

潜望式激光通信瞄准机构误差计算

黄龙*, 张文会

(中国空间技术研究院 西安分院, 陕西 西安 710100)

摘要: 本文提出了一种机构指向误差计算方法。首先,采用反射镜单位法向量和光束单位方向向量分别表示机构反射镜的姿态和激光束的传播方向,接着采用坐标变换和矩阵传递求出反射镜在总体坐标系中的单位法向量,通过向量对称计算出激光束经过两次镜面反射后的方向向量,最后将机构各参数的理论值和实际值代入上述算法,分别求出激光束经过两次镜面反射后的理论方向向量和实际方向向量,两向量夹角即为机构的指向误差。在得到指向误差和部件误差的关系式后,机构设计时即可通过机构指向误差反计算求出部件的误差值。结果表明:机构物理样机测试指向误差值为 0.0057° ,将机构部件参数测试误差值代入误差正计算算式,得出机构的指向误差值为 0.0061° ,以该指向误差通过反计算得出的参数平均误差值为 0.00225° ,与测试结果相近,可以为机构的精度设计提供参考依据。

关键词: 激光通信;潜望式瞄准机构;误差计算

中图分类号:V44 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20150805.0840

Error calculation of periscope pointing assembly for laser communication

HUANG Long*, ZHANG Wen-hui

(Xi'an Branch of China Academy of Space Technology, Xi'an 710100, China)

* Corresponding author, E-mail:493610415@qq.com

Abstract: A method of assembly error calculation is proposed in this paper. First, the posture of the mirrors and the direction of the laser beam are represented by using unit normal vector and unit direction vector. Then, using the coordinate transformation and the transfer matrix, the unit normal vector of the mirrors is obtained in the global coordinate system. The beam direction vector after twice specular reflection by the vector symmetry is calculated. Finally, taking the theoretical value and the actual value of the parameters of the assembly into the algorithm, the theoretical and actual direction vector of the laser beam reflected twice from the mirror are obtained. The intersection angle between two vectors is the pointing error of the assembly. After getting the relationship of the global pointing error and the part error, the average part error can be obtained by the pointing error back calculation. The testing pointing error of the prototype is 0.0057° , and the value of assembly pointing error which is obtained by taking the part testing error into the algorithm is 0.0061° . With this value, the average parts error is 0.00225° by back calculation. The calculation data is closed to the result of testing, and it can provide a reference for the accuracy design of the periscope pointing assembly.

Key words: laser communication; periscope pointing assembly; error calculation

1 引言

激光通信是指以激光作为信息载体应用于卫星或航天器间的一种新型通信方式,相对于微波通信,激光通信具有数据传输速率大、能量密度高、保密性好、终端天线体积小、重量轻等优点^[1],世界各国都开展了大量的研究工作,美国、欧洲、日本以及中国等国家都投入了大量的人力、物力进行激光通信技术及实验装置的研究,研制了各种类型的通信终端^[2-4]。搭载在卫星上的光通信终端是一个光、机、电等复合的系统,其主要由发射接收光束的光学系统、进行调制解调的通信模块、按照特定光路设计的机械结构装置、光束实现精确定向的控制系统、电源系统及热控系统组成。终端机械结构装置主要有两种结构形式:卡塞格伦式和潜望镜式。激光通信链路建立过程主要是由信号发射星通信终端向信号接收卫星通信终端区域进行信标光扫描,信号接收卫星终端探测到信标光后,调整其粗调瞄准机构和精瞄偏转镜使信标光光斑位于精瞄探测器中心,然后利用其通信光对信号发射星进行超前瞄准,并发出回馈通信光,信号发射卫星接收到反馈光后,停止信号光扫描并调整其对准的方向,使得光斑位于精瞄探测器的中心,然后利用其通信光对客户星进行超前瞄准,发出回馈光,同样客户星端机通过调整使得接收到的通信光光斑位于精瞄探测器中心,即实现了瞄准;双方相互锁定后,进入跟踪状态,开始光通信^[5-6]。由于卫星激光通信系统通信距离远,激光束发散角小^[7],对激光通信终端的机械指向机构提出了很高的精度要求^[8],所以指向误差成为瞄准机构的一个重要设计指标。本文旨在提出一种可以对潜望式瞄准机构指向误差进行准确计算的方法。

