

文章编号 1004-924X(2011) 03-0536-09

水平式激光发射系统指向误差的修正

薛向尧^{1,2}, 高云国¹, 韩光宇¹, 张文豹¹, 于 萍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 研究生院, 北京 100039)

摘要: 为修正由轴系误差引起的水平式激光发射系统的指向误差, 借鉴经纬仪视轴指向误差的修正方法 单项差法和坐标变换法, 建立了激光发射系统指向误差的修正模型, 得到了轴系误差在激光发射光路中的传递规律。介绍了系统光机结构及建模理论, 导出了反射镜的作用矩阵。通过建立水平式跟踪架笛卡尔坐标系, 将激光光束看作空间内一单位矢量, 并借助矢量旋转与坐标变换, 得到了各单项误差解析式; 通过线性叠加得出激光发射系统指向误差的修正模型。结合电视跟踪系统所测量的激光束指向误差, 采用最小二乘法拟合得出修正模型中各待定系数。实验结果表明: 指向误差经修正后, 系统在某两轨道上和天顶区域的指向精度可达到 3.1 和 9.7 , 满足系统设计的精度要求。

关 键 词: 激光发射系统; 轴系误差; 坐标变换; 指向误差

中图分类号: TH 744.5 文献标识码: A doi: 10. 3788/OPE. 20111903. 0536

Correction of laser pointing error of level mounting laser transmitter system

XUE Xiang-yao^{1,2}, GAO Yun-guo¹, HAN Guang-yu¹, ZHANG Wen-bao¹, YU Ping¹

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

Abstract: In order to correct the laser pointing errors caused by the axial errors for a level mounting laser transmitter system, a new laser pointing error correction model was built by using the correction method used in the pointing error correction of a photoelectric theodolite, and the error transfer behavior between shafts and optical path was investigated intensively. Firstly, the opto-mechanical structure and modeling theory were introduced, and the transformation matrixes of mirrors were presented. Then, by constructing two 3D coordinates in which the laser beam was considered as a unit vector, the laser pointing model was established by linear coordinate transformation and linear vector transformation. Furthermore, the undetermined coefficients in the laser pointing model were obtained by least square fitting. Finally, the TV tracking system whose optical axis was actually considered as an ideal one in the laser transmitter system was used to measure the laser pointing error. Experimental results indicate that the laser pointing precision of the level mounting laser transmitter system is up to 3.1 and 9.7 in 2 specific orbits and a zenith region, respectively, which satisfies the requirement

of the system design for the accuracy.

Key words: laser transmitter system; axial error; coordinate transformation; pointing error

1 引言

激光发射系统指向精度是指出射激光光束对准预定目标的精确程度,出射光束的指向精度即为系统的指向精度,出射光束的指向误差即为系统的指向误差。传统激光发射系统大多采用地平式跟瞄系统,激光有效作用距离一般为几至几十千米,要求系统的指向精度为十几至几十秒,这种系统指向精度由光机结构的装调精度即可保证。对于作用距离更远的激光发射系统,为提高其指向精度,通常采用复合轴结构及自适应光学系统。目前尚未见有利用指向误差修正模型来提高激光发射系统指向精度的报道^[1-6]。

本文涉及的激光发射系统首次采用水平式光电经纬仪跟瞄系统。该系统工作范围主要在天顶区域,作用距离为几百千米,因此仅靠装调方法难于保证系统的指向精度,而采用复合轴结构及自适应光学系统必然使研发成本成倍增加,因此提出建立指向误差的修正模型来提高系统的指向精度。

对于传统的光电经纬仪,指向误差修正方法已较为成熟,主要有单项差法、球谐函数法和坐标变换法^[7-12],但上述方法并不适于修正激光发射系统指向误差,这是由于二者的光机结构有所差别。传统的光电经纬仪其激光器及光学系统全部安装于纬轴芯部结构内(地平式则为俯仰轴芯部结构),轴系误差并没有耦合进光学系统内部。本文激光发射系统将激光器移至基座上,通过置于跟踪架内的各反射镜将激光器所发射激光导出(光机结构见2节)。因此该系统轴系误差已耦合进激光发射光路,传统的误差修正方法已不再适用于该系统。

本文首次借鉴单项差法及坐标变换法思想,将激光器所发激光看作一单位矢量并借助矢量旋转与坐标变换,分别得出由每项轴系误差引起的系统指向误差,然后将各项误差线性叠加获得系统总指向误差的数学模型,结合电视跟踪系统所测量的激光束指向误差,得出模型中各待定系数,最后采用该模型修正本文激光发射系统指向误

