

基于空间机构学的 Coude 光路装调方法

张丽敏, 韩西达, 曹玉岩, 王文攀

(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: 库德光路光学元件多且空气间隔长, 导致随着望远镜口径的增大装调难度急剧增加, 因此将计算机辅助装调技术引入到 Coude 光路装调对准中。首先利用了机器人运动学方程的 D-H 表示法对库德全反射光路进行建模, 然后根据光路误差来源讨论了蒙特卡洛模拟在 Coude 光路装调对准中的应用, 通过分析各个镜面的影响权重, 确定了系统装调顺序; 最后, 将蒙特卡洛法作为优化算法, 得出了 Coude 光路装调后的理想结果。通过模拟仿真, 证明了该方法可以将 Coude 光路靶面目标圆半径由 5 mm 下降到装调后的 0.3 mm。结果表明: 该方法简单、快速, 而且精度高, 对于全反射光路的装调是可行有效的。

关键词: Coude 光路; 蒙特卡洛; 计算机辅助装调技术

中图分类号: TH752 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0818004

Coude light path alignment scheme with spatial mechanism

Zhang Limin, Han Xida, Cao Yuyan, Wang Wenpan

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

Abstract: Coude light path consists of several optical elements, which have large interval, so the alignments become very difficult as the increase of telescope aperture, as a result, computer aided adjustment technique was applied to analyze reflecting light path error, such as Monte Carlo statistic tolerance. First, an analytical model based on robot kinematics equation of D-H notation was derived for Coude light path alignment scheme. Then, the theory of Monte Carlo simulation was studied, its application in Coude path alignment was discussed. By the analysis of the weight of every mirror in the effect of the path alignment, the final adjustment order was confirmed. Lastly, Monte Carlo methods was made as the optimization algorithm to find out the perfect result of the Coude alignment. Simulation results indicate that by the use of the Monte Carlo methods, the radius of object circle is reduced from 5 mm to 0.3 mm, the adjustment of Coude path is simple, fast, and precision is improved, as a broad applicable tolerance design method can solve the adjustment of all reflecting light path.

Key words: Coude light path; Monte Carlo; computer aided adjustment technique

收稿日期: 2016-12-10; 修订日期: 2017-01-20

基金项目: 国家自然科学基金(11403022)

作者简介: 张丽敏(1981-), 女, 副研究员, 博士, 主要从事光机结构设计方面的研究。Email: zhangtqx@163.com

0 引言

随着望远镜口径的增加,其功能应用也越来越多,以提高主望远系统的使用效率,如空间目标探测、自适应高分辨率成像、红外成像与探测等,这些功能应用均是通过主光学系统和多个子光学系统的对接耦合来实现,库德(Coude)光路便是将主光学系统与机下子光学系统对接不可或缺的一部分。Coude 光路是典型的全反射光路,光路内各反射镜安装于望远镜的方位轴和俯仰轴上,它的主要作用是将主望远系统的光束传递到机下的光学实验室,在尽可能减少能量损失的前提下,通过使主望远系统焦点的切换,为相应的子光学系统提供良好质量的对接光束。由于经 Coude 光路折转的光束与末端探测器视轴之间的位置关系直接影响望远镜的探测结果,因此 Coude 光路的精确对准是保证机下光学系统成像质量的关键^[1]。光路中反射镜之间间隔较大,环境对系统的影响非常显著。随着望远镜口径的增大,Coude 光路的尺寸也随之扩大,装调的难度进一步提高。

