

光电经纬仪轴系误差仿真计算的新方法

李 慧^{1,2}, 沈湘衡¹

(1.中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2.中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要: 轴系是决定光电经纬仪测量精度的关键组件, 过去常将球面三角学方法做某些简化后来推导轴系误差引起的光电经纬仪测量误差, 存在适用局限性。根据光电经纬仪的测量坐标系, 采用坐标变换方法, 将轴系误差出现的过程看作坐标系的旋转过程, 并用旋转矩阵来表示各个轴系误差, 最终建立了轴系误差引起测量误差的数学模型。采用 MATLAB 与 VB 混合编程的方法对该误差模型进行了仿真分析, 通过比较仿真结果与单项误差法计算的结果, 验证了该轴系误差模型的正确性, 为光电经纬仪的精度分析和误差修正提供了参考。

关键词: 轴系误差; 误差模型; 混合编程; 光电经纬仪

中图分类号: TH745.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2008)02-0334-04

New shafting error simulating method of photoelectric theodolite

LI Hui^{1,2}, SHEN Xiang-heng¹

(1.Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2.Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Shafting is the key module of photoelectric theodolite to decide the measurement precision. As measurement error brought by shafting error was deduced by the spherical trigonometry method with some simplification, the method had its limitation. According to the measuring coordinate of the photoelectric theodolite, the appearance process of shafting error was regarded as rotating course of the measuring coordinates, the shafting error was expressed by the rotating matrixes. A mathematic model for the influence of shafting error on the measurement error was built by a coordinate transformation method. Then a mixed-programmed method based on MATLAB and VB was introduced to simulate the shafting error model, and the error model was proved by comparing the simulating and calculating result with the spherical trigonometry method, which provides reference for precision analysis and error correction.

Key words: Shafting error; Error model; Mixed-programmed; Photoelectric theodolite

0 引 言

地平式结构的光电经纬仪有 3 条轴线: 垂直轴、水平轴和照准轴, 前两条轴线是仪器机械转动的轴线, 照准轴是主光轴。由于制造工艺、装配和调整使用

等因素的影响, 光电经纬仪的三轴不能完全满足两两垂直的理想条件, 这样因轴线不准确带来的测量误差称为轴系误差, 包括垂直轴倾斜误差、水平轴倾斜误差和照准轴倾斜差^[1]。以往轴系误差引起测量误差公式是采用球面三角学原理做某些简化后, 在考虑一种

收稿日期: 2007-06-10; 修订日期: 2007-08-15

作者简介: 李慧(1980-), 男, 山东聊城人, 博士生, 主要从事光电测量设备精密检测技术, 光电系统误差建模及精度分析的研究。

Email: limingj12@163.com

导师简介: 沈湘衡(1952-), 男, 吉林长春人, 研究员, 主要从事光电测量设备精密检测技术和方法的研究。

Email: shenxiangheng@yahoo.com.cn

误差时将其他两项设为零且假设轴系误差都非常小的情况下推导的,但光电经纬仪轴系误差是多项并存且存在耦合影响,在误差较大或经纬仪在大俯仰角状态时(如接近 90°),该方法不再适用^[2-3],而且误差合成公式是通过定性分析近似得到的^[4-5]。为了更加方便和准确地研究各个误差源对测量精度的影响,文中通过一种坐标变换方法,建立了光电经纬仪轴系误差对测量误差影响的数学模型,该模型的优点是不受测量角范围与轴系误差大小限制,并采用一种 MATLAB 和 VB 混合编程方法预先编制了光电经纬仪轴系误差仿真软件,对各个轴系误差的影响程度进行了仿真分析,为光电经纬仪轴系的精度分析和误差修正提供了参考依据。

1 数学模型的构建及推导原理^[6-8]

单项差法计算轴系误差的修正公式:

$$\Delta A = \Delta A_v + \Delta A_c + \Delta A_i = v \sin(A_v - A) \times \tan E + c \sec E + i \tan E \quad (1)$$

$$\Delta E = \Delta E_v + \Delta E_c + \Delta E_i = v \cos(A - A_v) \quad (2)$$

式中: ΔA_v 、 ΔE_v 、 ΔA_i 、 ΔE_i 、 ΔA_c 、 ΔE_c 分别为由垂直轴倾斜误差 v 、水平轴倾斜误差 i 和照准轴倾斜差 c 单独作用时所引起的方位角和高低角测量误差^[9]。该修正公式是用球面三角学方法近似推导出的,推导过程复杂不直观且存在适用局限性。文中采用坐标变换方法不做任何简化推导了轴系误差的修正模型。

