

DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20240064

网络首发日期: 2025-01-14; 网络首发地址: <http://link.cnki.net/urlid/12.1355.N.20250114.1426.005>

## 基于全站仪的长焦相机指向激光轴线调整方法

任鹤猛, 黄喆, 李佳雄, 张岚清

(天津科技大学电子信息与自动化学院, 天津 300457)

**摘要:** 针对煤矿巷道掘进导向系统中测量相机与指向激光轴线需保持严格共轴这一需求, 提出一种基于全站仪的长焦相机主光轴线与指向激光轴线平行度调整方法。基于全站仪分别在相机轴线和激光轴线上各测量两个点的坐标, 利用空间几何关系解算激光轴线和相机轴线方位角和俯仰角, 得出激光轴线相对相机轴线的水平、垂直偏差角度, 以完成轴线调整操作。实验结果表明, 两条轴线的俯仰角和方位角偏差角度均低于  $0.001^\circ$ , 该方法可以实现两条空间轴线的精确调整, 满足指向激光对相机轴线的高精度映射要求。

**关键词:** 平行性; 相机主光轴线; 指向激光轴线; 方位角; 俯仰角; 全站仪

中图分类号: V556 文献标志码: A 文章编号: 1672-6510(2026)01-0069-04

## A Method for Adjusting the Laser Axis of a Telephoto Camera Based on a Total Station

REN Hemeng, HUANG Zhe, LI Jiaxiong, ZHANG Lanqing

(College of Electronic Information and Automation, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China)

**Abstract:** A method for adjusting the parallelism between the main optical axis of a telephoto camera and the pointing laser axis based on a total station is proposed to meet the requirement of strict coaxial alignment between the measuring camera and the pointing laser axis in the coal mine tunnel excavation guidance system. Based on the total station, the coordinates of two points were measured on the camera axis and the laser axis respectively. Using spatial geometric relationships, the azimuth and elevation angles of the laser axis and the camera axis were calculated, and the horizontal and vertical deviation angles of the laser axis relative to the camera axis were obtained to complete the axis adjustment operation. The experimental results showed that the pitch angle and azimuth deviation angle of the two axes were both lower than  $0.001^\circ$ , and the method can achieve precise adjustment of the two spatial axes, meeting the high-precision mapping requirements of pointing laser to the camera axis.

**Key words:** parallelism; camera main optical axis; pointing towards the laser axis; azimuth; pitch angle; total station

### 引文格式:

任鹤猛, 黄喆, 李佳雄, 等. 基于全站仪的长焦相机指向激光轴线调整方法[J]. 天津科技大学学报, 2026, 41(1): 69-72.

REN H M, HUANG Z, LI J X, et al. A method for adjusting the laser axis of a telephoto camera based on a total station[J].

Journal of Tianjin university of science and technology, 2026, 41(1): 69-72.

随着现代科学技术的不断发展, 光学技术广泛应用于现代化武器装备、航空航天以及地下掘进等领域使用的光电测量设备中。在使用光电测量设备时, 为确保测量结果的准确性与一致性, 各光学系统之间需

要满足规定的指向一致性要求, 即多光轴一致性<sup>[1-2]</sup>。多光轴一致性一般以光轴间的平行度作为判定依据, 它是影响设备性能的重要指标, 其指标不合格会导致光电设备性能严重下降, 甚至无法正常工作。因此,

收稿日期: 2024-03-28; 修回日期: 2024-09-28

作者简介: 任鹤猛(1999—), 男, 河北衡水人, 硕士研究生; 通信作者: 黄喆, 讲师, [huangzhe@tust.edu.cn](mailto:huangzhe@tust.edu.cn)

