

## 增量式光电轴零位漂移问题解决

门涛<sup>1,2</sup>, 杨悦<sup>3</sup>, 徐蓉<sup>1,2</sup>, 刘长海<sup>1,2</sup>, 温昌礼<sup>2</sup>

(1. 宇航动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710043; 2. 中国西安卫星测控中心, 陕西 西安 710043;  
3. 四川大学软件学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 介绍了增量式光电轴角编码器的工作原理及其在空间目标测量领域的应用。分析了轴角编码器零点漂移的原因, 推导了基于轴系和球谐函数的望远镜系统误差修正模型。提出了采用外复核方法解算望远镜指向精度, 即用前两天测星解算出来的系统球谐函数误差模型系数修正并复核当天的测星误差。设计了零点标定实验对轴角编码器零位进行标定, 进行了连续 11 个晴天夜晚的观测实验, 在零点标定前后观测在视场内均匀分布的 30 颗恒星, 分别解算得到望远镜指向误差, 确认了轴角编码器的零点漂移现象。采集 GPS 卫星数据进行了精度鉴定, 望远镜方位和俯仰的轴系误差均值由 13.99"、11.50" 分别降至 5.94"、-3.49", 验证了零点标定方法消除零位漂移并提高望远镜测量精度的可行性。

**关键词:** 轴角编码器; 零点漂移; 球谐函数; 指向精度

**中图分类号:** TP212.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)02-0497-05

## Resolution of incremental photoelectric angular encoder with reference mark excursion

Men Tao<sup>1,2</sup>, Yang Yue<sup>3</sup>, Xu Rong<sup>1,2</sup>, Liu Changhai<sup>1,2</sup>, Wen Changli<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Astronautic Dynamics, Xi'an 710043, China; 2. Xi'an Satellite Control Center, Xi'an 710043, China;  
3. College of Software, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** The operational principle and characteristic of incremental photoelectric angular encoder were summarized and discussed. And the reasons of reference mark excursion for incremental photoelectric angular encoder were analyzed. In order to validate reference mark excursion, a pointing function, which defined in the spherical coordinate of level mounting telescope, was expanded into series by spherical function. Then the spherical function model of pointing error was obtained. 30 stars scattered in sky space uniformly were selected to observe, through which the discrete value of 30 stars' pointing error were gained in longitude dimension and latitude dimension respectively. A new technique called external checking method, which used observing data two days ago to check intraday pointing error, was tested to validate the phenomenon of reference mark excursion. An experiment measuring pointing error before and after reference mark calibration by observing Polaris last 11 days. The results showed reference mark excursion caused pointing error of telescope becoming greater than the technical index designed. And after calibration the reference mark became fixed all night. To evaluate the effect of reference mark

收稿日期: 2013-06-10; 修订日期: 2013-07-25

基金项目: 国家自然科学基金(61179010)

作者简介: 门涛(1982-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事光学测量技术方面的研究。Email: mentao1330@163.com

calibration, orbital position of a GPS satellite was measured by optoelectronic telescope. Pointing error of the telescope was gained compared with precision orbital position of GPS satellite. The results show that before reference mark calibration the mean azimuth and elevation error was 13.99", 11.50". And after calibration the mean azimuth and elevation error decreased to 5.94", -3.49" respectively. The experiment of GPS star observation showed that the reference mark calibration was available to eliminate reference mark excursion and to improve observation precision.

**Key words:** incremental angular encoder; reference mark excursion; spherical function; pointing precision

## 0 引言

光电轴角编码器又称光电角位移传感器,是集光、机、电于一体的一种数字测角装置。与其他同类用途的传感器相比,光电轴角编码器具有分辨率高、精度高、测量范围广、易于维护等优点,因此被广泛应用于光电望远镜、雷达和高精度闭环调速系统等诸多领域。编码器精度直接影响系统的控制与检测精度<sup>[1-5]</sup>。

光电轴角编码器只有具备精确的测角系统才能实现精确定位。广泛应用的位置测量器件有旋转变压器、感应同步器,以及光栅传感器等。光栅传感器是一种非接触光学测量系统,具有稳定、高速度、高分辨率、高精度等特点。光栅传感器由三部分组成,即光源部分,标尺光栅和指示光栅,光电接收部分。