根据光电经纬仪目标定位测量原理,首先建立其测量坐标系(见图 1),设地平坐标系为 O-XYZ,原点为

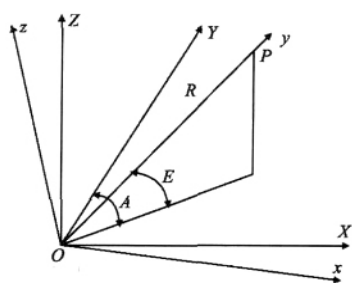


图 1 光电经纬仪测量坐标系示意图

Fig.1 Measuring principle of photoelectric theodolite coordinates

光电经纬仪三轴的交点,Z轴与测站水平面垂直,X轴和Y轴位于水平面内,Y轴指向大地北,X轴与Y轴和Z轴分别正交,组成右手坐标系,实际上该坐标系的各轴指向分别为光电经纬仪在理论零位时的水平轴、照准轴和垂直轴的指向,照准坐标系为 O-xyz, y 轴为光电经纬仪照准目标后视轴的指向,z轴与 y 轴正交并指向天顶(传感器光轴水平放置时),x轴与 y 轴和 z 轴分别

正交,组成右手坐标系,并设已修正目标脱靶量。

先考虑理想情况,在轴系误差为零时,经纬仪从零位指向目标需在方位上转动 A 角度,俯仰上转动 E 角度,可以看成是坐标系 O-XYZ 先后绕 Z 轴(垂直轴)和 X 轴(水平轴)分别旋转 A 角度和 E 角度至坐标系 O-xyz 的结果,则下式成立:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = M_x(E) M_z(A) \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中:

$$M_z(A) = \begin{bmatrix} \cos A & -\sin A & 0 \\ \sin A & \cos A & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$M_x(E) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos E & \sin E \\ 0 & -\sin E & \cos E \end{bmatrix} \quad (5)$$

可得:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = [M_z(A)]^{-1} [M_x(E)]^{-1} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (6)$$

但由于光电经纬仪跟踪目标过程中轴系误差的影响,空间目标在 O-XYZ 中的坐标与 O-xyz 中的坐标关系可由下式表示:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: M 为 O-XYZ 旋转至 O-xyz 的坐标转换矩阵,经纬仪从零位转动到照准目标除了发生 A、E 角的转动之外(A 和 E 分别为存在轴系误差时目标的方位角和高低角),同时也发生了 i 、 v 、 c 角度的转动,每一次角度转动便构成了一个转动前后坐标系间的旋转矩阵。总旋转矩阵 M 的生成过程如下^[10-11]:

(1) 在地平式结构的光电经纬仪上,测量基准是建立在基座上的。这样将首先发生垂直轴的倾斜,即垂直轴与水平面不铅垂,倾斜一角度 v ,此误差可看成原坐标系 O-XYZ 绕过原点的任一空间直线旋转了 v 角,倾斜方向为 A_v 旋转至坐标系 O- $X_v Y_v Z_v$ 。旋转矩阵表示为:

$$M_L(v) = \begin{bmatrix} \sin^2 A_v (1 - \cos v) + \cos v & \cos A_v \sin A_v (1 - \cos v) & \cos A_v \sin v \\ \cos A_v \sin A_v (1 - \cos v) & \cos^2 A_v (1 - \cos v) + \cos v & -\sin A_v \sin v \\ -\cos A_v \sin v & \sin A_v \sin v & \cos v \end{bmatrix} \quad (8)$$

(2) 光电经纬仪的方位编码器装在垂直轴上, 故方位角 A 为第二发生转动的角度。相应的 $O-X_1Y_1Z_1$ 坐标系中的 Z_1 轴为第二旋转轴, 原坐标系则变换至 $O-X_2Y_2Z_2$, 旋转矩阵表示为:

$$M_z(A) = \begin{bmatrix} \cos A & \sin A & 0 \\ -\sin A & \cos A & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

(3) 光电经纬仪的水平轴建立在垂直轴之上, 故第三发生的转动角为水平轴倾斜误差 i , 可看成是坐标系 $O-X_2Y_2Z_2$ 绕 Y_2 轴旋转 i 角后变换至坐标系 $O-X_3Y_3Z_3$, 相应的坐标变换矩阵为:

$$M_y(i) = \begin{bmatrix} \cos i & 0 & -\sin i \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin i & 0 & \cos i \end{bmatrix} \quad (10)$$

(4) 然后坐标系 $O-X_3Y_3Z_3$ 绕 X_3 轴旋转高低角 E 变换至坐标系 $O-X_4Y_4Z_4$, 相应的变换矩阵可表示为:

$$M_x(E) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos E & -\sin E \\ 0 & \sin E & \cos E \end{bmatrix} \quad (11)$$