目前通常使用的装调方法包括:通过 CCD 等探测器观察像点和像质进行定性分析,然后凭借经验装调;基于自准直的五棱镜安装方法,首先通过自准直平行光管建立方位轴和俯仰轴作为基准,然后通过五棱镜和平晶逐块安装 Coude 反射镜^[2]。方法一周期长,精度低,适合短小型光路;方法二效率得到了提升,但是装调精度受自准直平行光管的指向精度、自准直平行光管的安放精度、五角棱镜的定角转向精度以及五角棱镜的定位精度等影响,而且只适合静态对准装调。但是随着望远镜口径的增大和光学系统复杂度的提升,在望远镜工作时,风载、振动、重力畸变及温度变化引起的支撑结构变形等均会造成光路的对准误差,进而使成像质量和指向精度下降。为了提高望远镜工作时的成像质量和指向精度,必须及时修正对准误差^[3]。因此针对光学元件多、空气间隔长的 Coude 光路也需要进行深入研究以保证光路的对准和稳定。

在国内 Coude 光路装调时,普遍通过 CCD 相机观察像点和像质进行定性分析,然后凭借经验进行装调,成本高、效率低。另一方面技术问题在于由于 Coude 光路反射的次数较多,导致参数庞杂,直接利用解析解进行闭环装调的难度也非常高;随

着计算机辅助装调在望远镜光路装调中的普遍应用^[4-5],光学元件多、空气间隔长的 Coude 光路也应该引入相关技术以保证光路的稳定。

公差分析的方法有极值法和统计公差方法两类。对于极值法,从理论角度考虑,提高 Coude 光路中机械元件的加工精度,可以减小光路对准误差,但是将增加制造成本,尤其在大口径望远镜系统中。而统计公差方法中的蒙特卡洛模拟法,它可以进行各种随机变量(包括线性、非线性、尺寸链)的模拟计算,是一种通用的公差分析技术。将此方法应用于 Coude 光路的装调问题之中,可以很好地得到系统的统计学表征,并不需要将所有参数一一确定^[6-8]。

文中首先利用机器人运动学方程的 D-H 表示法^[9]对 Coude 全反射光路进行建模;之后利用蒙特卡洛法^[10],通过分析各个反射镜面的影响权重,将最后一片反射镜作为装调的第一选择,确定了系统装调顺序;最后,将蒙特卡洛法作为优化算法,使得 Coude 光路靶面画圈平均半径由 5 mm 下降到装调后的 0.3 mm。文中的工作对于全反射光路的装调问题有着很好的指导意义。

1 基本原理

1.1 Coude 光路模型

对于某 2 m 级口径地基望远镜,其简化光路及坐标系如图 1 所示。由图可知,此 Coude 光路为全反射光路,虽然单个反射镜光线反射规律明显,但是光路中有多个反射镜产生作用,则光路角度和光程均会发生改变。

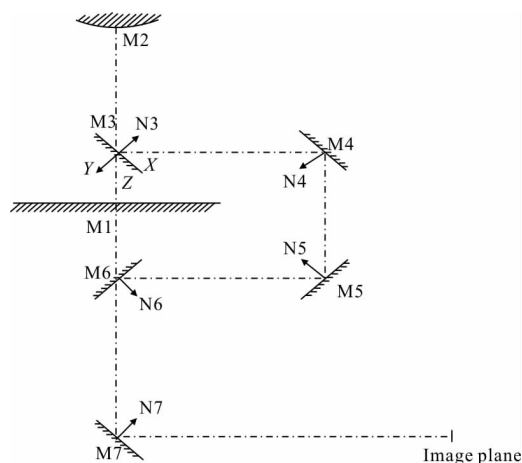


图 1 2 m 级 Coude 光路

Fig.1 Sketch of 2 meter Coude beam path

文中利用机器人运动学方程的 D-H 表示法对 Coude 全反射光路进行建模。将两两反射镜间的光线假设为机器人连杆和关节,利用 D-H 表示法建立其模型。D-H 参数如表 1 所示。图 2 表示了三个关节,在这些关节的前后可能有其他关节。

