

反射光路的计算机辅助装调模型

史亚莉^{1,2}, 高云国¹, 邓伟杰^{1,2}

(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. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:对反射光路中可能出现的两个反射镜之间的空间位置关系进行了分析。基于直角坐标系中的坐标变换原理, 推导法线平面平行、法线平面垂直、法线空间垂直三种位置关系下反射镜组的光路模型, 作为指导计算机辅助装调的模型依据。利用 Matlab 对光路模型进行仿真, 更直观的指导装调。

关键词:计算机辅助装调; 直角坐标变换; 光路模型; Matlab 仿真

中图分类号:TH74; TH71 **文献标识码:**A

Model for Computer-aided Alignment of Reflective Optical System

SHI Ya-li^{1,2}, GAO Yun-guo¹, DENG Wei-jie^{1,2}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: In order to satisfy the optoelectronic equipment's high precision requirements, the advanced optical system of these instruments became more complex and its alignment became more difficult. Computer-aided alignment proposed as a new method can achieve the system's alignment fast and accurately. In this paper, possible positions of two mirrors in the reflective optical system were analyzed and given. The models which are normal parallel in plane, normal perpendicular in plane and normal perpendicular in space, based on the principle of rectangular coordinate transformation were deduced to guide the computer-aided alignment. In the end, the models were simulated by Matlab for supervising the alignment directly.

Key words: computer-aided alignment; rectangular coordinate transformation; optical model; matlab simulation

1 引言

从1970-1985年, Itek公司研制出了许多成像质量优于 Cassegrain 和 Gregorian 设计的全反射、无中心遮拦、视场大、全波段应用的光学系统, 但却无法将系统装调到接近设计的成像质量。于是, 该公司采用了计算机辅助装调的方法, 达到了手工装调无法达到的结果, 从而为计算机辅助装调创立了一个良好的开端^[1-2]。

光学系统的计算机辅助装调技术, 是通过计算机对实时检测结果与理论结果进行对比分析, 通过必需的数学模型处理, 预测系统中零件的失调方位和量值以指导实际装调。随着光机电设备光学系统变得越来越复杂, 精度要求越来越高, 快速成功的装调已成为一个关键性问题。传统的装调方法装调时

间长且很难达到所需的精度要求, 采用计算机辅助装调技术, 能够确保足够的装调精度。

高能激光发射系统等全反射光路系统, 一般采用顺序装调, 即逐个安装调整的原则。本文分析了反射光路中可能出现的两个反射镜之间的三种典型相对空间位置关系, 基于光学仪器的坐标变换原理, 推导出相应的计算机辅助装调模型, 利用 Matlab 对光路模型进行仿真, 从而更直观的指导装调。使用

基金项目: 国家“863”高技术研究发展计划项目(No. 2006AA04Z367); 中科院长春光机所三期创新工程项目(No. 061X20C060)资助。

作者简介: 史亚莉(1982-), 女, 博士研究生, 主要从事高能激光发射系统光束监测与检测装调方面的研究。E-mail: shiyali_825@126.com

收稿日期: 2008-10-10

本文方法,装调时可以根据参考屏上成像光斑的位置,快速计算出反射镜之间的相对偏移量,实现快速高精度的装调。

2 反射镜空间位置分析

以高能激光发射系统为例,系统采用全反射光路,为了使从高能激光器发出的激光束扩展到主孔径大小,并经过万向架进入主孔径发射出去,系统使用的反射镜有20片之多。图1为由反射镜1~4组成的库德光路示意图,是典型的全反射光路。采用库德折转光路,当主机架转动时,经过库德折转光路的光束不随之转动,保持与望远镜同轴^[3-4]。

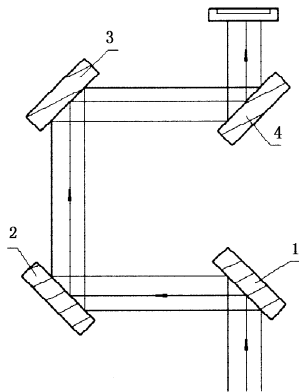


图1 库德折转光路示意图

反射系统中两个反射镜的空间相对位置关系主要有三种,如图2所示:①两反射镜的法线在同一平面且平行,光线经过之后方向不变,位置平移;②两反射镜的法线在同一平面且垂直,光线经过之后方向改变180°,位置平移;③两反射镜的法线不在同一平面且空间垂直,光线经过之后方向空间改变90°。

