

文章编号 1004-924X(2010)08-1766-07

圆光栅角度传感器的误差补偿及参数辨识

高贯斌, 王文, 林铿, 陈子辰

(浙江大学 现代制造工程研究所, 浙江 杭州 310027)

摘要: 基于正弦函数和粒子群算法提出了一种误差补偿及参数辨识方法, 用于提高圆光栅角度传感器的测量精度。使用光电自准直仪和金属多面体对圆光栅角度传感器的测量误差进行了离散标定, 通过对标定数据的频谱分析, 发现传感器测量误差主要由几种不同频率的正弦函数信号组成, 由此提出了一种基于正弦函数的圆光栅角度传感器误差补偿模型。补偿模型中包含 7 个待定常量, 本文采用粒子群算法求解这 7 个待定常量以克服最小二乘法无法收敛的问题。以待定常量为粒子位置坐标, 以平均误差为适值函数, 建立了一种基于粒子群算法的参数辨识模型, 并根据参数辨识模型求出最优的待定常量。应用补偿模型对关节臂式坐标测量机的 6 个圆光栅角度传感器测量误差进行了补偿, 结果表明: 补偿后各角度传感器的平均测量误差减小了约 398~1 102.5 倍, 大大地提高了传感器的测量精度。

关键词: 圆光栅角度传感器; 测量误差; 频谱分析; 补偿模型; 粒子群算法

中图分类号: TP212.12; TH712 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101808.1766

Error compensation and parameter identification of circular grating angle sensors

GAO Guan-bin, WANG Wen, LIN Keng, CHEN Zi-chen

(*Institute of Advanced Manufacturing Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China*)

Abstract: An error compensation and parameter identification method based on sine function and particle swarm optimization was presented to improve the measurement accuracy of circular grating angle sensors. The measurement errors of the sensors were calibrated discretely by a photoelectric autocollimator and a metal polyhedron. By analyzing the calibration data with the Fast Fourier Transform (FFT), it was found that the measurement errors of the sensors are composed mainly of the sinusoidal signals with different frequencies. Thus an error compensation model consisting of seven constants to be determined was presented based on sine functions. Furthermore, by taking these constants as the location coordinates of particles and the average error as the fitness function, one identification model based on particle swarm optimization was built to calculate the constants in the compensation model. Finally, the compensation method was used to compensate the errors of the sensors in an articulated arm coordinated measuring machine. The experimental results show that the average errors of the sensors are reduced about 398~1 102.5 times after compensation.

收稿日期: 2009-11-06; 修订日期: 2009-12-15.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50875241); 浙江省自然科学基金重点资助项目 (No. Z1090590)

Key words: circular grating angle sensor; measurement error; spectral analysis; compensation model; Particle Swarm Optimization (PSO)

1 引言

圆光栅角度传感器是一种精密的测角器件,主要应用在雷达、自动化仪表、精密仪器、机器人等领域,具有体积小、测量范围大、精度高等特点。在应用时,圆光栅角度传感器的指示光栅和标尺光栅需要分别安装在两个相对旋转的部件上,安装和调整过程中的偏差对传感器测量精度有着很大的影响。如果安装不当或达不到安装技术要求,圆光栅角度传感器的测量精度就会受到较大影响,有时甚至与目标精度相差很大。

目前工程上常采用 Johannes Heidenhain 公司发明的双读数头对径读数的方法来消除安装偏心问题,这种方法是在光栅盘对径位置安装两个读数头(读数信号相位相差 π),其原理为:由于偏心在某一位置造成的读数误差和在其对径方向读数所产生的误差数值大小相等、符号相反,只要将两个读数相加除以 2 即可消除偏心误差。但这种方法对读数头安装要求非常严格,而且会增大传感器的体积、增加成本。

