

## 库德光路光束指向稳定性分析

薛向尧, 高云国, 张文豹, 张 磊

(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:** 库德光路光束指向稳定性是保证激光测距机光轴指向精度的关键因素, 通过坐标变换建立了一种可以从空间角度表征光束指向稳定性的动态方法, 解决了大型激光测距机库德光路系统误差对光学系统影响的问题, 将库德光路系统误差与光束指向有机地结合起来, 以某地平式激光测距机为研究对象, 建立了库德光路光束指向的动态误差模型。将 CCD 固定在库德镜 5 的安装接口处, 并与图像采集卡组成图像采集系统, 直接对库德光路激光光斑进行采集, 获得了精度较高的光束指向动态误差数据。利用实测数据对光束指向的动态误差模型进行了最小二乘拟合, 由此标定出了该设备库德光路光束指向的动态特性, 为设备系统误差的修正工作奠定了基础。

**关键词:** 激光测距机; 误差修正; 坐标变换; 库德光路

**中图分类号:** TH74    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1007-2276(2013)06-1514-05

## Analysis of the beam pointing stability in coude optical path

Xue Xiangyao, Gao Yunguo, Zhang Wenbao, Zhang Lei

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

**Abstract:** The beam pointing stability in coude optical path is a key factor for the optical axis pointing accuracy of the laser range finder. By coordinate transformation, a dynamic method was developed to characterize the beam pointing stability in geometric space. A dynamic beam pointing error model in coude optical path for an altitude-azimuth laser range finder was built as an example, which was used to describe the relationship between the system error in the mechanical structure and the beam pointing error in coude optical path. A image collection system, consisting of an image acquisition card and a CCD mounted on the interface of the 5th coude mirror, was used to collect laser beam spots, and then, the high precision measured data of the beam pointing error was obtained. After least square fitting, the dynamic characteristic of the beam pointing error in coude optical path was finally calibrated, which would lay a foundation for the correction of the system error.

**Key words:** laser range finder; errors correction; coordinate transformation; coude optical path

收稿日期: 2012-10-07; 修订日期: 2012-11-20

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(061X20C060)

作者简介: 薛向尧(1981-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事光学精密机械结构设计与误差分析方面的研究。

Email: xuexiangyao@126.com

## 0 引言

卫星激光测距技术是 20 世纪 60 年代开始发展起来的高精度空间观测技术。卫星激光测距机对装有角反射器的卫星发射激光,由角反射器反射激光,返回的激光进入接收系统,通过精确测量激光往返时间可计算卫星的轨道高度,为卫星轨道测量提供实测数据<sup>[1-2]</sup>。

卫星激光测距机通常采用地平式两轴转台,该转台结构有两个相互垂直的机械旋转轴——垂直轴和俯仰轴<sup>[3-4]</sup>。库德光路内各反射镜安装于垂直轴、俯仰轴内,两轴带动各反射镜旋转,由反射镜引导激光器所发射的激光束射向预定目标。轴系误差会引起轴系内各反射镜的回转误差,从而导致库德光路内激光束指向发生偏差,而光路内各反射镜本身不可避免也会存在装调误差,因此在库德光路内轴系误差、反射镜装调误差已经耦合在一起,同时影响光路内激光束指向的稳定性。

目前,有关分析库德光路光束指向稳定性的文献或报导较为少见<sup>[5-7]</sup>。参考文献[5-6]中作者系统分析了水平式激光发射系统库德光路及轴系间系统误差源对激光轴指向的影响,并建立了误差修正模型,模型中既有常数项,又有以姿态角为自变量的函数项,因此,光轴指向误差中既有静态误差,又有动态误差,此外,模型中有些参数可以合并成一项。说明系统误差源中既有静态误差源,又有动态误差源,同时又有对光轴指向影响规律相同的误差源。

