

文章编号 1004-924X(2012)11-2479-06

## 基准圆光栅偏心检测及测角误差补偿

艾晨光\*, 褚明, 孙汉旭, 张延恒, 叶平  
(北京邮电大学 自动化学院, 北京 100876)

**摘要:**为了修正关节测试平台中由圆光栅安装偏心所产生的测量误差,建立了圆光栅偏心测角误差补偿模型并对安装偏心检测方法进行研究。首先,根据圆光栅测角与偏心参数间的几何关系,推导出圆光栅测量误差补偿模型。然后,描述了采用双读数头对比接收正弦信号间相位差,检测偏心参数的方法和原理;通过合成信号的李萨茹图形,检测出关节测试平台内圆光栅的偏心距及偏心方向。最后,根据所推导的偏心测角误差补偿公式对测试系统进行修正。对比实验结果表明:修正后的圆光栅测角精度大幅提高,测量精度提高了近 5 倍,满足关节测试平台的测量精度要求。

**关键词:**角度测量;圆光栅;系统误差补偿;偏心距检测;偏心方向检测

**中图分类号:** TB922; O436.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122011.2479

## Eccentric testing of benchmark circular grating and compensation of angular error

AI Chen-guang\*, CHU Ming, SUN Han-xu, ZHANG Yan-heng, YE Ping

(Automation School, Beijing University of Post and Telecommunication, Beijing 100876, China)

\* Corresponding author, E-mail: Aichenguang@gmail.com

**Abstract:** To correct the measuring angle errors derived from the eccentricity of installing a circular grating in a manipulator joint test system, a model for compensation of grating measuring angle errors and the test method for installing eccentric errors are investigated. First, according to the relationship between angular error and eccentric parameters, the paper deduces the model of angular errors caused by install eccentricity. Then, it describes the method and principle to detect the grating eccentricity and eccentric direction by receiving phase errors of signals using two sensors in contrast. Based on the Lissajous plot generated by composite signals, the eccentric parameters of the grating in manipulator joint test system is measured. Finally, using the angle error formulas to compensate the measuring angle, the measuring system has been amended. The experiment shows that the amended angular accuracy has greatly improved, and the measurement accuracy is increased by nearly five times. It can satisfy the requirements of high accurate systems.

**Key words:** angle measurement; circular grating; system error compensation; eccentric range test; eccentric direction test

收稿日期:2012-07-26;修订日期:2012-08-30.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61175080);高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(No. 20110005120004);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No. 2011PTB-00-11)

## 1 引言

关节测试平台可用于测定机械臂关节角度位置的输出精度,并为关节柔性部件传动特性研究和内部传感器标定提供平台基础<sup>[1]</sup>。关节测试系统内采用圆光栅作为角度位置检测元件,作为关节转角精度测定的基准,因此,圆光栅的测量精度直接决定关节测试系统的性能和测试应用范围。在安装过程中,圆光栅相对关节轴系会不可避免地产生偏心,而安装偏心将导致编码器产生测角误差。因此,为保证系统测试精度,需要对圆光栅测量角度加以修正。

目前对圆光栅测角修正的研究主要集中在偏心所引起的测量误差方面。文献[2]分析了偏心对圆光栅测角的影响;文献[3-4]用傅里叶级数展开方法分析了圆光栅测角误差的表达式,运用 23 面棱体标定的方法实现了对圆光栅测角误差的测量。文献[5-6]使用模拟退火算法对圆光栅安装偏心误差进行了辨识和修正;文献[7]采用四读数头法消除光栅编码器偏心 and 振动的影响。然而目前的研究并没有讨论在装调困难的条件下,如何测定偏心误差(偏心距及偏心方向)。

本文以机械臂关节测试系统为研究对象,讨论如何修正由光栅安装偏心产生的测试误差。机械臂关节是精密伺服系统,所测单关节位置精度需控制在 12" 内,因此要求测量基准圆光栅具有较高的测试精度。另外,由于关节测试系统需要经常更换被测关节,重新安装后,偏心参数就会发生变化,而在测试平台内进行圆光栅装调非常困难,也无法通过显微镜等仪器对偏心进行检测。通过标定和辨识的方法修正圆光栅往往成本高、耗时长且操作复杂,不适用于多次拆卸被测轴的测量系统。因此需要一种更加高效便捷的手段来测定偏心误差并对圆光栅测角进行修正。本文采用双读数头接收信号并将信号合成,通过对比信号间相位差的方式检测出偏心距及偏心方向,采用推导的圆光栅偏心测角误差模型对测试系统进