除对径读数法外还有一些其它补偿圆光栅角度传感器误差的方法,例如 Orton 等^[1]提出一种多读数头自动补偿圆光栅变形、制造缺陷和安装误差的方法可以消除圆光栅角度传感器的大部分误差,但存在与对径读数法同样的缺点;Watanabe 等^[2]设计了一种角度传感器自动标定系统,可自动消除转轴和圆光栅的偏心误差,并对角度传感器进行标定和补偿;洪喜等^[3]提出了一种基于径向基函数网络模型的编码器误差修正技术,以高精度检测仪器的检测值为学习目标,建立一种具有良好学习能力和泛化能力的神经网络,有效地改善了编码器的测量精度,并且很好地解决了非线性误差对系统的影响;张礼松等^[4]用非线性最小二乘法对柱面圆光栅误差进行修正;郭阳宽等^[5]分析了运动偏心对一种新型柱面圆光栅副测量精度的影响,并提出一种补偿方法。

本文提出一种不增加任何硬件的圆光栅角度

传感器误差实时补偿的方法,以解决关节圆光栅角度传感器精度较低的问题。首先采用光电自准直仪和金属多面体对圆光栅角度传感器的测量误差进行标定,得到圆光栅角度传感器误差分布曲线;运用快速傅里叶变换对误差分布曲线进行频谱分析后发现:圆光栅角度传感器的误差曲线主要由几种频率的正弦函数曲线构成,根据分析结果提出了一种误差补偿模型。由于最小二乘法无法求解误差补偿模型中的待定参数,本文采用粒子群算法对误差补偿模型的待定参数进行辨识。最后应用本文所述方法对关节臂式坐标测量机的六个关节圆光栅角度传感器分别进行了误差补偿。

2 关节圆光栅角度传感器的误差标定

光电自准直仪是利用光学自准直原理工作的,主要应用于机床和仪器仪表导轨的直线度及垂直度测量,各种零部件相对位置角度偏差测量,大平台的平面度测量等,具有较高的精度和分辨力。

光电自准直仪在较小范围内(一般为 $\pm 100''$)可实现高精度的角度测量,与金属多面体(相邻面夹角相等的正多面体,具有很高精度)联合使用可用于角度传感器测量误差的标定。如图 1 所示,装有圆光栅角度传感器的关节一端固定,另一端可自由转动,金属多面体固定在关节的自由端,与关节一起转动。

金属多面体各面转过的角度与关节转过的角度相同,且不受金属多面体与关节安装偏心的影响,因此,可以用光电自准直仪通过测量金属多面体转过的角度 β 来标定圆光栅角度传感器的读数误差 $\Delta\theta$,即:

$$\Delta\theta = \beta - \theta, \quad (1)$$

其中 θ 为角度传感器的读数, β 为:

$$\beta = i \times \frac{360}{N} + \epsilon, \quad (2)$$

其中, N 为多面体的面数,一般为 12、24、36 等; i

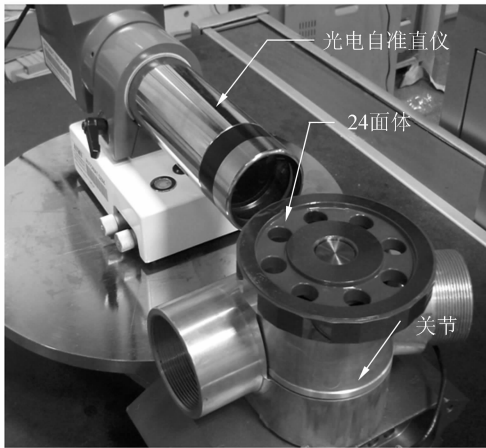


图 1 用光电自准直仪和金属多面体标定关节圆光栅角度传感器误差

Fig. 1 Error calibration of a circular grating angle sensor with a photoelectric autocollimator and a metal polyhedron

为多面体转过的一面数; ϵ 为光电自准直仪的数值。

本文实验中采用的双轴光电自准直仪在 $\pm 100''$ 内测量精度为 $\pm 0.25''$, 金属多面体是 24 面体, 相邻面夹角为 15° , 精度为 $1''$ 。

标定从 0° 开始, 每隔 15° 对角度传感器的读数和光电自准直仪的读数各记录一次, 并计算出传感器相应的误差值。第 1 关节角度传感器误差的标定结果如图 2 所示, 其它关节的标定结果与关节 1 类似, 此处不一一列出。