差,提高系统的指向精度。

2 系统结构及误差源分析

本文以水平式激光发射系统为对象,研究轴系误差对系统指向精度的影响。该系统结构图与光路图如图1,2所示,激光器发射激光,经反射镜1,2后,光束进入库德光路,最后经反射镜7,8及扩束系统射出。

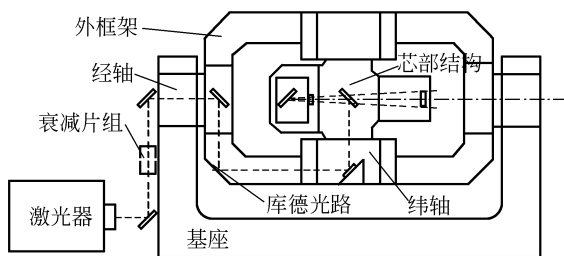


图1 系统结构示意图

Fig. 1 System framework

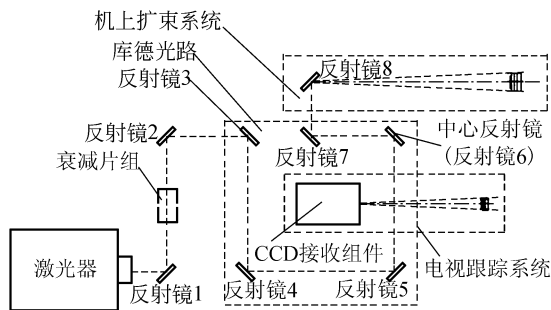


图2 系统光路示意图

Fig. 2 Light rays of optical system

其中轴系误差主要存在以下几个误差源:

- (1) 入射光轴与经轴回转轴不同轴带来的误差;
- (2) 纬轴与经轴不垂直带来的误差;
- (3) 经轴倾斜带来的误差;
- (4) 由反射镜6~8装调误差引起的照准轴误差。

由于对光路现有装调方法的局限性,使得激光器、反射镜7,8的安装误差很难控制在很小的

范围内,由此导致入射光轴及照准轴误差往往高于其它误差(如编码器误差、脱靶量滞后差等)一个数量级,因此综合分析轴系误差对系统指向精度的影响显得尤为重要。

3 系统坐标系的建立及建模理论

根据实际分析的需要,建立经轴坐标系 xyz 、纬轴坐标系 $x'y'z'$,如图 3 所示。由经轴坐标系下出射光束矢量 R_0 可得出射光束在经角方向上的指向误差 L ,由纬轴坐标系下出射光束矢量 R_0 可得出射光束在纬角 B 方向上的指向误差 B 。其中 L , B 分别简称经角误差和纬角误差。

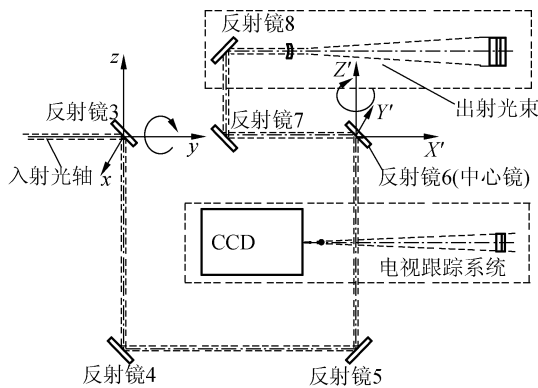


图 3 系统坐标系
Fig.3 System coordinates

经轴坐标系原点在反射镜 3 的反射面与经轴回转轴线的交点上,以纬角为零时出射激光光束指向目标的方向为 x 轴正向,以沿经轴回转轴线由反射镜 3 指向反射镜 6 的方向为 y 轴正向, z 轴与 x , y 轴正交,并组成右手坐标系;纬轴坐标系原点在反射镜 6 的反射面与纬轴回转轴线的交点上,以出射激光光束指向目标的方向为 x' 轴正向,以沿纬轴回转轴线由反射镜 5 指向反射镜 6 的方向为 z' 轴正向, y' 轴与 x' , z' 轴正交,并组成右手坐标系。当轴系出现误差时,可看成轴系内各反射镜法向矢量 N_i 绕轴系(含误差)回转轴(方向余弦为 $\cos \theta$, $\sin \theta$)旋转 θ 角度后得新矢量 N_i ,则

$$N_i = EN_i, \tag{1}$$

其中 E 为坐标变换矩阵^[13]

$$E = \begin{bmatrix} c + ^2(1 - c) & (1 - c) - s & (1 - c) + s \\ (1 - c) + s & c + ^2(1 - c) & (1 - c) - s \\ (1 - c) - s & (1 - c) + s & c + ^2(1 - c) \end{bmatrix}, \tag{2}$$