光电轴角编码器按测量方法分为绝对式和增量式两大类。绝对式是指直接把被测转角换成相应的代码,指示出绝对位置,没有累积误差,而且断电后位置信息不会丢失,但价格较贵;增量式无法给出光电轴角编码器转过的绝对位置,只能测出被测转角的相对值,因而需要一个相对零点以累计记位,其优点是编码简单、体积小、安装方便。

对于增量式光电轴角编码器,其只能测出相对位移量,要测出绝对角度,需要有一个参考点,而这个参考点就是编码器的零位<sup>[6]</sup>。光电轴角编码器在码盘上刻有一个零位狭缝,当码盘的零位狭缝旋转到所对应的指示光栅,光电接收器会输出一个电压值,通过电压比较器后变成一个窄方波脉冲,用于中断触发。编码器上电后,需要转动编码器经过固定零位,这时由单片机处理一次零位方波脉冲中断,给计数器清零之后开始正常工作。在码盘旋转过程中,通

过计数器记出相对零位转过的脉冲数,计算出转过的角度,并加上零位所对应的角度值,就可以实时地测出实际的角度值。实际工作中零位方波脉冲的宽度是有要求的,方波太窄,会使编码器转动速度较高,单片机就不能检测到零位中断信号,导致无法过零;方波较宽,很可能使编码器从不同方向过零后,在同一个位置显示不同的角度值,就起不到数据重现的作用。

实际运行过程中,由于受运行环境温度、电压、电磁干扰的影响,增量式光电编码器存在无法过零或零位漂移问题,导致角度参考点发生变化,影响测量精度,这也是增量式光电轴角编码器的主要缺点。

## 1 零点漂移问题分析

### 1.1 零点漂移问题的提出

该实验系统采用英国 RENISHAW 公司 24 位增量式金属反射式圆光栅编码器作为测角系统,编码器主体由周期性刻线光栅组成,通过加电后产生的零位脉冲确定参考点位置,并通过计算自参考点开始的增量数(测量步距数)获得位置信息。该编码器外直径为 300 mm、刻线宽度为 20 μm、输出脉冲为 47 200,读数头选用 400 细分,因此编码器本身的分辨率可达 0.07"。

天文光电望远镜在实验场初始安装时需要对编码器的零位差进行标定以消除望远镜的零位差,标定的方法是对北极星进行测量,以北极星理论位置引导望远镜,同时记录北极星在视场中的脱靶量,脱靶量即为望远镜的零位偏差。

望远镜在外场安装过程中首先观测北极星进行了零点标定,北极星作为定标星位于望远镜视场中

心。而设备安装结束后验算指向精度时,发现望远镜指向精度超差达 20"左右,远大于设计的 8"误差指标。经过检查设备硬件安装精度,如 CCD 安装位置误差、视轴晃动、塔台水平度等项目,发现设备硬件安装误差在设计指标范围内。再次对星进行观测实验,零点标定过程中发现北极星已脱离视场中心位置,偏离中心约 18"左右,从而问题原因定位于编码器零点漂移引起的指向误差超差。

### 1.2 球谐函数修正系统误差

为了验证光电轴角编码器零点漂移对望远镜轴系测量精度的影响,采用球谐函数<sup>[7-8]</sup>描述望远镜系统观测误差模型。

系统误差是与望远镜位置状态有关的量,是位置的函数。用  $A, E$  表示方位及俯仰角,用函数  $f_A, f_B$  表示偏差,则有

$$\begin{aligned} \Delta A &= f_A(A, E) \\ \Delta E &= f_E(A, E) \end{aligned} \quad (1)$$

$f_A, f_B$  为指向修正函数,它们是在球面上的连续函数。对全天分布的星体进行测量得到恒星的观测位置  $A_0, E_0$ , 及由星历表计算出的在  $t_0$  时刻目标恒星的视位置  $A_C, E_C$ , 即可得到望远镜在各个方向上的指向偏差:

$$\begin{aligned} \Delta A &= A_0 - A_C \\ \Delta E &= E_0 - E_C \end{aligned} \quad (2)$$

望远镜的指向系统误差是随俯仰角变化的复杂函数,所以调谐函数需用高次项进行拟合。选用一个带谐项到 4 阶和相应各阶都只有一次的球谐函数,其表达式如下:

$$F(\theta, \lambda) = \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ A_n^0 P_n(\cos\theta) + \sum_{m=1}^n [A_n^m \cos m\lambda + B_n^m \sin m\lambda] P_n^m(\cos\theta) \right\} \quad (3)$$