2 潜望式瞄准机构组成和工作原理

2.1 潜望式瞄准机构组成

图1为潜望式瞄准机构的基本结构,其主要由方位转轴、方位反射镜、俯仰转轴、俯仰反射镜及之间的连接结构件组成。方位转轴和俯仰转轴

组成基本相同,均由中空直流无刷电机、轴承、角度传感器及相应结构件组成,方位转轴一端安装在星载平台上^[9]。

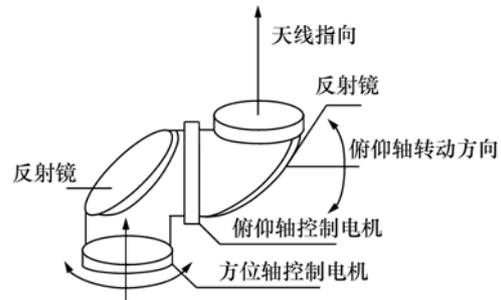


图1 潜望式瞄准机构基本机构

Fig.1 Basic mechanisms of periscope pointing assembly

2.2 潜望式瞄准机构工作原理

如图2所示,激光束在通信终端中被相应处理后射入粗调瞄准机构中,经过方位轴反射镜和俯仰轴反射镜先后两次反射后从机构中射出,如图2中虚线箭头所示;接收其它终端发射的激光束同样经过俯仰轴反射镜和方位轴反射镜先后两次反射后,之后经过相应的处理由光学天线接收。镜面的调节如图1所示,机构工作时,俯仰轴反射镜及其相应结构部分受驱动单元的驱动可以绕俯仰轴旋转,同时和方位反射镜一起受方位驱动单元驱动绕方位轴旋转,通过控制方位轴和俯仰轴的旋转调节方位反射镜和俯仰反射镜的位置和姿态,进而完成对激光束传播方向的控制^[10]。

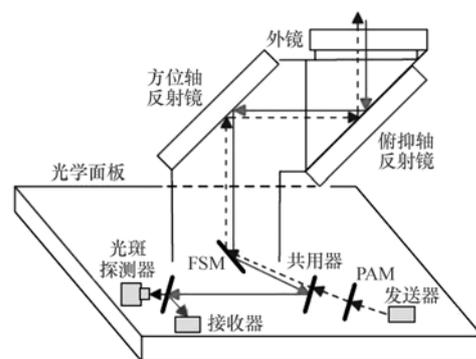


图2 潜望式粗调瞄准机构光路示意图

Fig.2 Light path diagram of periscope pointing assembly

3 机构误差分析

潜望式瞄准机构的指向误差是指机构工作时激光束经过镜面反射后光路的实际传播方向与激光束理想传播方向的夹角。

激光束在机构中传播时,通过方位反射镜和俯仰反射镜反射改变光束的传播方向,因此对激光束传播方向的研究可以转换为对方位反射镜和俯仰反射镜的位置姿态进行研究。基于潜望镜式粗调机构的工作原理,采用坐标变换和传递矩阵相结合的方法对方位反射镜和俯仰反射镜的位置姿态进行分析计算^[11]。

机构工作时,方位反射镜和俯仰反射镜的位置误差不会对对激光的传播方向产生影响,但可能由光学天线发射或接收的激光在镜面反射时由于镜面的位置移动使部分光线不能被反射,影响通信效率。在机构设计时,镜面的尺寸大于光学天线的直径^[12],而位置误差值要远小于镜面尺寸和光学天线尺寸间的差值,所以反射镜位置误差不会对激光通信的效率和光线传播方向产生影响,仅姿态误差对激光的传播方向有影响。

在机构生产装配和工作过程中,影响机构指向误差因素主要有^[13]机构结构件生产装配误差,方位转轴和俯仰转轴转动误差^[14]、机构在工作温度范围内的热变形误差。在之后误差计算模型建立过程中,将会对上述误差源产生的角度变化进行简要说明。

4 机构指向误差正计算

指向误差的正计算^[15]是指给定机构各部件的误差值求机构总体指向误差,建立各部件误差和总体误差的关系表达式。

$${}^0R_1 = \begin{pmatrix} \cos\alpha_y & 0 & \sin\alpha_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\alpha_y & 0 & \cos\alpha_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\alpha_x & -\sin\alpha_x & 0 \\ \sin\alpha_x & \cos\alpha_x & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

式中: α_y, α_x 分别为由机构生产装配误差导致坐标系 $o-x_1y_1z_1$ 绕坐标系 $o-xyz$ y, z 轴的转动角度, α_x 为工作时坐标系 $o-x_1y_1z_1$ 绕坐标系 $o-xyz$ x 轴转动的