在对光电设备进行指向性检验检测时应使用高精度光轴平行性检测设备和方法。

目前,已有很多光轴平行性的检测方法<sup>[3-10]</sup>,但这些检测方法均有各自的优缺点<sup>[11-13]</sup>。例如,投影靶法<sup>[14]</sup>的优点是其结构简单、成本低廉、使用方便、可以在野外和室内使用、误差小,但其缺点是只能在夜晚或阴天进行光轴调整。小口径平行光管法的优点是口径小、制作较容易且轻便,缺点是误差环节较多、精度不太高。相反,大口径平行光管法<sup>[15]</sup>的优点是误差环节少、测量精度高,缺点是大口径平行光管不易制作且笨重,不可能运到野外使用,且大口径高精度光束平行性的检测比较困难<sup>[16]</sup>。激光光轴仪法<sup>[17]</sup>的优点是具有自动诊断故障能力,排除了人为因素对测量结果的影响,缺点在于系统装配难度大、专用性强。五棱镜<sup>[18-19]</sup>最大的缺点是五棱镜在测试移动过程中,其特征方向的任何变化都会引起光轴偏差,产生测量附加误差,影响最终的测量精度,且该项误差是随机误差,难以控制<sup>[20-21]</sup>。拜飞等<sup>[22]</sup>提出一种激光校靶技术方法,通过图像采集设备对光斑进行采集,通过软件对光斑进行分析,显示光斑中心坐标与标准中心在  $x$  轴和  $y$  轴上的坐标偏差距离,根据光斑中心坐标调节机载光电探测设备扫描镜的位置。陈志斌等<sup>[23]</sup>提出一种基于光学自动瞄准和惯性测量的大间距光轴平行性检测方法,该方法利用惯性传感器提供一个准确且可移动的基准坐标系,利用各个光轴在基准坐标系内的向量关系计算光轴平行性。以上检测方法存在着针对性强、受主观因素影响大、精度不高等缺点,很难适应复杂的环境和高精度的科技需求。

本文在上述问题的基础上,提出一种将相机主光轴映射到指向激光轴线的调整方法。该方法采用全站仪分别测量相机轴线和激光轴线上远点位置与近点位置的坐标,并由此解算出两条轴线的方位角和俯仰角。该方法以相机轴线的角度为依据,使用  $X$ - $Y$  微位移调节机构改变激光器的角度,用全站仪测量激光轴线上远点和近点的坐标并计算其方位角、俯仰角以及两轴线偏差角度,验证相机轴线和激光轴线是否平行。该方法旨在解决煤矿掘进导向系统中相机主光轴和指示激光轴线不平行的问题。本文方法操作简单、场景要求度低,不受主观因素影响,具有轴线调准精度高的优点,将来有望在各种光电测量设备中广泛应用。

## 1 调整方法

### 1.1 调整原理

调整装置上发光二极管 (light emitting diode, LED) 的中心点距离相机远处记为  $A$  点,距离相机近处记为  $B$  点。 $A$ 、 $B$  点坐标定义为

$$\begin{cases} A=(a, b, c) \\ B=(j, k, l) \end{cases} \quad (1)$$

全站仪坐标系为左手系,其坐标轴  $NEZ$  对应数学坐标系的  $XYZ$ 。在数学坐标系中相机轴线的测量原理图如图 1 所示。

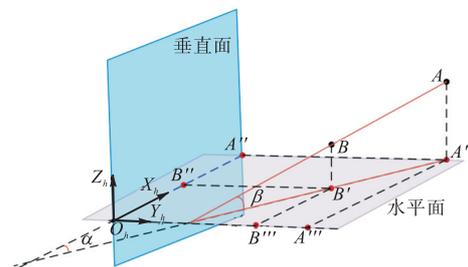


图 1 相机轴线测量原理图

Fig. 1 Schematic diagram of camera axis measurement

$A$  点在水平面的投影为  $A'$  点, $B$  点在水平面的投影为  $B'$  点。 $A'$  点在  $x$  轴的投影为  $A''$  点, $B'$  点在  $x$  轴的投影为  $B''$  点。 $A'$  点在  $y$  轴的投影为  $A'''$  点, $B'$  点在  $y$  轴的投影为  $B'''$  点。相机主光轴记为  $AB$ ,其方位角是  $AB$  在水平面的投影  $A'B'$  和  $x$  轴的夹角,记为  $\alpha$ ;俯仰角是  $AB$  延长线及其在水平面投影  $A'B'$  延长线的夹角,记为  $\beta$ 。