表 1 D-H 参数表

Tab.1 D-H parameters

#	θ	d	a	$\alpha/(^{\circ})$
1	θ_1	0	0	-90
2	0	d_2	0	90
3	θ_3	0	0	-90
4	0	d_4	0	90
5	θ_5	0	0	-90
6	0	d_6	0	90

θ 表示旋转关节的关节变量,此处表示光线夹角的变化, d 表示滑动关节的关节变量,此处表示光路光程的变化。其中 θ_1 为从 M3 镜来光偏角, d_2 为 M3 与 M4 镜光线间距。同理可知 θ_3 、 θ_5 、 d_4 和 d_6 参数的含义。

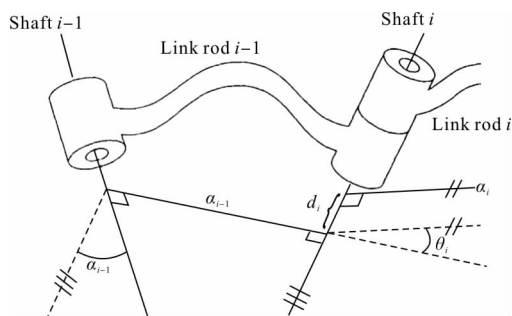


图 2 相邻关节的 D-H 表示

Fig.2 D-H notation of the adjacent joints

Coude 全反射光线几何追迹可以通过坐标变换实现,利用光线反射矩阵可以很好地模拟一次反射的情况。Coude 光路装调对准时,对光线末端的入射位置和空间角度都有要求。光线末端相当于机器人末端连杆,其位置和姿态可通过变换矩阵 ${}^0_n T$ 计算出来。

$${}^0_n T = {}^0_1 T {}^1_2 T {}^2_3 T \cdots {}^{n-1}_n T = A_1 A_2 A_3 \cdots A_n \quad (1)$$

由于 Coude 光路为空间光路,模型复杂。为方便建立模型,首先对如图 1 所示的 XZ 平面内的 Coude 光路进行建模。

相间光线的变换矩阵计算结果如下:

$$A_n = \begin{bmatrix} C\theta_n & -S\theta_n C\alpha_n & S\theta_n S\alpha_n & \alpha_n C\theta_n \\ S\theta_n & C\theta_n C\alpha_n & -C\theta_n S\alpha_n & \alpha_n S\theta_n \\ 0 & S\alpha_n & C\alpha_n & d_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

由表 1 可分别计算矩阵 $A_1 \sim A_6$ 得到光线最终姿态矩阵:

$${}^0_6 T = \begin{bmatrix} C_5(C_1 C_3 - C_5(C_1 S_3 - S_1 S_3)) & -S_5(C_1 C_3 - C_5(C_1 S_3 - S_1 S_3)) & S_5(C_1 C_3 - C_5(C_1 S_3 - S_1 S_3)) & -d_2 S_1 - d_6(C_5 \cdot \\ C_5(C_1 C_3 - C_5(C_1 S_3 - S_1 S_3)) & -S_5(C_1 C_3 - C_5(C_1 S_3 - S_1 S_3)) & S_5(C_1 C_3 - C_5(C_1 S_3 - S_1 S_3)) & -d_2 S_1 - d_6(C_5 \cdot \\ C_5(C_1 C_3 - C_5(C_1 S_3 - S_1 S_3)) & -S_5(C_1 C_3 - C_5(C_1 S_3 - S_1 S_3)) & S_5(C_1 C_3 - C_5(C_1 S_3 - S_1 S_3)) & -d_2 S_1 - d_6(C_5 \cdot \\ C_5(C_1 C_3 - C_5(C_1 S_3 - S_1 S_3)) & -S_5(C_1 C_3 - C_5(C_1 S_3 - S_1 S_3)) & S_5(C_1 C_3 - C_5(C_1 S_3 - S_1 S_3)) & -d_2 S_1 - d_6(C_5 \cdot \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

假定输入光线偏角 θ_1 已知, d_2 、 d_4 分别为 θ_3 、 θ_5 的函数, θ_3 、 θ_5 为变量。那么可知 Coude 全反射光线可通过调整 M4、M5 两块反射镜旋转自由度使得射入 M6 镜光线位置和姿态与理想重合。

