

转台分度误差检测及补偿技术的研究

郭敬滨¹ 曹红艳¹ 王克新² 齐永岳¹

1. 天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室,天津,300072

2. 温州市计量技术研究院,温州,325000

摘要:采用 0.3" 的精密多齿分度台与平面反射镜组合,对转台分度误差进行检测。针对多齿分度台安装倾斜对检测结果产生影响的问题,提出了利用双轴光电自准直仪 Y 轴读数补偿调整误差的方法。根据转台分度误差是由多次谐波叠加的特点,采用谐波分析的方法对测量得到的离散数据进行拟合处理,得到用于转台分度误差补偿的连续曲线模型。对分度误差为 17.82" 的转台进行实测和误差补偿,补偿后转台的最大分度误差为 2"。

关键词:分度误差检测;调整误差;谐波分析;误差补偿

中图分类号: TB922

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2014.07.009

Study on Verification and Compensation of Indexing Errors for Turntable

Guo Jingbin¹ Cao Hongyan¹ Wang Kexin² Qi Yongyue¹

1. State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin, 300072

2. Wenzhou Institute of Measurement Technology, Wenzhou, Zhejiang, 325000

Abstract: A multi-tooth indexing table with 0.3" precision and plane mirror were selected as the angular standard, to check the indexing errors of turntable. With regard to the impact of the installation tilt of multi-tooth indexing table on the test results, a compensation method was proposed. According to the characteristics that the indexing errors of turntable were superimposed by the multiple harmonic waves, the harmonic analysis method was used to fit the measured data. The fitting curve was applied to compensate index errors. After testing and compensating, the indexing precision of the turntable is improved from 17.82" to 2", which verifies the validity and feasibility of measurement methods and the compensation model.

Key words: check of indexing error; adjustment error; harmonic analysis; error compensation

0 引言

转台是进行圆分度的常用设备,经常作为机床附件进行零件的圆分度加工,在三坐标测量机中,为了测量回转体零件,也常用到转台。科学技术的不断发展对转台精度的要求也越来越高。采用误差补偿的方法可以简单、有效地提高转台的精度,以较低的成本达到较高的精度要求。

为了补偿转台的分度误差,首先需要对其进行检测。常以正多面棱体作为圆分度标准器,并采用全组合测量法消除多面棱体工作角偏差的影响。但全组合测量法测量工作量大,且检测间隔受多面棱体面数的限制,不能太小^[1-3]。目前常用的多面棱体面数最多为 72 面,可达到的最小测量间隔为 5°,且一个多面棱体只能实现一种或几种角度间隔的测量。多齿分度台具有较易获得高分度精度、对环境要求不高、操作简便等优点,作为圆分度标准器可以实现较高的精度,因此,本文利用多齿分度台与平面反射镜组合,形成一种可回转的多角度基准,测量间隔可以灵活改变,能

够测量正多面棱体不能实现的角度间隔。

分度误差检测前需要对自准直仪和多齿分度台进行调整。如果调整未达到要求,测得的分度误差中就含有调整误差,对测量结果的影响较大。本文分析了多齿分度台安装偏心和调整误差的影响,提出了利用光电自准直仪的 Y 轴读数补偿 X 轴测量值(Y 轴读数表示竖直方向倾斜, X 轴读数为分度误差)来消除调整误差的方法,进一步提高了检测精度。根据转台分度误差是由多次谐波叠加的特点,选择谐波分析法作为分度误差的拟合模型对分度误差进行补偿。最后通过实验对以上方法进行验证。

1 测量原理

用多齿分度台检测转台分度误差的基本思想是:以多齿分度台为分度基准件,其回转的角度作为标准角度,将转台实际转过的角度与标准角度进行比较,由光电自准直仪读取角度偏差。其测量原理如图 1 所示。