(5) 最后坐标系 $O-X_4Y_4Z_4$ 绕 Z_4 轴转动照准轴倾斜差 c 后变换至坐标系 $O-xyz$ 指向被测目标, 相应的变换矩阵表示为:

$$M_z(c) = \begin{bmatrix} \cos c & -\sin c & 0 \\ \sin c & \cos c & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

根据旋转顺序连续右乘表示每次坐标系旋转前后的变换矩阵, 即可得到总变换矩阵 M :

$$M = M_L(v)M_z(A)M_y(i)M_x(E)M_z(c) \quad (13)$$

比较公式 (6)、(7) 与公式 (13), 便可得到测量误差 $\Delta A(A - A)$ 、 $\Delta E(E - E)$ 与 i 、 v 、 c 之间的数学关系式, 即轴系误差影响光电经纬仪测量误差的数学模型。

2 MATLAB 与 VB 混合编程

为更加方便准确地研究各个轴系误差对光电经纬仪测量精度的影响, 有必要编制轴系误差仿真软件对各种因素进行仿真分析, 这样不仅易于预先得到所需结果, 而且可以帮助验证定性分析结果的正确性。鉴于上节数学模型推导中涉及的大量矩阵运算, 文中提出用 VB 设计人机交互界面, 用 MATLAB 实现轴系误差仿真运算、数据处理及图形输出的混合编程方法。MATLAB 与 VB 混合编程主要有以下 4 种方法^[12]:

(1) 利用 MATLAB 所支持的 ActiveX 自动化协议实现调用, 直接有效; (2) VB 通过 DDE 动态数据交换协议和 MATLAB 实现交互; (3) 直接在 VB 中添加 Matrix VB 函数库, 但需要独立安装 Matrix VB 软件; (4) 使用 MATLAB COM 组件技术, 执行速度快, 但需要设置 MATLAB 编译环境, 调用预先编译好的 dll 文件等, 过程较为复杂。各种方法都有其优缺点, 鉴于混合编程的目的在于最大限度地利用各种编程语言的优势, 降低编程难度, 故下面将采用 VB 调用 MATLAB 的 ActiveX 自动化对象的方法进行光电经纬仪轴系误差的仿真计算。

3 轴系误差的仿真实现

混合编程思路如图 2 所示, 由于 VB 支持 ActiveX 自动化控制端协议, MATLAB 支持 ActiveX 自动化服务器端协议, 两者之间已经建立了 ActiveX 自动化链接, 用 VB 编程语言进行用户界面接口、数据

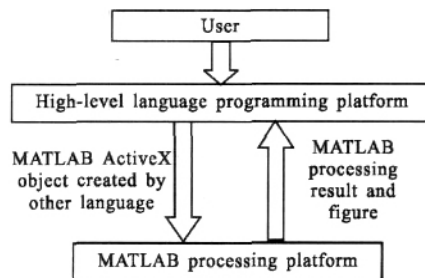


图 2 混合编程思路

Fig.2 Mixed programmed idea

获得、硬件接口的编程, 在数据处理、复杂图形绘制时通过 ActiveX 接口调用 MATLAB, 并将处理结果回传 VB 程序中, 即前台是 VB 编程设计界面, 后台是 MATLAB 运算。首先必须在 VB 中创建 MATLAB 的 ActiveX 对象, 具体程序为:

```
Dim matlab As Object
```

```
Set matlab = CreateObject("matlab.application")
```

matlab.application 对象包含有 Execute、GetFullMatrix、PutFullMatrix 等几种方法, 利用这些方法在 VB 程序中可对 MATLAB 进行操作, 执行 MATLAB 命令, 与 MATLAB 之间传递、接受数据等。

设置好初始参数后, 利用上面导出的轴系误差数学模型, 调用 MATLAB 进行仿真计算和图形的绘制, 图 3 和图 4 分别是当水平轴倾斜误差、垂直轴倾斜误差、照准轴误差均为 3, 垂直轴倾斜方向角为 180°; 目标俯仰角为 30° 时, 在 MATLAB 中模拟的光电经纬仪

的方位角、俯仰角测量误差随着方位角变化的曲线,与单项差法定性分析计算的结果一致,从而验证了该轴系误差模型的正确性。同时,该程序综合考虑了各种误差影响,在轴系误差和俯仰角较大情况下均可适用。

