

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2019.03.15

光电跟踪误差校准技术的研究

唐英娜, 崔岩梅

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘 要: 研制光电跟踪仪校准系统, 利用激光跟踪仪跟踪光电跟踪仪并采集测量数据, 剔除其中存在的粗大误差得到有效数据, 采用球面拟合最小二乘法确定光电跟踪的中心。建立合理的坐标转换模型, 实现激光跟踪仪的中心向光电跟踪仪的中心坐标转换, 并将二者的测量数据进行对比得到校准结果。利用 VB 和 MATLAB 软件结合的方法对数据进行分析与处理, 提升运算效率。举例给出光电跟踪仪校准系统的测试结果, 并对其不确定度进行分析, 证明了此校准系统的可靠性, 为跟踪及瞄准系统的参数校准提供了参考。

关键词: 光电跟踪仪; 跟踪误差; 球面拟合; 坐标转换

中图分类号: TB96; TB97

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2019)03-0078-05

Research on the Calibration Technology of Photoelectric Tracking Error

TANG Yingna, CUI Yanmei

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: A calibration system of the photoelectric tracker is developed. The laser tracker is used to track the photoelectric tracker and collect measurement data. The gross errors in the system are eliminated and the center of the photoelectric tracker is determined by spherical fitting least square method. A reasonable coordinate conversion model is established to realize the coordinate transformation from the center of laser tracker to that of photoelectric tracker, and the calibration results are obtained by comparing the measured data of the two systems. The method of combining VB and MATLAB software is used to analyze and process the data, so as to improve the operation efficiency. The test results of the photoelectric tracker calibration system are given with examples, and the uncertainty of the system is analyzed. The reliability of the calibration system is proved, which provides a reference for the parameter calibration of the tracking and aiming system.

Key words: photoelectric tracker; tracking error; spherical surface fitting; coordinate transformation

0 引言

从 20 世纪 60 年代至今, 光电跟踪技术得到了极大的发展。光电跟踪仪广泛应用于导弹和航天器试验中, 美、英、法等国家研制出的舰载防空反导火控系统、陆用近程防空反导火控系统, 以及我国从 20 世纪 70 年代开始生产的“小牛”导弹、GBU-15 型电视炸弹等均采用了电视跟踪技术。现如今光电跟踪技术不仅在军事方面得到了进一步发展, 在工业生产及科学研究中也获得了广泛应用^[1]。

光电跟踪仪的误差校准至关重要, 一般将准确度更高一级的光电跟踪仪综合测试系统的测量值和被测光电跟踪仪的测量值进行对比, 求解出光电跟踪仪的测量误差, 形成校准结果。校准测试既可以在外场利用真实系统进行, 例如对气球、航模靶机、飞机和实弹射击等进行跟踪试验, 也可以在内场利用模拟目标进行, 比如利用平行光管模拟无穷远目标进行跟踪试

验^[2]。但是目前国内没有明确的光电跟踪仪校准规范, 实际校准工作存在不完善性。为解决此问题, 本文研制了光电跟踪仪校准系统, 对其原理、操作方法、应用特点进行详细说明, 并对其测量不确定度进行分析, 证明此校准系统的可靠性, 为规范光电跟踪仪的校准工作提供重要技术基础。

1 光电跟踪仪动态校准技术

可采用高性能的动态靶标实现光电跟踪仪的跟踪角度校准和跟踪角速度校准。由于激光跟踪仪的测角准确度高于光电跟踪仪的测角准确度, 将激光跟踪仪对动态标靶的测量值进行坐标变换后可以作为光电跟踪仪的校准值, 将该校准值和光电跟踪仪对动态标靶的测量值进行比较, 得到光电跟踪仪的跟踪误差^[3]。