参考文献[6]中作者利用相应的检测方法能够拟合出所有系统误差源,虽然拟合精度达到设计指标,但采用的检测方法精度较低,因此在工程应用中实际精度并不理想。

实际上,误差修正工作的难点是修正系统的动态误差。因此,文中以某地平式激光测距机为研究对象,针对库德光路光束指向稳定性的问题,系统分析了动态误差源对光束指向的影响,建立了地平式激光测距机库德光路光束指向动态误差模型。将 CCD 固定在库德镜 5 的安装接口处,并与图像采集卡组成图像采集系统,直接采集经库德镜 4 反射后的激光光斑,利用采集的数据求解该模型,最终确定了该测距机库德光路光束指向的动态特性,为误差修正工作奠定了基础。

## 1 库德光路光束指向稳定性检测

库德光路结构如图 1 所示,激光器发射激光束,经库德镜 1 后沿垂直轴回转轴线射向库德镜 2,再经库德镜 2、3、4 后沿俯仰轴回转轴线射向库德镜 5,经库德镜 5 反射,最终由扩束系统射出。

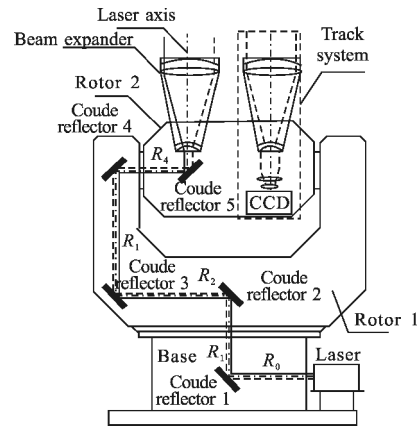


图 1 库德光路结构示意图

Fig.1 Framework of the coude optical path

事实上,库德光路激光束指向的不稳定性是指激光束指向的动态误差,是由激光束与轴系回转轴线不同轴所产生的角度偏差引起的,即由激光束  $R_1$ 、 $R_4$  分别与垂直轴、俯仰轴回转轴线不同轴产生的角度偏差所引起的,该部分误差为动态误差源。

针对该部分误差分析库德光路光束指向的稳定性对后续的光轴指向误差的修正工作具有重要意义。因此,抛开库德镜 5 对光束指向的影响,在库德镜 1~4 装调完成后,在库德镜 5 安装接口处放置一 CCD,用于采集经库德镜 4 后的光斑,如图 2 所示。

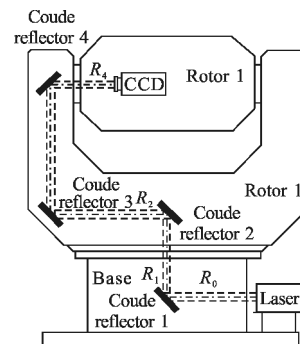


图 2 库德光路光束指向动态特性检测示意图

Fig.2 Measurement of dynamic beam pointing characteristics in coude optical path

通过装调手段将 CCD 视轴与俯仰轴回转轴线调成同轴状态,当激光束  $R_4$  指向偏离俯仰轴回转轴线时,激光光斑将偏离 CCD 视场中心,并产生脱靶量值,如图 3 所示,通过进一步的换算可得激光束  $R_4$  的指向角度。

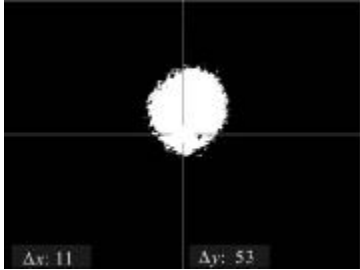


图 3 光斑随跟踪架姿态角变化而变化

Fig.3 Position of laser spot varies as the attitude angles of the tracking support

## 2 库德光路光束指向稳定性模型

根据该测距机光机结构,建立垂直轴坐标系  $(x, y, z)$ 、俯仰轴坐标系  $(x', y', z')$ ,如图 4 所示。垂直轴坐标系原点在反射镜 2 的反射面与垂直轴回转轴线的交点上,以俯仰轴为零位时测距机视轴指向的方向为  $y$  轴正向,以沿垂直轴回转轴线铅垂向上的方向为  $z$  轴正向, $x$  轴与  $y, z$  轴正交,并组成右手坐标系;俯仰轴坐标系原点在 CCD 像面中心,以沿俯仰轴回转轴线由反射镜 4 指向 CCD 的方向为  $x'$  轴正向,以测距机视轴指向的方向为  $z'$  轴正向, $y'$  轴与  $x', z'$  轴正交,并组成右手坐标系。