检测装置由多齿分度台、平面反射镜、光电自准直仪组成。多齿分度台安装在转台工作面的中心,平面反射镜固定在多齿分度台上,类似于多面

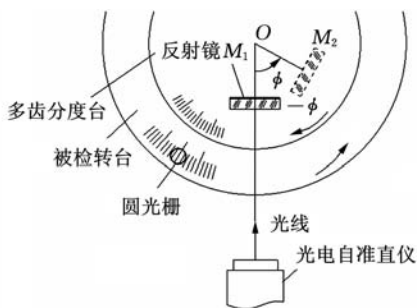


图 1 测量原理示意图

棱体的一个工作面,利用自准直仪进行瞄准。自准直仪内部十字分划板发出的平行光射向反射镜,当反射镜与光轴垂直时,光线经过反射镜按原路反射回自准直仪,形成原十字分划板像。自准直仪光轴与反射镜角度的微小偏差会引起十字分划像位置的移动,从而非常精确地检测出该微小偏差角度。如图 1 所示,测量时,先将被检转台置零位,此时反射镜位于 M_1 ,读取自准直仪的初始值 a_0 ;然后,多齿分度台及反射镜随转台一起转动(逆时针) ϕ 角度($\phi = 360^\circ/n, n$ 为整数,且需满足 ϕ 是多齿分度台最小分度间隔的整数倍的条件);反射镜位于 M_2 ,当反射镜随多齿分度台向相反的方向(顺时针)回转相同角度后,光电自准直仪再次瞄准反射镜并读取测量值 a_1 。两次读数之差即为该角度间隔的分度误差 $\Delta\phi = a_1 - a_0 = \phi' - \phi$ (其中 ϕ' 为转台实际转过的角度),按此顺序对各被检角度进行测量(记第 i 个测量点读数为 a_i),直至整周。各测量点读数与初始值之差 $x_i (x_i = a_i - a_0)$ 即是转台相对于零位的分度误差。

实验中为了达到较高的补偿精度,采用 $0.3''$ 的 360 齿精密多齿分度台作为角度基准(可实现的最小间隔为 1°),并通过 $0.5''$ 的双轴光电自准直仪读数。

2 安装调整误差分析

转台分度误差检测时,影响测量结果的因素主要有安装调整引起的误差^[4]、多齿分度台和光电自准直仪重复性误差以及外界环境的影响等。本文主要分析安装调整对测量结果的影响。

2.1 多齿分度台安装偏心的影响

如图 2 所示, O 为转台的回转中心,存在安装偏心时,多齿分度台中心为 O_1 ,反射镜初始在 M_1 位置,当多齿分度台随转台一起绕 O 点逆时针转动 ϕ 角后,中心由 O_1 变为 O'_1 ,反射镜移动到 M_2 位置,多齿分度台再绕自身中心 O'_1 顺时针回转角 ϕ 后,反射镜随多齿分度台回转动移动到 M_3 位置,

此时光电自准直仪再次照准,完成一次读数。由图 2 中几何关系可知: $\angle 1 + \angle 3 = \angle 2 + \angle 4 + \phi$, 而 $\angle 3 = \angle 4 + \phi$, 因此 $\angle 1 = \angle 2$, 则图 2 中分别与反射镜 M_1, M_3 垂直的两条直线 n_1 和 n_2 相互平行。因此, M_1 和 M_3 是平行的,安装偏心不会引起光电自准直仪示值变化,仅使光线照射在反射镜上的位置发生了改变(设光线偏离原来位置的距离为 ΔL)。

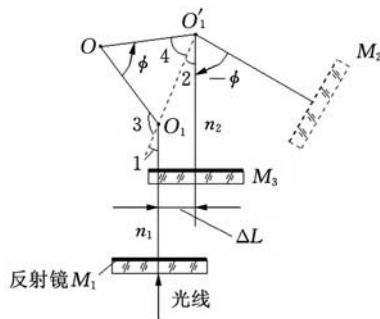


图 2 多齿分度台安装偏心

当光线照射在反射镜上的位置改变 ΔL 时,由反射镜平面度引起的误差为

$$\Delta_1 = 8h\Delta L\rho/H^2$$

式中, H 为反射面的宽度; ΔL 为光线偏离原来位置的距离; h 为平面度误差; ρ 为“一弧度对应的秒值”, $\rho = 206\,265''$ 。

本实验用到的反光镜的反射面宽度 $H = 60\text{ mm}$, 平面度误差小于 $\lambda/8$, 取 $h = \lambda/8 \approx 0.079\ \mu\text{m}$, 当 $\Delta L = 1\text{ mm}$ 时,引入的误差 Δ_1 为 $\Delta_1 = 8 \times (0.079/1000) \times 1 \times 206265 / (60 \times 60) = 0.036''$

