

光学系统计算机辅助装调的坐标基准过渡方法

顾志远^{1,2} 颜昌翔¹ 胡春晖¹ 王 洋^{1,2} 高志良¹ 刘 伟¹

(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 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 为实现光学系统计算机辅助装调工程化应用,达到根据失调量的计算值对光学元件进行空间位置误差校正的目的,提出了失调量的计算值和调整机构调整量之间的过渡方法,利用坐标变换和最小二乘优化算法建立了失调量-调整量的关系模型,完成了两者坐标基准过渡。仿真结果表明,根据此方法自编程序计算出的平移调整量精度可达 10^{-6} mm量级,角度调整量精度可达 $0.02''$ 量级,计算精度远高于光学系统的装调要求。在模拟装调过程中,与直接采用失调量计算值对元件调整的结果相比,此方法的调整结果明显好于前者。对于不同的光学元件装卡方式和调整机构,可对此算法的相关参量进行赋值,灵活运用于不同的工况,为计算机辅助装调的实际工程化应用提供理论依据。

关键词 光学设计;光学系统装调;计算机辅助装调;坐标基准过渡;最小二乘法

中图分类号 TH703 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0322003

Coordinate Datum Transition Method for Optical System Computer-Aided Alignment

Gu Zhiyuan^{1,2} Yan Changxiang¹ Hu Chunhui¹ Wang Yang^{1,2} Gao Zhiliang¹ Liu Wei¹

(¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract In order to realize the engineering application of optical system computer-aided alignment and reach the goal of spatial location error correction for optical elements according to the misalignment by calculation, a method of transition between the misalignment by calculation and alignment quantity of adjusting mechanism is presented. Coordinate transform and least squares optimization algorithm are used to establish the misalignment-alignment quantity relation model. The coordinate datum transform between them are finished. Simulation results show that the accuracy of translational alignment quantity can reach 10^{-6} millimeter order and the accuracy of angular alignment quantity can reach $0.02''$ order, which are calculated by self-compiled program according to the method. The accuracy of calculation is much higher than the accuracy needed for optical system computer-aided alignment. In the simulation of alignment, compared with the result of alignment on the basis of misalignment by calculation, the result of the method is much better. For different chucking methods of optical elements and adjusting mechanisms, related parameters of the method can be assigned to meet the requirements of different working conditions. The method provides the reference basis for engineering application of optical system computer-aided alignment.

Key words optical design; optical system alignment; computer-aided alignment; coordinate datum transition; least square method

OCIS codes 220.1140; 000.4430; 080.2720; 220.4610; 350.4600

收稿日期: 2013-07-18; 收到修改稿日期: 2013-09-18

基金项目: 国家 863 计划(2011AA12A103)、中国地质调查局工作项目(1212011120227)

作者简介: 顾志远(1986—),男,博士研究生,主要从事光学系统集成装调和检测方面的研究。

E-mail: zhiyuangu@gmail.com

导师简介: 颜昌翔(1973—),男,博士,研究员,主要从事空间光学遥感技术方面的研究。E-mail: yancx@ciomp.ac.cn (通信联系人)

1 引 言

光学系统装调是将优秀的光学设计转化为现实中性能良好的仪器的关键环节。常规的装调方法主要依靠人员的经验和装调设备完成,装调过程中存在盲目性、反复性、周期长、精度低等问题,为了解决常规装调方法的弊端,计算机辅助装调技术逐渐受到光学制造行业的广泛关注。