行修正,最后通过测量实验验证了方法的有效性。

## 2 关节测试平台介绍

关节测试系统可对不同载荷情况下的柔性关节的定位精度、输出轴转角滞后量和速度性能进行指标测试。关节测试平台(如图 1 所示)硬件系统包括:待测关节、扭矩传感器、磁粉制动器、圆光栅编码器、上位机及数据采集卡等。圆光栅与关节输出端固连,用于测定关节轴系的转角。关节输出端通过联轴器与扭矩传感器连接,磁粉制动器则通过联轴器与扭矩传感器另一端进行连接,用于加载关节的负载力矩并测定负载大小。

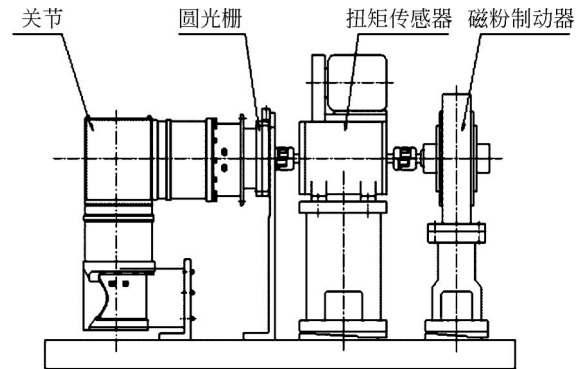


图 1 关节测试系统原理图

Fig. 1 Schematic of joint test system

## 3 偏心引起的圆光栅测角误差的修正

使用圆光栅测量旋转运动时,其角度位置误差具有周期性。通常,圆光栅测角误差来源主要有:圆光栅安装偏心误差;轴承径向误差;光栅条纹误差等。其中,轴承径向误差和光栅条纹误差的大小可通过选用高精度轴承和圆光栅来保证,因此,圆光栅安装偏心误差是最不可控的误差来源,很大程度地影响着系统的测试精度。偏心误差是在安装过程中由于圆光栅的几何中心和被测轴旋转中心不重合所产生的,是一种有规律的系统误差,其误差值随着转轴转角周期性变化,因此可以通过修正补偿来加以消除<sup>[8-9]</sup>。下面将讨论偏心误差与测量角之间的关系。

分析偏心引起的角度误差,如图 2 所示,图中



$$\widehat{A_2 B} \approx 2O_M E = 2e \cdot \sin\varphi, \quad (6)$$

其中  $\varphi$  为偏心方向与  $A_1 A_2$  方向间夹角。

长度差  $\widehat{A_2 B}$  在电条纹信号周期内所对应的角度数即为 2 个读数头探测到的正弦信号间的相位差, 读数头 1 与读数头 2 接收信号间的相对相位差可以表示为:

$$\Delta\phi_{12} = 360 \times \frac{2e \cdot \sin\varphi}{d}, \quad (7)$$

其中  $d$  为光栅栅距, 360 代表一个电条纹信号周期内的角度数。读数头 1 与读数头 2 间相位差随转轴转角的变化而变化。

被测轴旋转一周的过程中, 读数头 1 与读数头 2 间的偏心路程差会 2 次达到极值点(如图 4 所示), 分别对应偏心方向与  $A_1 A_2$  方向正交时接收器 2 读到的 2 个点。圆光栅从极小值点  $P_{\min}$ , 逆时针旋转  $180^\circ$  到达极大值点  $P_{\max}$  期间 2 个读数头所读到的总相位差为  $\Delta\psi$ 。进一步变换整理式, 可得到偏心距  $e$  的计算公式。

$$e = \frac{\Delta\psi}{4 \times 360^\circ} \times d, \quad (8)$$

读数头 2 读到极值点时开始记录, 圆光栅旋转  $90^\circ$  后, 偏心方向将会和  $A_1 A_2$  方向一致。因此, 在示波器中捕捉到相位极值点后, 根据正交关系便可确定圆光栅的偏心方向。