由此可知,反射镜平面度误差对测量结果的影响很小,因此,由安装偏心产生的误差可以忽略,检测时只需调整转台和多齿分度台大致同心即可。

2.2 光电自准直仪未调平

自准直仪在使用前必须调平,即调整自准直仪十字丝竖线与转台的轴线相平行,光电自准直仪调平要求为:一轴在 $\pm 800''$ 范围内变化时,另一轴的变化量应小于 $10''$ 。

在检测时,由于没有专门的调整工具,一般只能利用自准直仪可调底座的三个调整螺丝来仔细调整,耗时耗力,且会有调整误差残存。设未调平时,十字丝与转台的轴线夹角为 γ 。

2.3 多齿分度台相对于转台倾斜

转台的端面与其轴线不垂直以及多齿分度台上下端面不平行等误差的影响,使多齿分度台的轴线与转台的轴线不平行(如图 3 所示,夹角为 β),从而导致安装在多齿分度台上的反射镜相对于转台轴线倾斜,用双轴自准直仪测量时, Y 轴

读数即为反射镜在转台被测各分度处垂直方向的倾斜角。

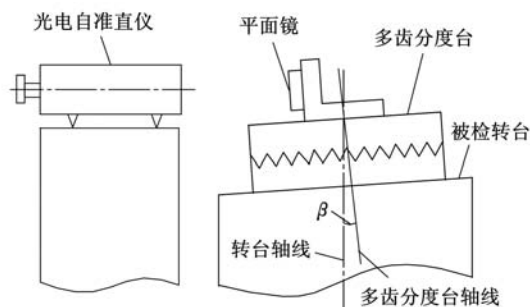


图3 多齿分度台相对于转台倾斜

在自准直仪未调平的情况下,如果多齿分度台相对于转台倾斜,两者共同作用就会使分度误差 x 的测量值产生误差 Δx ,如图4所示,其中 Y 轴方向为转台的轴线方向, Y' 轴方向为光电自准直仪十字丝竖线方向。

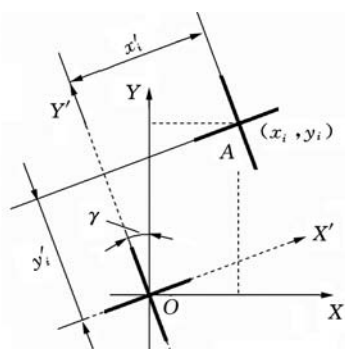


图4 自准直仪十字丝倾斜

假设十字丝交点起始位置为 O 点,由于竖直方向反射镜的倾斜 y_i 以及水平方向分度误差 x_i 的存在,使得十字丝交点由 O 移至 A 点时,在 XOY 坐标系(转台坐标系)中,理论测量值应为 (x_i, y_i) 。但由于十字丝倾斜 γ 角,在光电自准直仪坐标系 $X'OY'$ 中读数时,实际读数值为 (x'_i, y'_i) 。

由图4可得读数值 x'_i 与转台分度误差 x_i 之间的关系:

$$x'_i = (x_i + y'_i \sin \gamma) / \cos \gamma \quad (1)$$

由于 γ 值很小, $\cos \gamma \approx 1$, 因此有

$$x'_i \approx x_i + y'_i \sin \gamma \quad (2)$$

式中, x_i 为转台实际的零起分度误差; x'_i, y'_i 为光电自准直仪读数值, x'_i 为分度误差的测量值, y'_i 为竖直方向多齿分度台倾斜角的测量值。

当 β 和 γ 同时存在时,光电自准直仪的测量值 x'_i 包括由调整引起的系统误差 Δx_i :

$$\Delta x_i = y'_i \sin \gamma \quad (3)$$

Δx_i 与 Y 轴读数有关,随 Y 轴读数变化而变化;而 $\sin \gamma$ 与十字丝倾斜有关,在测量过程中自准直仪是不动的,因此, $\sin \gamma$ 是一个常数。

在自准直仪未调平情况下进行检测时,若设

$\gamma = 0.6^\circ$, 由倾斜角 β 引起的 Y 轴读数最大值 $y'_{\max} = 100''$, 则调整误差 $\Delta_2 = 1.05''$, 影响较大。

3 补偿调整误差的方法

用调整的方法减小测量误差,需要反复调整多齿分度台相对于转台的倾斜 (β) 以及十字丝与转台轴线的夹角 γ , 比较困难,且检测精度要求越高,对检测前的调整要求也越高。