计算机辅助装调是根据光学系统波像差的检测结果,计算出元件的失调量来指导装调。在装调过程中,系统波像差作为输入值,经光学设计软件的追迹计算后,输出元件失调量的计算值。在计算机辅助装调的实际工程化应用中,主要有两个因素影响装调的精度和收敛速度。1)失调量的计算是否准确,2)失调量的计算值是否能准确地转化为实际工程应用中的调整量。第一个因素主要取决于光学系统波像差和元件位置误差的模型建立以及相关的求解算法,目前针对这方面已经取得了非常丰富的研究成果^[1-7]。但是在实际的装调过程中,调整机构的6个调整维度难以与光学元件的6个失调量准确地一一对应,常出现以下情况:光学元件和调整机构的旋转对称轴不重合、光学元件的偏心方向和调整机构相对应的平移方向存在夹角等。这时若直接利用调整机构根据失调量的计算值对元件进行调整,会导致调整后的状态与理想状态存在偏差,影响装调的收敛速度,甚至导致装调无法进行。所以失调量-调整量关系模型的准确求解至关重要,而目前关于这方面的研究却未见报道。

结合工程实际,本文针对计算机辅助装调的需要,解决了光学设计软件中的失调量基准和调整机构的调整基准不统一问题,利用坐标变换^[8-9]和Levenberg-Marquardt最小二乘优化算法^[10]建立了失调量和调整量的关系模型。该算法为参数化设计,可灵活运用于不同的工况。仿真结果表明,该算法的计算精度远高于光学装调的要求。

2 失调量-调整量关系模型建立与算法设计

计算机辅助装调输出的失调量计算值是基于光学设计软件的坐标基准,在光学设计软件定义的平移及旋转变换规则下,先根据失调量计算值求解出光学元件旋转变换后的空间坐标。再根据调整机构的相关结构参数,求解出元件在调整机构上旋转变换后的空间坐标,最后利用最小二乘优化算法求解出旋转

维度的调整量,利用基变换公式得到平移维度的调整量,完成失调量-调整量关系模型的准确求解。

2.1 坐标系建立

分别建立以光学元件光轴与镜面交点为原点的全局坐标系(GCS)和局部坐标系(LCS)。GCS选择光学元件初始状态光轴方向为Z轴方向,光学元件子午面内垂直向上为Y轴方向,GCS与光学元件的空间位置变化无关。LCS定义在光学元件上,同样以光学元件光轴方向为z轴方向,子午面内垂直向上为y轴方向,LCS随光学元件的空间位置变化而变化。GCS和LCS均满足右手法则,如图1所示。为避免GCS和LCS的混淆,GCS坐标轴以大写字母表示,LCS坐标轴以小写字母表示。

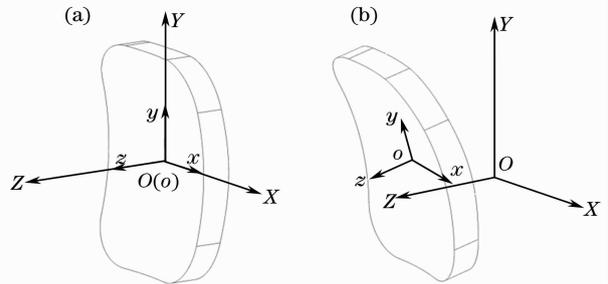


图1 GCS与LCS的定义。(a)光学元件初始状态;
(b)光学元件空间位置变化后状态

Fig. 1 Definition of GCS and LCS. (a) Initial state of optical element; (b) state of optical element after spatial location changed

2.2 求解基于光学设计软件旋转变换规则的空间坐标

在光学设计软件中,光学元件的失调量使用LCS下6个参量进行表征,分别是沿x、y、z轴的偏心量和绕x、y、z轴的旋转量。光学设计软件定义的坐标变换规则如下:光学元件先沿x、y、z轴进行平移,再依次绕着x、y、z轴旋转 α 、 β 、 γ 。

根据上述规则,可以得到欧拉角形式的旋转变换公式:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 $[x \ y \ z]^T$ 为光学元件镜面上任一点P的初始坐标向量; $[x' \ y' \ z']^T$ 为P点经旋转变换后的坐标向量。