1.2 蒙特卡洛法

对于 Coude 光路的装调,使用蒙特卡洛法的基本思路就是对于各个反射镜的平移以及转动自由度加入服从正态分布的扰动,之后利用计算机结合 1.1 节提出的方法得到靶面上的光点的位置分布。通过调整各个镜面四个自由度所服从分布,可以得到 Coude 光路中各个反射镜的影响系数。相对于解析解,文中的算法时空效率大为提高,且对结果可以进行定性或定量的表述;另一方面,通过增加实验次数,统计学方法的逼近程度也会相应提高。

1.3 误差来源解析

望远镜装调的最终目的是光学系统像质达到设计要求和光轴上的目标在靶面上成像点位置稳定。通过调整主次镜各自的位置和二者之间的间隔可以满足像质要求,而要达到成像点位置稳定,对于设计有 Coude 光路的系统,必要条件之一是穿过方位轴

的光线必须与方位回转轴线重合。图 3 所示为 Coude 光路未调整时光路反射示意图。

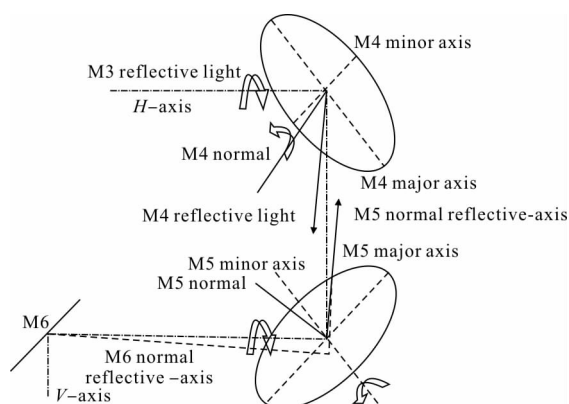


图 3 未对准反射光路

Fig.3 Sketch of reflective light path unaligned

根据图 3 可以看出,当调整主镜、次镜和反射镜 M3 达到理想位置后,光线逆向追迹,反射镜 M6 反射光线与望远镜垂直轴重合时,反射镜 M5 反射垂直轴线与反射镜 M4 反射光线不重合,说明此时光路终端靶面上的像点不稳定。此时,可以调整反射镜 M4、M5 和 M6 中任意两块反射镜的转动自由度或者其中一块反射镜的转动自由度和平移自由度。

另外一项误差源为轴系误差,包括方位轴系晃动误差、俯仰轴系晃动误差、方位轴系与俯仰轴系不垂直和不相交误差,以及视轴与方位轴不相交误差和视轴与俯仰轴系不垂直误差等。

方位轴系和俯仰轴系的误差均分为随机误差和系统误差两部分,这些误差会引起轴系内各反射镜的回转误差,从而导致 Coude 光路的光束方向发生偏转,其中系统误差可以通过调整后光路进行修正。方位轴系误差主要包括方位轴对基面的调整误差和轴系轴承环面加工平行度误差引起的系统晃动误差,俯仰轴系误差主要包括由左右轴头两端不同轴等因素引起的系统晃动误差和俯仰轴与方位轴的垂直度误差,这些误差均可以视为服从正态分布。

2 数值仿真

2.1 权重分析

如图 1 所示,某 2 m 级口径地基望远镜光路中反射镜之间的空间间隔十分可观,其中 M5 与 M7

间隔大于 10 m, M3 与 M4 之间间隔大于 2.5 m,采用传统的手动装调方法将导致装调难度大、周期长,很难在规定的时间内完成。现将文中的方法运用于此望远镜 Coude 光路计算机辅助装调之中。