由上述分析可知,双轴光电自准直仪水平方向 X 轴的读数 x'_i 包括调整误差 Δx_i , 见式(2)。式(2)中 x'_i, y'_i 为已知量,十字丝倾斜角 γ 未知。

如果在第一次测量完成以后,改变多齿分度台相对于转台的倾斜角(只要保证改变之后的倾斜角在自准直仪读数范围内即可),同时保持自准直仪不动,进行第二次测量,此时可得到另外一组数据:

$$x'_{i1} = x_i + y'_{i1} \sin \gamma \quad (4)$$

式中, x'_{i1}, y'_{i1} 为改变倾斜角后光电自准直仪第二次测量值。

联立式(2)和式(4)就可消去调整误差 Δx_i , 得到转台各分度处的分度误差 x_i :

$$x_i = (y'_{i1} x'_i - y'_i x'_{i1}) / (y'_{i1} - y'_i) \quad (5)$$

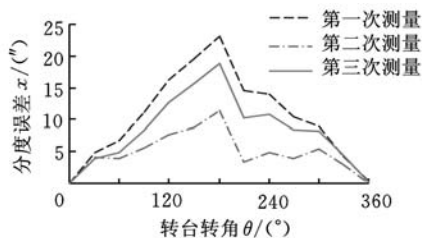
这种方法对检测前的调整要求不高,只要保证在整个检测过程中水平和竖直两个方向的偏角都在测量范围内即可,简化了调整过程。

为了验证该方法的补偿效果,选定间隔为 30° , 第一次,在多齿分度台倾斜角 β 和十字丝倾斜角 γ 较大时测量;第二次,自准直仪保持不动,改变多齿分度台倾斜角 β , 进行测量;第三次,精心调整多齿分度台和自准直仪,使 β 和 γ 很小时测量(认为此时无调整误差,测量得到的即为转台的分度误差)。

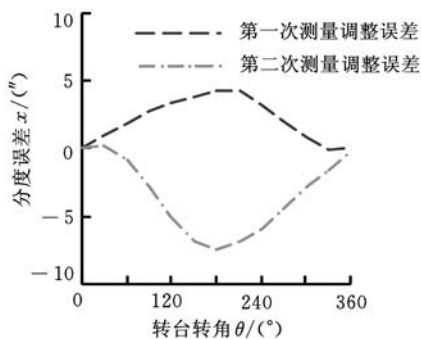
三次测量结果如图5a所示,由于三次测量中 γ, β 不同,故测得的分度误差结果不同。前两次测量分别与第三次精确测量得到的结果进行比较,调整误差曲线如图5b所示,可以看出,前两次测量调整误差较大。按照上述方法对前两次测量结果进行处理,得到的结果与精确测量得到的转台分度误差比较如图5c所示。可以看出,当修正调整误差后,其结果与转台实际分度误差很接近,从而验证了该补偿方法的正确性。

4 谐波分析法拟合转台的分度误差

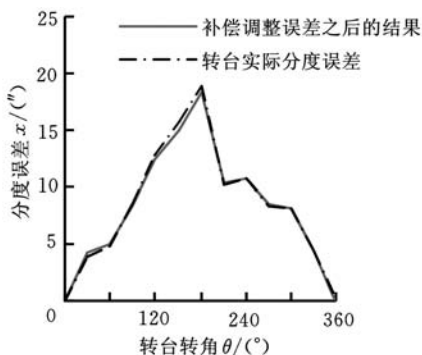
转台的分度误差主要来源于圆光栅的刻划误差、安装误差和轴系误差等。在圆光栅刻划过程中,由于存在安装偏心、倾斜、传动系统误差、主轴



(a) 三次测量结果



(b) 调整误差



(c) 补偿调整误差后的结果与转台实际分度误差比较

图 5 三次测量结果曲线与调整误差补偿效果图

误差^[5]等,这些误差的综合作用引起了光栅的刻划误差。以上各误差分量大都具有周期性,空间基周期为 2π ^[6-7],因此,转台的分度误差是以 2π 为周期的函数,为多次谐波的叠加。

根据转台分度误差为多次谐波叠加的特点^[8-10],对检测得到的离散数据进行谐波分析,然后将各次谐波函数进行叠加,可以得到转台分度误差的拟合函数。在转角 θ 处的分度误差 $x(\theta)$ 为