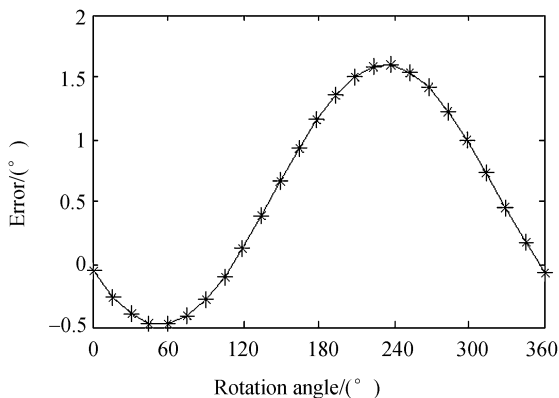


图 2 关节 1 的角度传感器误差分布图

Fig. 2 Error distribution of angle sensor 1

图 2 表明关节角度传感器误差分布与正弦曲线非常类似, 这一现象主要是由于光栅莫尔条纹的基本性质——正弦性造成的, 这里用傅里叶

变换对标定结果做了进一步的频谱分析。

3 角度传感器误差补偿模型

傅里叶变换是信号分析领域常用的技术手段^[6], 广泛应用在故障诊断、图像处理等领域, 本文应用快速傅里叶变换 (Fast Fourier Transform, FFT) 对各关节圆光栅角度传感器的标定结果进行分析, 得到了误差信号的频谱图, 图 3 所示为关节 1 的频谱图。

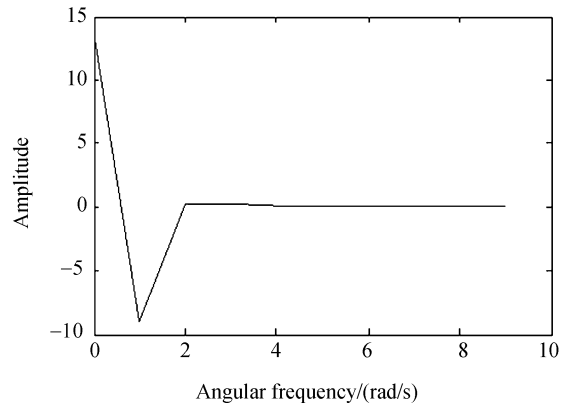


图 3 关节 1 的角度传感器转角误差频谱图

Fig. 3 Angle error spectrogram of angle sensor 1

由图中可知标定结果中主要存在角频率为 0, 1, 2, 3 的正弦信号, 其余信号较弱。为简化数学模型, 将角频率为 4 及其后的正弦信号忽略不计, 因此, 误差分布曲线可用下式来表示:

$$E(\theta) = A_0 \sin(0 + P_0) + A_1 \sin(\theta + P_1) + A_2 \sin(2\theta + P_2) + A_3 \sin(3\theta + P_3), \quad (3)$$

令 $C = A_0 \sin(P_0)$, 则有:

$$E(\theta) = C + A_1 \sin(\theta + P_1) + A_2 \sin(2\theta + P_2) + A_3 \sin(3\theta + P_3). \quad (4)$$

由式(4)可知对于每个转角 θ 都对应有一个误差 $E(\theta)$, 且计算并不复杂, 因此可以用式(4)对角度传感器的误差进行在线实时补偿, 以提高传感器精度。式(4)中含有 7 个待定参数, 必须先求出这 7 个参数才能确定传感器的补偿模型, 目前一般利用实验数据来求解待定参数。

4 基于粒子群算法的模型参数求解

最小二乘法是由实验数据进行参数估计的主要手段之一^[7],即求出使实际测量值与计算值间的误差平方和达到最小的参数值作为估计值。最小二乘法在噪声为零均值和白噪声的条件下进行的参数估计是无偏且一致收敛,否则就可能不是无偏的甚至不收敛。由于本文标定结果非线性较强且式(4)中的参数较多,在采用最小二乘法对式(4)中的待定参数进行估计时,由于算法不收敛,故得不到正确的参数估计值。因此,本文采用处理非线性问题能力更强的粒子群算法来求解式(4)中的待定参数。

$$\begin{cases} v_{id}(k+1) = \omega v_{id}(k) + c_1 r_1 (p_{id} - x_{id}(k)) + c_2 r_2 (g_{id} - x_{id}(k)) & (|v_{id}(k+1)| \leq v_{d,max}) \\ v_{id}(k+1) = \frac{v_{id}(k+1) \cdot v_{d,max}}{|v_{id}(k+1)|} & (|v_{id}(k+1)| > v_{d,max}) \end{cases}, \quad (6)$$

