

文章编号 1004-924X(2015)09-2446-06

大型望远镜测角系统误差的修正

王显军

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 由于大型望远镜转台轴系对测角精度要求较高, 本文研究了测角数据系统的误差修正技术。分析了测角数据误差产生的原因, 对测角元件误差、安装误差、被测轴系误差进行了讨论, 指出轴系测角分系统的误差规律符合谐波方程, 故提出采用谐波方程式来表达误差规律。针对工程应用, 建立了基于傅里叶级数的简化谐波方程误差公式, 用谐波方程算法和多项式拟合算法对系统误差进行修正。在一个望远镜垂直轴转台进行了试验验证, 结果显示测角精度峰值由原来的 3.81" 提高到了 1.06"。实验表明, 基于傅里叶级数的修正算法, 较好地符合误差分布规律; 采用系统误差修正技术, 可以对系统综合误差统一修正, 能够有效提高系统测角精度。

关键词: 望远镜; 测角系统; 编码器; 测角精度; 误差修正

中图分类号: TP212.12; TH743 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152309.2446

Correction of angle measuring errors for large telescopes

WANG Xian-jun

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: wangxianjun@ciomp.ac.cn

Abstract: As the turntable shaft system of a large telescope needs a higher angle measuring precision, this paper explores an error correction method for the angle measuring system. The causes of data errors of angle measuring were analyzed, and the errors of angle measuring device, installation errors and the errors of measured shaft were discussed. It points out that the error rules of the shaft angle measuring subsystem are according with a resonant equation, so the resonant equation was used to explain the error rule. For engineering applications, a simplified resonant equation error formula was established through the research of the Fourier series. Then, the harmonic equation algorithm and the polynomial fitting algorithm were used to correct the system errors. A test was taken on the vertical axis turntable of a telescope and the results show that the peak of angle measurement precision is improved from 3.81" to 1.06". The experiments indicate that the modified algorithm based on Fourier series conforms the error distribution rule better. The error correction method corrects comprehensive errors of the system in a unified way and effectively improves the angle measurement precision of the system.

Key words: telescope; angle measurement system; encoder; angle measurement precision; error correction

收稿日期: 2014-12-29; 修订日期: 2015-02-20.

基金项目: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所三期创新工程资助项目 (No. 065X32CN60)

1 引 言

大型望远镜用于对天文及人造空间目标的高分辨率成像,其观测目标小、距离远,因此对系统测角精度的要求较高^[1]。1989 年欧洲南方天文台建成的 3.5 m 口径 NTT 望远镜,测角系统采用 Heidenhain 绝对式编码器,设备跟踪误差为 0.15",瞄准误差为 1.5"。1998 年欧洲北方天文台建成的 3.5 m 口径 TNG 望远镜,采用 Heidenhain 绝对式 28 位编码器,设备跟踪误差为 0.2",瞄准误差为 1"。2004 年美国白沙靶场建成的 4.1 m 口径 SOART 望远镜,采用 Heidenhain 29 位钢带编码器,设备跟踪误差为 0.064",瞄准误差为 0.08"。

安装误差以及被测轴系误差会影响编码器精度,使得望远镜系统难以达到较高精度。如文献^[2]中的关节测试平台^[2]选用的 R10851 型圆光栅,栅距为 20 μm,其基础刻线为 16 384 对光栅线,刻划光学半径为 107.95 mm,用此光栅作编码器,精度可高于 5",但将其应用到关节测试平台时系统的测量精度只有 28.3"。这说明测量基准光栅元件的精度虽高,但受到系统安装和被测轴系的影响,仪器系统难以达到高精度。

为了满足系统的测量精度要求,首先要选择高精度的编码器,其次是减小测角元件的安装误差,最后,系统地考虑影响被测轴系精度的各个环节,采用误差修正技术来提高系统的测量精度。误差通常分为两类:一类是系统误差,一类是随机误差。本文基于理论和标定数据分析了望远镜系统测角误差的规律,并研究了系统误差的补偿方法。