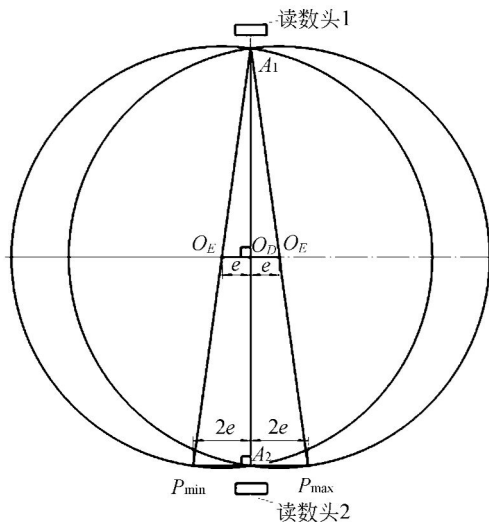


图 4 圆光栅偏心极值位置

Fig. 4 Extremum position of eccentricity for circular grating

由以上分析可知, 通过对比 2 个读数头合成信号的方法, 可以计算出被测转轴旋转一周对径

位置信号产生的相位差, 根据信号间的相位差可确定圆光栅的偏心距  $e$  和偏心方向。将测量得到的偏心距  $e$  和偏心相角  $\psi$  带入式(4), 获得了完整的由偏心引起的测角误差修正公式。

## 5 测量实验与结果

### 5.1 偏心误差测量实验

读数头 1、2 对径安装在关节测试平台圆光栅传感器支架上。通过 5 V 稳压电源向接收器供电, 示波器的通道 1 和通道 2 分别连接读数头 1、2 的信号输出端, 如图 5 所示。

读数头 1 与读数头 2 转换的电信号通过示波器的两通道合成李萨茹图形。从李萨茹图形可读出对应的相位差值(要求正弦信号频率相等), 方法是: 设图形 2 次穿过水平轴之间的距离  $X$  与图形在水平轴投影总长度  $X_0$  之比为  $\omega$ , 则相位差  $\Delta\psi = \arcsin(\omega)$ 。

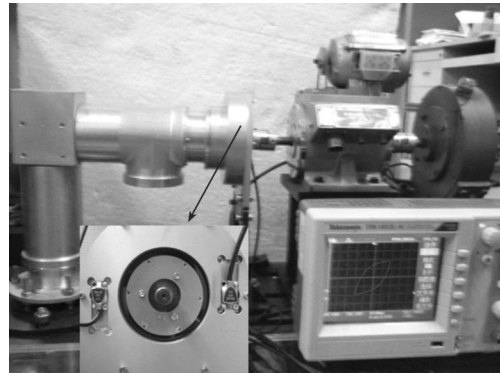


图 5 偏心误差测量实验

Fig. 5 Experiment of eccentric error detection

相位差的读取: 首先进行偏心极值的位置判定, 观察李萨茹图形的运动轨迹, 当信号合成图的运动轨迹方向发生改变时, 得到记录的最小极值点, 此时的相位差记为  $\Delta\psi_{\min}$ , 继续沿同向转动, 得到最大极值点, 记录相位差为  $\Delta\psi_{\max}$ ; 得到 2 个极值点后, 记录此转动过程中李萨茹图变化的循环次数, 即相位差中的整周期数  $n$ , 通过以上的记录, 根据下面的公式计算出偏心距  $e$ :

$$e = \frac{(\Delta\psi_{\max} + 360n - \Delta\psi_{\min})}{4 \times 360^\circ} \times d. \quad (9)$$

实验中选用 MicroE R10851 型圆光栅, 栅距为  $20 \mu\text{m}$ 。实验测量计算安装后圆光栅偏心距为  $6.9 \mu\text{m}$ , 偏心相位角为  $34.96^\circ$ 。将偏心参数带入

式(4),得到完整的偏心引起的误差补偿公式。

## 5.2 测量实验验证

为了验证修正圆光栅偏心测角误差后,关节测试系统的测量精度。将偏心引起的测角误差修正公式加到测试软件的误差修正程序中,获取的角度作为修正角度;以 24 棱镜体测量角度作为标准角度,每 15°测量一次,分别记录一周内的测角标准值,修正前测量值和修正后测量值,共记录 20 组。修正前后测量误差对比如图 6 所示。

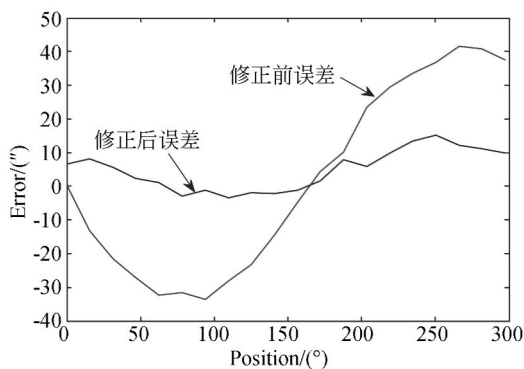


图 6 修正前后测量误差对比

Fig. 6 Comparison of measurement errors before and after corrections

由图 6 可知,修正前的测角误差呈正弦曲线趋势,说明圆光栅测角误差主要为系统误差,经过偏心误差修正后的测角误差范围明显缩小。数据整理后得到,修正前的圆光栅误差为 28.3",修正后的误差为 5.8",误差减小了近 79%。修正后的测试系统满足了单关节输出角度测试精度需求。