式中 c 代表 $\cos$, s 代表 $\sin$ 。

由于激光器发射的激光光束通过置于轴系内各反射镜的作用指向目标,设任一反射镜为 i ,光束入射该反射镜前单位矢量为 R_i ,出射光束单位矢量为 R_0 ,则

$$R_0 = MR_i, \tag{3}$$

式中, M_i 为反射镜的作用矩阵,表示为

$$M_i = \begin{bmatrix} 1 - 2N_x^2 & -2N_xN_y & -2N_xN_z \\ -2N_xN_y & 1 - 2N_y^2 & -2N_yN_z \\ -2N_xN_z & -2N_yN_z & 1 - 2N_z^2 \end{bmatrix}, \tag{4}$$

其中 N_x, N_y, N_z 为该平面反射镜法线量 N_i 的方向余弦,即 $N_i = N_xi + N_yj + N_zk$ 。

因此,该系统轴系误差将同时引起轴系回转轴线偏差与反射镜法向矢量偏差,最终激光光束经各反射镜后,其出射光束将产生经角 L 、纬角 B 两个方向的角度误差。通过矢量旋转与坐标变换,求得出射光束在各坐标系下的矢量表达式,从而建立该激光发射系统指向误差的数学模型。

4 激光发射系统指向误差模型的建立

4.1 入射光轴误差

激光器所发射的激光经反射镜 1, 2 后射入库德光路,由于反射镜 1, 2 与激光器存在安装误差,使入射光轴(进入反射镜 3 前的光束)与经轴回转轴线产生一偏角 V 。该光轴具有确定的倾斜方向,设其倾斜角为 L_v ,当仪器经角为 L 时,入射光轴在经轴坐标系下的矢量为 R_{iv} ,

$$R_{iv} = \begin{Bmatrix} \sin V \cos(L_v - L) \\ \cos V \\ \sin V \sin(L_v - L) \end{Bmatrix}, \tag{5}$$

在经轴坐标系下,第 3~ 8 反射镜的法线矢量分别为

$$N_3 = -N_4 = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{Bmatrix} 0 \\ -1 \\ -1 \end{Bmatrix}, \tag{6}$$

$$N_5 = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{Bmatrix} 0 \\ -1 \\ 1 \end{Bmatrix}, \tag{7}$$

$$N_6 = -N_7 = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{Bmatrix} -\cos B \\ \sin B \\ -1 \end{Bmatrix}, \tag{8}$$

$$N_8 = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{Bmatrix} \cos B \\ -\sin B \\ -1 \end{Bmatrix}, \tag{9}$$

则作用矩阵分别为

$$M_3 = M_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}, \tag{10}$$

$$M_5 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \tag{11}$$

$$M_6 = \begin{bmatrix} \sin^2 B & \sin B \cos B & -\cos B \\ \sin B \cos B & \cos^2 B & \sin B \\ -\cos B & \sin B & 0 \end{bmatrix}, \tag{12}$$

$$M_7 = \begin{bmatrix} \sin^2 B & \sin B \cos B & -\cos B \\ \sin B \cos B & \cos^2 B & \sin B \\ -\cos B & \sin B & 0 \end{bmatrix}, \tag{13}$$

$$M_8 = \begin{bmatrix} \sin^2 B & \sin B \cos B & \cos B \\ \sin B \cos B & \cos^2 B & -\sin B \\ \cos B & -\sin B & 0 \end{bmatrix}, \tag{14}$$

则当入射光轴产生误差 V 时, 出射光束矢量

$$\begin{aligned} R_{0V} &= M_8 M_7 M_6 M_5 M_4 M_3 R_W = \\ &\begin{Bmatrix} \sin V \sin B \sin(B + L_V - L) + \cos B \cos V \\ \sin V \cos B \sin(B + L_V - L) - \sin B \cos V \\ \sin V \cos(B + L_V - L) \end{Bmatrix}, \end{aligned} \tag{15}$$

则由 V 引起的经角误差为

$$L_V = -\arctan\left(\frac{\sin V \cos(B + L_V - L)}{\sin V \sin B \sin(B + L_V - L) + \cos B \cos V}\right), \tag{16}$$

因 V 为很小量, B 通常小于 60° , 则上式化简后得

$$L_V = V \cos(B + L_V - L) / \cos B, \tag{17}$$

出射光束在纬轴坐标系下的矢量

$$R_{0V} = M R_{0V} = \begin{Bmatrix} \cos V \\ \sin V \sin(B + L_V - L) \\ \sin V \cos(B + L_V - L) \end{Bmatrix}, \tag{18}$$