2 误差源分析

望远镜测角系统的误差源主要包括三个方面:一是测角传感器的误差,二是传感器的安装误差,三是被测轴系的误差。

2.1 传感器误差

传感器误差分为两部分:一部分是测角基准的光栅刻划误差,另一部分是从光栅读取的光电信号误差。

刻划误差由光栅的刻划制造质量决定,经过掩模母板光刻、毛坯加工、光栅盘复制等工艺,各环节的误差最终体现到成品光栅盘^[3]。图 1 是一

种光栅盘精度检测数据的记录,由图可见基准光栅刻划误差的分布规律。

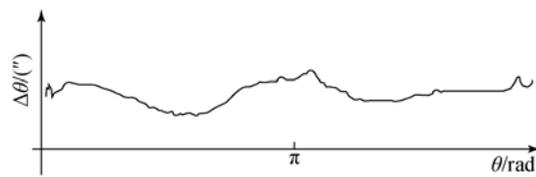
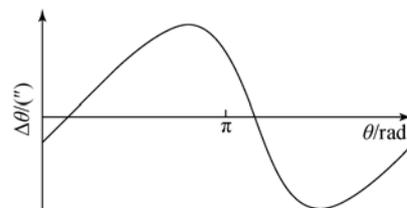
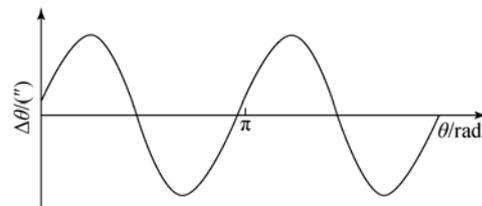


图 1 基准光栅盘的误差分布规律
Fig. 1 Distribution of benchmark grating errors

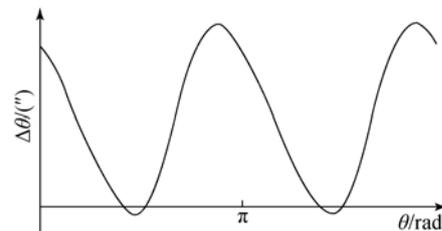
理想的光电信号是两路正交的正弦波,误差表现为细分误差,其由两路正弦波的直流分量误差、幅值误差、正交相位误差、噪声误差和谐波分量误差等组成^[4]。信号分类误差规律如图 2 所示。



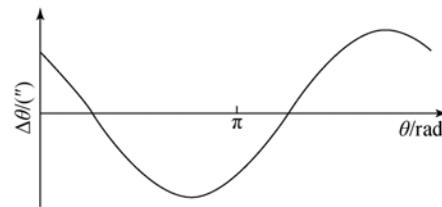
(a) 直流分量误差
(a) DC component error



(b) 幅值误差
(b) Amplitude error



(c) 正交相位误差
(c) Orthogonal phase error



(d) 噪声误差
(d) Noise error

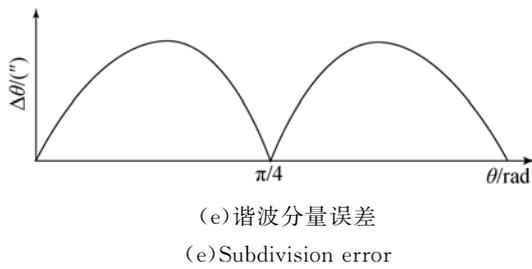


图 2 信号分类误差的分布规律

Fig. 2 Distribution of various signal errors

如图 2(a) 所示, 直流分量误差呈非正弦分布, 细分周期内 1 次变化。

如图 2(b) 所示, 幅值分量误差呈近似正弦分布, 细分周期内 2 次变化。

如图 2(c) 所示, 正交相位误差呈近似正弦分布, 细分周期内 2 次变化。

如图 2(d) 所示, 电路信号噪声误差呈正弦分布, 细分周期内 1 次变化。噪声是随机误差, 虽然噪声能量各处相同, 但在不同位置产生的作用不同。

实际工作中光电信号的谐波误差是通过细分算法体现的, 其分布规律如图 2(e) 所示, 细分周期内 8 次变化。

综上所述, 传感器误差有规律可循。光电信号的误差特点是在细分周期内呈现规律变化, 若采用前述 R10851 型圆光栅, 其细分周期为 $79.1''$, 当综合误差控制为 1.5% 时, 细分精度可达 $1.18''$ 。