式中 $x_i = (x_{i_1}, x_{i_2}, x_{i_3}, x_{i_4}, x_{i_5}, x_{i_6}, x_{i_7}) = (C_i, A_{i,1}, A_{i,2}, A_{i,3}, P_{i,1}, P_{i,2}, P_{i,3})$ 为粒子 i 的位置,分别表示式(4)中的 7 个参数; $v_i = (v_{i_1}, v_{i_2}, v_{i_3}, v_{i_4}, v_{i_5}, v_{i_6}, v_{i_7})$ 为粒子 i 当前速度; k 表示迭代序号; r_1, r_2 是取值在 $[0, 1]$ 内的随机数; $v_{d,max}$ 是粒子第 d 维分量的最大速度; c_1, c_2 是学习因子,分别用来调节粒子朝着 p_b 和 g_b 的方向移动的速度,一般均取值为 $2^{[12]}$ 。

ω 为惯性权重系数,是影响收敛速度的重要参数, ω 过大可能导致算法早熟而不能收敛于全局最优点,而 ω 过小可能导致算法在局部最优解处“振荡”^[12]。为增强算法的全局探索和局部搜索能力,本文采用自适应惯性权重系数改变策略,如式(7)所示,即算法在刚开始的时候具有较高的收敛速度,离最优解越近(g_b 越小)速度越小。

$$\omega = 0.9 - 0.4e^{-g_b}. \quad (7)$$

根据粒子群算法的原理编写了补偿模型参数辨识程序,程序的流程如图 4 所示。

粒子群算法是 Kennedy 和 Eberhart 受鸟类捕食原理启发而提出的一种进化算法,该算法模拟鸟群觅食行为,通过个体之间的相互协作使群体达到最优^[8-9]。粒子群由一群粒子组成,每个粒子代表问题的一个潜在解,粒子在问题空间中的初始位置随机产生,然后通过不断地学习和进化来改变自身位置,直到达到最佳位置^[10-11]。

粒子群算法采用适值函数来评价粒子位置的优劣,在搜索过程中每个粒子都向着自身最佳位置 p_b 和群体最佳位置 g_b 两个方向飞翔,粒子位置用式(5)更新。

$$x_{id}(k+1) = x_{id}(k) + v_{id}(k+1), \quad (5)$$

其中:

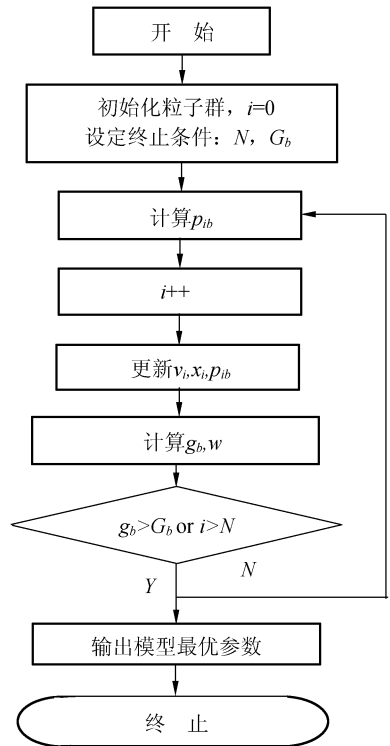


图 4 自适应粒子群算法流程

Fig. 4 Flow chart of adaptive particle swarm optimization

5 实验

5.1 参数辨识

每个关节圆光栅角度传感器补偿模型中的参

数不尽相同,下面利用前文所述的粒子群算法,根据各关节的转角误差标定结果,分别对各关节角度传感器补偿模型中的待定参数进行辨识,辨识结果如表 1 所示。

表 1 补偿模型参数辨识结果

Tab. 1 Identified parameters of compensation model

关节	C	A1	A2	A3	$P_1/(^\circ)$	$P_2/(^\circ)$	$P_3/(^\circ)$
1	0.558 6	1.041 4	0.001 1	-0.004 0	216.363 3	143.032 9	168.438 3
2	0.341 7	-0.363 3	0.007 7	0.001 1	80.239 3	93.506 1	245.362 1
3	-0.353 4	-0.615 4	-0.001 0	0.001 2	326.532 5	73.851 7	210.606 6
4	-0.317 4	-0.288 0	0.015 1	-0.002 6	273.361 0	310.462 5	240.953 6
5	0.200 8	-0.303 6	-0.002 4	-0.001 5	105.492 8	158.290 0	235.118 3
6	-0.628 1	-0.677 5	-0.023 3	-0.007 1	64.934 3	264.632 7	69.528 3