其中 M 为经轴坐标系到纬轴坐标系的变换矩阵,

$$M = \begin{bmatrix} \cos B & -\sin B & 0 \\ \sin B & \cos B & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \tag{19}$$

则由 V 引起的纬角误差为

$$\begin{aligned} B_V &= -\arcsin(\sin V \sin(B + L_V - L)) \\ &\quad - V \sin(B + L_V - L), \end{aligned} \tag{20}$$

4.2 纬轴误差

纬轴误差即纬轴与经轴的不垂直度, 该误差可看成纬轴回转轴线绕 x 轴旋转一误差角 b 。在经轴坐标系下, 纬轴回转轴矢量表示为 N_B

$$N_B = \begin{Bmatrix} 0 \\ \sin b \\ -\cos b \end{Bmatrix}, \tag{21}$$

则由式(2)可得纬轴回转轴的作用矩阵 E_B ,

$$E_B = \begin{bmatrix} \cos B & \cos b \sin B & \sin b \sin B \\ -\cos b \sin B & \cos B + \sin^2 b (1 - \cos B) & -\sin b \cos b (1 - \cos B) \\ -\sin b \sin B & -\sin b \cos b (1 - \cos B) & \cos B + \cos^2 b (1 - \cos B) \end{bmatrix}, \tag{22}$$

此时, 反射镜 6, 7, 8 绕纬轴回转轴线 N_B 旋转, 其法向矢量已偏离理想矢量方向, 表示为 N_{6b} 、 N_{7b} 、 N_{8b} , 则

$$N_{ib} = E_B N_i \quad (i = 6, 7, 8), \tag{23}$$

其中, N_i 为纬角 $B = 0$ 时反射镜的法向矢量

$$N_{60} = -N_{70} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{Bmatrix} -1 \\ \sin b \\ -\cos b \end{Bmatrix}, \tag{24}$$

$$N_{80} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{Bmatrix} 1 \\ \sin b \\ -\cos b \end{Bmatrix}, \tag{25}$$

由此可确定反射镜 6, 7, 8 作用矩阵 M_{6b} 、 M_{7b} 、 M_{8b} , 则纬轴产生误差 b 时, 出射光束矢量

$$\begin{aligned} R_{0b} &= M_{8b} M_{7b} M_{6b} \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{Bmatrix} = \\ &\begin{Bmatrix} \cos b \cos B + \sin b \sin B \cos B \\ \sin b \cos b \cos^2 B - \sin B (\cos^2 b - \sin b) \\ \sin^2 b \cos^2 B - 2 \sin b \cos b \sin B \end{Bmatrix}, \end{aligned} \tag{26}$$

则由误差 b 引起的经角误差为

$$L_b = - \arctan(\frac{\sin^2 b \cos^2 B - 2 \sin b \cos b \sin B}{\cos b \cos B + \sin b \sin B \cos B}) - 2b \tan B, \tag{27}$$

在纬轴坐标系下, 出射光束矢量

$$\boldsymbol{R}_{Ob} = \boldsymbol{M} \boldsymbol{R}_{Ob}, \tag{28}$$

由误差 b 引起的纬角误差为

$$B_b = - \arcsin(\cos b \cos B \sin B + \sin b \sin^2 B \cos B + \sin b \cos b \cos^3 B - \sin B \cos B (\cos^2 b - \sin^2 b)) - b \cos B. \tag{29}$$

4.3 经轴误差

当经轴出现误差, 则经轴实际回转轴线偏离理想回转轴线 I 角, 偏离方向角为 L_I 。则在经轴坐标系下, 经轴回转轴矢量为

$$\boldsymbol{N}_L = \begin{Bmatrix} \sin I \cos(L_I - L) \\ \cos I \\ \sin I \sin(L_I - L) \end{Bmatrix}. \tag{30}$$

根据激光发射系统工作原理, 本文分两种情况对经轴误差加以分析:

(1) 当由调平误差引起设备整体倾斜时, 激光器、库德光路、轴系、电视跟踪系统将同时发生倾斜, 但其相对位置没有发生变化, 因此出射光束与电视光轴的平行度没有变化而只同时随设备整体倾斜一角度 I 。由该系统工作特性可知, 该系统只要求瞄得准, 打得准, 不要求测量目标的具体位置, 而上述误差角 I 既没有影响电视系统跟踪精度又没有影响两光轴平行度, 因此该部分误差对系统的指向精度并没有影响。