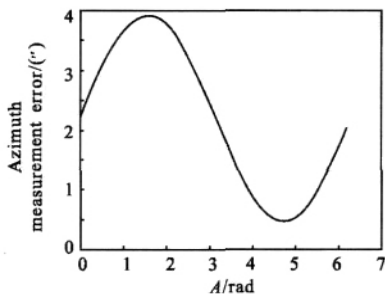


图3 方位角测量误差随目标方位角的变化曲线
Fig.3 Azimuth measurement error variance curve vs azimuthal variance of object

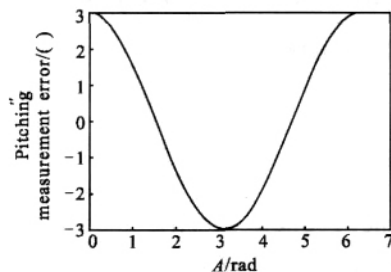


图4 俯仰角测量误差随目标方位角的变化曲线
Fig.4 Pitching measurement error variance curve vs azimuthal variance of object

4 结 论

文中通过一种坐标变换方法,建立了光电经纬仪轴系误差对其测量精度影响的数学模型,并采用ActiveX 自动化协议技术实现了MATLAB 和VB 的混合编程方法,编制了光电经纬仪轴系误差仿真程序,分析了各个轴系误差对测量误差的影响,为光电经纬仪的轴系误差分析提供了一种新方法。另外,文中提出的混合编程的设计思想突破了以往利用单一语言实现需求的方法,更广泛地利用了现有技术成果,也为其他领域应用程序设计提供了参考。

参考文献:

- [1] HE Zhao-cai, HU Bao-an. Photoelectric Measurement [M]. Beijing: National Defense Industry Press (何照才,胡保安.光电测量.北京:国防工业出版社),2002.
- [2] ZENG Zhi-xiong, HU Xiao-dong, GAO Li-min. Effect of digital zenith camera axis error on measurement precision of vertical deflection and its correction [J]. Optics and Precision Engineering (曾志雄,胡晓东,高立民.天顶摄影仪轴系误差对垂线偏差测量精度的影响及其修正方法.光学精密工程), 2004,12(1):6- 10.
- [3] GONG Yan. Calibrating the pointing precision of satellite laser ranging theodolite by observing stars [J]. Optics and Precision Engineering (巩岩.利用恒星标校卫星激光测距经纬仪的指向精度.光学精密工程), 2000,8(3):258- 260.
- [4] DU Jun-feng, LI Zheng-zhou. Analysis of the axial accuracy of the GD-220 photoelectric theodolite [J]. Optics and Precision Engineering (杜俊峰,李正周. GD-220 光电经纬仪轴系的精度分析.光学精密工程), 2002,10(4):416- 419.
- [5] LI Song, ZHANG Li-ping. Design and accuracy analysis for drift adjusting rotary axes of space camera [J]. Optics and Precision Engineering (李松,张立平. 空间相机偏流调整旋转轴的设计与精度分析.光学精密工程), 2004,12(2):141- 145.
- [6] ZHANG Ying-hua, WAN Zhong-nan. Error analysis of servo system for IR staring image seeker [J]. Infrared and Laser Engineering (张盈华,万中南.红外凝视成像导引头随动误差分析.红外与激光工程), 2006,35(1):25- 30.
- [7] JIN Guang, WANG Jia-qi, NI Wei. The three-error axis of the oddlite with the utilization of the coordinate to the variation [J]. Optics and Precision Engineering (金光,王家骥,倪伟.利用坐标变换推导经纬仪三轴误差.光学精密工程), 1999,7(5): 89- 94.
- [8] PIO R L. Euler angle transformation [J]. IEEE Transactions on Automatic, 1966, AC- 11(4):707- 715.
- [9] ZHAO Jin-yu, WANG De-xing, LI Wen-jun, et al. New method of dynamic correction for the system errors of telescope [J]. Infrared and Laser Engineering (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.红外与激光工程), 2005,34(2):244- 246.
- [10] WANG Zhi-jian, ZHENG Jian-ping. The special for dynamic optical system [J]. Journal of Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics (王志坚,郑建平.动态光学系统专辑.长春理工大学学报), 1992,15(2):1- 28.
- [11] WU Feng-hua. Mathematical model influenced by shafting error and its correction method [D]. Chongqing: Automation College of Chongqing University (武风华.轴系偏差对测量角影响的数学模型及改正方法.重庆:重庆大学自动化学院), 2002.
- [12] SU Jin-ming, HUANG Guo-ming, LIU Bo. Matlab and the External Programming Interface [M]. Beijing: Publishing Houses of Electronics Industry (苏金明,黄国明,刘波. Matlab 与外部程序接口.北京:电子工业出版社), 2004.