忽略其他系统误差,设置望远镜俯仰轴误差和方位轴误差均服从正态分布,均值为 0 方差分别为 $2.5''$ 和 $3''$ 。

当望远镜俯仰角和方位角变化时,对 4 个不同状态采样点有 50 个,靶面的像点位置如图 4 所示。

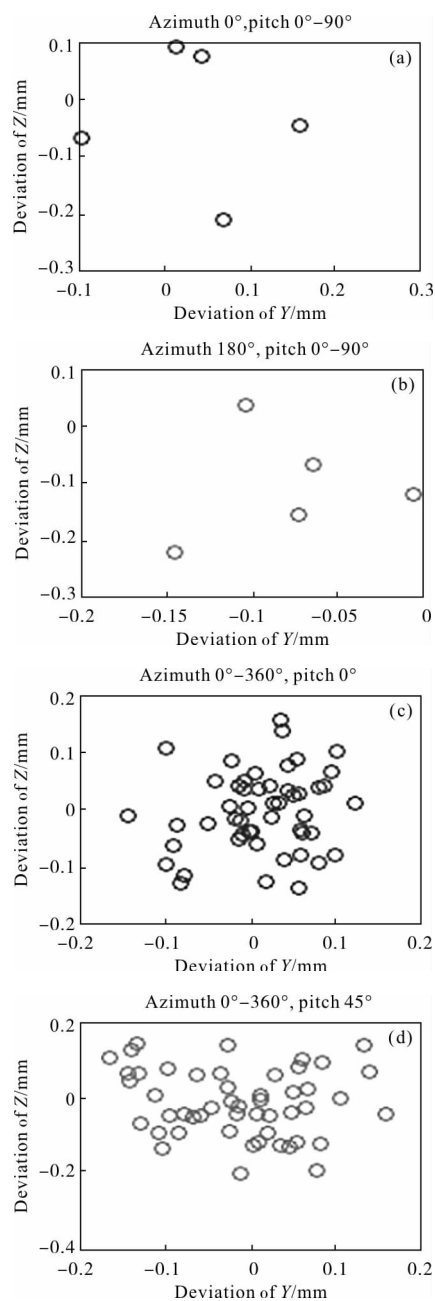


图 4 靶面上的像点位置

Fig.4 Position of image spot at the target plane

将靶面上 95% 像点围起来的最小圆半径作为反馈指标。单独地向库德光路中各个反射镜加入三个方向的位移量与三个方向的转动量。假设望远镜入射光为平行光, 在镜面转动自由度上添加 $1''$ 的角度偏差, 在平移自由度上添加 0.1 mm 的位置偏差。

望远镜俯仰角固定, 绕方位转动时, M3~M6 反射镜的偏移均导致像点在靶面画圆, 圆的半径与反射镜的偏移量相同, 均为 0.1 mm。在固定方位角时望远镜绕俯仰角转动, M3 在 X 轴和 Z 轴的偏移导致像点在靶面的轨迹不同, 图 5 为 M3 沿 Z 轴偏移 0.1 mm 时, 像点在靶面的轨迹图。对 M4~M6 的平移分别独立添加误差, 望远镜俯仰运动时像点在靶面的位置为偏离靶面圆心的固定点。

