

文章编号 1004-924X(2010)08-1760-06

水平式两轴转台中库德光路的快速装调

乔 健¹,高云国¹,韩光宇¹,赵 天²

(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. 中国农业大学 信息与电气工程学院,北京 130083)

摘要:为实现对水平式两轴转台中库德光路的快速高精度装调,建立了自准直平行光管与平面反射镜相组合的自准直装调和检测系统。介绍了水平式两轴转台中库德光路的组成和工作原理,根据光学自准直原理给出了库德光路的装调和检测方法;结合库德光路的特点推导出基于坐标变换的库德镜辅助装调模型,进而实现了库德光路的快速装调。最后,对装调好的库德光路进行了随经轴和纬轴转动的误差检测,得出两轴转台工作过程中库德光路的实际晃动误差。结果表明,通过装调的库德光路晃动误差仅为 $5.2''$,满足设计指标要求的 $8''$ 。该装调技术不仅适用于库德光路也可对其它的反光镜装调提供一定的借鉴和参考。

关键词:库德光路;快速装调;自准直平行光管;平面反射镜

中图分类号:TH741.14;TN206 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20101808.1760

Fast alignment of Coude optical system in alt-alt two axis tracking turntable

QIAO Jian¹,GAO Yun-guo¹,HAN Guang-yu¹,ZHAO Tian²

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*;2. *College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 130083, China*)

Abstract: In order to realize the fast and high accuracy alignment of Coude optical system in an alt-alt two axis tracking turntable, an auto-collimation alignment and testing system was built, which was composed of an auto-collimator with a flat reflector. The working principle and components of Coude optical system in the turntable were introduced, and its alignment and testing methods were proposed according to the principle of optical autocollimating. On the basis of the characteristics of Coude system, the principle of rectangular coordinate transformation was deduced and the fast alignment of Coude optical system was achieved with computer-aided alignment. The errors in Coude optical system with latitude and longitude axes rotated were measured. The results show that the wobble errors of Coude optical system aligned by this methods is $5.2''$, which is superior to the system precision expected by laser launching system in $8''$, and meets the requirements of technology index. This methods can be widely used in the alignment of Coude optical system with the two axes rotated, and has broad ap-

收稿日期:2010-04-15;修订日期:2010-05-10.

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. 057X22C050)

plication prospects in practical engineering.

Key words: Coude optical system; fast alignment; auto-collimator; flat reflector

1 引言

水平式两轴转台有两根相互垂直的旋转轴,一根轴平行于地平面指向“南北”方向,称为经轴;另一根轴垂直于经轴指向“东西”方向,称为纬轴。视轴绕着经轴和纬轴旋转,可以指向不同的天区,继而实现对高仰角目标的跟踪测量^[1-2]。

在激光跟踪领域,随着激光技术的发展,对激光发射系统激光输出功率也有了更多的需求^[3-7]。但激光器功率的增大,其自身的体积和重量也会增大,同时也增加了激光发射系统的复杂性。激光器发出的激光束需通过导光光路才能从激光发射系统中向预定方向发射出去^[8],库德光路就是一种能够将光束转折到随轴系旋转的导光光路,且已有与水平式两轴转台组合使用的先例。通过库德光路可以使激光束随经轴和纬轴一起转动,实现激光束覆盖全天域的照射。由于经库德光路转折的激光束与其它探测器视轴之间的平行性直接影响发射激光束的准确性,因此直接对库德光路的装调是保证激光束沿跟踪测量轴精确发射到跟踪目标的关键^[9]。传统库德光路装调方法的装调周期长且很难达到所需的精度要求。本文基于自准直平行光管与平面反射镜组合的自准直法提出了库德光路的装调和检测方法,该方法结合坐标变换的辅助装调模型对库德光路进行装调和检测,实现了库德光路快速高精度装调,为提高激光束发射的准确性提供了新的途径。