光电跟踪仪校准装置由动态靶标、光电跟踪仪、激光跟踪仪和计算机系统组成。其中, 动态靶标可以

是把猫眼和靶标安装于直线导轨上的直线运动靶标,也可以是将猫眼反射镜固定于标准转台上的角度转动靶标。以直线运动靶标为例,光电跟踪仪校准装置的示意图如图1所示。其主要技术指标为:①校准范围:方位角 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$,俯仰角 $-60^{\circ}\sim 60^{\circ}$;②跟踪角度校准不确定度 $U=20''(k=2)$ 。

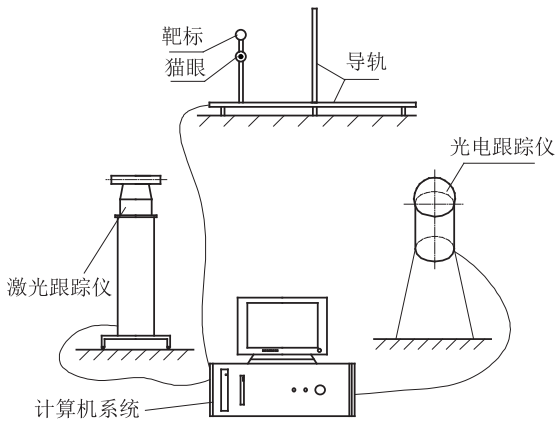


图1 光电跟踪仪校准装置的示意图

2 光电跟踪校准方法

2.1 校准光电跟踪仪的方法

光电跟踪仪的校准流程图如图2所示。利用激光跟踪仪跟踪光电跟踪仪,对测量数据进行分析处理,实现激光跟踪仪中心向光电跟踪仪中心的转换,并将激光跟踪仪的坐标系转化到光电跟踪仪的坐标系中,再将两个系统的测量数据进行分析比较,即可计算出光电跟踪误差。

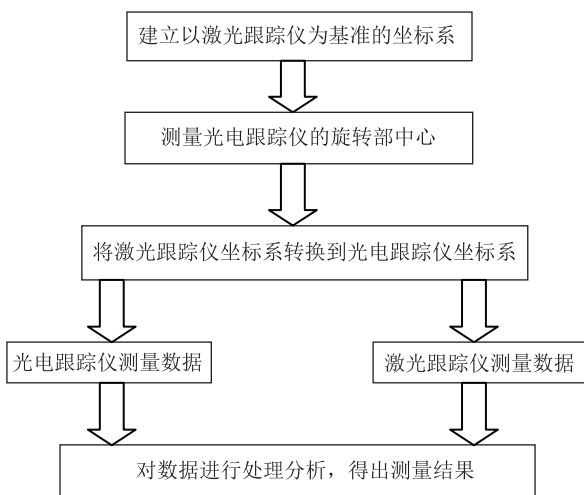


图2 光电跟踪仪校准流程图

测量时,将反射球镜固定在光电跟踪仪上,使两者成为一体。由跟踪仪的跟踪头发出激光束,通过反射球镜捕获此激光束,跟踪头会始终随着反射球镜的移动而转动,即一直追踪光电跟踪仪的运动轨迹。将激光跟踪仪测得的长度值与跟踪机构给出的角度变化值相结合,可得出光电跟踪仪的三维坐标。激光跟踪仪符合空间极坐标测量原理,如图3所示,激光跟踪头到球形反射镜的距离为 r ,且二者之间存在两个空间角度,即水平角 α 和垂直角 β ,根据其关系可将极坐标系转化为直角坐标系。激光跟踪仪的跟踪头为坐标原点,光电跟踪仪上的球形目标反射镜的位置为被测点 p ,根据式(1)可以计算出 p 点的直角坐标 (x, y, z) ^[3]。

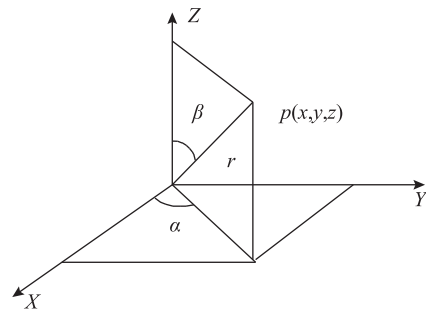


图3 极坐标转换为直角坐标的示意图

$$\begin{cases} x = r \sin \beta \cos \alpha \\ y = r \sin \beta \sin \alpha \\ z = r \cos \beta \end{cases} \quad (1)$$

