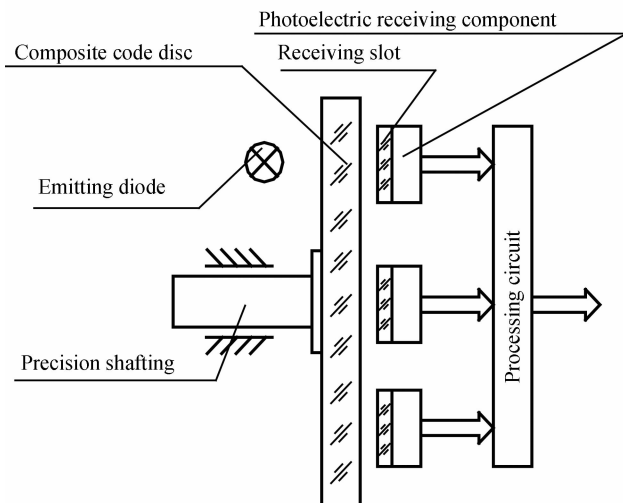


图 1 编码器原理

Fig. 1 Principle block diagram of encoder structure

轴系的各项误差主要包括径向晃动误差、轴向窜动误差、主轴端面跳动误差. 其中, 对编码器测角准确度起决定性作用的是径向晃动误差, 即置中准

* 中国科学院知识创新工程领域前沿项目资助

† Tel: 0431-86176566

Email: lianglhciomp@126.com

收稿日期: 2010-11-04

修回日期: 2010-11-19

精度. 轴向窜动相对于径向晃动来讲对测角准确度的影响相对较小, 可以通过电子学的处理电路补偿. 主轴径向晃动误差主要影响测角准确度、精粗关系、码道间关系, 端面跳动及轴向窜动引起码盘与狭缝之间的间隙变化, 这一变化直接影响信号的对比度和码盘的使用安全, 同时, 当采用固体发光器件照明时, 由于固体光源的发散, 而使莫尔条纹产生一定的附加位移, 将产生分度误差.

2 复合式光电编码器轴系设计

复合式光电编码器的准确度要求为 $\sigma < 2''$, 考虑到机械装调、电路处理等因素影响, 确定轴系径向跳动为 $\delta < 3 \mu\text{m}$.

2.1 轴系材料的选择

温度变化经常使轴系转动发滞, 破坏轴系旋转的匀滑性. 温度变化将引起轴系配合间隙的改变润滑油粘度变化、轴系零件变形以及由此产生应力等.

设在温度 t_1 和 t_2 时, 轴系相应的间隙为 Δd_1 和 Δd_2 , 则

$$\Delta d_1 = d_k - d_z - d_r$$

$$\Delta d_2 = d_k [1 + \alpha_k (t_2 - t_1)] - d_z [1 +$$

$$\alpha_z (t_2 - t_1)] - d_r [1 + \alpha_r (t_2 - t_1)] =$$

$$\Delta d_1 + (d_k \alpha_k - d_z \alpha_z - d_r \alpha_r) \Delta t \quad (1)$$

式中: d_k 、 d_z 、 d_r 分别为轴套孔、主轴轴颈和滚珠的直径; α_k 、 α_z 、 α_r 分别为轴套、主轴材料和滚珠的线膨胀系数.

由于 d_k 和 d_z 近似等于公称尺寸 d , 用 d 代替 d_k 和 d_z 后, 式中可改写成

$$\Delta d_2 = \Delta d_1 + d(\alpha_k - \alpha_z) \Delta t - d\alpha_r \Delta t =$$

$$\Delta d_1 + d\Delta\alpha \Delta t - d\alpha_r \Delta t \quad (2)$$

温度变化不仅影响轴系的径向尺寸, 还将引起轴向尺寸的改变. 若主轴的伸长量与轴套的伸长量不等, 则可能造成主轴的挤压变形, 从而影响轴系的回转准确度. 所以在设计时, 光电轴角编码器主轴材料的选择原则是: 能满足各部分对硬度的要求, 热处理后变形小, 组织稳定且易于加工. 最重要的轴系各零件的材料尽量采用相同或接近的材料.