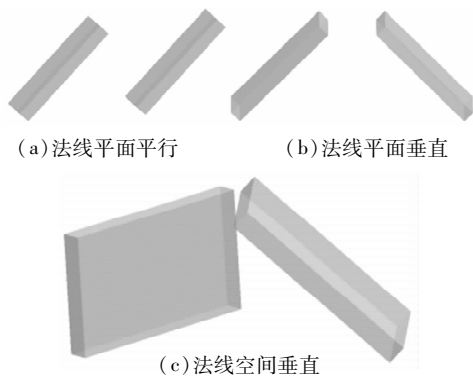


图2 反射镜位置关系示意图

3 光学仪器中的坐标变换^[5]

一个矢量可以在任何坐标系内表示出来。在分析光电测量误差中,虽然偶尔应用球坐标系会更方便些,但通常总是应用直角坐标系。一般都是通过指定原点、X轴、Y轴和Z轴的方向来定义一个直角坐标系。为此,定义三个单位矢量以指明相互垂直的三个轴的方向,任一矢量均可以用这三个单位矢

量的线性组合来表示。三个单位矢量的集合通常称为“坐标基”。坐标变换只不过是改变矢量的坐标基。经坐标变换后,矢量的大小和方向保持不变,仍表示同一物理量。用齐次坐标表示的三维图形的坐标变换如下:

(1) 图形平移

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & e \\ 0 & 1 & 0 & f \\ 0 & 0 & 1 & g \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x+e \\ y+f \\ z+g \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix}$$

图形在 x, y, z 方向分别移动 e, f, g 。或者说坐标系原点相对图形在 x, y, z 方向分别移动 $-e, -f, -g$ 。

(2) 图形绕 x 轴旋转

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y\cos\theta - z\sin\theta \\ y\sin\theta + z\cos\theta \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix}$$

即 $x' = x, y' = y\cos\theta - z\sin\theta, z' = y\sin\theta + z\cos\theta$ 。

此时也可视作坐标系相对图形绕 x 轴旋转“ $-\theta$ ”角之后的结果。

(3) 图形绕 y 轴旋转

$$\begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x\cos\theta + z\sin\theta \\ y \\ -x\sin\theta + z\cos\theta \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix}$$

即 $x' = x\cos\theta + z\sin\theta, y' = y, z' = -x\sin\theta + z\cos\theta$ 。

此时也可视作坐标系相对图形绕 y 轴旋转“ $-\theta$ ”角之后的结果。

(4) 图形绕 z 轴旋转

$$\begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x\cos\theta - y\sin\theta \\ x\sin\theta + y\cos\theta \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix}$$

即 $x' = x\cos\theta - y\sin\theta, y' = x\sin\theta + y\cos\theta, z' = z$ 。

此时也可视作坐标系相对图形绕 z 轴旋转“ $-\theta$ ”角之后的结果。

4 基于坐标变换的光路模型

4.1 数学模型推导

坐标变换通常被用来表示光路的转折关系。使用空间坐标变换推导出光束经过三种基本光路的变换模型,可以为指导装调提供理论依据。以法线平

面平行的光路模型为例介绍光路模型的建立过程。

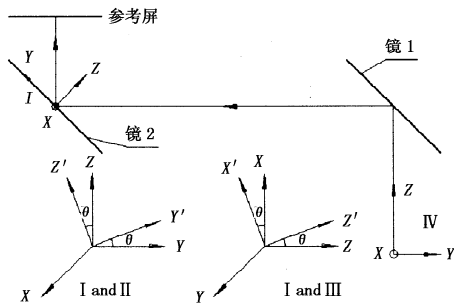


图3 法线平面平行模型

如图3所示,建立坐标系 I, II, III和IV,其中 I, II和III是进行坐标变换的辅助坐标系,IV为度量坐标系。

以镜2绕Y轴旋转为例,介绍关系推导过程:当绕Y轴顺时针旋转 θ_y 角时,坐标 I 中入射光束的向量表示为 $[x_0 \ y_0 \ z_0]$,经过镜2后反射光束在坐标系 I 中的向量可表示为:

$$[x_0' \ y_0' \ z_0'] = [x_0 \ y_0 \ z_0] \cdot T_1 \cdot T_2 \cdot T_1^{-1}$$

其中, $T_1 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_y) & 0 & -\sin(\theta_y) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\theta_y) & 0 & \cos(\theta_y) \end{bmatrix}$,为光束向量由