## 6 结 论

圆光栅安装偏心所产生的测角误差是影响圆光栅测量精度的一个重要因素。本文研究了偏心参数与圆光栅角度测量间的关系,推导了由偏心引起的圆光栅测角误差补偿公式。此误差补偿模型同样适用于其他光电测角系统,具有通用性。提出了一种通过双读数头接收信号间相位差,检测出圆光栅偏心距离和偏心方向的方法。通过所测得的偏心距和偏心方向获得了完整的由偏心引起的测角误差补偿项,可以在不增加大型测试仪器的前提下,短时间内对圆光栅测角进行修正。测量实验结果表明,经修正后的圆光栅测量误差降低了近 79%,测量精度满足关节测试需求。

## 参考文献:

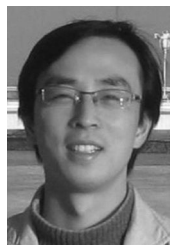
- [1] 韩彬. 柔性机械臂模块化测试系统的设计与实现[D]. 北京:北京邮电大学,2009.  
HAN B. *Design and implementation of a modular test system for the flexible manipulator*[D]. Beijing: Beijing University of Post and Telecommunication,2009. (in Chinese)
- [2] 郭阳宽,李玉和,李庆祥,等. 运动偏心对圆光栅副测量的影响及误差补偿[J]. 清华大学学报(自然科学版),2005,45(2):178-181.  
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)
- [3] 于连栋,丁洋,程文涛. 平行双关节坐标测量机圆光栅测角误差补偿技术[J]. 南京理工大学学报(自然科学版),2009,33(5):659-662.  
YU L D,DING Y,CHENG W T. Compensation of angle measurement error of circular gratings for parallel dual-joint coordinate measuring machine[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology(Natural& Science)*,2009,33(5):659-662. (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] 王文,林铿,高贯斌,等. 关节臂式坐标测量机角度传感器偏心参数辨识[J]. 光学精密工程,2010,18(1):135-134.  
WANG W, LIN K, GAO G B, *et al.*. Eccentricity parameter identification of angle sensors for articulated arm CMMs [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010,18(1):135-141. (in Chinese)
- [6] 高贯斌,王文,林铿,等. 圆光栅角度传感器的误差补偿及参数辨识[J]. 光学精密工程,2010,18(8):1766-1772.  
GAO G B, WANG W, LIN K, *et al.*. Error compensation and parameter identification of circular

- grating angle sensors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(8):1766-1772. (in Chinese)
- [7] 朱帆, 吴易明, 刘长春. 四读头法消除码盘偏心和振动对叠栅条纹相位测量的影响[J]. *光学学报*, 2011, 31(4):1-7.  
ZHU F, WU Y M, LIU CH CH. Eliminating influence of grating encoders eccentricity and vibration to moire fringes signal by four reading heads [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(4):1-7. (in Chinese)
- [8] NOBUMI H, YOSHIHISA S, HIDEAKI M. A method of improving the resolution and accuracy of rotary encoders using a code compensation technique [J]. *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, 1992, 41(1):98-101.
- [9] 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)
- [10] PORTMAN V, PESCHANSKY B. Phase-statistical method and device for high precise and high-efficiency angular measurements [J]. *Precision Engineering*, 2001, 25(4):309-315.

#### 作者简介:



艾晨光(1987—),男,吉林长春人,主要从事空间机器人地面实验平台方面的研究。E-mail: Aichengguang @ gmail.com



叶平(1979—),男,浙江遂昌人,博士,讲师,主要从事空间机器人容错控制、移动机器人定位等方面的研究。E-mail: yeping@bupt.edu.cn

#### 导师简介:



褚明(1983—),男,山东东营人,博士,讲师,主要从事机器人动力学与自动控制方面的研究。E-mail: chuming\_bupt@bupt.edu.cn



孙汉旭(1960—),男,陕西汉中,教授,博士生导师,主要从事机器人机构学与控制方面的研究。E-mail: hxsun@bupt.edu.cn



张延恒(1978—),男,山东人,副教授,硕士生导师,主要从事运动学、动力学及控制方面的研究。E-mail: zyh620@163.com