2 库德光路组成与工作原理

2.1 系统组成

水平式两轴转台库德光路主要由库德镜 I,库德镜 II,库德镜 III 以及中心反射镜等组成。通过装调使库德镜 I,库德镜 II 和库德镜 III 与入射光线成 45° 的位置紧固;其中库德镜 I 安装在经轴轴线上,库德镜 II,库德镜 III 与库德镜 I 保持相对静止,并能够一同随经轴转动。中心反射镜在经轴和纬轴的交汇处,并与经轴、纬轴、入射光线

和视轴均成 45° ,同样能够随经轴和纬轴一起旋转,如图 1 所示。

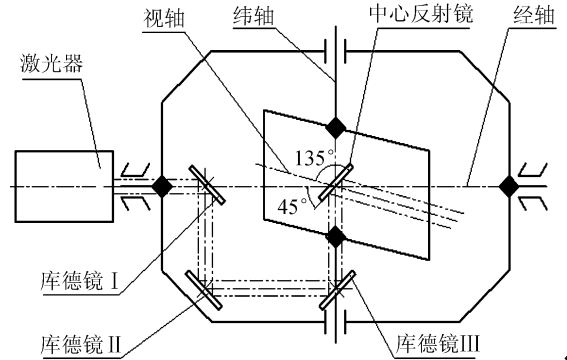


图 1 库德光路组成示意图

Fig. 1 Coude optical system

2.2 工作原理

从图 1 可以看出,库德光路是典型的全反射光路。激光器发出的光通过调整与经轴轴线平行(即光束中心与经轴重合),由于库德镜 I 与经轴相交成 45° ,光源发出的光照射在库德镜 I (库德镜 I 足够大,光源发出的光束全部照射在库德镜 I 上),光束经库德镜 I 反射转折 90° 照射到库德镜 II 上,然后由库德镜 II 转折 90° 照射在库德镜 III 上,并转折 90° 照射到中心反射镜上,光束经中心反射镜转折后与视轴平行,并随着经轴和纬轴的旋转照射到预定的发射方向。

3 库德光路的装调

从库德光路的组成可以看出,在装调过程中,需对各块库德镜按顺序逐个装调。本文主要针对经轴和纬轴转动精度均为 $2''$ 的水平式两轴转台库德光路进行装调和检测,其中要求库德光路的光束误差控制在 $8''$ 以内。

装调过程中采用 $0.2''$ 自准直平行光管作为库德光路的装调光源。通过自准直平行光管分别对平面反射镜进行自准直成像,即驱动经轴和纬轴旋转,分别带动两块基准平面反射镜转动,对基准平面反射镜和自准直平行光管 I、III 进行调整,使从平面反射镜反射回的十字丝像处于零位,然后把平行光管 I,平行光管 III,经轴基准平面反射

镜和纬轴基准平面反射镜实施紧固,将其作为库德光路的装调基准,如图 2 所示。

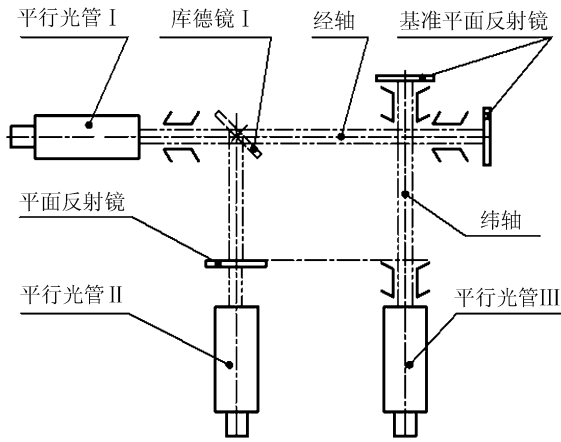


图 2 库德光路装调基准示意图

Fig. 2 Alignment measurement reference of Coude optical system

3.1 库德镜装调方法

库德光路装调基准建立后,同样采用自准直法对各块库德镜进行装调。库德镜 I 静态装调时通常采用平行光管 II 粗瞄库德镜 I,用平尺使其与平行光管 III 的光轴平行,确定平行光管 II 的位置,通过调整库德镜 I 直到平行光管 II 的十字丝像在平行光管 I 中处于零位。考虑库德镜 I 随经轴旋转时动态装调的情况,可在平行光管 II 与库德镜 I 之间增加平面反射镜,利用静态调整好的平行光管 II 确定平面反射镜位置,通过驱动经轴旋转来调整动态库德镜 I,即调整库德镜 I 使经轴在旋转过程中从平面反射镜返回的十字丝像处于零位,最后将库德镜 I 紧固,如图 2 所示。