4.1 机构各部件坐标系建立

采用反射镜镜面的法向单位向量表示表示镜面的姿态,机构模型及各构件的坐标系如图3所示。总体坐标系 $o-xyz$ 固定在安装平台上, x 轴与方位转轴重合;方位旋转轴坐标系 $o-x_1y_1z_1$ 原点和 $o-xyz$ 原点重合, x_1 轴方向与方位转轴方向重合;俯仰旋转轴坐标系 $o-x_2y_2z_2$ 位于方位包络和俯仰转轴的安裝面上, x_2 轴方向与俯仰轴系重合;方位反射镜坐标系 $o-x_3y_3z_3$ 原点位于镜面中心, x_3 轴方向与镜面法线方向重合。俯仰反射镜坐标系 $o-x_4y_4z_4$ 原点位于镜面中心, x_4 轴方向与镜面法线方向重合,在初始位置,坐标轴 z_1, z_2, z_3, z_4 和坐标轴 z 同向。由于只有反射镜的姿态误差对激光的传播方向有影响,因而在计算时不考虑坐标系原点的移动,认为各坐标系坐标原点重合,仅考虑坐标系间绕相应坐标轴的旋转。

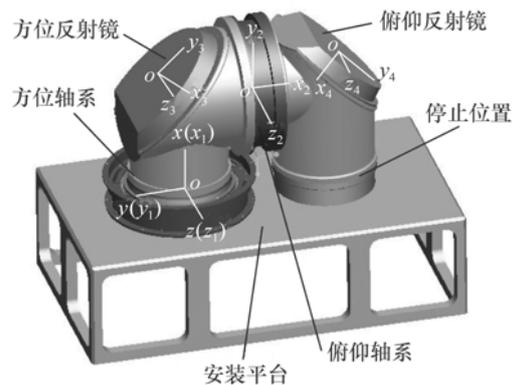


图3 潜望镜式粗调机构坐标位置

Fig. 3 Coordinate position of periscope pointing assembly

4.2 方位反射镜在总体坐标系中法向量计算

方位反射镜单位法向量在局部坐标系 $o-x_3y_3z_3$ 中为 $n_1 = (1, 0, 0)^T$, 根据坐标变换及矩阵传递理论^[16], 坐标系 $o-x_1y_1z_1$ 相对于坐标系 $o-xyz$ 的变换矩阵为:

$$\begin{pmatrix} \cos\alpha_x & -\sin\alpha_x & 0 \\ \sin\alpha_x & \cos\alpha_x & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_y & -\sin\alpha_y \\ 0 & \sin\alpha_y & \cos\alpha_y \end{pmatrix}, \quad (1)$$

工作变量。

坐标系 $o-x_3y_3z_3$ 相对于 $o-x_1y_1z_1$ 的变换矩阵为:

$${}^1R_1 = \begin{pmatrix} \cos\theta_z & -\sin\theta_z & 0 \\ \sin\theta_z & \cos\theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta_y & 0 & \sin\theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_y & 0 & \cos\theta_y \end{pmatrix}, \quad (2)$$

式中: θ_y 、 θ_z 分别为由于设计要求及机构生产装配误差和机构热变形误差叠加使坐标系 $o-x_3y_3z_3$ 绕坐标系 $o-x_1y_1z_1$ 转动时 y_1 和 z_1 轴的转动角度。

$${}^0R_2 = \begin{pmatrix} \cos\alpha_y & 0 & \sin\alpha_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\alpha_y & 0 & \cos\alpha_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\alpha_z & -\sin\alpha_z & 0 \\ \sin\alpha_z & \cos\alpha_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

坐标系 $o-x_2y_2z_2$ 相对于坐标系 $o-x_1y_1z_1$ 的变换矩阵为:

$${}^1R_2 = \begin{pmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta & -\sin\beta \\ 0 & \sin\beta & \cos\beta \end{pmatrix}, \quad (5)$$

式中: γ 为机构设计要求使坐标系 $o-x_2y_2z_2$ 绕坐标系 $o-x_1y_1z_1$ 绕 z 轴的转动角度, β 为机构工作时坐标系 $o-x_2y_2z_2$ 绕坐标系 $o-x_1y_1z_1$ 转动时 x 轴转动的工作变量。

坐标系 $o-x_4y_4z_4$ 相对于坐标系 $o-x_2y_2z_2$ 的变换矩阵为:

$${}^2R_3 = \begin{pmatrix} \cos\omega_z & -\sin\omega_z & 0 \\ \sin\omega_z & \cos\omega_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\omega_y & 0 & \sin\omega_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\omega_y & 0 & \cos\omega_y \end{pmatrix}, \quad (6)$$