对于专业的测角编码器制造商来说, 编码器的核心技术为基准光栅制作和光电信号提取。光栅刻划质量和信号提取质量的提高, 以及光电信号补偿技术的应用^[5-6]可增大传感器的精度。但传感器精度不等于仪器系统的精度, 提高仪器系统精度还需考虑其它因素。

2.2 安装误差

编码器与被测轴可采用弹性联轴器连接, 如图 3 所示; 也可采用弹簧片连接, 如图 4 所示。



图 3 弹性联轴器
Fig. 3 Flexible connection

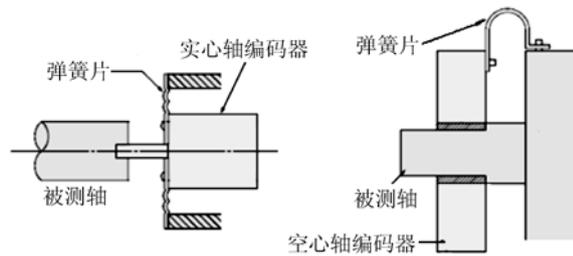


图 4 弹簧片连接方法示意图

Fig. 4 Schematic diagram of diaphragm connection

由于这两种连接方式均采用弹性原件, 被测轴与编码器之间存在带动误差, 不适合应用在高精度测角要求的情况下。

高精度的测角系统通常采用直接安装的方式, 即将测量基准光栅直接安装到转台轴系上, 望远镜转台轴系即编码器轴系。这种方法的安装误差主要来自两方面: 一是光栅平面与轴线不垂直, 二是基准光栅的中心与轴系偏心, 如图 5 所示。

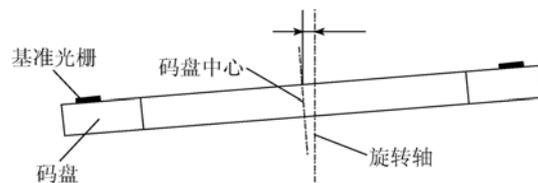


图 5 安装误差示意图

Fig. 5 Schematic diagram of install error

光栅平面与轴线不垂直会产生端跳, 影响光电信号质量。由端跳造成的信号误差效果与前述传感器的误差相同, 可通过安装调整使端跳尽量小, 而微小的端跳对系统精度的影响不大。

偏心误差^[7]的产生原因如图 6 所示, 基准光栅理论圆心 O' 与实际测量轴旋转中心 O 存在偏心。A 读数头的初始位置在 x 轴 0° 点处, 以旋转中心 O 点为准转动 90° , 实际转动角度 $\angle xOy = 90^\circ$, 读出角度数据为 $a, a = 90^\circ + \Delta\theta$, 由此产生偏心误差 $\Delta\theta$ 。在 A 头对径设置读数头 B, 采用对径读数可以消除部分偏心误差。B 的读数角度为 $b, b = 270^\circ - \Delta\theta$, 因 B 头初始位置与 A 对径, 所以 B 头的增量角度 $b_a = 90^\circ - \Delta\theta$ 。对径读数时 $+\Delta\theta$ 与 $-\Delta\theta$ 相互抵消, 由此消除了偏心误差。

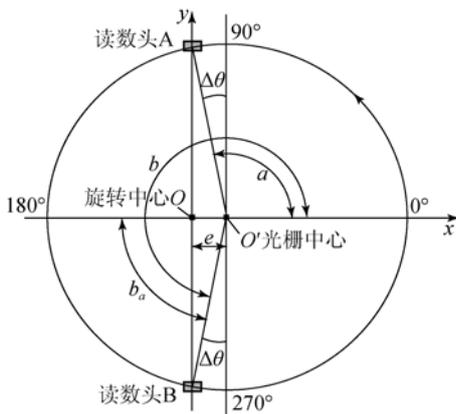


图 6 偏心误差示意图

Fig. 6 Schematic diagram of eccentric error

若偏心为 $2 \mu\text{m}$, 光栅刻划直径为 200 mm , 偏心误差最大为 $8.2''$ 。偏心误差很难通过安装消除, 因安装偏心难以控制在 $2 \mu\text{m}$ 以内。由此可见, 安装误差主要表现为偏心误差, 规律明显且影响较大。