2.2 校准光电跟踪仪时剔除粗差

将激光跟踪仪的球形目标反射镜固定于光电跟踪仪的两维旋转机构上,启动运行旋转功能后,利用激光跟踪仪记录球形目标反射镜的位置坐标。所测得的个别坐标值可能含有粗大误差,因当测量次数大于50次时,选用 3σ 准则剔除粗差^[5],激光跟踪仪实际测量数据为 $(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2), (x_3, y_3, z_3) \dots, (x_{n-1}, y_{n-1}, z_{n-1}), (x_n, y_n, z_n)$,则有

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i; \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i; \bar{z} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i \quad (2)$$

$$r_i = \sqrt{(x_i - \bar{x})^2 + (y_i - \bar{y})^2 + (z_i - \bar{z})^2} \quad (3)$$

$$\bar{r} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i \quad (4)$$

$$s_k = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (r_i - \bar{r})^2}{n-1}} \quad (5)$$

如果某数据 r_d 满足式(6),则 r_d 为粗大误差。

$$|r_d - \bar{r}| \geq 3s_k \quad (6)$$

剔除粗差的过程为：把所有测量数据代入式(2)~式(5)，计算找到粗大误差，剔除后再采用上述方法对剩余的数据进行循环计算，直到所有数据都不满足(6)式时，剩余的数据为最终有效数据，可以进行球面拟合确定球心。

2.3 光电跟踪测量采用球面拟合方法确定中心

利用球面拟合确定球心，将激光跟踪仪的猫眼固定于光电跟踪仪的旋转机构上，光电跟踪仪进行两维旋转的同时，激光跟踪仪记录猫眼的位置坐标。假设以带有反射球镜的光电跟踪仪为中心的坐标点近似球面，任取某两校准点的示意图如图4所示。

因反射球的点云数据曲面不完整性及环境因素等引入了误差，故实际所得数据拟合曲面只能为类似球面的二次曲面。基于曲面拟合的特点和方法计算确定光电跟踪仪的中心坐标，将激光跟踪仪测量数据的极坐标系转换为直角坐标系后，可以采用最小二乘法拟合出一个 $1/10 \sim 1/5$ 的球面。采用最小二乘法的算法的原因是该方法具有较好稳定性和广泛应用性，可以拟合出比较理想的参数。实际拟合数据和真正的理想参数之间存在残差。将上述残差的平方和与理想参数的平方之间的差值作为目标函数，使目标函数值最小即可求出拟合值。

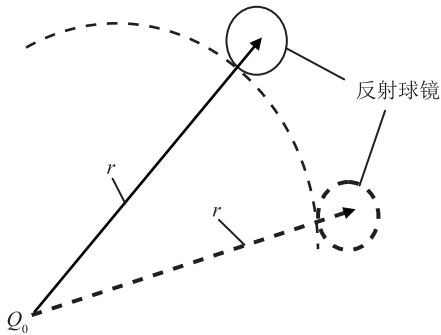


图4 以光电跟踪仪为球心的运动轨迹的平面示意图

以光电跟踪仪为中心的坐标点集，组合成为大约 $1/10 \sim 1/5$ 球面，其球心为 $Q_0(x_0, y_0, z_0)$ ，半径为 r ，则该球面可以写为标准形式

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 = r^2 \quad (7)$$

将激光跟踪仪获得的反射镜球面若干点的坐标转化直角坐标点集为 $A_i(x_i, y_i, z_i) (i=1, 2, \dots, n-1, n)$ ，剔除粗差后，获得有效的点集数据 $B_i(x_i, y_i, z_i) (i=1, 2, 3, \dots, m-1, m; m \leq n)$ 。利用式(7)进行球面拟合计算，根据残差的标准公式 $l_i = (x_i -$