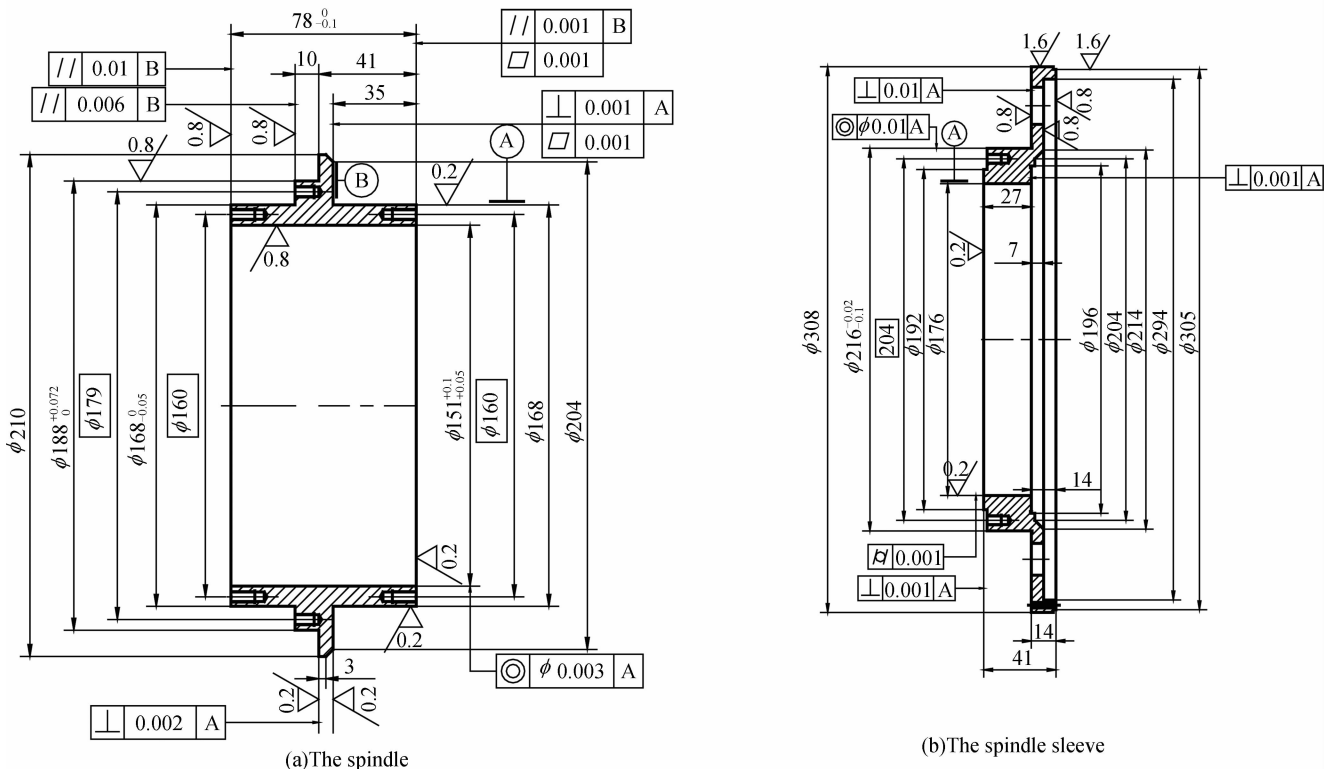


图 2 编码器主轴和轴套结构图

Fig. 2 Structures of the spindle and the spindle sleeve

高精度复合式光电轴角编码器对轴系准确度要求较高, 对于高精度的轴系, 材料及热处理的选择是保证导轨受外界因素影响小、达到高精度、高稳定性的关键. 为此该轴系主轴、轴承套和轴系压板材料都选用 GCr15siMn 轴承钢, 淬火到 HRC58~60. 这种经热处理后的轴承钢, 其特点为具有高硬

度、高耐磨性、高强度、机械性能稳定的特点, 适合于准确度较高的编码器轴系. 图 2(a) 和 (b) 分别为复合式光电编码器的主轴及轴套结构.