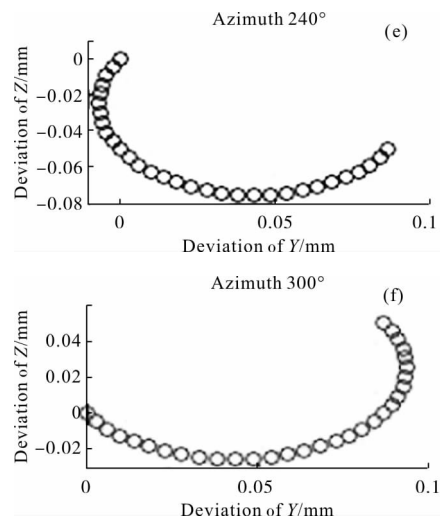
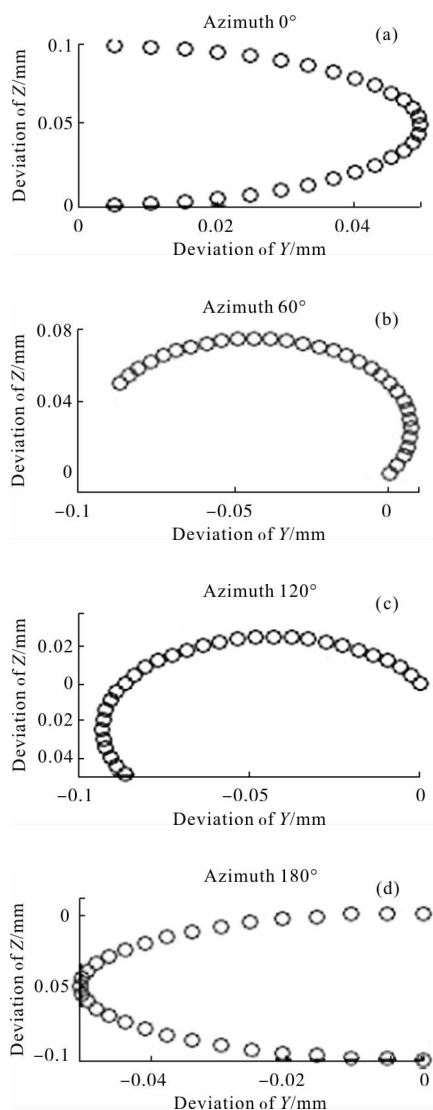


图 5 M3 平移对像点位置的影响

Fig.5 Effect of M3's translation on the position of image spot

各反射镜绕 Y 轴和 Z 轴独立转动时, 像点在靶面的轨迹基本为圆形, 圆半径大小如图 6 所示, 单位 mm。

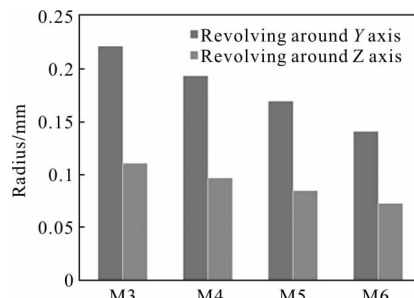


图 6 各反射镜转动对像点位置的影响

Fig.6 Effect of different mirror's rotation on the position of image spot

根据以上分析, M3~M6 的平移误差对像点在靶面位置的影响没有放大作用, 而反射镜的转动误差导致像点位置的变化比较大, 因此对转动误差的校正应该是研究的重点。M6 的转动对像点位置的影响最小, 如果仅调节 M6 即可满足要求, 可以将该反射镜作为调节镜, 来补偿由之前系统引入的光线偏移, 从而降低对调整机构的精度要求。

2.2 优化结果

优化过程通过编写 Matlab 程序实现, 程序的流程图见图 7。

利用蒙特卡洛法作为优化算法, 寻找尽可能好的装调结果, 分别对 M6 的绕 Y 轴转动自由度和绕

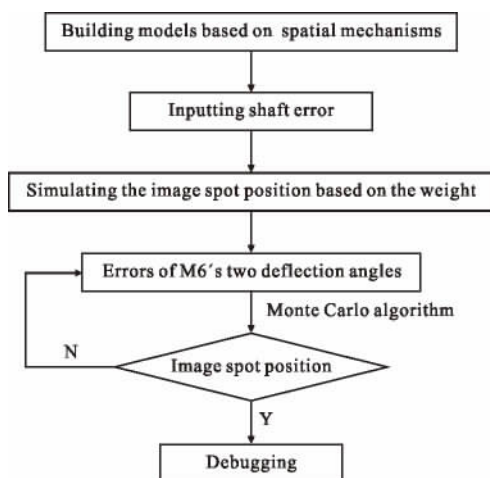


图 7 优化流程图

Fig.7 Flow chart of optimization

Z 轴转动自由度同时独立地添加均值为 0, 标准差为 $-20''$ 和均值为 0, 标准差为 $45''$ 的高斯误差, 对于不同状态下进行 5 000 步优化, 靶面上像点优化前后的位置如图 8、9 所示。