利用(1)式可得光学元件镜面上任一点P顺次

绕着 x, y, z 轴旋转 α, β, γ 后的坐标向量, 该坐标向量 \mathbf{O} 有如下形式

$$\mathbf{O} = \begin{bmatrix} o_{11}(\alpha, \beta, \gamma)x + o_{12}(\alpha, \beta, \gamma)y + o_{13}(\alpha, \beta, \gamma)z \\ o_{21}(\alpha, \beta, \gamma)x + o_{22}(\alpha, \beta, \gamma)y + o_{23}(\alpha, \beta, \gamma)z \\ o_{31}(\alpha, \beta, \gamma)x + o_{32}(\alpha, \beta, \gamma)y + o_{33}(\alpha, \beta, \gamma)z \end{bmatrix}. \quad (2)$$

2.3 求解基于机械调整机构旋转变换后的空间坐标

6 自由度调整机构调整维度包括 3 个方向的平

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x^2(1 - \cos \theta) + \cos \theta & n_x n_y(1 - \cos \theta) - n_z \sin \theta & n_x n_z(1 - \cos \theta) + n_y \sin \theta \\ n_x n_y(1 - \cos \theta) + n_z \sin \theta & n_y^2(1 - \cos \theta) + \cos \theta & n_y n_z(1 - \cos \theta) - n_x \sin \theta \\ n_x n_z(1 - \cos \theta) - n_y \sin \theta & n_y n_z(1 - \cos \theta) + n_x \sin \theta & n_z^2(1 - \cos \theta) + \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z - z_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中 $[x \ y \ z]^T$ 为光学元件镜面上任一点 P 的初始坐标向量; $[x' \ y' \ z']^T$ 为 P 点经旋转变换后的坐标向量; $[n_x \ n_y \ n_z]^T$ 为旋转对称轴的归一化方向向量; $[x_0 \ y_0 \ z_0]^T$ 为旋转对称轴上任一点的坐标向量; θ 为 P 点绕直线的旋转角。

利用 3 个旋转轴的方向向量和(3)式可以得到光学元件镜面上坐标向量为 $[x \ y \ z]^T$ 的点经 3 次旋转变换后的坐标向量, 该坐标向量 \mathbf{M} 为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_{11}(\alpha', \beta', \gamma')x + m_{12}(\alpha', \beta', \gamma')y + m_{13}(\alpha', \beta', \gamma')z + c_1(\alpha', \beta', \gamma') \\ m_{21}(\alpha', \beta', \gamma')x + m_{22}(\alpha', \beta', \gamma')y + m_{23}(\alpha', \beta', \gamma')z + c_2(\alpha', \beta', \gamma') \\ m_{31}(\alpha', \beta', \gamma')x + m_{32}(\alpha', \beta', \gamma')y + m_{33}(\alpha', \beta', \gamma')z + c_3(\alpha', \beta', \gamma') \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中 α', β', γ' 为调整机构 3 个旋转自由度的调整量。 c_1, c_2, c_3 与待求的平移调整量有关。

2.4 求解调整机构 6 个自由度的调整量

构造如下方程组

$$o_{ij}(\alpha, \beta, \gamma) = m_{ij}(\alpha', \beta', \gamma'), \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (5)$$

该方程组为三元超定非线性方程组, 通过采用 Levenberg-Marquardt 非线性最小二乘法可求其数值解, 从而解出调整机构 3 个旋转自由度的调整量 α', β', γ' 。

调整机构 3 个平移维度的调整量 $\delta x', \delta y', \delta z'$ 与元件偏心量 $\delta x, \delta y, \delta z$ 的关系为

$$\begin{bmatrix} \delta x' \\ \delta y' \\ \delta z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m'_4 & m'_5 & m'_6 \\ n'_4 & n'_5 & n'_6 \\ p'_4 & p'_5 & p'_6 \end{bmatrix}^{-1} \left(\begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \\ \delta z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} c_1(\alpha', \beta', \gamma') \\ c_2(\alpha', \beta', \gamma') \\ c_3(\alpha', \beta', \gamma') \end{bmatrix} \right), \quad (6)$$