$x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2$ ，可得到其残差的目标函数 l 为

$$l = \sum_{i=1}^m [(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2 - r^2]^2 \quad (8)$$

采用被测有效数据点到拟合球面球心 $Q_0(x_0, y_0, z_0)$ 的几何距离与拟合球面半径 r 的残差进行拟合，得到目标函数 V 为

$$V = \sum_{i=1}^m [\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} - r]^2 \quad (9)$$

以式(9)作为目标函数进行拟合，逼近程度比用式(8)作为目标函数更好，但是计算复杂，耗时久；目标函数式(8)比式(9)计算更为简单，对应的参数复杂程度较小，近似于线性计算形式。综合两者的优劣，改进提出新的目标函数 L 为

$$L = \sum_{i=1}^m \left[\frac{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2 - r^2}{2r} \right]^2 \quad (10)$$

进一步简化式(10)，将分数形式的式(10)改为非分数形式

$$L = [A(x_i^2 + y_i^2 + z_i^2) + Bx_i + Cy_i + Dz_i + E]^2 \quad (11)$$

式中： $A = 1/2r$ ； $B = -x_0/r$ ； $C = -y_0/r$ ； $D = -z_0/r$ ； $E = (x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 - r^2)/2r$ 。

$$B^2 + C^2 + D^2 - 4AE = 1 \quad (12)$$

根据式(12)的约束条件来确定式(11)中的待定参数，带约束条件下，求极小值的目标函数 L 转化为新的函数

$$L = [A(x_i^2 + y_i^2 + z_i^2) + Bx_i + Cy_i + Dz_i + E]^2 + \lambda (B^2 + C^2 + D^2 - 4AE - 1) \quad (13)$$

根据极值求解定理可知，当式(13)中 L 最小时，可以求出 A, B, C, D, E 的值，从而确定球心坐标 $Q_0(x_0, y_0, z_0)$ 和球的半径 r 。

2.4 激光跟踪仪的坐标转换

将激光跟踪仪的测量坐标系转换到光电跟踪仪的测量坐标系中，光电跟踪仪的测量坐标系为 $O-XYZ$ ，激光跟踪仪的测量坐标系为 $O'-X'Y'Z'$ 。选择布尔莎—沃尔夫转换模型作为光电跟踪仪跟踪误差校准的坐标转换模型，其包括三个平移参数、三个旋转参数和一个尺度参数。因为光电跟踪仪和激光跟踪仪都垂直放置于地平面，故两者的坐标系与其所在大地坐标系基本无旋转角度。考虑到两者本身坐标轴的偏差、其放置位置和大地平面曲率的影响，由此得出两坐标系的水平面($O-XY$ 和 $O'-X'Y'$)之间有微小的角度，这样两坐标转换时旋转角度较小，符合线性模型转换。已知布尔莎—沃尔夫转换模型的七个参数，在两个坐

标系中进行参数转换,可采用最小二乘法。在三维坐标转换参数的求解过程中,激光跟踪仪已用球面拟合的方法确定了光电跟踪仪的中心,即两套坐标系下的坐标原点已经确立,故可实现激光跟踪仪的坐标系转换到光电跟踪仪的测量坐标系。激光跟踪仪坐标模型转换示意图如图 5 所示。

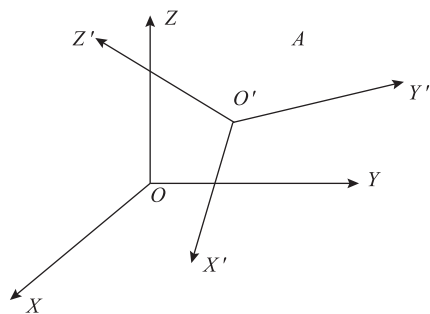


图 5 激光跟踪仪坐标模型转换示意图

3 数据的处理和分析

3.1 利用 VB 和 MATLAB 混和编程实现数据处理

球面拟合中,可以利用 VB 和 MATLAB 的混和编程确定光电跟踪仪的中心并计算坐标转换系数,此方法适用于 Windows98/2000/XP 平台。VB 是基于可视对象和界面的程序设计,但是其对大量数据计算能力不强,因此调用 MATLAB 的强大数据计算功能来解决这一缺陷。二者结合使数字信号处理更加便捷,可实现数据的传输、计算、分析、交互和显示等一系列功能^[6]。