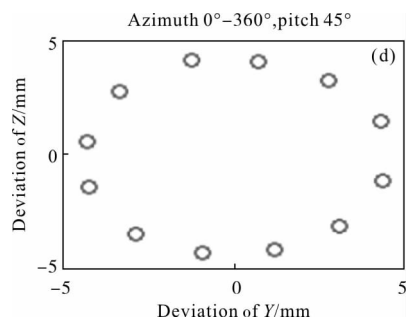
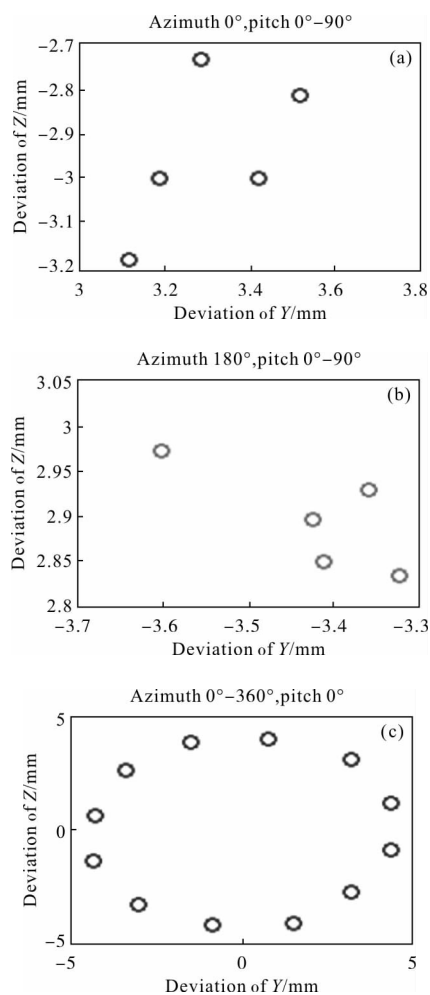


图 8 CCD 优化前靶面像点位置

Fig.8 Image spot position on the CCD before optimization

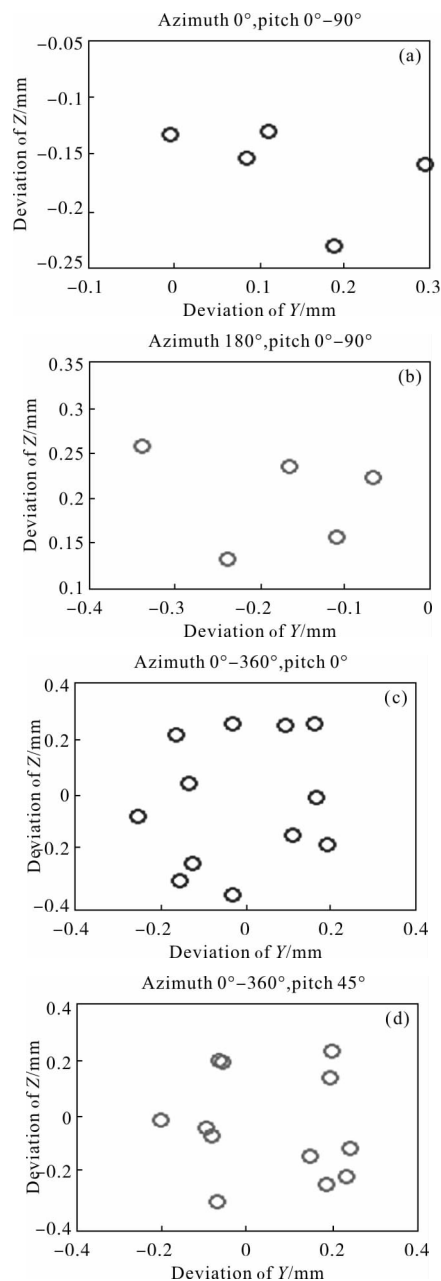


图 9 CCD 优化后靶面像点位置

Fig.9 Image spot position on the CCD after optimization

由图可知, 经过优化后的目标圆的半径下降一个数量级, 达到约 0.3 mm, 而此中轴系误差造成的目标圆半径约为 0.18 mm。可以证明假设的正确性与方法的可行性。