式中 $[m'_i, n'_i, p'_i]^T$ 为调整机构平移维度经旋转调整后的方向向量, 其值可由(3)式求出。

通过上述求解过程, 完成了失调量计算值和调

移调整和绕 3 个旋转轴的旋转调整。从调整机构结构设计和光学元件的装卡方式可以得到基于 GCS 的 3 个旋转轴的点向式方程和 3 个平移调整维的方向向量。

GCS 下, 光学镜面上任一点 P 的坐标向量为 $[x \ y \ z]^T$, 可利用矢量转轴公式^[11]求解 P 点绕空间中某一直线旋转一定角度后的坐标向量, 即

整机构调整量的过渡关系, 且求解过程采用调整机构参数化方法, 可通过改变相关参量的数值, 灵活运用于各种工况。

3 仿真结果与验证

仿真装调实验利用 UG 软件对光学元件和调整机构进行建模, 任意选取一组数据作为失调量的计算值, 分别模拟元件的理想调整状态、使用调整机构直接根据失调量计算值对元件调整后的状态和根据该方法求解出的调整量对元件调整后的状态。通过对以上 3 种状态的对比分析, 说明失调量-调整量关系模型建立的必要性及验证模型的求解精度。

光学元件的装卡方式及调整机构的结构设计如图 2 所示。调整机构由 3 个方向的平移滑台、精密转台和 2 个倾斜调整机构构成, 待装调的反射镜竖直装卡在平移滑台 1 上。

利用 UG 中的分析测量功能可得基于 GCS 调整机构的相关参量, 如表 1 所示。

表 1 调整机构的相关参量

Table 1 Related parameters of adjusting mechanism

	Coordinate vector of point	Direction vector
Rotation axis 1	$[-140.9925 \ 115.9989 \ -335.0812]^T$	$[0.1736 \ 0 \ -0.9848]^T$
Rotation axis 2	$[-51.2121 \ 31.9989 \ -397.9460]^T$	$[-0.9848 \ 0 \ -0.1736]^T$
Rotation axis 3	$[-127.5347 \ 192.0000 \ -411.4038]^T$	$[0 \ -1 \ 0]^T$
Shift direction 1		$[0 \ 1 \ 0]^T$
Shift direction 2		$[-0.1736 \ 0 \ 0.9848]^T$
Shift direction 3		$[0.9848 \ 0 \ 0.1736]^T$

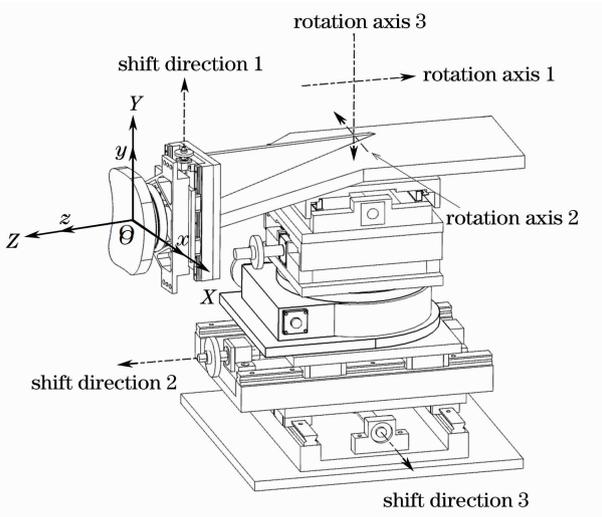


图 2 光学元件装卡方式及调整机构结构设计示意图

Fig. 2 Schematic diagram of chucking method of optical elements and structure design of adjusting mechanism

任意选取一组数据作为失调量的计算值,如表 2 所示。

表 2 失调量的计算值

Table 2 Misalignment data by calculation

δx	δy	δz	α	β	γ
-2 mm	1.5 mm	1 mm	-1.8°	1°	1.5°

反射镜的 6 个失调量计算值在调整机构上都有近似对应的调整维度,在建模环境中模拟使用调整机构直接根据失调量计算值对反射镜进行调整后的状态,并与理想状态比较。调整机构 6 个维度的调整量如表 3 所示,调整顺序从左到右,两种状态的仿真结果如表 4 所示,方向向量保留 8 位有效数字,向量之间偏差用两向量夹角表征。