激光跟踪仪确定光电跟踪仪的旋转球心时,其记录的所有位置坐标数据均可导入 Excel 表格中,如表 1 所示,文件格式为 data.xls。应用 VB 程序访问 Excel 调用激光跟踪仪的坐标数据时,使用 Excel 的对象库,引入对象库只需选择“工程”菜单中的“引用”命令,在窗口中选择 Microsoft Excel 11.0 Object Library 即可^[6]。

VB 程序成功调用 Excel 中坐标数据后,可以把 X, Y, Z 坐标数据定义为相应数组数据 $A_i(x_i, y_i, z_i) (i = 1, 2, 3, \cdots, n - 1, n)$,依据激光跟踪仪校准数据的剔除粗差原理,编写 VB 程序获得有效的数据 $B_i(x_i, y_i, z_i) (i = 1, 2, 3, \cdots, m - 1, m; m \leq n)$ 。

用 VB 和 MATLAB 混和编程,两种程序存在接口问题,故利用 ActiveX 自动化技术实现 VB 和 MATLAB 的结合。ActiveX 自动化协议实现了 VB 和 MATLAB 之间的自动连接,VB 向 MATLAB 传送命令,将激光跟踪仪的有效数据传送给 MATLAB,利用 MATLAB 高效的

计算能力实现球面拟合确定球心过程的计算,并求解得出球心坐标 $Q_0(x_0, y_0, z_0)$ 和球的半径 r ,最后把计算结果传输回 VB,实现 VB 可视界面的交互功能^[7]。

表 1 光电跟踪仪旋转坐标值

测量次数	坐标值/mm		
	X	Y	Z
1	5831.2575	-726.6366	273.4828
2	5832.6164	-732.8523	273.4783
3	5835.1010	-738.7410	273.4864
4	5838.5490	-744.0742	273.5084
.....			
100	5838.9663	-744.5956	273.5217
101	5838.8883	-744.4954	273.5167
102	5838.8194	-744.4017	273.5229
103	5838.7430	-744.3094	273.5198
.....			
200	5833.1207	-734.3582	273.4826
201	5833.0874	-734.2618	273.4864
202	5833.0533	-734.1441	273.4866
203	5833.0253	-734.0374	273.4890
.....			
600	5849.1675	-691.3645	273.6665
601	5849.2597	-691.3185	273.6715
602	5849.3755	-691.2624	273.6717
603	5849.4938	-691.1992	273.6725
.....			
800	5864.5545	-681.1926	267.7548
801	5864.5559	-681.1191	267.6642
802	5864.5518	-681.0522	267.5729
803	5864.5520	-680.9847	267.4957
.....			
997	5854.8209	-678.9971	262.4911
998	5854.6354	-679.0482	262.4817
999	5854.4323	-679.0880	262.4812
1000	5854.2492	-679.1021	262.4727

3.2 光电跟踪误差校准结果的数据分析

将激光跟踪仪的测量数据转化到光电跟踪仪坐标

系中,进行水平角和竖直角的角度比较。依据相应标准,取一次测量或几次测量中的差值作为采样点差值,采样点差值的最大值和最小值的差值为光电跟踪仪的跟踪角度误差^[8]。针对光电跟踪仪跟踪角度的现场校准进行了大量试验,试验结果证明现场校准效果均满足相应的技术指标。任取某一具体测试数据,其跟踪角度误差的计算和结果如表 2 所示。

表 2 光电跟踪仪现场校准测试结果 (")