(2) 由于加工误差或设备受热不均, 导致经轴壳体倾斜, 此时激光器与库德光路、轴系、电视跟踪系统相对位置发生变化, 激光入射光束与经轴回转轴线之间发生相对角度变化, 即入射光束已不再严格与经轴回转轴同轴, 在经轴旋转过程中, 出射光束则会偏离理想光轴位置, 此时出射光束与电视光轴发生了相对角度变化, 因而必须将该部分误差计入系统指向误差模型中, 由 4.1 节所述可知该部分误差 I 引起的经角、纬角误差分别为

$$L_I = - I \cos(B + L_I - L) / \cos B, \tag{31}$$

$$B_I = I \sin(B + L_I - L). \tag{32}$$

4.4 照准轴误差

对于本文系统, 照准轴误差是指由于反射镜 6, 7, 8 装调误差所引起的出射激光光束的指向误差, 由 C 表示。设在纬轴坐标系下, 出射光束矢

量在经角方向、纬角方向的偏差分别为 ΔL , ΔB 。由照准轴误差引起的经角、纬角误差为

$$L_C = \Delta L / \cos B, \tag{33}$$

$$B_C = \Delta B. \tag{34}$$

综合上述轴系误差对激光发射系统指向误差的影响分析, 经整理得系统指向误差的模型为

$$L = \frac{x^1 + x^2 \sin B + x^3 \sin(B - L) + x^4 \cos(B - L)}{\cos B}, \tag{35}$$

$$B = y^1 + y^2 \cos B + y^3 \cos(B - L) + y^4 \sin(B - L). \tag{36}$$

其中 $x^1 = \Delta L$, $y^1 = \Delta B$, $x^2 = 2y^2 = -2b$, $x^3 = -y^3 = V \sin L_V + I \sin L_I$, $x^4 = y^4 = -(V \cos L_V + I \cos L_I)$ 。

以上参数具有明确的物理意义, 式(35)、(36)可以描述轴系误差对激光发射系统指向精度的影响。

5 试验分析

5.1 试验方法及观测点的选择

由激光发射系统的工作原理可知, 系统的指向精度是由跟瞄精度所保证的, 对于本文的系统, 电视跟踪精度优于 1。该系统指向误差主要是由出射光束与电视光轴不平行度产生的, 因此本文可以认为电视光轴为理想光轴, 由电视跟踪系统检测系统的指向误差。

方法如下: 在一定距离 R 处架设靶板, 在电视跟踪系统和扩束系统上方安装一平面反射镜, 由该反射镜将出射激光光束导向靶板, 如图 4 所示。读取靶板上激光光斑在电视跟踪系统中脱靶量数值, 其分别为与理论脱靶量值差, 即可作为该系统指向误差的测量值。根据测量数据, 进行最小二乘拟合, 即得模型的各项系数, 进而获得指向误差的修正模型。

本文选两组观测数据用于模型求解及误差分析, 第一组数据选取系统常用于工作的某两条轨道上的 37 个观测点, 用于计算模型中的待定系数。第二组数据选取 $L = 45^\circ \sim 135^\circ$ 、 $B = -45^\circ \sim 45^\circ$ (天顶区域) 的 100 个观测点, 进行误差修正及分析, 即用第一组数据确定的模型修正第二组数据的指向误差。这样做既可以优先保证系统在某两条轨道上的指向精度, 又可以有效地修正系统

在天顶区域的指向误差。

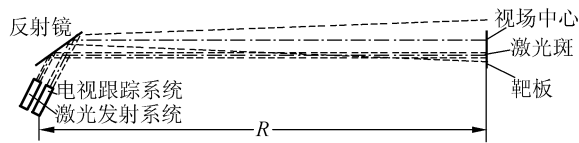


图 4 靶板法测量示意图

Fig. 4 Sketch map of target board measurement

5.2 计算及误差分析

在传统经纬仪等精度单观测实验中, 由于获得的观测数据中包含系统误差和随机误差, 以拟合值代表系统误差, 以残差值代表随机误差的真值, 因此, 通常用中误差或标准偏差来衡量光电经纬仪视轴指向精度^[14-17], 本文采用标准偏差来衡量激光发射系统的指向精度, 其在经角、纬角方向的指向精度和总指向精度的关系为:

$$L = \sqrt{\frac{L_i^2}{n-1}} \quad i = 1, 2, 3, \dots, n, \quad (37)$$

$$B = \sqrt{\frac{B_i^2}{n-1}} \quad i = 1, 2, 3, \dots, n, \quad (38)$$

$$= \sqrt{\frac{2}{L} + \frac{2}{B}}. \quad (39)$$

由第一组观测数据, 用最小二乘法拟合式 (35) 和 (36), 得模型待定系数见表 1, 将系数代回上述方程即得指向误差修正模型。用该模型进行误差修正后, 根据式 (37) ~ (39) 可得系统在两轨道上的指向精度, 见表 2。经修正后系统在两轨道上的指向精度由 67.1 提高到了 3.1, 达到了系统设计的精度要求。