从表 4 可以看出,若不对失调量-调整量关系模型进行求解,直接通过调整机构根据失调量计算值对反射镜进行调整后的状态与理想状态偏差较大,反射镜的 Y 方向偏心误差超过 17 mm, y 轴指向误差超过 22',调整结果难以满足装调的要求。调整误差产生的原因主要有两点:1)反射镜和调整机构的旋转对称轴存在空间距离,角度调整时引入了平移调整,特别是平移滑台 1 背部的连接板较长,造

表 3 调整量

Table 3 Alignment data

Shift direction 3	Shift direction 1	Shift direction 2	Rotation axis 2	Rotation axis 3	Rotation axis 1
-2 mm	1.5 mm	1 mm	-1.8°	1°	1.5°

表 4 理想状态与根据失调量计算值对反射镜调整后的状态比较

Table 4 Comparison of ideal state and state of reflector after alignment according to misalignment data by calculation

	Ideal state	State after alignment	Error
X-decenter /mm	-2	7.816214	9.816214
Y-decenter /mm	1.5	18.740133	17.240133
Z-decenter /mm	1	-0.594325	-1.594325
Direction vector of x-axis	$\begin{bmatrix} 0.99950507 \\ 0.02561603 \\ -0.01825982 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.99962765 \\ 0.020312124 \\ -0.018220116 \end{bmatrix}$	18'14.3"
Direction vector of y-axis	$\begin{bmatrix} 0.99917841 \\ -0.03094315 \\ 0.01745218 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.99916406 \\ -0.035108167 \\ 0.017491765 \end{bmatrix}$	22'59.1"
Direction vector of z-axis	$\begin{bmatrix} 0.03140575 \\ 0.99935434 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.035476674 \\ 0.99921742 \end{bmatrix}$	14'0.2"

成了 X 方向和 Y 方向较大的偏心误差;2)调整机构的旋转轴 1、平移方向 2 与相对应的反射镜 z 轴存在夹角,旋转轴 2、平移方向 3 与相对应的反射镜 x 轴存在夹角,造成了角度和位移调整时,各维调整量之间存在耦合,产生调整误差。

根据坐标基准过渡方法,利用失调量-调整量的关系模型自编程计算调整量,结果如表 5 所示。

在建模环境中模拟根据计算出的调整量对反射镜调整后的状态,并与理想状态比较。两种状态的仿真结果比较如表 6 所示。

表 5 计算所得调整量

Table 5 Alignment data by calculation

$\delta x'$	$\delta y'$	$\delta z'$	α'	β'	γ'
-14.7533 mm	4.3393 mm	-11.9285 mm	-1.758753°	1.517407°	-1.000269°

表 6 理想状态与根据计算所得调整量对元件调整后的状态比较

Table 6 Comparison of ideal state and state of reflector after alignment according to alignment data by calculation

	Ideal state	State after alignment	Error
X-decenter /mm	-2	-1.999998	2×10^{-6}
Y-decenter /mm	1.5	1.499999	-1×10^{-6}
Z-decenter /mm	1	1	0
Direction vector of x-axis	$\begin{bmatrix} 0.99950507 \\ 0.02561603 \\ -0.01825982 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.99950507 \\ 0.02561603 \\ -0.01825983 \end{bmatrix}$	0"
Direction vector of y-axis	$\begin{bmatrix} -0.02617295 \\ 0.99917841 \\ -0.03094315 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.02617295 \\ 0.99917841 \\ -0.03094314 \end{bmatrix}$	0"
Direction vector of z-axis	$\begin{bmatrix} 0.01745218 \\ 0.03140575 \\ 0.99935434 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.01745223 \\ 0.03140593 \\ 0.99935433 \end{bmatrix}$	$3.85 \times 10^{-2}''$