激光轴线测量原理图如图 2 所示。

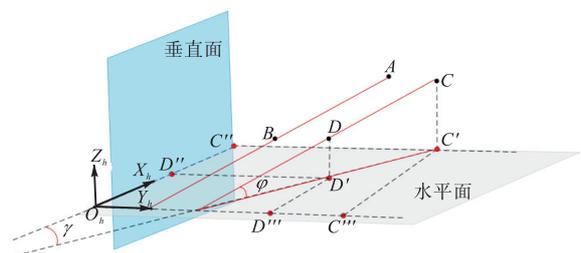


图 2 激光轴线测量原理图

Fig. 2 Principle diagram of laser axis measurement

调整装置十字片中心点在距离全站仪远处记为  $C$  点,距离全站仪近处记为  $D$  点。同理, $C$  点在水平面的投影记为  $C'$  点, $D$  在水平面的投影记为  $D'$  点,指向激光轴线记为  $CD$ 。 $C'$  点在  $x$  轴的投影记为  $C''$  点, $D'$  点在  $x$  轴的投影记为  $D''$  点。 $C'$  点在  $y$  轴的投影记

为 $C'''$ 点, $D'$ 点在 $y$ 轴的投影记为 $D'''$ 点。激光轴线的方位角和俯仰角分别记为 $\gamma, \varphi$ 。

$C, D$ 点坐标定义为

$$\begin{cases} C=(r, s, t) \\ D=(e, h, i) \end{cases} \quad (2)$$

$A''B''$ 和 $C''D''$ 的长度分别记为 $m, n$ 。根据 $A, B, C, D$ 四点的空间坐标信息,再联立式(1)和式(2),求得相机轴线 $\overline{BA}$ 和激光轴线 $\overline{DC}$ 分别在 $x$ 轴上的投影 $A''B''$ 和 $C''D''$ 的长度表达式为

$$\begin{cases} m=a-j \\ n=r-e \end{cases} \quad (3)$$

$A'''B'''$ 和 $C'''D'''$ 的长度分别记为 $f, g$ 。联立式(1)、式(2),即求出相机轴线 $\overline{BA}$ 和激光轴线 $\overline{DC}$ 在 $y$ 轴上的投影 $A'''B'''$ 和 $C'''D'''$ 的长度,表达式分别为

$$\begin{cases} f=b-k \\ g=s-h \end{cases} \quad (4)$$

$A$ 点与 $B$ 点的垂直高度差记为 $u, C$ 点与 $D$ 点的垂直高度差记为 $v$ ,联立式(1)、式(2)可以得出垂直高度差 $u$ 和 $v$ 的表达式分别为

$$\begin{cases} u=c-l \\ v=t-i \end{cases} \quad (5)$$

$A'B'$ 和 $C'D'$ 的长度分别记为 $p, q$ 。求得 $A'B'$ 和 $C'D'$ 的长度表达式分别为

$$\begin{cases} p=\sqrt{f^2+m^2} \\ q=\sqrt{g^2+n^2} \end{cases} \quad (6)$$

$R, R'$ 分别是相机轴线和激光轴线的方位角所对应的反正切值,求得相机轴线和激光轴线方位角<sup>[24]</sup>所对应反正切值表达式分别为

$$\begin{cases} R=\tan^{-1}(f/m) \\ R'=\tan^{-1}(g/n) \end{cases} \quad (6)$$

同理求得相机轴线俯仰角和激光轴线俯仰角的表达式分别为

$$\begin{cases} \beta=\tan^{-1}\frac{u}{p} \\ \varphi=\tan^{-1}\frac{v}{q} \end{cases} \quad (8)$$

根据象限判断 $A'''B'''、A''B''、C'''D'''、C''D''$ 的正负,并根据式(7)中反正切值计算相机轴线和激光轴线的方位角。表1为相机轴线和激光轴线的方位角。