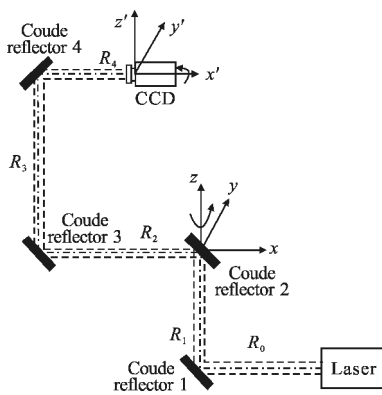


图 4 库德光路坐标系

Fig.4 Coordinates of the coode optical path

通过建立两个坐标系可将库德光路内各激光束看

作单位矢量,经坐标变换后确定各激光束的空间指向。

在轴系回转过程中,当激光束  $R_1, R_4$  分别与垂直轴、俯仰轴回转轴线产生角度偏差时,CCD 像面激光光斑位置将偏离像面中心,并随方位角、俯仰角变化而变化,说明库德光路激光束  $R_4$  在俯仰轴坐标系下指向产生动态误差。

理想情况下,在垂直轴坐标系内,激光束  $R_1, R_4$  的空间指向为

$$R_1 = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$$R_4 = M_4 M_3 M_2 R_1 = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

式中: $M_2 \sim M_4$  分别为反射镜 2~4 的作用矩阵。

在俯仰轴坐标系下

$$R_4' = K R_4 = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

式中: $K$  为垂直轴坐标系到俯仰轴坐标系的变换矩阵。

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

说明在理想情况下,在轴系旋转的过程中,激光束  $R_4$  始终指向  $x'$  轴,即与俯仰轴回转轴线同轴,激光束指向稳定。

当激光束  $R_1$  与垂直轴回转轴线产生角度偏差时,在垂直轴坐标系下激光束  $R_1$  的空间指向为

$$R_{1v} = \begin{Bmatrix} \sin v \cos(A_v - A) \\ \sin v \sin(A_v - A) \\ \cos v \end{Bmatrix} \quad (5)$$

式中: $A_v$  为  $v$  在方位方向的倾斜角。则

$$R_{4v} = M_4 M_3 M_2 R_{1v} = \begin{Bmatrix} \cos v \\ \sin v \sin(A_v - A) \\ \sin v \cos(A_v - A) \end{Bmatrix} \quad (6)$$

在俯仰轴坐标系下

$$R_{4v}' = K R_{4v} = \begin{Bmatrix} \cos v \\ -\sin v \cos(A_v - A) \\ \sin v \sin(A_v - A) \end{Bmatrix} \quad (7)$$

式中: $R_{4v}'$  在俯仰轴坐标系  $y', z'$  方向的误差分量为:

$$\Delta y_v \approx -v \cos(A_v - A + E) \quad (8)$$

$$\Delta z_v \approx v \sin(A_v - A + E) \quad (9)$$

当激光束  $R_4$  与俯仰轴回转轴线产生角度偏差  $u$  时,在垂直轴坐标系下

$$R_{4u} = \begin{pmatrix} \cos u \\ \sin u \cos E_u \\ \sin u \sin E_u \end{pmatrix} \quad (10)$$

式中:  $E_u$  为  $u$  在俯仰方向的倾斜角。

在俯仰轴坐标系下

$$R_{4u}' = KR_{4u} = \begin{pmatrix} \cos u \\ -\sin u \sin(E - E_u) \\ \sin u \cos(E - E_u) \end{pmatrix} \quad (11)$$