式中: ω_y 、 ω_z 分别为由于设计要求及机构生产装配误差和机构热变形误差叠加使坐标系 $o-x_4y_4z_4$ 绕坐标系 $o-x_2y_2z_2$ 绕 y 转动时 z 轴的转动角度。

由坐标变换原理俯仰反射镜在总体坐标系 $o-xyz$ 中的单位法向量为:

$$\mathbf{m} = {}^0R_2 \cdot {}^1R_2 \cdot {}^2R_3 \cdot \mathbf{m}_1. \quad (7)$$

4.4 对称向量计算

在机构的指向误差计算中,采用单位向量表示激光束的传播方向,激光束经过镜面反射后光路传播方向的单位方向向量的反向向量与入射光单位方向向量以镜面的法向量对称。若镜面法向量 $k=(a,b,c)$,入射光方向向量 $\mathbf{e}_1=(r,s,t)$,则反射光线的方向向量:

$$\mathbf{e}_2 = (x,y,z), \quad (8)$$

式中:

根据坐标变换原理方位反射镜在总体坐标系 $o-xyz$ 中的单位法向量为:

$$\mathbf{n} = {}^0R_1 \cdot {}^1R_1 \cdot \mathbf{n}_1. \quad (3)$$

4.3 俯仰反射镜在总体坐标系中法向量计算

俯仰反射镜单位法向量在坐标系 $o-x_4y_4z_4$ 中为 $\mathbf{m}_1=(1,0,0)^T$,与方位反射镜相同,坐标系 $o-x_1y_1z_1$ 相对于坐标系 $o-xyz$ 的变换矩阵为:

$$\begin{pmatrix} -\sin\alpha_z & 0 \\ \cos\alpha_z & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_x & -\sin\alpha_x \\ 0 & \sin\alpha_x & \cos\alpha_x \end{pmatrix}. \quad (4)$$

$$\begin{cases} x = -\frac{ra^2 + 2sab + 2tac - rb^2 - rc^2}{a^2 + b^2 + c^2} \\ y = -\frac{sb^2 + 2rab + 2tbc - sa^2 - sc^2}{a^2 + b^2 + c^2} \\ z = -\frac{tc^2 + 2rac + 2sbc - tb^2 - ta^2}{a^2 + b^2 + c^2} \end{cases}. \quad (9)$$

4.5 机构指向误差计算

由于通信终端在接收和发射激光束时,光束在瞄准机构中的传播路径相同,所以以发射终端指向机构为例计算机构的指向误差,定义射入机构的激光束的方向向量为 $\mathbf{e}_1=(1,0,0)^T$,从机构中射出的激光束的方向向量的理论值和实际值取决于计算反射镜法向量时代入的参数值不同。将相应参数理论值和实际值代入式(3)、(7)分别求出方位反射镜和俯仰反射镜法向量的理论值和实际值,激光束经过两次反射从机构中射出的方向向量由入射激光束的方向向量和反射镜法向量代入式(8),经过两次对称计算分别求出射出光线方向向量的理论值和实际值。

在得到光线从机构中射出时的理想传播方向向量 \mathbf{d} 和实际传播方向向量 \mathbf{d}' 后,根据向量的性质,可以求出激光的实际传播方向和理论传播方向的夹角:

$$\lambda = \arccos \frac{\mathbf{d}\mathbf{d}'}{\|\mathbf{d}\| \|\mathbf{d}'\|}, \quad (10)$$

式中: λ 即为机构的指向误差。

5 机构指向误差反计算

机构设计时,需要各构件的误差为零部件选择、生产和装配提供参考。指向误差的逆问题是

指给定机构的总体设计误差,计算机构各构件误差的过程。本文使用等公差法计算各部件误差。

采用等公差法时,先假定各部件参数的公差相等,在满足部件公差合成的机构整体公差等于机构设计误差的条件下,求出各部件的平均公差,之后根据各部件的尺寸大小、加工难易程度及样机测试结果等因素对部件公差进行适当调整,得出各部件的公差,最后将部件公差代入误差正计算公式中,验证是否满足设计要求。