## 1.2 调整方案

该轴线调整方法主要由全站仪、相机设备和调整装置等单元组成。相机设备主要由激光器、 $X-Y$ 微位移调节机<sup>[25-26]</sup>、电荷耦合器件(charge coupled de-

vice, CCD)相机、镜头等部分组成。调整装置主要由 $X-Y$ 微位移调节机构、LED灯、十字片、三脚架、电源等部分构成。 $X-Y$ 微位移调节机构如图3所示。先利用CCD工业相机采集调整装置上LED的光斑图像,使 $A, B$ 两点的光斑均处在分辨率为 $1280 \times 1024$ 的图像中心(640, 512)位置处;再使调整装置上十字片中心 $C, D$ 两点与激光投影在十字片上的光斑重合。控制全站仪打出指示激光到调整装置LED的中心位置并进行测量,得到调整装置上LED的中心 $A, B$ 两点坐标;由电脑控制全站仪打出指示激光到调整装置十字片的中心点进行测量,测得调整装置上十字片的中心 $C, D$ 两点坐标。将全站仪测量的 $A, B, C, D$ 四点坐标代入相关公式解算出相机轴线和激光轴线的俯仰角和方位角。根据解算出的相机轴线的角度,在 $X-Y$ 微位移调节机构上调整激光器的角度,使激光轴线与相机轴线平行。最后使用全站仪测量调整装置上十字片中心 $C, D$ 两点坐标,计算两轴线的水平偏差角和俯仰偏差角并进行验证。在误差允许范围内,相机轴线和激光轴线的角度一致时,调整结束。

表1 相机轴线和激光轴线的方位角

Tab. 1 Azimuth angles of the camera and laser axis

| 象限  | $A'''B'''$ | $A''B''$ | $C'''D'''$ | $C''D''$ | 相机方位角 $\alpha$  | 激光方位角 $\gamma$   |
|-----|------------|----------|------------|----------|-----------------|------------------|
| I   | +          | +        | +          | +        | $R$             | $R'$             |
| II  | +          | -        | +          | -        | $180^\circ - R$ | $180^\circ - R'$ |
| III | -          | -        | -          | -        | $180^\circ + R$ | $180^\circ + R'$ |
| IV  | -          | +        | -          | +        | $360^\circ - R$ | $360^\circ - R'$ |

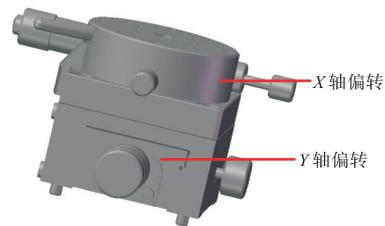


图3  $X-Y$ 微位移调节机构

Fig. 3  $X-Y$  micro-displacement adjustment mechanism

## 2 实验

为了验证所提出调整原理和调整方法的可行性和测量精度以及在煤矿掘进导向系统中保证测量相机主光轴线和指示激光轴线共轴,本文设计如下实验方案并搭建实验环境。调整方法实验场景和设备实物图如图4所示。



图4 调整方法实验场景和设备实物图

Fig. 4 Experimental scene and pictures of physical devices for adjusting the method

实验过程分为三步。第一步,全站仪分别测量调整装置 LED 灯的中心  $A$ 、 $B$  两点坐标,将测量结果代入式(1)—式(8)和表 1 中解算出相机轴线的方位角和俯仰角。 $A$ 、 $B$  点坐标及相机轴线方位角、俯仰角见表 2。第二步,全站仪分别测量调整装置十字片中心  $C$ 、 $D$  两点坐标,将测量结果代入式(1)—式(8)和表 1 中解算出激光轴线的方位角和俯仰角。 $C$ 、 $D$  点坐标及激光轴线方位角、俯仰角见表 3。第三步,计算相机轴线和激光轴线的方位偏差角和俯仰偏差角。然后以表 2 相机轴线方位角和俯仰角的结果为基准,使用  $X$ - $Y$  微位移调节机构改变激光器的角度,不断进行调整验证,最终相机轴线和激光轴线的方位、俯仰偏差角调整到低于  $0.001^\circ$ ,则说明激光轴线与相机轴线达到平行。调整过程中激光轴线和相机轴线的方位、俯仰偏差角见表 4。