2.2 钢球的选择及排列方式

在滚动轴系中, 主轴是无间隙转动, 但是由于轴套、主轴及钢球有形状误差, 特别是钢球之间的尺寸

误差和平面滚道面与回转轴线的不垂直度的影响, 会引起主轴的径向游动. 如图 3 所示, 主轴带动钢球旋转, 主轴每转一周相对轴套的位置是不变的(图中的 B 点相对于 A 点), 而相对钢球的位置按一定的规律改变. r 为钢球半径, 设主轴的角速度为 ω_1 , 若钢球为纯滚动, 且角速度为 ω_2 , A 点为钢球的瞬心, 则 B 点与 O_1 点的线速度分别为

$$V_B = 2r\omega_2 \quad (3)$$

$$V_{O_1} = r\omega_2 \quad (4)$$

它们的比值 V_B/V_{O_1} , 即在相同的时间 B 点和 O_1 点所经过的路程之比也为 2:1, 即

$$S_B/S_{O_1} = 2 \quad (5)$$

式(5)表明, 主轴每转一周, 钢球相对于主轴的位置发生变化, 当钢球本身有微小的尺寸误差和形状误差时, 主轴轴心位置便发生改变, 造成主轴回转误差.

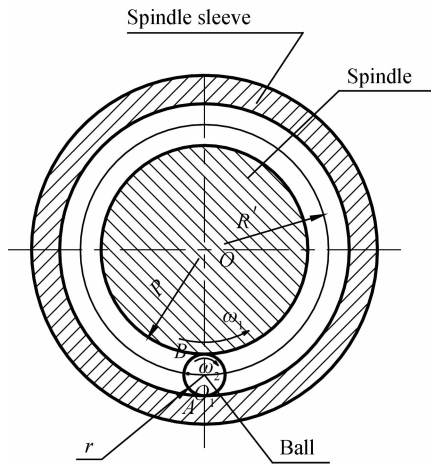


图 3 主轴游动规律
Fig. 3 Orderliness of principal axis sport

由此可见当滚动钢球存在圆度误差和尺寸互差时, 主轴回转中心将接上述规律发生摆动. 该摆动无法通过调整来补偿, 对光电轴角编码器的准确度影响极大. 为保证高准确度光电轴角编码器的轴系准确度指标, 在轴系设计中, 应用半运动学及平均效应原理, 采用 00 级(钢球圆度误差 $0.12 \mu\text{m}$, 直径互差 $0.1 \mu\text{m}$)钢球设计散装轴承, 同时控制轴承内外滚道的圆度, 并保证钢球与内外圆滚道的配合为过盈配合.

钢球的排列方式必须满足每个钢球的滚道互不重叠, 这样的布置法可以均化主轴、轴套、钢球的形状误差和钢球的直径误差等. 而且要保证在直径方向上钢球的对称性, 这对于消除上述形状误差中的偶次谐波量是有利的. 根据以上原则设计了径向保持架如图所示. 保持架上共有 288 个孔, 分为 12 个组, 在每个组内按螺旋线排列, 每个组有 24 个孔, 轴向 4 个孔, 相邻母线上的孔中心夹角为

$$\alpha = \frac{360^\circ}{12 \times 6} = 5^\circ$$

同一组中每条母线上的孔都与前一条母线上的同位置的孔的连线与水平线的夹角为 5° , 不同组的母线则依此错开 0.8 mm , 保持架的展开图如图 4.

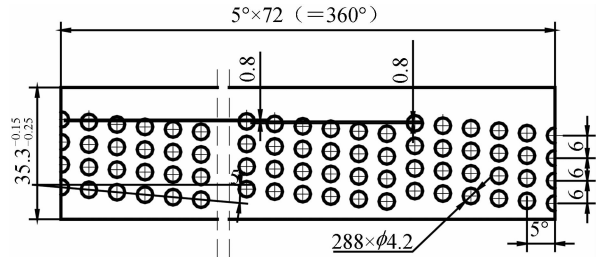


图 4 径向保持架展开图
Fig. 4 Sketch of the radial direction bearing cage

轴向保持架采用单排钢球排列的方式, 通过轴向过盈保证精密轴系的轴向准确度. 轴向保持架结构如图 5.