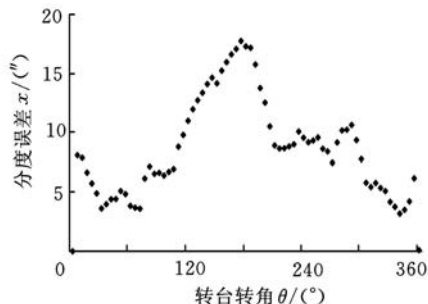
$$x(\theta) = a_0 + \sum_{k=1}^m (a_k \sin(k\theta + \alpha_k)) \quad (6)$$

式中, a_0 为零次谐波的幅值; k 为谐波次数; a_k 为 k 次谐波的幅值; α_k 为相位角。

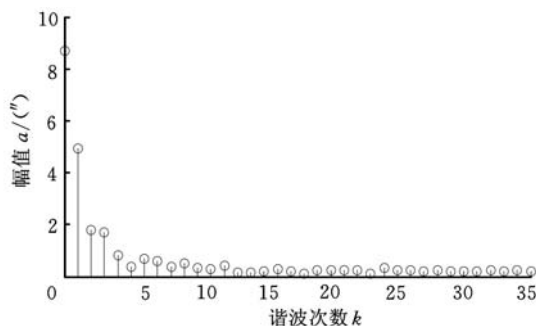
与三次样条插值、多项式拟合等其他拟合方法相比,谐波分析法拟合从转台分度误差的来源出发,能很好地反映分度误差的周期性等特点,对复杂曲线的拟合能力强^[11-12],同时根据谐波分析中各次谐波的幅值大小,可以为加工者寻找、分析误差源和使用者寻求最佳使用方法提供有用的信息^[13-14]。

5 实验验证

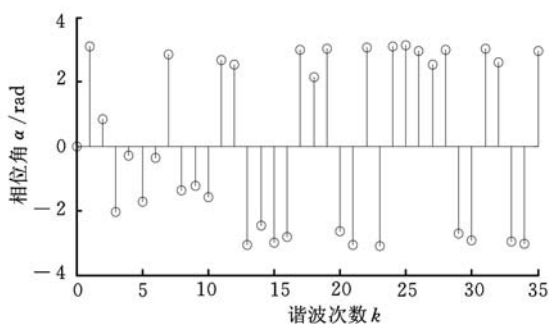
选定测量间隔为 5° 对转台分度误差进行检测。测量得到的离散数据及谐波分析结果如图 6 所示。



(a) 分度误差检测离散数据



(b) 谐波分析(幅值)



(c) 谐波分析(相位角)

图 6 转台分度误差检测结果

由图 6b 可以看出,转台分度误差以低次谐波为主。根据谐波分析的结果,将各次谐波函数叠加,得到转台分度误差的拟合模型,对其进行补偿,补偿后的分度误差曲线如图 7 所示(为了验证不在检测点处的补偿效果,补偿后测量点数 n 为 144)。通过对比可以看出,补偿前转台的最大分度误差为 $17.82''$;误差补偿后分度误差在零附近

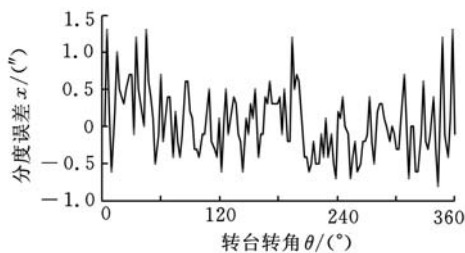


图 7 补偿后转台的分度误差

分布,具有随机性,最大分度误差为 $2''$,分度误差明显减小。

6 结论

(1) 本文选择多齿分度台作为角度基准器,用光电自准直仪读数,对转台的分度误差进行检测。通过多齿分度台回转,相当于一种高精度的、面数可灵活改变的多面棱体,可实现的最小测量间隔为 1° 。

(2) 根据对转台分度误差检测中调整误差的分析,多齿分度台安装偏心对测量结果的影响很小,可以忽略;但多齿分度台相对于转台倾斜会产生测量误差,因此选择双轴光电自准直仪进行读数,利用 X、Y 两轴的读数,经过数据处理来消除调整误差,实验证明了该方法的正确性。