$R_{4u}'$  在俯仰轴坐标系  $y'$ 、 $z'$  方向的误差分量为:

$$\Delta y_u \approx -u \sin(E - E_u) \quad (12)$$

$$\Delta z_u \approx u \cos(E - E_u) \quad (13)$$

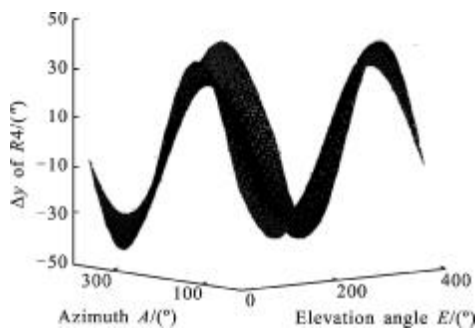
综合上述两项误差,并将其线性叠加可得库德光路激光束  $R_4$  在俯仰轴坐标系下指向动态误差为:

$$\Delta y \approx u \sin E_u \cos E - u \cos E_u \sin E - v \cos A_v \cos(A - E) - v \sin A_v \sin(A - E) \quad (14)$$

$$\Delta z \approx u \cos E_u \cos E + u \sin E_u \sin E + v \sin A_v \cos(A - E) - v \cos A_v \sin(A - E) \quad (15)$$

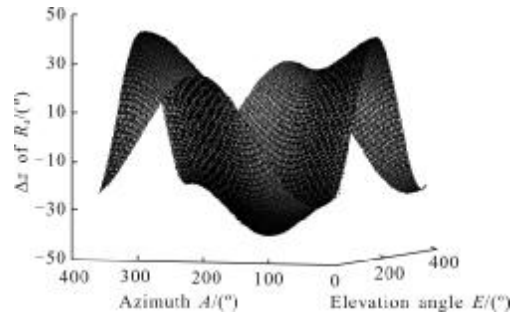
### 3 库德光路光束指向稳定性标定

在跟踪架各姿态角下,由 CCD 采集激光束  $R_4$  的激光光斑,可得  $R_4$  在俯仰轴坐标系下的光束指向的动态误差,所采集的数值为一组离散数据,通过最小二乘法拟合式 14、15 便可得到激光束  $R_4$  指向的动态误差方程,由此可定量的标定出该台设备库德光路光束指向的稳定性,图 5 为标定后  $R_4$  的指向动态特性曲面。



(a)  $R_4$  在  $y'$  方向的动态特性曲面

(a) Dynamic characteristics surface  $R_4$  in  $y'$  direction



(b)  $R_4$  在  $z'$  方向的动态特性曲面

(b) Dynamic characteristics surface of  $R_4$  in  $z'$  direction

图 5  $R_4$  指向动态特性曲面

Fig.5 Dynamic characteristics surface of  $R_4$

### 4 残差序列的正态性检验

利用正态概率图来检验总体的正态性,方法简单、直观。下面介绍正态概率图检验法的具体步骤。

(1)  $H_0$ : 假设数据  $x$  来自正态分布,计算数据均值  $\mu$ , 标准差  $\sigma$ ;

(2) 将数据  $x$  由小到大顺序排列,计算标准正态分布  $z$  值,  $z = (x - \mu) / \sigma$ ;

(3) 计算  $x$  的累积分配函数  $F(x) = P(X \leq x) = \phi(z)$ , 实际上,若数据来自正态总体,则  $x$  与  $F(x)$  呈线性关系,即拒绝域为:  $x$  与  $F(x)$  为非线性关系;

(4) 绘制  $x$  的正态概率图,横轴为  $x$  值,纵轴为  $F(x)$  值。

(5) 如果图形显示出直线性形态,接收假设  $H_0$ , 如果图形显示出曲线形态,则拒绝假设。

图 6、图 7 分别为动态误差模型  $\Delta y$ 、 $\Delta z$  拟合残差数据的正态概率图,由图可看出,图形显示均为直线形态,由此说明残差数据均来自正态分布的总体。