表 2  $A$ 、 $B$  点坐标及相机轴线方位角、俯仰角

Tab. 2 Coordinates of points  $A$  and  $B$  and azimuth and pitch angles of camera axis

| $A$ 点坐标/m           | $B$ 点坐标/m           | $\alpha/(\circ)$ | $\beta/(\circ)$ |
|---------------------|---------------------|------------------|-----------------|
| (88.56, 5.74, 5.25) | (33.51, 5.69, 5.17) | 0.053 8          | 0.068 1         |

表 3  $C$ 、 $D$  点坐标及激光轴线方位角、俯仰角

Tab. 3 Coordinates of points  $C$  and  $D$  and azimuth and pitch angles of laser axis

| $C$ 点坐标/m           | $D$ 点坐标/m           | $\gamma/(\circ)$ | $\varphi/(\circ)$ |
|---------------------|---------------------|------------------|-------------------|
| (65.42, 5.72, 5.10) | (16.89, 5.61, 4.91) | 0.129 9          | 0.224 3           |

表 4 激光轴线和相机轴线的方位、俯仰偏差角

Tab. 4 Horizontal and elevation deviation angles between laser axis and camera axis

| 调节轮次 | 方位偏差角/ $(\circ)$ | 俯仰偏差角/ $(\circ)$ |
|------|------------------|------------------|
| 第一轮  | 0.068 3          | 0.142 9          |
| 第二轮  | 0.037 5          | 0.139 9          |
| 第三轮  | 0.034 3          | 0.002 0          |
| 第四轮  | 0.000 2          | 0.139 0          |
| 第五轮  | 0.000 2          | 0.000 6          |

### 3 结 语

本文提出一种基于全站仪的长焦相机指向激光轴线调整方法,通过全站仪测量相机轴线和激光轴线上两点空间坐标并结合空间几何位置关系解算出相机轴线和激光轴线方位角和俯仰角,以及两轴线偏差角度,使用  $X$ - $Y$  微位移调节结构调整激光轴线角度,使其与相机轴线平行,完成调整操作。本文搭建的实验作为煤矿掘进导向系统的一部分,可以验证调整激光轴线方法的可行性以及测量精度,还可以保证煤矿掘进导向系统中测量相机主光轴线和指示激光轴线共轴。结果显示,调整激光器的角度,相机轴线和激光轴线的方位、俯仰偏差角低于  $0.001^\circ$ ,能够满足保持严格共轴的需要。此外该调整方法不受空间限制,在室内和室外均可操作,校准精度高、操作简单,具有一定的工程推广和应用价值。

### 参考文献:

- [1] 吴淑巧. 棱镜式望远镜光轴平行性检验分析[J]. 新型工业化, 2021, 11 (9): 220-221.
- [2] XIAO Z J, GUO X X, XIA Y, et al. Research on detection system of optical sights triaxial parallelism[J]. Optik, 2014, 125 (16): 4427-4430.
- [3] 储雨豪. 非成像光学系统多光轴一致性检测方法研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2021.
- [4] LIU X, LIU K F, QIN B, et al. Optical alignment and tuning system for the HUST THz-FEL[J]. Nuclear instruments and methods in physics research section A: accelerators, spectrometers, detectors and associated equipment, 2016, 837: 58-62.
- [5] WANG S R, LI Z F, HUANG Y, et al. Alignment of optical axis parallelism in multi-axis system[J]. Chinese optics letters, 2015, 13 (S1): S11202.
- [6] GORSHKOV V A, CHURILIN V A. Multispectral apparatus based on an off-axis mirror collimator for monitoring the quality of optical systems[J]. Journal of optical technology, 2015, 82 (9): 646-648.
- [7] ZOU H H. Improvement detecting method of optical axes parallelism of shipboard photoelectrical theodolite based on image processing[J]. Optics and photonics journal, 2017, 7 (8): 78313.
- [8] ZOU H H, WU H B, ZHOU L J. A testing method of

(下转第 80 页)