库德镜 II、库德镜 III 的位置见图 3,同样利用平行光管 I 发出的光束照射库德镜 I,经库德镜 II,库德镜 III 直到纬轴基准平面反射镜,光束被反射返回平行光管 I,通过调整库德镜 II,库德镜 III 的位置,使返回平行光管的十字丝像处于零位,然后对库德镜 II 和库德镜 III 进行紧固。

中心反射镜的装调在装调完库德镜 I, II, III 的基础上进行。通过旋转纬轴,调整中心反射镜的转向使其对准经轴基准平面反射镜,平行光管 I 发出的光束折转到经轴基准平面反射镜,若光束原路返回平行光管 I 时,固定经轴,旋转纬轴,待返回平行光管 I 的十字丝像返回零位时,将纬轴锁紧,再次旋转经轴来进行装调,如图 3 所示。



图 3 库德光路装调示意图

Fig. 3 Alignment of Coude optical system

装调各块库德镜时,为实现库德光路的快速装调,建立了辅助装调模型来指导库德镜装调,以缩短装调周期,提高装调效率。

3.2 库德镜装调模型

坐标变换通常用来表示光路的转折关系。根据库德光路的特点,使用空间坐标变换来推导光束经转折后的变换模型^[10-11]。出于计算的考虑,分别建立坐标系 I, II, III, IV 和坐标系 V (见图 4),其中坐标系 I, IV, V 是坐标变换的辅助坐标系,II, III 是度量坐标系。分析过程主要针对库德镜 III 相对于坐标系 I 发生平移和旋转时,自准直平行光管上十字丝像的位置变化。

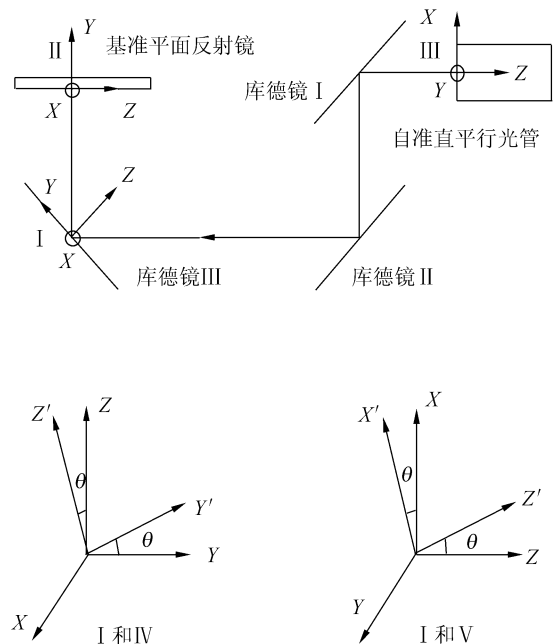


图 4 库德镜坐标变换示意图

Fig. 4 Coordinate transformation of Coude mirror 2 and 3

以库德镜Ⅲ绕Y轴旋转为例,当绕Y轴顺时针旋转 θ 角时,坐标I中入射光束的向量表示为 $[\mathbf{x}_0 \mathbf{y}_0 \mathbf{z}_0]$,第一次经库德镜Ⅲ后反射光束在坐标系I中的向量可表示为:

$$[\mathbf{x}_0' \mathbf{y}_0' \mathbf{z}_0'] = [\mathbf{x}_0 \mathbf{y}_0 \mathbf{z}_0] \cdot \mathbf{T}_1 \cdot \mathbf{T}_2 \cdot \mathbf{T}_1^{-1}, \quad (1)$$