其中,  $P_n(\cos\theta)$  为勒让得多项式:

$$P_n(\cos\theta) = \frac{1}{2^n * n!} * \frac{d^n}{d(\cos\theta)^n} (\cos^2 \theta - 1)^n \quad (4)$$

其中,  $P_n^m(\cos\theta)$  为连带勒让得多项式:

$$P_n^m(\cos\theta) = (-1)^m (1 - \cos^2 \theta)^{m/2} * \frac{d^m}{d^m(\cos\theta)} P_n(\cos\theta) \quad (5)$$

简化  $F(\theta, \lambda)$  并做相应的解算得望远镜在方位及俯仰角两个方向上的系统误差修正函数:

$$\begin{aligned} f_A(A, E) &= \Delta A \sin E = \\ &= A_0 + A_1 \cos E + A_2 \cos A \sin E + A_3 \sin A \sin E + A_4 \cos^2 E + \\ &= A_5 \cos A \sin E \cos E + A_6 \sin A \sin E \cos E + A_7 \cos^3 E + \\ &= A_8 \cos A \sin E \cos^2 E + A_9 \sin A \sin E \cos^2 E + A_{10} \cos^4 E + \\ &= A_{11} \cos A \sin E \cos^3 E + A_{12} \sin A \sin E \cos^3 E \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} f_E(A, E) &= \Delta E = \\ &= B_0 + B_1 \cos E + B_2 \cos A \sin E + B_3 \sin A \sin E + B_4 \cos^2 E + \\ &= B_5 \cos A \sin E \cos E + B_6 \sin A \sin E \cos E + B_7 \cos^3 E + \\ &= B_8 \cos A \sin E \cos^2 E + B_9 \sin A \sin E \cos^2 E + B_{10} \cos^4 E + \\ &= B_{11} \cos A \sin E \cos^3 E + B_{12} \sin A \sin E \cos^3 E \end{aligned} \quad (7)$$

式中:  $A_i, B_i$  为系数 ( $i=0, 1, 2, 3, \dots, 12$ )。

利用望远镜观测 30 颗以上在方位角和俯仰角上均匀分布的恒星,对其测量值进行蒙气差修正,将修正后的星体测量值和观星时刻计算的理论值进行比较,得到观测误差。

30 颗以上恒星的测量值可构成非线性方程组:

$$\begin{aligned} AX_A &= L_A \\ AX_B &= L_B \end{aligned} \quad (8)$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \dots & a_{1,13} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \dots & a_{2,13} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{N,1} & a_{N,2} & \dots & a_{N,13} \end{bmatrix}$$

$$X_A = \begin{bmatrix} A_0 \\ A_1 \\ \dots \\ A_{13} \end{bmatrix}, L_A = \begin{bmatrix} \Delta A_0 \\ \Delta A_1 \\ \dots \\ \Delta A_{13} \end{bmatrix}, X_B = \begin{bmatrix} B_0 \\ B_1 \\ \dots \\ B_{13} \end{bmatrix}, L_B = \begin{bmatrix} \Delta E_0 \\ \Delta E_1 \\ \dots \\ \Delta E_{13} \end{bmatrix}$$

矩阵  $A$  中各元素定义为:

$$\begin{aligned} a_{i,1} &= 1, a_{i,2} = \cos E_i, a_{i,3} = \cos A_i \sin E_i, a_{i,4} = \sin A_i \sin E_i, \\ a_{i,5} &= \cos^2 E_i, a_{i,6} = \cos A_i \cos E_i \sin E_i, a_{i,7} = \sin A_i \cos E_i \sin E_i, a_{i,8} = \\ &= \cos^3 E_i, a_{i,9} = \cos A_i \sin E_i \cos^2 E_i, a_{i,10} = \sin A_i \sin E_i \cos^2 E_i, a_{i,11} = \\ &= \cos^4 E_i, a_{i,12} = \cos A_i \sin E_i \cos^3 E_i, a_{i,13} = \sin A_i \sin E_i \cos^3 E_i. \end{aligned}$$