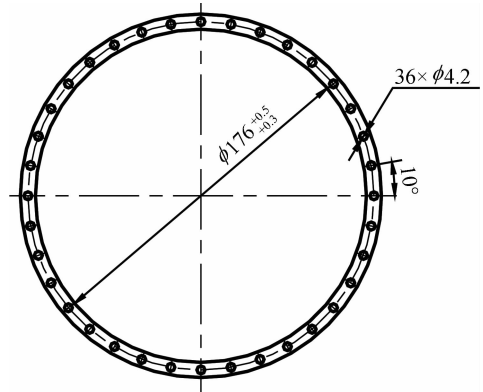


图 5 轴向保持架
Fig. 5 Sketch of the axis direction bearing cage

2.3 轴系过盈量分析

过盈配合是密珠轴系的一个主要特征, 是提高轴系准确度及负荷的关键. 其过盈量相当于预加负荷, 即能提高轴承的刚度, 又能起到平均误差的作用. 同一轴承内的滚珠尺寸不可能完全一样, 但由此引起的轴的晃动量不是滚珠间最大与最小尺寸差, 而比这个值要小, 因为部分量是被轴的过盈压缩了. 根据主轴顶尖处径向跳动量和过盈量的关系, 以及主轴、钢球、轴套的表面粗糙度相结合的方法, 来确定高准确度、高分辨力绝对式光电轴角编码器的合适的过盈量.

在此编码器轴系中, 根据钢球的实际尺寸和轴套内孔的实际尺寸通过研磨轴颈来实现预定的过盈量.

因为钢球在滚动时, 开始总是与凸出的少数几个点接触, 将这些少数点磨损, 然后接触面积增大, 磨损减小, 经过一段时间后, 滚道被压平. 为防止滚道压平后出现间隙并保持一定的刚度, 所以在中等以上载荷的轴系中, 最小过盈量可取

$$\Delta_{\min} = 2\Delta_1 + 4\Delta_2 + 2\Delta_3 \quad (6)$$

对于编码器轻载轴系,最小过盈量可取

$$\Delta_{\min} = \Delta_1 + 2\Delta_2 + \Delta_3 \quad (7)$$

式中: Δ_1 为主轴轴颈表面粗糙度; Δ_2 为钢球表面粗糙度; Δ_3 为轴套表面粗糙度。

根据目前的工艺加工水平确定主轴和轴套的表面粗糙度为 $0.2 \mu\text{m}$,所选钢球的表面粗糙度为 $0.012 \mu\text{m}$,则轴系的最小过盈量为 $0.424 \mu\text{m}$ 。

2.4 复合式光电编码器精密轴系结构

根据以上分析设计了复合式光电编码器的精密轴系。图 6 为轴系的结构,由主轴、轴承套、径向保持架、轴向保持架、钢珠、轴系压板等组成。

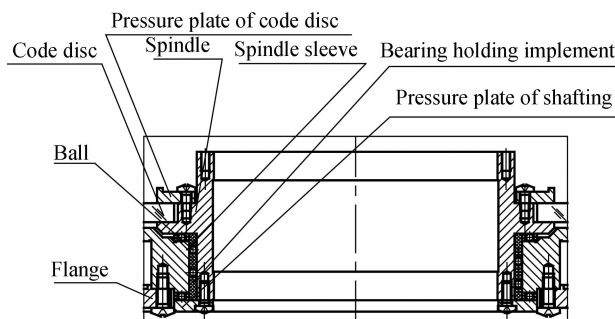


图 6 复合式光电编码器密珠轴系结构

Fig. 6 Configuration diagram of close packing ball bearing shafting

3 轴系准确度分析

复合式光电编码器轴系结构为密珠轴系,内孔达 $\Phi 150$,该结构有利于结构紧凑和轴系准确度。编码器轴系工作过程中,影响轴系径向晃动误差因素很多,其主要包括:钢球等径差,主轴轴颈、轴套的圆度误差,各个钢球的球形偏差,主轴轴颈、轴套圆柱度误差、主轴与钢球接触面轴肩处和轴套上下端面垂直度误差。这些误差带来的径向晃动误差,有的互相影响,有的互不相关,变化复杂,所以晃动误差采用均方根近似表示为

$$\Delta_{c_{\text{all}}}^2 = \sqrt{\Delta_{c_{1\text{max}}}^2 + \Delta_{c_{2\text{max}}}^2 + \Delta_{c_{3\text{max}}}^2 + \Delta_{c_{4\text{max}}}^2} \quad (8)$$