(3) 针对转台分度误差为多次谐波叠加的特点,选择谐波分析法作为分度误差的拟合模型,对分度误差为 $17.82''$ 的转台进行补偿,补偿后转台最大分度误差为 $2''$,大大提高了转台的定位精度。

参考文献:

- [1] 《角度计量》编写组. 角度计量[M]. 北京: 中国标准出版社, 1984.
- [2] 凌四营, 王立鼎, 马勇, 等. 全组合测量法在多齿盘基准面测量中的应用[J]. 中国机械工程, 2009, 20(18): 2149-2151.
Ling Siying, Wang Liding, Ma Yong, et al. Application on Whole Combination Measuring Method in the Datum Measurement of End-tooth Plate[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(18): 2149-2151.
- [3] Akira T. Present State of Precision Angle Measurement Technique in Japan[J]. Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering, 1981, 15(1): 1-6.
- [4] 范天泉, 谢长文, 陆德基, 等. 排列互比法用于超精测角时产系统误差的研究[J]. 精密工程, 1997, 5(2): 98-103.
Fan Tianquan, Xie Changwen, Lu Deji, et al. Investigations on the Application of Permutation Intercomparison Method to Superprecision Angle-measuring[J]. Opto-electronic Engineering, 1997, 5(2): 98-103.
- [5] 杨永才, 陈林, 孙银春, 等. 圆光栅刻划误差的自动校正[J]. 华东工业大学学报, 1996, 18(3): 85-90.
Yang Yongcai, Chen Lin, Sun Yinchun, et al. Automatic Correction for Dividing Errors of Radial Grating[J]. East China University of Technology, 1996, 18(3): 85-90.
- [6] 赵建科, 张周峰. 轴角编码器测量中偏心带来的误

差分析[J]. 光子学报, 2007, 36(S): 249-252.

Zhao Jianke, Zhang Zhofeng. Error Analysis for Measurement of Encoder with Shaft Eeeentricity [J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(S): 249-252.

- [7] 黄宗升, 秦石乔, 王省书, 等. 光栅角编码器误差分析及用激光陀螺标校的研究[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(10): 1866-1869.
Huang Zongsheng, Qin Shiqiao, Wang Xingshu, et al. Error Analysis of Optical Angular Encoder and Its Calibration with Ring Laser Gyro[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(10): 1866-1869.
- [8] Qin Shiqiao, Huang Zongsheng, Wang Xingshu. Optical Angular Encoder Installation Error Measurement and Calibration by Ring Laser Gyroscope[J]. Instrumentation and Measurement, 2010, 59(3): 506-511.
- [9] Kaul S K, Tickoo A K, Koul R, et al. Improving the Accuracy of Low-cost Resolver-based Encoders Using Harmonic Analysis[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2008, 586(2): 345-355.
- [10] 曹向群, 楼永坚. 圆刻机分度误差和测点数关系的研究[J]. 光学仪器, 1994, 16(1): 21-25.
Cao Xiangqun, Lou Yongjian. Study of the Relationship between the Number of Test Points and the Error in Circle Dividing [J]. Optical Instrument, 1994, 16(1): 21-25.
- [11] Patorski K, Yokozeki S, Suzuki T. Moiré Profile Prediction by Using Fourier Series Formalism[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1976, 15(3): 443-456.
- [12] Filali M. Harmonic Analysis and Applications[J]. Kybernetes, 2012, 41(1/2): 129-144.
- [13] Hatiris E, Orton P A, Poliakoff J F, et al. Eccentricity Error Compensation Models for an Incremental Motion Encoder [C]//Proc. of the 16th European Simulation Multiconference. Darmstadt, 2002: 328-331.
- [14] 张礼松, 管炳良. 关节坐标测量机研制中圆光栅误差修正技术[J]. 计测技术, 2007, 27(4): 41-43.
Zhang Lisong, Guan Bingliang. Error Correction and its Application to Multi-joint CMM Research [J]. Measuring Technique, 2007, 27(4): 41-43.

(编辑 陈勇)

作者简介: 郭敬滨, 男, 1959年生。天津大学精密仪器与光电子工程学院副教授。主要研究方向为精密测试技术及仪器。发表论文10余篇。曹红艳, 女, 1988年生。天津大学精密仪器与光电子工程学院硕士研究生。王克新, 男, 1979年生。温州市计量技术研究院工程师。齐永岳, 男, 1978年生。天津大学精密仪器与光电子工程学院讲师、博士。