其中 $\mathbf{T}_1 = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & -\sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix}$,为光束向量

由坐标系I变换到V的变换矩阵, $\mathbf{T}_2 =$

$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$,为坐标系V中库德镜Ⅲ上的入

射光束向量和反射光束向量之间的变换矩阵。经过平面反射镜反射后的反射光束在坐标系I中的向量表示为:

$$[\mathbf{x}_1' \mathbf{y}_1' \mathbf{z}_1'] = [\mathbf{x}_0' \mathbf{y}_0' \mathbf{z}_0'] \cdot \mathbf{T}_3 \cdot \mathbf{T}_4 \cdot \mathbf{T}_3^{-1}, \quad (2)$$

其中 $\mathbf{T}_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\pi/4) & -\sin(\pi/4) \\ 0 & \sin(\pi/4) & \cos(\pi/4) \end{bmatrix}$,为向量由

坐标系I变换到II的变换矩阵, $\mathbf{T}_4 =$

$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$,为坐标系II中平面反射镜上的

入射光束向量和反射光束向量之间的变换矩阵。

第二次经过库德镜Ⅲ反射光束在坐标系I中的向量可表示为:

$$[\mathbf{x}_3' \mathbf{y}_3' \mathbf{z}_3'] = [\mathbf{x}_1' \mathbf{y}_1' \mathbf{z}_1'] \cdot \mathbf{T}_1 \cdot \mathbf{T}_2 \cdot \mathbf{T}_1^{-1}, \quad (3)$$

经反射镜反射后的反射光束,即自准直光管接收到的光束,在坐标系I中的向量表示为:

$$[\mathbf{x}_4' \mathbf{y}_4' \mathbf{z}_4'] = [\mathbf{x}_3' \mathbf{y}_3' \mathbf{z}_3'] \cdot \mathbf{T}_2, \quad (4)$$

把自准直光管接收到的光束向量变换到坐标系III中:

$$[\mathbf{x}_5 \mathbf{y}_5 \mathbf{z}_5] = [\mathbf{x}_4' \mathbf{y}_4' \mathbf{z}_4'] \cdot \mathbf{T}_4 \cdot \mathbf{T}_5, \quad (5)$$

其中 $\mathbf{T}_5 = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$,为光束向量由坐标系

II变换到III的变换矩阵。把式(1)~(5)联立得出:

$$[\mathbf{x}_5 \mathbf{y}_5 \mathbf{z}_5] = [\mathbf{x}_0 \mathbf{y}_0 \mathbf{z}_0] \cdot \mathbf{T}_1 \cdot \mathbf{T}_2 \cdot \mathbf{T}_1^{-1} \cdot \mathbf{T}_3 \cdot \mathbf{T}_4 \cdot \mathbf{T}_3^{-1} \cdot \mathbf{T}_1 \cdot \mathbf{T}_2 \cdot \mathbf{T}_1^{-1} \cdot \mathbf{T}_2 \cdot \mathbf{T}_4 \cdot \mathbf{T}_5, \quad (6)$$

将 $[\mathbf{x}_0 \mathbf{y}_0 \mathbf{z}_0] = [0 \quad -1 \quad 1]$ 代入,可以计算出自准直光管接收到的十字丝与零点位置的夹角 $\beta = \arctan(\sqrt{x_5^2 + y_5^2} / z_5)$, β 的方位投影角 $\beta_x = \arctan(x_5 / z_5)$ 和高低投影角 $\beta_y = \arctan(y_5 / z_5)$ 。

同样可以推导出库德镜Ⅲ绕X轴旋转的关系。当库德镜Ⅲ在X,Y轴方向平移和绕Z轴旋转时,自准直光管接收到的十字丝像位置不变;当库德镜Ⅲ绕X和Y轴旋转时,由自准直光管接收到的十字丝像位置会改变。

同理,可以推导出库德镜II在X,Y轴方向平移和绕Z轴旋转时,自准直光管接收到的十字丝像位置不变;当库德镜II绕X和Y轴旋转时,自准直光管接收十字丝像位置会有相应改变。