表 1 误差修正模型各待定系数值

Tab. 1 Undetermined coefficients in laser pointing model

Coefficient of	Result	Coefficient of	Result
L	$l(\text{ }^\circ)$	B	$l(\text{ }^\circ)$
x_1	14.86	y_1	16.16
x_2	4.46	y_2	1.75
x_3	51.84	y_3	-50.99
x_4	-36.2	y_4	-34.13

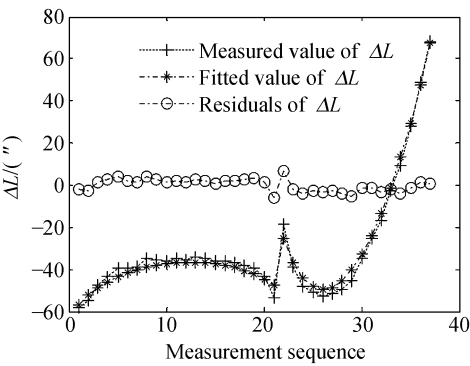
图 5 直观地表达了修正前后系统在两轨道上指向误差的大小, 其中横坐标为测量数据组的序列号, 纵坐标为系统指向误差的大小。由图可看

出拟合曲线与测量曲线吻合的较为理想, 拟合后系统在两条轨道上的指向精度显著提高, 说明该模型能够基本剔除系统的主要误差源。

表 2 修正前后激光发射系统指向精度

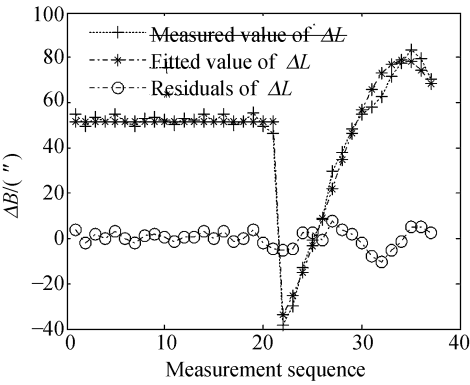
Tab. 1 Laser pointing precisions before and after corrections

	2 specific orbits/()	Zenith region/()
L	41.1/1.9	39.6/6.6
B	53.1/2.4	55.1/7.1
	67.1/3.1	67.8/9.7



(a) 两轨道经角误差曲线

(a) Laser pointing error in longitude dimension



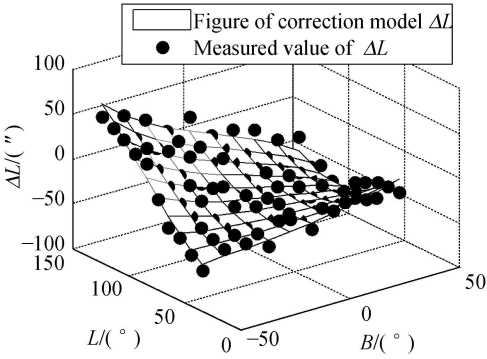
(b) 两轨道纬角误差曲线

(b) Laser pointing error in latitude dimension

图 5 两轨道出射激光光束指向误差曲线

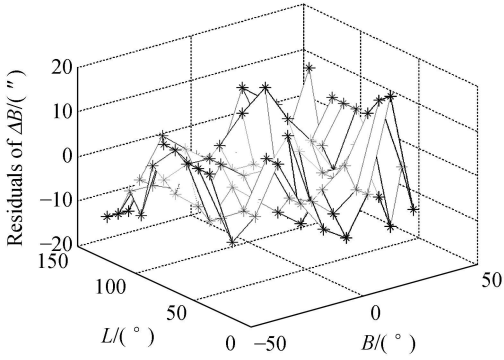
Fig. 5 Laser pointing errors in 2 specific orbits

用已求误差修正模型对第二组数据进行误差修正与分析, 得系统在天顶区域内指向精度, 见表 2。经修正后系统在天顶区域的指向精度由 67.8 提高到了 9.7。图 6 直观地表达了在天顶区域系统指向误差修正前后的结果。