式中: $\Delta_{c_{1\text{max}}}$ 为钢球等径差带来的晃动误差; $\Delta_{c_{2\text{max}}}$ 为主轴轴颈、轴套的圆度误差带来晃动误差; $\Delta_{c_{3\text{max}}}$ 为各个钢球的球形偏差带来晃动误差; $\Delta_{c_{4\text{max}}}$ 为主轴轴颈、轴套圆柱度误差带来晃动误差。

由于采用密珠轴系,钢球的数目较多,并且过盈配合相当于预加载荷的情况下,钢球和主轴及轴套的弹性变形,可以部分补偿由于钢球直径差所引起的误差。为分析简便,取钢球等径差引起的径向晃动误差为: $\Delta_{c_{1\text{max}}} = 0.1 \mu\text{m}$ 。

当主轴轴颈(或轴套孔)具有圆度误差时,主轴轴心径向晃动误差的最大值可近似为

$$\Delta_{c_{2\text{max}}} = (\Delta_{R_k} + \Delta_{R_z})/2 \quad (9)$$

式中 Δ_{R_k} 和 Δ_{R_z} 分别为轴套孔和主轴轴颈的圆度误差。

编码器主轴和轴套的圆度误差均为 $0.2 \mu\text{m}$,轴套孔和主轴轴颈的圆度误差所引起的径向晃动误差

$$\Delta_{c_{2\text{max}}} = 0.2 \mu\text{m}$$

滚珠形状误差对轴系回转准确度的影响,当滚珠形状误差为 Δ_0 时,顶尖的径向跳动量为

$$e = \Delta_0 (a + l/2)/l \quad (10)$$

式中: a 为主轴悬伸长度; l 为轴套悬伸长度; e 为顶尖跳动量; Δ_0 滚珠形状误差。

因此,选用的钢球球形偏差为 $0.25 \mu\text{m}$ 的钢球。由图 2 可知 $l \approx 35 \text{ mm}$, $a \approx 35 \text{ mm}$,则顶尖的径向跳动量为: $e = \Delta_{c_{3\text{max}}} = 0.375 \mu\text{m}$ 。

如图 2,轴套孔和主轴轴颈的圆柱度误差为 $0.5 \mu\text{m}$,则主轴径向晃动误差的最大值为: $\Delta_{c_{4\text{max}}} = 1 \mu\text{m}$,由式(8)可知: $\Delta_{c_{\text{all}}} = 1.19 \mu\text{m}$ 。

4 准确度检测

轴系加工装配完成后,需要对轴系的径向跳动进行检测。一般轴系回转准确度的检测,主要检测径向跳动。使用电感测微仪对轴系的径向跳动进行检测,每周检测 16 个点,并进行两测回检测,检测数据如表 1。

表 1 径向跳动检测数据

Table 1 Measuring data of the radia runout

Serial number of spindle measuring	Error of the first circle/ μm	Error of the second circle/ μm
1	0	0
2	1.6	1.5
3	1.1	1
4	-0.2	-0.2
5	1.3	1.4
6	0.6	0.7
7	0.6	0.8
8	0.3	0.3
9	0.1	0.2
10	-0.8	-1
11	-0.9	-0.8
12	-0.2	-0.2
13	0.2	0.4
14	0.1	0.2
15	0.4	0.4
16	0.8	0.8
17	0	0

根据表 1 数据,计算轴系径向跳动最大值为 $1.6 \mu\text{m}$,最小值为 $-0.9 \mu\text{m}$,其峰值: $\delta_{\text{pp}} = 2.5 \mu\text{m}$ 。

该误差与理论计算基本相吻合. 在实际测量中包含测量误差以及轴系的其他误差等因素, 所以实际测量值要大于理论计算值.

5 结论

本文根据高准确度复合式光电编码器的准确度要求, 通过对光电轴角编码器轴系中的主轴轴颈的圆度、轴套孔的圆度、钢球圆度及直径尺寸互差误差的控制, 设计的大内孔高准确度轴系, 并对轴系径向跳动进行了估计. 实验结果证明, 复合式光电编码器的高准确度轴系的回转准确度 $\delta < 3 \mu\text{m}$, 应用该精密轴系研制的高准确度复合式光电编码器测角准确度 $\sigma < 2''$, 满足系统的使用要求, 并且已经批量生产, 应用在某型雷达转台中.