2.3 被测轴系误差

大型经纬仪轴系的机械零件制造误差和安装调试误差会影响经纬仪的测角精度。轴系精度决定系统的测角精度。大型望远镜轴系精度的影响因素较多^[8], 主要有:

- (1) 机械零件较大, 加工精度不高;
- (2) 零件刚度不足引起弹性变形, 水平轴弯沉, 垂直轴支撑点之间下陷;
- (3) 轴承钢球与轴承环的误差;
- (4) 偏心载荷造成轴系倾斜;
- (5) 轴承受力不均匀、且随转动角度改变;
- (6) 温度不均衡产生变形等。

上述因素会引起轴系晃动误差, 而轴系误差是影响整个系统测角精度的主要因素。不过, 其中有些误差具有规律, 是可以修正的。

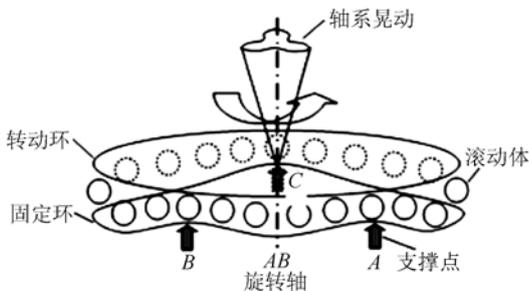


图 7 轴系晃动受结构刚度影响示意图

Fig. 7 Schematic diagram of shafting rock influenced by structure stiffness

图 7 所示为轴系晃动受结构刚度影响的一种情况。转台基座采用三点支撑, 由于结构刚度较弱, 导致轴系固定环发生变形, 造成轴系转动部分的晃动。若跟踪架采用 U 型结构, 对称两点承重, 垂直轴压力随转动角度改变。如图 7 所示, 支撑点 A, B, C, AB 两点中间点标记为 AB, AC 两点中间点标记为 AC。当 U 型架处于 AB-C 方向, 轴承 AB, C 两点受力大。AB-C 方向左右两点受力小, 受力均衡。如果底座采用三点调平支撑, 三点均布在 A 点、B 点和 C 点, 当 U 型架处于 AB-C 方向, A, B 两点之间受力下陷, 垂直轴线向 AB 方向倾斜。U 型架顺时针转动 60° 后, A, C 两点之间受力下陷, 垂直轴线向 AC 方向倾斜。上述情况下轴系晃动明显, 其它情况不再一一举例。

理论与实践证明^[9-10]: 大型轴系的晃动误差规律可采用傅里叶谐波公式进行分析。

3 误差规律建模

对望远镜测角系统三个主要方面的误差分析表明, 所有误差均体现出周期规律, 为修正误差, 故本文建立了 3 种误差算法模型。

3.1 标准的误差谐波方程

合成误差可以用谐波方程表达, 测角系统误差在 2π 测角周期内重复。一个以 2π 为周期的函数傅里叶级数为:

$$f(x_i) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos kx_i + b_k \sin kx_i). \quad (1)$$

其中:

$$a_0 = \frac{2}{n} \sum_{i=0}^{n-1} Y_i,$$

$$a_k \approx \frac{2}{n} \sum_{i=0}^{n-1} Y_i \cos kx_i,$$

$$b_k \approx \frac{2}{n} \sum_{i=0}^{n-1} Y_i \sin kx_i.$$

第 k 次谐波函数为:

$$y_k = a_k \cos kx_i + b_k \sin kx_i. \quad (2)$$

将测量误差值代入式(1)和式(2)中, 得到谐波分量系数, 获得最终的误差谐波方程。

3.2 简化的误差谐波方程

针对实际情况, 这里对谐波公式进行了简化

处理。谐波分量有幅值、频率和相位 3 个要素。针对这 3 个要素的分量表达式为：

$$y_k = a_k \cos(kx_i + \varphi_k), \quad (3)$$

其中： y_k 为 k 次谐波分量， a_k 为幅值， k 为频率， φ_k 为相位。简化的误差级数表达式为：

$$f(x_i) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos(kx_i + \varphi_k). \quad (4)$$