(a) 天顶区域经角误差曲面图

(a) Laser pointing error in longitude dimension

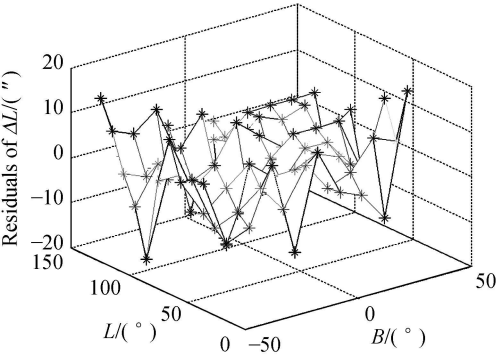


(d) 天顶区域纬角残差图

(d) Residuals in latitude dimension

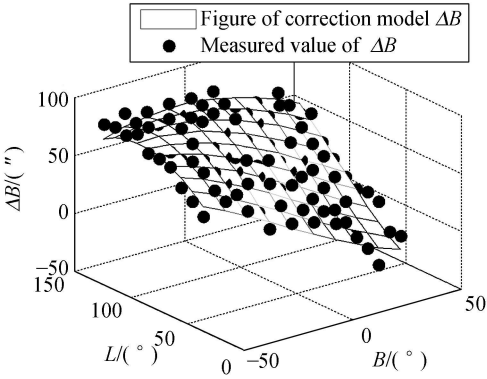
图 6 激光发射系统在天顶区域的指向误差

Fig. 6 Laser pointing errors in zenith region



(b) 天顶区域经角残差图

(b) Residuals in longitude dimension



(c) 天顶区域纬角误差曲面图

(c) Laser pointing error in latitude dimension

由图 6 可看出误差模型曲面与测量数据点吻合的较为理想。该模型能够修正系统的主要误差,使激光发射系统指向精度显著提高。

6 结 论

针对水平式激光发射系统的指向误差不能用传统的光电经纬仪指向误差修正模型来描述,本文对系统指向误差的主要来源——轴系误差进行了分析。通过分析轴系误差在激光发射光路中的传递规律,建立了激光发射系统指向误差的修正模型。试验证明采用该模型对激光发射系统指向误差进行修正后,能够基本剔除系统的主要误差,修正后激光发射系统在某两工作轨道及天顶区域的总指向精度分别为 3.1 和 9.7,达到了系统设计的精度要求。

参考文献:

[1] 郭劲. 战术激光武器系统若干关键技术分析及发展研究[J]. 光学 精密工程, 1996, 4(11): 8-10.
GUO J. Key technology analysis and develop researching of the tactical laser weapon system [J]. Opt. Precision Eng., 1996, 4(1): 8-10. (in Chinese)

[2] 赵江, 徐世录. 激光武器的现状与发展趋势[J]. 激光与红外, 2005, 35(2): 67-68.
ZHAO J, XU S L. The development trend and current situation of the laser weapons [J]. Laser & Nfrared, 2005, 35(2): 67-68. (in Chinese)
[3] 徐军, 罗积军, 郭锁利. 高能激光武器反战术导弹的技术分析[J]. 光学技术, 2005, 31(增): 424.