参考文献

- [1] WAN Qiu-hua, SUN Ying, WANG Shu-jie, et al. Design for spaceborne absolute photoelectric encoder of dual numerical system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(1): 52-57.
万秋华, 孙莹, 王树洁, 等. 双读数系统的航天级绝对式光电编码器设计[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(1): 52-57.
- [2] DONG Li-li, WU Jing-xiong, WAN Hua-qiu. Development of photoelectric rotary encoder [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, **8**(2): 198-202.
董莉莉, 熊经武, 万秋华. 光电轴角编码器的发展动态[J]. *光学精密工程*, 2000, **8**(2): 198-202.
- [3] SHE Lin, FENG Chang-you, DING Lin-hui. Measurement of encoder errors with two-step method[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, **12**(1): 66-70.
余琳, 冯长有, 丁林辉. 两步法测量编码器测角误差[J]. *光学精密工程*, 2004, **12**(1): 66-70.
- [4] TANG Tian-jin, CAO Xiang-qun, LIN Bin. Developing current situation and the thread of photoelectric-angular encoder[J]. *Optical Instrument*, 2005, **27**(1): 90-95.
汤天瑾, 曹向群, 林斌. 光电轴角编码器发展现状分析及展望[J]. *光学仪器*, 2005, **27**(1): 90-95.
- [5] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [6] 张善钟. 精密仪器结构设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.
- [7] 叶盛祥. 光电位移精密测量技术[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2003.
- [8] WU Yong-zhi, SHE Rong-hong, LI Xing-hong, et al. Dynamic extracting method of photoelectric signal parameters [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2009, **23**(5): 69-73.
吴永芝, 余容红, 李兴红, 等. 光电信号参数的动态提取方法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2009, **23**(5): 69-73.
- [9] DENG Fang, CHEN Jie, CHEN Wen-ji, et al. A high precision test method and apparatus for photoelectric encoder [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2007, **27**(11): 977-980, 1008.
邓方, 陈杰, 陈文颖, 等. 一种高准确度的光电编码器检测方法及其装置[J]. *北京理工大学学报*, 2007, **27**(11): 977-980, 1008.
- [10] MANCINI D, CASCONI E, SCHIPANI P. Galileo high-resolution encoder system[C]. *SPIE*, 1997, **3112**: 328-334.
- [11] LU X D, TRUMPER D L. Self-calibration of on-axis rotary encoders [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2007, **56**(1): 499-504.
- [12] KAO C F, LU M H. Optical encoder based on the fractional Talbot effect[J]. *Opt Commun*, 2005, **250**(1-3): 16-23.
- [13] KAO C F, HUANG H L, LU M H. Optical encoder based on Fractional-Talbot effect using two-dimensional phase grating [J]. *Opt Commun*, 2010, **283**(9): 1950-1955.
- [14] ALEJANDRE I, ARTES M. Method for the evaluation of optical encoders performance under vibration[J]. *Prec Eng*, 2007, **31**(2): 114-121.
- [15] LIU Feng-wen, DENG Wen-he. 25-bit absolute type encoder [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2000, **27**(6): 66-68.
刘丰文, 邓文和. 25位绝对式编码器[J]. *光电工程*, 2000, **27**(6): 66-68.

Shaft Design and Errors Analysis of the Composite Optical Encoder

LIANG Li-hui^{1,2}, WAN Qiu-hua¹, SHE Rong-hong¹

(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 100049, China)

Abstract: To improve the composite precision optical encoder, a large hollow shaft precision shaft was designed using the close packing ball bearing and the close-packing arranging bearing, and errors of the shaft were analyzed. With this method, the radial shaft precision shaft is $\delta < 3 \mu\text{m}$, which solves the poor accuracy problem of the large hollow shaft shafting and improves the composite encoder angle measurement accuracy. The experimental results show that the proposed design can meet the composite optical encoder whose accuracy $\sigma < 2''$.

Key words: Composite optical encoder; Close packing ball bearing



LIANG Li-hui was born in 1980. Now he is an assistant research fellow and is pursuing the Ph. D. degree at Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, CAS. His research interests focus on photoelectric conversion technology.



WAN Qiu-hua was born in 1962. As a research fellow and doctoral supervisor, she works at Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, CAS, and her research interests focus on photoelectric conversion technology and high-precision optical encoder.