坐标系 I 变换到 III 的变换矩阵,

$$T_2 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
,为坐标系 III 中镜2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 IV 中的向量表示为:

$$[x_1 \ y_1 \ z_1] = [x_0' \ y_0' \ z_0'] \cdot T_3$$

其中, $T_3 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -\cos(\pi/4) & \sin(\pi/4) \\ 0 & \sin(\pi/4) & \cos(\pi/4) \end{bmatrix}$,为向量

由坐标系 I 变换到IV的变换矩阵。

可以计算出坐标系 IV 中参考屏接收到的光斑与零点位置的夹角 $\alpha = \arctan(\sqrt{x_1^2 + y_1^2}/z_1)$,以及 α 的方位投影角 $\alpha_x = \arctan(x_1/z_1)$ 和高低投影角 $\alpha_y = \arctan(y_1/z_1)$ 。投影到参考屏上的位移变化量:

$$[x, y] = [l \times \tan(\alpha_x), l \times \tan(\alpha_y)]$$

其中, l 为坐标系 I 的原点到参考屏的距离。

同理可以分析出:当镜2相对于镜1沿坐标系 I 产生 X 向和 Y 向的平移量 x 和 y 时,光束的方向和位置不变。当镜2相对于镜1沿坐标系 I 产生 Z 向的平移量 z 时,光束的方向不变,参考屏上的位移

变化量:

$$[x, y] = [0, \sqrt{2} \times z]$$

当镜2相对于镜1沿坐标系 I 产生绕 Z 向的旋转量 θ_z 时,光束的方向和位置不变。当镜2相对于镜1沿坐标系 I 产生绕 X 向的旋转量 θ_x 时,光束没有平移,方向变化,投影到参考屏上的位移变化量:

$$[x, y] = [0, l \times \tan(2\theta_x)]$$

图4和图5分别给出了法线平面垂直和法线空间垂直的光路模型。同法线平面平行的计算推导过程相同,表1给出了推导结果。

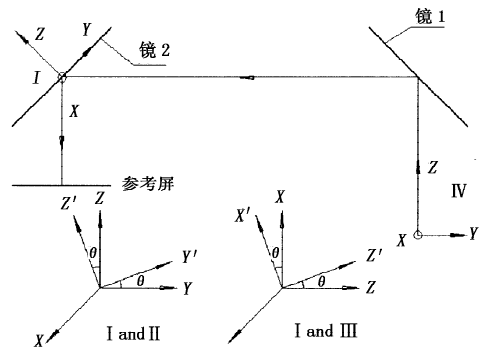


图4 法线平面垂直模型

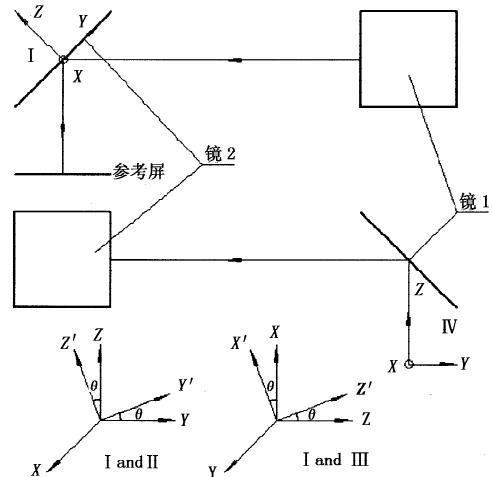


图5 法线空间垂直模型

表1中的 x, y, z 分别表示镜2相对于镜1在坐标系 I 中沿 X 方向平移 x, Y 方向平移 y, Z 方向平移 $z; \theta_x, \theta_y, \theta_z$ 分别表示镜2相对于镜1在坐标系 I 中绕 X 方向旋转 θ_x, Y 方向旋转 θ_y, Z 方向旋转 θ_z 。

表1 模型的计算结果

模型	x	y	z	θ_x	θ_y	θ_z
法线平面平行	0	0	$y = \sqrt{2} \times z$	$y = l \times \tan(2\theta_x)$	$x = l \times \tan(\alpha_x)$ $y = l \times \tan(\alpha_y)$	0
法线平面垂直	0	0	$y = -\sqrt{2} \times z$	$y = l \times \tan(2\theta_x)$	$x = l \times \tan(\beta_x)$ $y = l \times \tan(\beta_y)$	0
法线空间垂直	0	0	$y = -\sqrt{2} \times z$	$y = l \times \tan(2\theta_x)$	$x = l \times \tan(\chi_x)$ $y = l \times \tan(\chi_y)$	0