其中,  $i=1, 2, 3, 4, \dots, N, N$  为被测恒星个数。

解非线性方程组(8),求得函数  $f_A(A, E), f_B(A, E)$  的系数  $X_A, X_B$  后即可获得观测值的均方差。

## 2 零点标定实验

为了分析与验证编码器相对于前一个观测夜晚的零点漂移现象与漂移量,设计了对北极星零点标

定对比实验,并且提出采用外复核方法解算指向精度,利用不同日期(相隔两天)的观测数据进行精度符合,即用前两天测星解算出来的系统球谐函数误差模型系数修正当天的测星误差,得到设备外复核指向误差。

表1 望远镜指向误差列表(单位:("))

Tab.1 Pointing precision of telescope (Unit: ("))

Experiment day	Before calibration		After calibration	
	Azimuth	Elevation	Azimuth	Elevation
1	3.5	-14.1	-2.6	-0.7
2	-12.0	-7.3	-0.2	0.1
3	-12.0	-7.0	-0.2	0.1
4	12.9	4.6	-0.2	0.7
5	7.6	7.7	0.1	-0.5
6	9.0	22.0	-1.9	-0.3
7	0.8	6.7	0.5	0.6
8	5.8	3.8	-0.3	-0.3
9	-7.5	-1.5	-0.2	-0.5
10	0.3	8.5	-2.2	0.7
11	3.9	1.5	-2.2	-0.8

零点标定实验步骤如下:在每个观测夜晚望远镜开机时首先拍星,即利用望远镜观测 30 颗以上在方位角和俯仰角上均匀分布的恒星,使用球谐函数模型将星体测量值和观星时刻计算的理论值进行比较,得到设备观测指向误差。此后,将望远镜观测北极星进行零点标定,即为编码器固定一个“零值”;再次观测 30 颗以上恒星,解算得到零点标定后的设备外复核指向误差。

此项实验一直持续 11 个晴天夜晚,实验结果如表 1 所示。可以看出,零点标定之前望远镜方位、俯仰指向误差最大值分别可达 12.9"、22.0",表明增量式编码器每个观测夜晚开机时相对于上个观测夜晚其零点已发生了漂移。而零点标定之后的解算数据明显对标定之前数据减小,方位、俯仰指向误差最大值仅为-2.6"、-0.8",且指向精度保持稳定,均满足技术指标要求。

零点标定实验结果表明,在现阶段由于光栅制造工艺精度的限制,昼夜温差过大引起码盘零

位狭缝旋转到指示光栅时不能精确过零,导致开机时增量式光电轴角编码器零点相对于前一个观测夜晚发生了漂移,引起望远镜观测精度超差。因此,为消除零点漂移误差对设备观测精度的影响,可在每个观测夜晚进行零点标定之后再行观测。

### 3 精度验证

为验证轴角编码器零点标定效果,应用光电望远镜对 GPS 卫星(26690)进行了跟踪测量,图 1、图 2 是望远镜对 GPS 星的观测数据。选用 GPS 星是因为 GPS 星在国际上提供精确的轨道数据,可以与望远镜的测量结果进行比对。图 1、图 2 中的测量误差是用设备测量数据与精确轨道数据比较得出的。

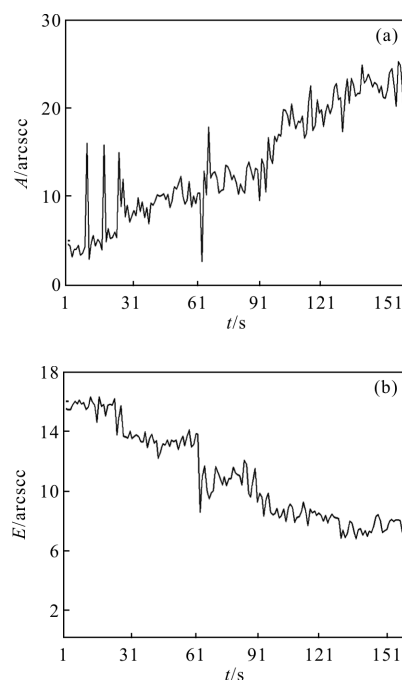


图 1 GPS 卫星测量数据误差曲线(零点标定前)

Fig.1 Error curves of a GPS before reference mark correction

从图 1 中可以看出,零点标定之前方位的原始数据误差为 13.9911.33,俯仰的原始数据误差为 11.504.81。从图 2 中可以看出,零点标定之后方位的原始数据误差为 5.942.04,俯仰的原始数据误差为-3.492.63。从两组数据比对可以看出,零点标定方法对系统轴系误差的修正效果是明显的,验证了该方法提高设备测量精度的可靠性。