5.2 误差补偿及验证

各关节补偿模型的参数确定之后,就可以直接对圆光栅角度传感器的测量结果进行补偿。为验证补偿的效果,按照前文所述方法,从 7.5° 左右开始,每隔 15° 对关节转角补偿前和补偿后的误差进行记录,补偿前的误差分布与图 2 相同,补偿后的误差分布如图 5 所示,补偿前后的平均误差如表 2 所示。对表 2 中数据计算之后发现,补偿后各关节圆光栅角度传感器平均误差分别减小了 917.75,398.1 102.5,429.2,774.3,562.2 倍。

势,说明已经基本消除了系统误差。

表 2 各关节传感器补偿前后的平均误差

Tab. 2 Average errors of joint angle sensors

关节序号	补偿前平均误差/ $(^\circ)$	补偿后平均误差/ $(^\circ)$
1	0.734 2	0.000 8
2	0.119 4	0.000 3
3	0.441 0	0.000 4
4	0.214 6	0.000 5
5	0.232 3	0.000 3
6	0.281 1	0.000 5

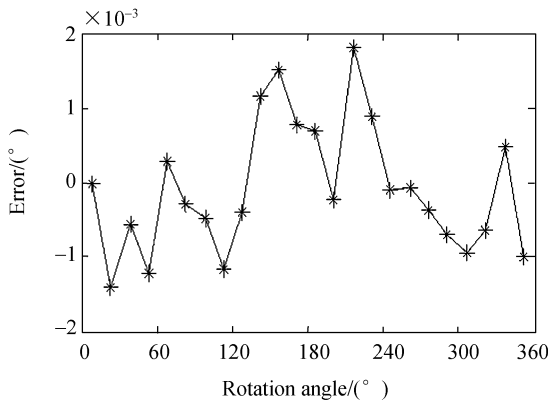


图 5 补偿后关节 1 的转角误差分布图

Fig. 5 Angle error distribution of joint 1 after compensation

从图 2 中数据可以看出补偿之前传感器的误差分布为正弦分布,说明有很大的系统误差,而图 5 表明补偿之后,传感器误差分布没有明显的趋

6 结论

本文提出一种不增加硬件、无需安装调整的圆光栅角度传感器误差补偿模型,并应用粒子群算法对补偿模型的待定参数进行辨识。

首先通过标定关节圆光栅角度传感器的测量误差,绘制出传感器的误差分布图。利用 FFT 对误差数据进行频谱分析后发现,传感器的测量误差主要由几种不同频率的正弦函数信号组成,据此,提出一种圆光栅角度传感器误差补偿模型,补偿模型中每个转角都对应一个确定的误差值,因此可以方便地在传感器测量中用软件的方法进行在线补偿。使用粒子群算法对误差补偿模型中的 7 个待定参数进行辨识,最后应用补偿模型对 6 个关节的圆光栅角度传感器进行了补偿。实验结

果表明:未补偿之前的各关节圆光栅角度传感器平均误差为亚度级,而补偿之后圆光栅角度传感

器平均误差分别达到秒级,比补偿前分别提高398~1 102.5倍。

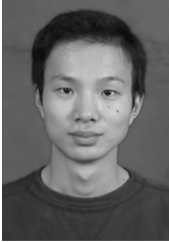
参考文献:

- [1] ORTON P A, POLIAKOFF J F, HATIRIS E, *et al.*. Automatic self-calibration of an incremental motion encoder [C]. *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Budapest, Hungary*, 2001;1614-1618.
- [2] WATANABE T, FUJIMOTO H, NAKAYAMA K, *et al.*. Automatic high precision calibration system for angle encoder[C]. *Recent Developments in Traceable Dimensional Measurement, Munich, Germany*, 2003;400-409.
- [3] 洪喜, 续志军, 杨宁. 基于径向基函数网络的光电编码器误差补偿法[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(4):598-604.
HONG X, XU ZH J, YANG N. Error compensation of optical encoder based on RBF network[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(4): 598-604. (in Chinese)
- [4] 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):41-44.
ZHANG L S, GUAN B L. Error correction and its application to multi-joint CMM research[J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2007, 27(4): 41-44. (in Chinese)
- [5] 郭阳宽, 李玉和, 李庆祥, 等. 运动偏心对圆光栅副测量的影响及误差补偿[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2005, 45(2):178-181.
GUO Y K, LI Y H, LI Q X, *et al.*. Error compensation for eccentric motions of circular gratings[J]. *Journal of Tsinghua University (Sci & Tech)*, 2005, 45(2):178-181. (in Chinese)
- [6] POTTS D, TASCHE M. Numerical stability of nonequispaced fast fourier transforms[J]. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2008, 222(2):655-674.
- [7] BAI E W. A random least-trimmed-squares identification algorithm[J]. *Automatica*, 2003, 39(9): 1651-1659.
- [8] LEE W S, CHEN Y T, WU T H. Optimization for ice-storage air-conditioning system using particle swarm algorithm[J]. *Applied Energy*, 2009, 86(9):1589-1595.
- [9] CHEN D, ZHAO C. Particle swarm optimization with adaptive population size and its application [J]. *Applied Soft Computing*, 2009, 9(1): 39-48.
- [10] 刘得军, 刘彩平, 韦荣方. 基于粒子群算法的6-DOF并联坐标测量机的测量建模[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(1):76-81.
LIU D J, LIU C P, WEI R F. Measurement modeling for 6-DOF parallel-link coordinate measuring machine based on particle swarm optimization[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(1): 76-81. (in Chinese)
- [11] 许廷发, 赵思宏, 周生兵, 等. DSP并行系统的并行粒子群优化目标跟踪[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(9):2236-2240.
XU T F, ZHAO S H, ZHOU SH B, *et al.*. Particle swarm optimizer tracking based on DSP parallel system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(9): 2236-2240. (in Chinese)
- [12] EBERHART R C, SHI Y. Particle swarm optimization: developments, applications and resources [C]. *Congress on Evolutionary Computation 2001, Seoul, Korea*, 2001:81-86.

作者简介:



高贯斌(1979—),男,山东成武人,博士研究生,主要从事精密测量系统、数控技术等方面的研究。E-mail: gbgao@163.com



林 铿(1985—),男,福建罗源人,硕士研究生,主要从事精密测量系统方面的研究。E-mail: loganlinkeng@163.com

通讯作者:



王 文(1968—),男,湖北大冶人,博士,副教授,硕士生导师,1996年于浙江大学获得博士学位,主要从事精密工程、微纳测量与数字控制等方面的研究。E-mail: wangwn@zju.edu.cn

导师简介:



陈子辰(1950—),男,福建福州人,博士,教授,博士生导师,主要从事精密机械、精密测量、MEMS等方面的研究。E-mail: chenzc@zju.edu.cn

● 下期预告

大口径积分球方向辐射特性自动测试系统

谢 萍,吴浩宇,郑小兵,邹 鹏

(中国科学院 安徽光学精密机械研究所 遥感研究室,安徽 合肥 230031)

研制了一套用于快速、高精度检测大口径积分球方向辐射特性的全自动测量系统。测量系统由扫描机构、陷阱探测器和总控系统组成,总控系统控制安装有陷阱探测器的扫描机构按设定的位置进行位移,并控制数据采集器进行数据采集,最后进行数据显示、分析及保存。该系统能实现面均匀性扫描范围 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$,角度特性扫描范围 $\pm 60^\circ$ 。利用该测量系统对自行研制的 2.5 m 直径积分球进行了测量,实现了全自动控制,证实了该测量系统的高精度和高效率,得到该积分球的面均匀性为 0.19% ,水平方向角度特性为 0.0103 ,垂直方向角度特性为 0.0068 。