- [16] HONG Y G, WANG J K, CHENG D Z. Adaptive finite-time control of nonlinear systems with parametric uncertainty[J]. IEEE Transactions on automatic control, 2006, 51(5): 858–862.
- [17] DING S H, LI S H, ZHENG W X. Nonsmooth stabilization of a class of nonlinear cascaded systems[J]. Automatica, 2012, 48(10): 2597–2606.
- [18] LIANG Y J, MA R C, WANG M, et al. Global finite-time stabilisation of a class of switched nonlinear systems[J]. International journal of systems science, 2015, 46(16): 2897–2904.
- [19] YAN Y Q, ZHANG H G, SUN J Y, et al. Optimal fuzzy event-triggered fault-tolerant control of fractional-order Nonlinear Stochastic Systems[J]. Information sciences, 2024, 678: 120877.
- [20] HE K Y, TANG L. Adaptive event-triggered finite-time control for switched nonlinear systems[J]. IEEE Transactions on fuzzy systems, 2024, 32(3): 745–754.

责任编辑:周建军

(上接第72页)

- optical axes parallelism of shipboard photoelectrical theodolite[C]//SPIE. Proceedings of the 8th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies. Suzhou: SPIE, 2016: 96841V.
- [9] 贾文武, 刘培正, 唐自力, 等. 靶场适用的光电经纬仪光轴平行性检测[J]. 光学精密工程, 2020, 28(8): 1670–1677.
- [10] YOSHINO M, HARA T. Light axis adjustment with a sterilised photostimulation device for visually evoked potential monitoring[J]. British journal of neurosurgery, 2018, 32(3): 283–285.
- [11] 崔启胤. 大间距光轴平行性检测方法研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2018.
- [12] 金伟其, 王霞, 张其扬, 等. 多光轴一致性检测技术发展及其分析[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(3): 526–531.
- [13] 马世帮, 杨红, 杨照金, 等. 光电系统多光轴平行性校准方法的研究[J]. 应用光学, 2011, 32(5): 917–921.
- [14] 姜宏滨. 用投影靶板调整光轴平行性[J]. 舰船科学技术, 1995(4): 61–65.
- [15] 王路. 大口径平行光管光学系统设计[D]. 长春: 长春理工大学, 2012.
- [16] 高文静, 窦茂森, 李金亮. 大口径平行光管在多光轴探测器光轴平行性测量中的应用[J]. 光电技术应用, 2009, 24(4): 32–33.
- [17] 李炎冰, 陈洪亮, 于鑫. 一种便携式光轴检测设备[J]. 电子测试, 2021(24): 26–27.
- [18] 张向明, 张锦亮, 王养云, 等. 多光轴校轴仪调校关键技术研究[J]. 应用光学, 2014, 35(4): 592–597.
- [19] XIAO W J, MA D X, CHEN Z B, et al. Research on a detection system for a large distance multi-axis bore-sight[J]. Journal of optical technology, 2016, 83(10): 622–626.
- [20] 黄富瑜, 李刚, 史云胜, 等. 多光谱多光轴平行性检测方案设计与误差分析[J]. 光电工程, 2019, 46(2): 12–20.
- [21] 李雅灿, 邱丽荣, 张鹏嵩, 等. 便携式多光轴平行性校轴系统的研制[J]. 中国激光, 2012, 39(10): 149–153.
- [22] 拜飞, 王庆祥. 某型机载光电设备激光校靶技术方法研究[J]. 航空维修与工程, 2021(4): 63–66.
- [23] 陈志斌, 肖文健, 马东玺, 等. 大间距多光轴一致性野外在线检测方法[J]. 光学学报, 2017, 37(1): 0112006.
- [24] 王红芳, 张保亮. 坐标方位角通用计算公式[J]. 山西建筑, 2008(6): 361–362.
- [25] RILEY D, HANSEN C. Sun-relative pointing for dual-axis solar trackers employing azimuth and elevation rotations[J]. Journal of solar energy engineering, 2015, 137(3): 031008.
- [26] ZHAO H N, DING W J, FAN M Y, et al. An optical method based auto-collimation for measuring five degrees of freedom error motions of rotary axis[J]. T review of scientific instruments, 2022, 93(12): 125110.

责任编辑:周建军