机构指向误差正计算模型中各参数理论值为: $\theta_y = 0, \theta_z = -135^\circ, \gamma = 90^\circ, \omega_y = 0, \omega_z = -135^\circ, \alpha_y = 0, \alpha_z = 0$, 参数 α_x, β 分别为机构工作时方位轴和俯仰轴的转动角度值;误差分别为: $\Delta\alpha_x, \Delta\alpha_z, \Delta\beta, \Delta\gamma, \Delta\theta_y, \Delta\theta_z, \Delta\omega_y, \Delta\omega_z$, 误差反计算时,首先令机构各参数的公差值相等,且均等于 x 即: $\Delta\alpha_x = \Delta\alpha_y = \Delta\alpha_z = \Delta\beta = \Delta\gamma = \Delta\theta_y = \Delta\theta_z = \Delta\omega_y = \Delta\omega_z = x$ 。为了计算简便,令 α_x, β 为常值且均等于 0,即以机构初始位置姿态计算各部件误差,将上述各参数及平均误差值 x 代入式(3)、(7)分别求出从机构射出激光束的理论方向向量 \mathbf{d} 和实际方向向量 \mathbf{d}' 后,将 \mathbf{d}, \mathbf{d}' 代入式(10)得出机构的指向误差 λ 和部件平均误差值 x 的关系式:

$$\lambda = \lambda(x) . \quad (11)$$

由于矩阵相乘、向量对称及反余弦计算后 $\lambda(x)$ 表达式极为复杂,本处采用绘制 $\lambda = \lambda(x)$ 曲线图,在曲线图上取点求出 x 的值。使用 Matlab 软件绘制 $\lambda = \lambda(x)$ 曲线,如图 4 所示。

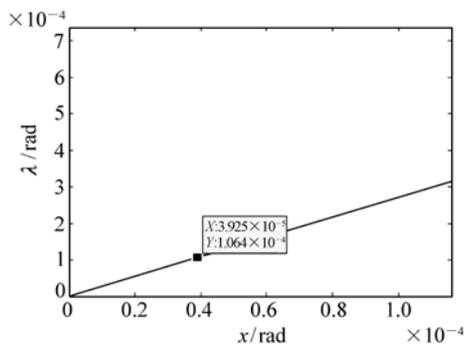


图 4 $\lambda = \lambda(x)$ 曲线

Fig. 4 Curve of $\lambda = \lambda(x)$

6 样机测试结果及验证计算

通过对机构物理样机的部件及装配结构的测量,静态误差测量结果如表 1 所示。

表 1 机构样机测试结果

Tab. 1 Testing results of the prototype

项目	测量结果
方位轴与安装面垂直度	0.003°
方位轴与俯仰轴垂直度	0.003 7°
方位反射镜与其安装面位置精度	0.000 6°
俯仰反射镜与其安装面位置精度	0.000 6°

机构的运动参数 α_x, β , 方位驱动单元和俯仰驱动单元测试结果见表 2。

表 2 机构转动精度测试结果

Tab. 2 Testing results of rotation accuracy

测试项目	测试结果/(°) (RMS)	
方位驱动单元	正向	0.001 25
	反向	0.001 36
俯仰驱动单元	正向	0.001 37
	反向	0.001 40

机构的整体测试误差为 0.005 7°(静态)。

因为测试条件所限,方位旋转轴绕总体坐标系 $o-xyz$ 坐标轴 y 轴和 z 轴的转动误差值无法测量,仅测得方位轴线与安装面($o-yz$ 平面)的垂直度,在此处为了计算方便,将该垂直度值等分分解为方位转轴绕 y, z 轴的正向转动值,得出参数 α_y, α_z 的误差值分别为: $\Delta\alpha_y = 0.002 3^\circ, \Delta\alpha_z = 0.002 3^\circ$ 。对于参数 $\theta_y, \theta_z, \omega_y, \omega_z$, 采用同样方法分别对方位反射镜与安装面位置精度和俯仰反射镜与安装面位置精度进行分解,得出其误差值分别为: $\Delta\theta_y = 0.0004 2^\circ, \Delta\theta_z = 0.000 42^\circ, \Delta\omega_y = 0.0004 2^\circ, \Delta\omega_z = 0.000 42^\circ$ 。参数 γ 的误差值即为方位轴与俯仰轴垂直度,其值 $\Delta\gamma = 0.003 7^\circ$ 。

将上述各参数误差代入式(3)、式(7)、式(10)得出机构指向误差正计算结果为 0.006 1° (1.064×10^{-4} rad)(初始位置,静态)。将此误差值代入误差反计算,在 $\lambda = \lambda(x)$ 曲线图中取点,