比较式(3)、(4)和式(1)、(2)可知，简化方程同样可以表示谐波规律，虽然简化方程系数较难确定，但简化方程应用少一次 sin 计算，求解简单，效率更高；标准方程适用于理论分析，简化方程有利于工程应用。

3.3 多项式算法的误差方程

用多项式可以拟合误差分布。多项式表达式为：

$$f(x) = a_0 + a_1 x^1 + \dots + a_{n-1} x^{n-1} + a_n x^n. \quad (5)$$

工程实践中，很多误差处理都采用了多项式方法，该方法在数值计算领域中很有实用价值。

误差模型越复杂，处理运算效率越差。考虑到实际应用系统程序的计算能力限制，本文只采用上述 3 种算法进行了试验。

4 误差修正

试验在望远镜垂直轴转台上进行，如图 8 所示。

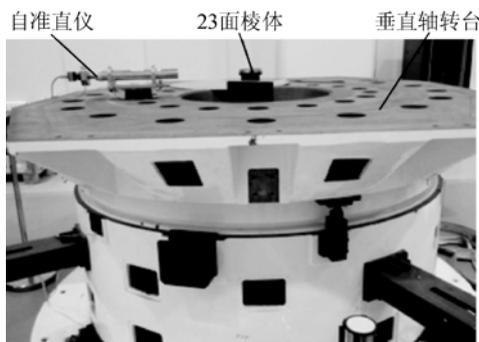


图 8 测角误差检测试验

Fig. 8 Testing experiment of angle error

测得 4 组误差数据如图 9 所示，结果表明，数据重复且有规律可循。误差数据的峰峰值为 $3.81''$ ，均方根误差为 $1.14''$ 。

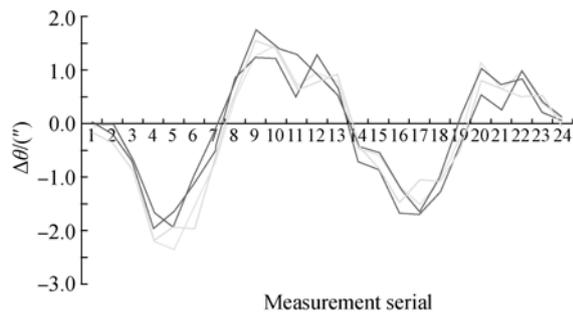


图 9 测角误差数据图

Fig. 9 Data of angle error

用 MATLAB 进行数据分析，两种谐波方程的谐波级数均设为 4，标准方程与简化方程的效果相同。仿真处理后的残差均为 $\sigma_x = 0.19''$ 。采用多项式算法，方程阶数设为 7，仿真处理后的残差 $\sigma_d = 0.21''$ 。可见多项式的残差稍大一点，而且 7 阶多项式计算比 4 次简化谐波方程的计算效率低得多。因此本文采用简化的谐波算法，忽略小误差项，确定修正方程为：

$$\Delta = -0.3 \times \cos(A - 1.57) + 1.3 \times \cos(2 \times A - 2.07) - 0.3 \times \cos(4 \times A + 1.57), \quad (6)$$