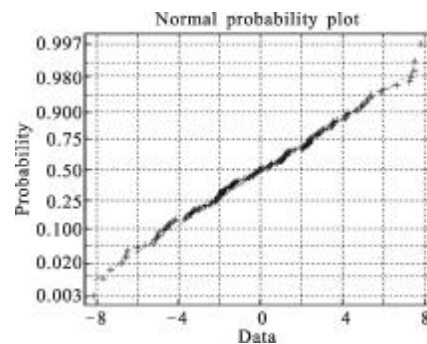


图 6 模型  $\Delta y$  残差数据的正态概率图

Fig.6 Figure of normal probability plots of residuals for error

model  $\Delta y$

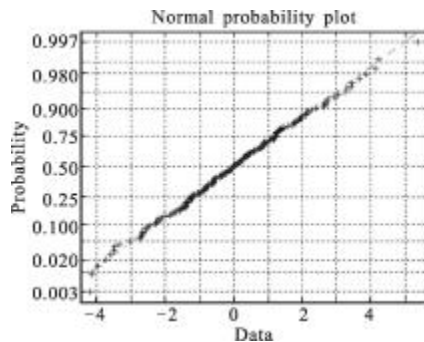


图7 模型  $\Delta z$  残差数据的正态概率图

Fig.7 Figure of normal probability plots of residuals for error model  $\Delta z$

参考文献[6]中通过在窗口处安装一对折返镜将激光束导入电视跟踪系统内,由于折返镜连接刚度小、安装误差大,在检测过程中,两块折返镜的位置关系随跟踪架姿态角的变化而变化,在高仰角部分的残差数据呈正弦变化规律,因此检测精度不高。

文中采集光斑所用的 CCD 安装在了库德镜 5 的安装接口处,库德光路的出射激光束直接进入 CCD 内,该检测方法解决了文献中检测所遇到的问题,提高了检测精度,通过残差数据的正态性检验可知,采用该检测方法基本剔除了检测环节的动态误差,所得残差数据呈正态分布,可以认为对模型参数的估计为最优估计。

## 5 结论

对于地平式激光测距机而言,库德光路光束指向稳定性是由库德光路系统动态误差源决定的。文中系统分析了动态误差源对库德光路光束指向的影响,建立了光束指向的动态误差模型。通过固定在库德镜 5 安装接口处的 CCD,测量库德光路的光束指向,获得了精度较高的检测数据,利用该组数据标定出了库德光路光束指向的动态特性,并对标定后的残差数据进行了正态性检验,检验结果说明残差数据均来自正态分布的总体,可以认为对模型参数的估计为最优估计。

## 参考文献:

- [1] Wang Bin. Research on the pointing error of telescope mount in SLR system [D]. Beijing: University of the Chinese Academy of Sciences, 2004. (in Chinese)  
王斌. 卫星激光测距系统的机架指向误差的研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2004.
- [2] Zhao Jie. The research on improving the pointing precision of SLR telescope in Changchun observatory [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2005. (in Chinese)  
赵洁. 长春人卫站提高卫星激光测距望远镜指向精度的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2005.
- [3] Wang Tao, Tang Jie, Song Liwei. Correction of measuring error of vehicular photoelectric theodolite [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(5): 1336-1337. (in Chinese)  
王涛, 唐杰, 宋立维. 车载光电经纬仪的测量误差修正[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(5): 1336-1337.
- [4] Peng Chen, Chen Qian, Qian Weixian. Method of correcting the static error of infrared search and track system by using photoelectric theodolite [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(10): 2792-2793. (in Chinese)  
彭晨, 陈钱, 钱惟贤. 利用光电经纬仪修正地基红外搜索跟踪系统静态误差的方法 [J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(10): 2792-2793.
- [5] Xue Xiangyao, Gao Yunguo. Correction of laser pointing error of level mounting laser transmitter system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(3): 536-541. (in Chinese)  
薛向尧, 高云国. 水平式激光发射系统指向误差的修正 [J]. *光学·精密工程*, 2011, 19(3): 536-541.
- [6] Xue Xiangyao, Gao Yunguo, Qiao Jian, et al. Analysis of optical axis parallelism error for the level mounting laser transmitter system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 335-337. (in Chinese)  
薛向尧, 高云国, 乔健, 等. 水平式激光发射系统光轴平行度误差分析[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(2): 335-337.
- [7] Qiao Jian, Gao Yunguo, Han Guangyu, et al. Fast alignment of Coude optical system in alt-alt two axis tracking turntable [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 18(8): 1761-1764. (in Chinese)  
乔健, 高云国, 韩光宇, 等. 水平式两轴转台中库德光路的快速装调[J]. *光学·精密工程*, 2011, 18(8): 1761-1764.