- XU J, LUO J J, GUO S L. Technical analyses using high laser weapon against tactical ballistic missile [J]. *Optical Technique*, 2005, 31(suppl): 424.
- [4] 邹振宁, 冷锋, 周芸. 光电对抗技术和装备现状评析[J]. 光电与控制, 2004, 11(3): 33-34.
- ZOU Z N, LENG F, ZHOU Y. Current situation of electro-optical counter measure technology and equipment [J]. *Electronics Optics & Control*, 2004, 11(3): 32-33. (in Chinese)
- [5] 易明, 王晓, 王龙. 美军光电对抗技术、装备现状与发展趋势初探[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(5): 603-904.
- YI M, WANG X, WANG L. Status quo and trend of American army of electro-optic countermeasure technology and equipment [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(5): 603-604. (in Chinese)
- [6] 王效才. 强激光武器系统光学总体考虑[J]. 应用光学, 1996, 17(6): 11-12.
- WANG X C. Optical general considerations of powerful laser weapon system [J]. *Applied Optics*, 1996, 17(6): 11-12. (in Chinese)
- [7] 王家骥, 金光, 颜昌翔. 机载光电跟踪测量设备的目标定位误差分析[J]. 光学精密工程, 2005, 13(2): 105-108.
- WANG J Q, JIN G, YAN CH X. Orientation error analysis of airborne optoelectric tracking and measuring device [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(2): 105-108. (in Chinese)
- [8] 金光, 王家骥. 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): 89-93.
- JIN G, WANG J Q. The Three-error Axis of Theodolite with the Utilization of the Coordinate to the Variation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999, 7(5): 89-93. (in Chinese)
- [9] 高策, 乔彦峰. 光电经纬仪测量误差的实时修正[J]. 光学精密工程, 2007, 15(6): 846-849.
- GAO C, QIAO Y F. Real-time error correction method for photoelectrical theodolite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(6): 846-849. (in Chinese)
- [10] 平一鼎, 张晓祥, 鲁春林. 65cm 水平式望远镜静态指向模型[J]. 天文学报, 2006, 47(2): 224-230.
- PING Y D, ZHANG X X, LU CH L. Static pointing model of 65 cm level mounting telescope [J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2006, 47(2): 224-230. (in Chinese)
- [11] 赵金宇, 王德兴, 李文军, 等. 望远镜系统误差动态修正的一种新方法[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(2): 244-247.
- ZHAO J Y, WANG D X, LI W J, et al.. New method of dynamic correction for the system errors of telescope [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(2): 244-247. (in Chinese)
- [12] 王晶, 高利民, 姚俊峰. 机载测量平台中的坐标变换误差分析[J]. 光学精密工程, 2009, 17(2): 389-392.
- WANG J, GAO L M, YAO J F. Analysis on coordinate conversion error of airborne measuring device [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(2): 389-392. (in Chinese)
- [13] 陆震. 高等机械原理[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2001.
- LU Z. *Senior Mechanical Theory* [M]. Beijing: Publishing House of BUAA, 2001. (in Chinese)
- [14] 巩岩. 利用恒星标校卫星激光测距经纬仪指向精度[J]. 光学精密工程, 2000, 8(3): 259-260.
- GONG Y. Calibrating the pointing precision of satellite laser ranging theodolite by observing stars [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(3): 259-260. (in Chinese)
- [15] 毛英泰. 误差理论与精度分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982.
- MAO Y T. *Deviation Theory and Accuracy Analysis* [M]. Beijing: Defense Industry Press, 1982. (in Chinese)
- [16] 徐智勇, 袁家虎, 黄祖华, 等. 精确修正光电经纬仪中的系统误差方法研究[J]. 光电工程, 1998, 25(sup.): 56-57.
- XU Z Y, YUAN J H, HUANG Z H, et al.. Method study on accurately correction of the system errors of the photoelectric theodolite [J]. *Optoelectronic Engineering*, 1998, 25(sup.): 56-57. (in Chinese)
- [17] 张世箕. 测量误差及数据处理[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- ZHANG S J. *Measurement Deviation and data analysis* [M]. Beijing: Science Press, 1979. (in Chinese)

作者简介:



薛向尧(1981-),男,河北唐山人,博士研究生,2005 年于桂林电子科技大学获得硕士学位,2008 年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事光学精密机械结构设计与误差分析方面的研究。E-mail: xuexiangyao@126.com



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

张文豹(1967-),男,黑龙江绥化人,副研究员,1989 年于齐齐哈尔大学获得学士学位,主要从事光机结构设计方面的研究。E-mail: zhangwb@126.com



于 萍(1963-),女,吉林长春人,研究员,硕士生导师,1986 年于吉林工业大学获得学士学位,主要从事光电测量设备的设计与研究。E-mail: yuping_gtdk@163.com

通讯作者:



高云国(1955-),男,山东乳山人,研究员,博士生导师,1982 年于哈尔滨科技大学获得学士学位,1991 年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事光电仪器总体设计的研究。E-mail: gaoyg_gjs@163.com.cn

下期预告

编码结构光系统模型及误差分析

贾小军^{1,2}, 张之江¹, 曹 芳¹, 曾 丹¹

(1. 上海大学 特种光纤与光接入网重点实验室, 上海 200072;

2. 嘉兴学院 数学与信息工程学院, 浙江 嘉兴 314001)

根据编码结构光检测原理,建立了结构光测量系统的数学模型,并对该模型的各参量之间的相互关系及误差进行研究,得到了优化的系统结构参数。按照系统的几何结构,建立了深度信息的计算模型。分析了系统参数对模式成像的影响,实现了测量系统的模式像在不同参数值下的动态变形,并确定了图像坐标随深度值变化的几何关系。通过分析系统参数与深度信息的误差关系,确定了系统集成应遵守的约束条件,集成了最优系统结构。实验结果表明,按照优化参数建立的系统,其测量相对误差约为 0.3%,基本满足编码结构光测量系统三维重建的高精度要求。