根据建立的辅助装调模型及推导的相关结论,可以缩短库德光路的装调周期。

4 库德光路精度检测

完成库德镜装调后,需对库德光路的晃动误差进行检测。由于库德光路随经轴与纬轴旋转,因此对库德光路随纬轴和经轴的转动误差分别进行检测,最后取其均方根值作为库德光路的晃动误差。

4.1 随纬轴转动误差

库德光路随纬轴转动的误差检测通过固定经轴,转动纬轴来进行(见图3)。从平行光管I中读取十字丝像偏离零位的数值并将其记录,检测结果如表1所示。其中 X_1 、 Y_1 为平行光管I中两个垂直坐标系下对应的读数。

取检测结果A的最大值作为库德光路随纬轴的转动误差。由于是通过自准直平行光管对基准平面反射镜返回像的检测,因此从平行光管中读出的数值是对应反射镜转角的2倍,即库德光路随纬轴的转动误差为 $A_{\max} / 2 = 4.3''$ 。

表 1 库德光路随纬轴转动的检测结果

Tab.1 Measurement results of Coude optical system with latitude axis rotated (")

纬轴转动 角度(°)	X_1	Y_1	$A = \sqrt{X_1^2 + Y_1^2}$
0	0	0	0
45	2.3	1.6	2.8
90	3.1	3.6	4.8
135	3.6	7.7	8.5
180	3.3	6.5	7.3
225	2.7	5.8	6.4
270	-2.6	2.2	3.4
315	-2.4	-0.5	2.5
360	0	0	0

表 2 库德光路随经轴转动检测结果

Tab.2 Measurement result of Coude optical system with longitude axis rotated (")

经轴转动 角度/(°)	X_2	Y_2	$B = \sqrt{X_2^2 + Y_2^2}$
0	0	0	0
45	-5.7	8.6	10.3
90	-8.5	4.3	9.5
135	-7.8	-7.9	11.1
180	-6.9	-9.8	12.0
225	-3.6	-8.9	9.6
270	-3.3	-6.5	7.3
315	-3.1	-4.2	5.2
360	0	0	0

4.2 随经轴转动误差

库德光路随经轴的转动误差检测通过驱动经轴的旋转来进行。依然从平行光管 I 中读取经轴转动过程中十字丝像的偏离值,检测结果见表 2。其中 X_2 、 Y_2 是平行光管 I 中两个垂直坐标系下对应的读数。

同样,计算结果中 $B_{\max}/2 = 6.0''$ 是库德光路随经轴的转动误差。

根据上述检测数据,将 $A_{\max}/2$ 与 $B_{\max}/2$ 取均方根作为最终库德光路的晃动误差,计算结果为:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(A_{\max}/2)^2 + (B_{\max}/2)^2}{2}} = 5.2'' \quad (7)$$

从检测结果可以看出,经轴、纬轴旋转精度均为 $2''$ 的水平式两轴转台在工作过程中库德光路的晃动误差仅为 $5.2''$,已满足库德光路光束误差为 $8''$ 的技术要求。

5 结 论

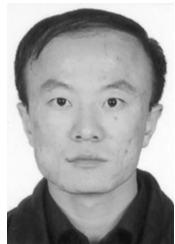
本文针对水平式两轴转台库德光路晃动误差小的要求,提出了采用自准直平行光管和平面发射镜相组合的自准直装调和检测系统,并结合库德光路的特点推导出基于坐标变换的辅助装调模型,最终实现了对库德光路的快速高精度装调。对库德光路随经轴和纬轴转动误差的检测结果显示,两旋转轴系精度均为 $2''$ 的水平式经纬仪中库德光路的晃动误差仅为 $5.2''$,完全达到了指标 $8''$ 的要求,表明所采用的装调检测方法具有装调周期短、精度高、成本低的特点,可以给类似反射镜组合系统的装调检测提供一定的借鉴和参考。

参考文献:

- [1] STEFAN, RODRIGO A, PHILIPPE D, *et al.*. VLT astronomical site monitor: control, automation, and data flow[J]. *SPIE*, 2000, 4009: 338-349.
- [2] 韩雪冰, 张景旭, 王志, 等. 水平式光电望远镜照准差检测方法[J]. *光电工程*, 2009, 36(6): 63-67.
HAN B X, ZHANG J X, WANG Z, *et al.*. Research of alt-alt photoelectric telescope sighting error measurement [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, 36(6): 63-67. (in Chinese)
- [3] BILLMAN K W, BREAKWELL J A, DUTTA K, *et al.*. ABL beam control laboratory demonstrator [J]. *SPIE*, 1999, 3706: 172-179.
- [4] BILLMAN K W, HORWITZ B A. Airborne laser system common path/common mode design approach[J]. *SPIE*, 1999, 3706: 196-203.
- [5] 刘万里, 曲兴华, 欧阳健飞, 等. 激光跟踪测量系统角度自动校正装置设计[J]. *光学 精密工程*, 2008, 16(9): 1695-1700.
LIU W L, QU X H, OUYANG J F, *et al.*. Design of angular automatic calibration mechanism for laser tracker system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(9): 1695-1700. (in Chinese)
- [6] 闫勇刚, 欧阳健飞, 夏飞. 激光制导测量机器人及

- 几何误差分析[J]. 光学精密工程, 2008, 16(5): 907-911.
- YAN Y G, OUYANG J F, XIA F. Laser guiding measurement robot and its geometric error analysis [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(5): 907-911. (in Chinese)
- [7] 史亚莉, 高云国, 张磊, 等. 提高 CCD 激光自准直测角精度的硬件方法[J]. 光学精密工程, 2008, 16(4): 726-732.
- SHI Y L, GAO Y G, ZHANG L, *et al.*. Improvement of measuring accuracy of CCD laser autocollimator by changing hardware parameters[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(4): 726-732. (in Chinese)
- [8] HIGGS J C. Overview of the ABL-firepond active-tracking and compensation facility[J]. *SPIE*, 1998, 3381: 14-18.
- [9] 史亚莉, 高云国, 邓伟杰. 高能激光发射系统光束监测与装调的新方法[J]. 光电工程, 2008, 35(2): 29-33.
- SHI Y L, GAO Y G, DENG W J. Novel method of beam monitoring and alignment for high-energy laser launching system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, 35(2): 29-33. (in Chinese)
- [10] 王家骐. 光学仪器总体设计[M]. 长春: 长春光学精密机械与物理研究所青年职工培训班教材, 2008.
- WANG J Q. *Optical Instrument Collectivity Design* [M]. Changchun: Teaching Material of Young Employee of Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 2008. (in Chinese)
- [11] 金光, 王家骐, 倪伟. 利用坐标变换推导经纬仪三轴误差[J]. 光学精密工程, 1999, 7(5): 89-94.
- JIN G, WANG J Q, NI W. Deduction of errors of three axis of theodolites using coordinate transformation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999, 7(5): 89-94. (in Chinese)

作者简介:



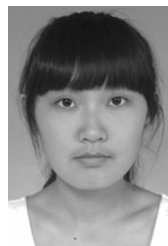
乔健(1980—),男,山西忻州人,博士,助理研究员,2008年于吉林大学获得博士学位,主要从事光电仪器设备的设计与研究。E-mail: qiaojj99065@163.com



高云国(1955—),男,山东乳山人,研究员,博士生导师,1991年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获硕士学位,主要从事光电仪器设备、精确定位方法与机构、机械传动方法的研究。E-mail: gaoyunguo@163.com



韩光宇(1972—),男,吉林梨树人,副研究员,2004年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获硕士学位,主要从事光电仪器设备、精密机械设计的研究。E-mail: hanlamost@163.com



赵天(1989—),女,吉林长春人,中国农业大学信息与电气工程学院电子信息工程专业学生。E-mail: zhaotian19890403@126.com