其中 A 为系统测角传感器的原始数据。

误差修正后，再次测量获得的测角数据如图 10 所示。误差峰峰值为 $1.06''$ ，均方根误差为 $0.259''$ 。修正后均方根误差提高了 4.4 倍。

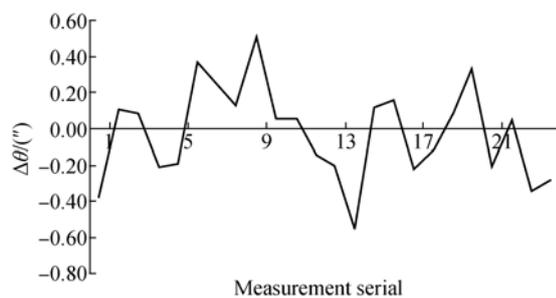


图 10 修正后测角误差数据图

Fig. 10 Data of angle error after correction

5 结 论

本文对误差源理论和实测数据进行了分析，指出轴系测角分系统的误差规律符合谐波方程，并采用谐波方程式来表达误差规律。采用提出的

方法进行误差修正,理论上能同时校正测角传感器的信号误差、安装误差和被测轴系误差。望远镜垂直轴转台试验结果表明,测角精度峰值由原来的3.81"提高到1.06"。

参考文献:

- [1] 王建立,陈涛,张景旭.地基高分辨率光电成像望远镜总体需求及关键技术分析[J].光学精密工程,2008,16(5):1-16.
WANG J L, CHEN T, ZHANG J X. General requirements and key technologies for the ground-based high resolution EO imaging telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(5):1-16. (in Chinese)
- [2] 艾晨光,褚明,孙汉旭,等.基准圆光栅偏心检测及测角误差补偿[J].光学精密工程,2012,20(11):2479-2484.
AI CH G, CHU M, SUN H X, *et al.*. Eccentric testing of benchmark circular grating and compensation of angular error [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012,20(11):2479-2484. (in Chinese)
- [3] 张红胜,杨进堂.光学码盘的检验[J].计量技术,1999(10):25-27.
ZHANG H SH, YANG J T. Testing of optical encoder[J]. *Metrology Technology*, 1999(10):25-27. (in Chinese)
- [4] 王显军.光电轴角编码器细分信号误差及精度分析[J].光学精密工程,2012,20(2):379-386.
WANG X J. Errors and precision analysis of subdivision signals for photoelectric angle encoders[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012,20(2):379-386. (in Chinese)
- [5] 吕孟军,郭琪,吕印晓.莫尔条纹信号相位误差补偿[J].光学精密工程,2009,17(7):1694-1700.
LÜ M J, GUO Q, LÜ Y X. Signal phase error compensation of Moire fringe[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(7):1694-1700. (in Chinese)
- [6] 祝成军,龙科慧.光电编码器信号幅值自动补偿方法的研究[J].测控技术,2009,28(9):6-12.
ZHU CH J, LONG K H. Research on the method of signal amplitude automatic compensation for photoelectric encoder [J]. *Measurement & Control Technology*, 2009,28(9):6-12. (in Chinese)
- [7] 王显军,杨晓霞.光电编码器的应用-分辨率和精度[J].光机电信息,2011,28(9):6-11.
WANG X J, YANG X X. The application of optical encoder-differentiate and precision[J]. *OME Information*, 2011,28(9):6-11. (in Chinese)
- [8] 高福晖.大型经纬仪轴系晃动的傅里叶谐波分析方法[J].光电工程,1998,25(5):1-10,15.
GAO F H. Fourier harmonic analysis method for axial system wobbling of the large scale theodolite [J]. *Opt. Electronic Engineering*, 1998, 25(5): 1-10,15. (in Chinese)
- [9] 冯栋彦,高云国,张文豹.采用标准轴承的光电经纬仪轴系误差修正[J].光学精密工程,2011,19(3):605-611.
FENG D Y, GAO Y G, ZHANG W B. Elimination of shafting error in photoelectrical theodolites with standard bearings[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(3):605-611. (in Chinese)
- [10] 潘年,马文礼.拼接式钢带光栅编码器测角误差分析与修正[J].中国光学,2013,6(5):788-794.
PAN N, MA W L. Error analysis and correction of scale tape grating encoder [J]. *Chinese Optics*, 2013,6(5):788-794. (in Chinese)

作者简介:



王显军(1965—),男,吉林长春人,研究员,主要从事光电传感器、电子技术应用等研究工作。E-mail: wangxian jun@ciomp. ac. cn