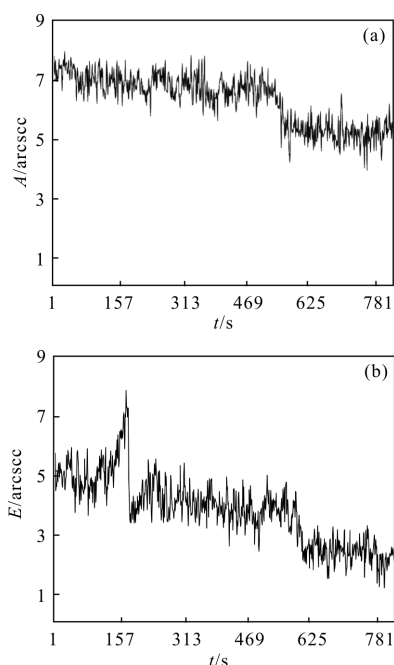


图2 GPS 卫星测量数据误差曲线(零点标定后)

Fig.2 Error curves of a GPS after reference mark correction

## 4 结论

分析了增量式光电轴角编码器零点漂移的原因,采用球谐函数模型推导计算了望远镜的轴系指向误差,并提出了外复核算方法,即用前两天测星解算出来的系统误差模型系数修正当天的测星误差,从而验证编码器零点漂移现象并计算得到了超差数值。在理论分析的基础上,提出每个观测夜晚首先进行零点标定以消除零点漂移影响的解决方法,通过观测 GPS 卫星验证了该方法的可靠性和稳定性,提高了设备指向精度,对于空间目标的光电探测具有重要意义。

## 参考文献:

[1] Shi Fengdong, Shi Yijun, Su Huanxin, et al. Design of pulley movement information collection system in space motion simulation platform [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(11): 3093-3096. (in Chinese)  
史风栋, 史屹君, 苏焕鑫, 等. 空间运动模拟平台中的滑车运动信息采集系统设计 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41

(11): 3093-3096.  
[2] Wang Shuai, Wang Jianli, Chen Tao, et al. Application of the nonlinear tracking-differentiator in velocity estimation on optical encoder [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(5): 849-853. (in Chinese)  
王帅, 王建立, 陈涛, 等. 非线性跟踪微分器在光电编码器测速中的应用[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(5): 849-853.  
[3] Tang Tianjin, Cao Xiangqun, Lin Bin. Developing current situation and the trend of photoelectric-angular encoder [J]. *Optical Instruments*, 2005, 27(1): 90-95. (in Chinese)  
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.  
[4] Chen Yun, Zhang Hongsheng. Coding modes of photoelectric shaft encoders and their developing trend [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2009, 2(2): 126-133. (in Chinese)  
[5] Du Yingcai, Wang Xijun, Wang Shujie, et al. Auto-detection system of incremental encoder [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2012, 26 (11): 993-998. (in Chinese)  
杜颖财, 王希军, 王树洁, 等. 增量式编码器自动检测系统 [J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(11): 993-998.  
[6] Xu Zhou, Hu Xiaodong, Luo Changzhou, et al. The electronic multiplication and interpolation of incremental optical encoder with reference mark [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, 31(12): 1497-1550. (in Chinese)  
徐洲, 胡晓东, 罗长洲, 等. 增量式轴角编码器的电子细分及零位处理[J]. 光子学报, 2002, 31(12): 1497-1500.  
[7] Zhao Jinyu, Wang Dexing, Li Wenjun, et al. New method of dynamic correction for the system errors of telescope [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(2): 244-247. (in Chinese)  
赵金宇, 王德兴, 李文军, 等. 望远镜系统误差动态修正的一种新方法[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(2): 244-247.  
[8] Wang Jianjun, Lu Changming, Gao Xin, et al. Correction of the system errors of equatorial telescopes [J]. *Journal of Spacecraft TTC Technology*, 2012, 31(1): 47-50. (in Chinese)  
王建军, 陆长明, 高昕, 等. 极轴式望远镜系统误差修正方法研究[J]. 飞行器测控学报, 2012, 31(1): 47-50.