测量对象	跟踪角误差计算	跟踪角误差结果
水平角	22.72 - (15.36)	38.1
竖直角	8.70 - (17.97)	26.7

分析校准结果数据的准确性,对光电跟踪校准装置进行不确定度分析,其主要测量标准不确定分量如表 3 所示。

表 3 测量不确定度分量汇总

序号	不确定度分量来源	类别	符号	分量计算结果/(")
1	校准装置的控制卡刷新	B	u_1	3.2
2	校准装置的两轴综合运动	B	u_2	1.8
3	激光跟踪仪确定光电跟踪仪中心的影响	B	u_3	7.1
4	靶标的安装、调整、瞄准的影响	B	u_4	1.2
5	激光跟踪仪确定靶标位置	B	u_5	3.5
6	测量重复性	A	u_6	1.2

由于表 3 中各不确定度分量相互独立,合成标准不确定度为

$$u_c = \sqrt{3.2^2 + 1.8^2 + 7.1^2 + 1.2^2 + 3.5^2 + 1.2^2} = 8.9(")$$

则跟踪角度的扩展校准不确定度 $U = k \times u_c = 2 \times 8.9" = 17.8"(k=2)$ 。因此评定的光电跟踪仪校准装置测量不确定度 $U = 17.8"(k=2)$ 满足该装置跟踪角 $U = 20"(k=2)$ 的技术指标要求^[10]。

4 总结

研究光电跟踪误差的校准技术,设计针对光电跟踪仪的校准系统,阐述此校准系统的工作原理及操作流程:利用激光跟踪仪跟踪光电跟踪仪并采集测量数据,剔除其中存在的粗大误差得到有效数据,采用球

面拟合最小二乘法确定光电跟踪的中心。建立合理的坐标转换模型,实现激光跟踪仪的中心向光电跟踪仪的中心坐标转换,并将二者的测量数据进行对比,得到最终的校准结果。数据的分析处理过程均可利用 VB 和 MATLAB 软件结合实现,极大地提升了运算效率。举例给出光电跟踪仪校准系统的测试结果,并对其不确定度进行分析,证明了此校准系统的可行性和准确性。本文研制的光电跟踪仪校准系统保障了真实现场中光电跟踪仪测量的准确性、可靠性、可溯源性,为跟踪及瞄准系统的参数校准提供了重要参考,对相关空间几何量参数测量研究、动态大数据测量试验具有借鉴意义。

参 考 文 献

- [1] 许新光,陈维义,李日忠,等. 光电跟踪仪综合测试系统[J]. 舰船电子工程, 2007, 157(1): 175 - 182.
- [2] 韩艳丽,卢刚. 光电跟踪测量系统[M]. 烟台: 海军航空工程学院, 2000.
- [3] GJB 6201 - 2008 大尺寸测量系统激光跟踪仪校准规范[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 2008.
- [4] 崔岩梅,李涛,师会生,等. 光电跟踪仪角跟踪误差测试方法[P]. 中国专利: 200910158067, 2009.
- [5] 计量技术基础编委会. 计量技术基础[M]. 北京: 原子能出版社, 2002.
- [6] 梁芳. Visual Basic 程序设计案例教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [7] 朱卫安. 光电跟踪传感器的非线性校正[J]. 广州大学学报: 综合版, 2001(2): 61 - 63.
- [8] 刘亚辰,张新磊,高扬,等. 光电跟踪瞄准系统的多光轴平行度校准方法研究[J]. 宇航计测技术, 2015(4): 5 - 8.
- [9] 侯宏录,周德云,王伟,等. 基于星体标定的光电跟踪系统测角精度评定[J]. 光电工程, 2006, 33(3): 5 - 10.

收稿日期: 2019 - 06 - 16

作 者 简 介



唐英娜(1978 -),女,工程师,主要从事几何量计量研究工作。2001年毕业于哈尔滨工程大学,获工学学士学位;现就职于北京长城计量测试技术研究所。