通过以上分析可得, 利用计算机将靶面画圈平均半径作为反馈量, 通过控制 M6 的转动, 从而使 Coude 光路的光线传递误差满足设计要求。对于没有反馈量的情况, 通过之前的调试, 建立误差查询表亦可对于系统装调有很好的指导意义。

3 结 论

随着望远镜口径的增大, 使得简单、快速的 Coude 光路装调问题成为亟待解决的关键技术之一。文中第一次提出通过类比机器人运动学方程的 D-H 表示法来建立 Coude 光路数学模型, 为光路的快速装调奠定了良好的理论和分析基础。然后, 合理分析影响装调的误差来源, 通过统计公差方法——蒙特卡洛法对于 2 m 级口径地基望远镜全反射 Coude 光路进行了分析和模拟, 结果表明, 此方法能够使装调简捷便利, 且比较准确地达到系统精度要求, 为后续机械结构设计以及同类产品的研制提供了理论支持。

此外, 在实际的科学研究与工程实践之中, 系统的数学模型虽然可以建立起来, 但是参数往往过于冗杂, 结果过于复杂, 对于问题的解决贡献甚微, 但是使用文中的方法, 跳过具体的表达, 从输入输出的关系直接分析系统的统计学特性, 对于此类问题的求解有一定的贡献。

参考文献:

- [1] 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*, 2010, 18(8): 1760-1765. (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*, 2010, 18(8): 1760-1765.
- [2] Li Qingbo, Wang Hui. Alignment of Coude optical system by the pentaprism[J]. *Laser & Infrared*, 2014, 44(7): 792-795. (in Chinese)
- [3] Zhang Xiaoming. Study on the technique of real time alignment of optical system of telescope [D]. Chengdu: The Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
张晓明. 望远镜光路实时对准方法研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2014.
- [4] Xiao Wenjian, Ma Dongxi, Chen Zhibin, et al. Pointing uncertainty evaluation of optical axis in large-scale spatial angle measuring system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(11): 230-236. (in Chinese)
肖文健, 马东玺, 陈志斌, 等. 大尺寸空间角测量系统光轴指向不确定度评定 [J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(11): 230-236
- [5] Zhang Dongge, Fu Yutian. Surrogate model used for computer aided alignment [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(3): 680-685. (in Chinese)
张东阁, 傅雨田. 计算机辅助装调的代理模型方法 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(3): 680-685.
- [6] Dan Blanco, Myung Cho, Larry Daggert, et al. Control and support of 4-meter class secondary and tertiary mirrors for the Thirty Meter Telescope [C]//SPIE, 2006, 6273: 62731A.
- [7] Wang Zengfa, Sun Lina, Li Gang, et al. Accuracy analysis on autonomous guiding of airborne opto-electronic platform [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43 (11): 3585-3591. (in Chinese)
王增发, 孙丽娜, 李刚, 等. 机载光电平台自主引导精度分析[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(11): 3585-3591.
- [8] Goodwin G C, Payne R L. Dynamic System Identification-experiment Design and Data Analysis [M]. New York: Academic Press, 1977.
- [9] Farley C T, Gonzalez O. Leg stiffness and stride frequency in human running [J]. *Journal of Biomechanics*, 1996, 29 (2): 181-186.
- [10] Li Baofeng, Sun Hanxu, Jia Qingxuan, et al. Calculation of space robot work space by using Monte Carlo method [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 20(4): 79-85. (in Chinese)
李保丰, 孙汉旭, 贾庆轩, 等. 基于蒙特卡洛法的空间机器人工作空间计算[J]. *航天器工程*, 2011, 20(4): 79-85.