4.2 Matlab 模型仿真

为了更直观地表达光路模型,使用 Matlab 软件对三个模型进行了仿真,分别对三个模型施加偏离理想位置的位移量 x, y, z 和旋转量 $\theta_x, \theta_y, \theta_z$, 仿真结果如图 6 所示。

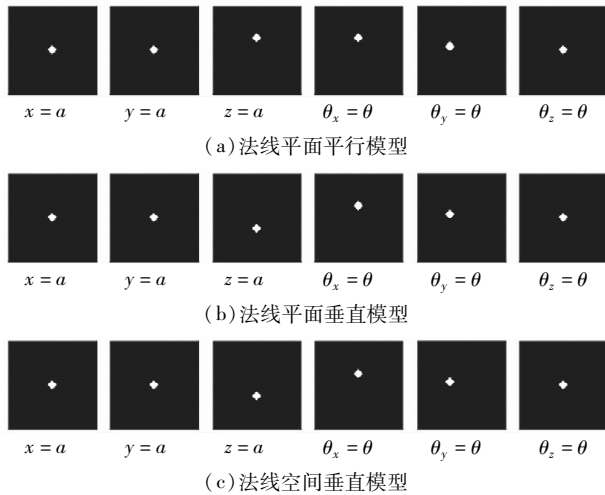


图 6 Matlab 仿真结果

5 结 论

CCD, 计算机等技术的快速发展使得计算机辅助装调的实现成为了可能。使用计算机辅助装调可

以明显提高装调效率,节省人力和时间,是光机电系统装调急需解决的关键问题。本文提出的方法经过实际验证可行,但要在装校车间实现真正的计算机辅助装调仍有很多的工作需要做。

参考文献:

- [1] Ira M, Egdal L. Manufacture of a three-mirror wide-field optical system [J]. Optical Engineering, 1985, 24 (2): 285 - 292.
- [2] Yang Xiao-fei, Zhang Xiao-hui, Han Chang-yuan. Application of Zemax software in alignment of three-mirror off-axis aspherical optical system [J]. Optics and Precision Engineering, 2004, 12(3): 270 - 274. (in Chinese)
- [3] He He-hao, Ye Lu, Zhou Xing-yi, et al. Theory and precision analysis of testing apparatus of parallel depth [J]. Opto-Electronic Engineering, 2007, 34 (5): 52 - 56. (in Chinese)
- [4] Su Yi, Wan Min. High energy laser system [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004. (in Chinese)
- [5] Wang Jia-qi. Overall design of optical instruments [M]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 2003. (in Chinese)

全国第十二届红外加热暨红外医学发展研讨会征文通知

由中国光学学会红外光电器件专业委员会、中国光学光电子行业协会红外分会、中国电子学会量子电子学与光电子学分会、锦州市光学学会、云南省光学学会、中国机械工程学会工业炉分会、中国电工技术学会电热专业委员会、武汉国家红外产品质量监督检验中心联合主办,南京大学光通信工程研究中心、南京丹联科技有限公司承办,《红外技术》编辑部、《工业加热》编辑部协办的全国第十二届红外加热暨红外医学发展研讨会,定于 2009 年 10 月在南京市召开。

本届会议主要反映与交流近年来红外加热技术及红外医学领域的新成果和新进展。

一、应征论文范围

1. 红外加热技术在国民经济中地位、作用及发展前景的综述、评论文章;
2. 红外加热元件、红外辐射涂料的新成果、新工艺及相关技术研究;
3. 红外与物质相互作用,红外加热理论与机理的研究;
4. 各种红外加热装置的优化设计与制造及应用实例剖析;
5. 红外加热测试技术、物质的红外光谱及相关技术研究;
6. 红外加热在生物学和医学中的应用等;
7. 红外医学新仪器、新材料、新技术、新成果及国内外发展动向;
8. 红外医学的临床理论研究,临床应用报告及相关的激光、微波、毫米波研究与应用。

二、应征论文作者请在 2009 年 8 月 30 日前将 500 ~ 800 字论文摘要寄到:大连理工大学物理与光电工程学院栾文彦教授收(邮政编码:116023),并请作者注明详细通讯地址、工作单位及职务、职称和邮政编码。

三、经审稿录用的论文摘要集将由《红外技术》编辑部、中国学术期刊(光盘版)电子杂志社编辑出版。

四、会议筹备组的通信地址:锦州市 13 号信箱锦州市光学学会(邮政编码:121000),联系人:王永钧,电话:0416 - 2650160,2135100,传真:0416 - 2135100, E-mail:lykj88@163.com。

(全国第十二届红外加热暨红外医学发展研讨会筹备组)