从表 6 可以看出,该方法计算出的反射镜的平移调整量精度可达 10^{-6} mm 量级,角度调整量精度可达 $0.01''$ 量级,模拟调整结果也明显好于直接采用失调量计算值对元件调整后的结果,进一步说明了失调量-调整量关系模型准确求解的必要性。调整结果存在误差的原因是 Levenberg-Marquardt 非线性最小二乘法迭代优化过程中存在残差。光学系统装调中,光学元件的偏心公差一般不小于 0.01 mm 量级,角度公差一般不小于角秒量级,故坐标基准过渡方法在计算精度上远高于光学系统的装调要求。

进行准确求解,再结合光学元件和满足定位精度要求的调整机构对初始参数准确赋值,可实现不同工况下光学元件的高精度定量调整。综上,采用坐标基准过渡方法,配合满足装调精度的调整机构,即可实现计算机辅助装调的工程化。

参 考 文 献

- 1 M R Descour, M R Willer, D S Clarke, *et al.*. Misalignment modes in high-performance optical systems [J]. *Optical Engineering*, 2000, 39(7): 1737-1747.
- 2 Yang Xiaofei, Zhang Xiaohui, Han Changyuan. Alignment of a three-mirror off-axis aspherical optical system by using gradual aberration optimization [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(1): 115-120.
杨晓飞, 张晓辉, 韩昌元. 用像差逐项优化法装调离轴三反射镜光学系统 [J]. *光学学报*, 2004, 24(1): 115-120.
- 3 Sun Jingwei, Chen Tao, Wang Jianli, *et al.*. Computer-aided alignment for primary and secondary mirrors [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(10): 2156-2163.
孙敬伟, 陈涛, 王建立. 主次镜系统的计算机辅助装调 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(10): 2156-2163.
- 4 E Gutierrez-Herrera, M Strojnik. Misalignment study for a Dove prism employing exact ray trace [C]. *SPIE*, 2007, 6678: 667811.
- 5 K P Thompson, T Schmid, O Cakmakci, *et al.*. Real-ray-based method for locating individual surface aberration field centers in imaging optical systems without rotational symmetry [J]. *J Opt Soc Am A*, 2009, 26(6): 1503-1517.
- 6 H Lee, G B Dalton, I A J Tosh, *et al.*. Computer-guided alignment III: description of inter-element alignment effect in

4 结 论

通过对光学元件在光学设计软件和机械调整机构中空间位置变换进行分析,建立了光学设计软件给出的失调量计算值和调整机构调整量的关系模型,提出了失调量-调整量的过渡方法。通过仿真验证,说明了该方法对于光学系统装调的必要性,自编程的计算精度远高于光学系统的装调要求,调整结果也明显好于直接采用失调量计算值对元件调整的结果。提出的坐标基准过渡方法为参数化设计,在实际的装调过程中,根据失调量-调整量关系模型

- circular-pupil optical systems [J]. *Opt Express*, 2008, 16(15): 10992–11006.
- 7 H Lee, G B Dalton, I A J Tosh, *et al.*. Computer-guided alignment II: optical system alignment using differential wavefront sampling [J]. *Opt Express*, 2007, 15(23): 15424–15437.
- 8 Hu Chunhui, Yan Changxiang. Optical-mechanical assembly based on Gaussian optical homogeneous coordinate transformation [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(11): 2353–2359.
胡春晖, 颜昌翔. 基于高斯光学齐次坐标变换的光机装调[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(11): 2353–2359.
- 9 Luo Yong. Coordinates-decoupling of multidimensional precision optical adjusting frame [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, 38(4): 37–40.
罗 勇. 多维精密光学调整架坐标解耦合分析[J]. *光电工程*, 2011, 38(4): 37–40.
- 10 J Nocedal, S J Wright. *Numerical Optimization* [M]. New York: Springer Science Business Media, 2006. 258–262.
- 11 Wang Chunyan. Study about Measuring System of Cannon's Static Direction Angles [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, 2001. 30–36.
王春艳. 坦克炮管静态定向角测量系统研究[D]. 长春: 长春光学精密机械学院, 2001. 30–36.

栏目编辑: 张 腾