如图4所示,得出各参数的平均误差为 0.00225° (3.925×10^{-5} rad),测试结果与平均误差相差较小且分布在平均误差周围,所以通过误差反计算的出的部件平均误差可以为误差设计提供参考依据,在得到参数的平均误差后,根据各部件的尺寸大小、加工难以程度、热变形分析结果及样机测试结果等因素对部件公差进行适当调整,得出各部件的公差值。

7 结 论

光通信终端瞄准机构的指向精度是激光链路建立的一个重要因素,本文采用向量坐标变换的

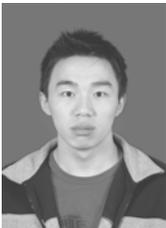
方法计算反射镜在总体坐标系中的姿态,用向量表示光路传播,采用向量对称的计算方法对光束反射后的传播方向进行计算,通过理论传播方向和实际传播方向对比,得出瞄准机构的指向误差,之后利用正计算的算式,对机构部件的误差进行反计算。机构的样机测试整体静态指向误差为 0.0057° ,将各部件参数误差测试结果代入误差正计算算式求出机构的初始位置静态指向误差为 0.0061° ,以此误差值反计算得出参数平均误差为 0.00225° 。通过测试和计算数据对比,该计算方法计算结果准确,所以该算法在机构设计时可以对机构的精度设计提供帮助,为机构误差的计算和分配提供理论支持。

参考文献:

- [1] 程彦彦. 星载激光通信终端光学系统研究[D]. 西安:中国科学院西安光学精密机械研究所,2012.
CHENG Y Y. Research on space laser communication optical system[D]. Xian:Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics Chinese Academy of Science,2012. (in Chinese)
- [2] HEMATI H. Status of free-space optical communication program at JPL[J]. *SPIE*,2002(4635):185-193.
- [3] 陈莲. 星间光通信终端粗瞄系统控制方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
CHEN L. Research on control method of coarse pointing in laser intersatellite communication[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology,2011. (in Chinese)
- [4] NIEISEN T T, OPPENHAEUSER G. In orbit test result of an operational optical intersatellite link between ARTEMIS and SPOT4, SILEX[J]. *SPIE*,2002,4635:1-15.
- [5] 邵兵. 激光星间通信终端精瞄微定位系统关键技术的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.
SHAO B. Research on key technology of fine pointing micro-positioning system for laser intersatellite communication terminal[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology,2006. (in Chinese)
- [6] 吴从均, 颜昌翔, 高志良. 空间激光通信发展概述[J]. *中国光学*,2013,6(5):670-680.
WU C J, YANG CH X, GAO ZH L. Overview of space laser communications[J]. *Chinese Optics*,2013,6(5):670~680. (in Chinese)
- [7] 崔宁, 陈兴林, 曹开锐, 等. 空间光通信精跟踪系统的模糊自抗扰控制[J]. *光学精密工程*,2015,27(5):1394-1400.
CUI N, CHEN X L, CAO K R, *et al.*. Fuzzy active disturbance rejection control of fine tracking system for free space optical communication[J]. *Opt. Precision Eng.*,2015,27(5):1394-1400. (in Chinese)
- [8] 于笑楠, 佟首峰, 董岩, 等. 空间激光通信组网单光束跟踪子系统[J]. *光学精密工程*,2014,22(12):3348-3353.
YU X N, TONG SHF, DONG Y, *et al.*. Single beam tracking subsystem of space laser communication network[J]. *Opt. Precision Eng.*,2014,22(12):3348-3353. (in Chinese)
- [9] SZEKELY G, BLUM D, HUMPHRIES M, *et al.*. A Coarse Pointing Assembly for Optical Communication. Proceeding of the 40th Aerospace Mechanisms Symposium, NASA Kennedy Space Center, May 12-14, 2010.
- [10] BAISTER G, GATENBY P, LEWIS J, *et al.*. The SOUT optical intersatellite communication terminal[J]. *IEEE*,1994,141(6):345-355.
- [11] 温瑞. 六自由度测量机器人误差分析与仿真[D]. 西安:西安理工大学,2008.
WEN R. Research on error sources analysis and dynamic simulation of 6-DOF measurement robot[D]. Xi'an: Xian University of Technology,2008. (in Chinese)
- [12] BARBO R, SCHMID M. Coarse Pointing and Fine Pointing Mechanism (CPA and FPA) for an optical communication link

- [J]. *Proceedings of European Space Mechanisms & Tribology Symposium*, 2003:89-96.
- [13] 张滋黎,朱涵,周维虎. 激光跟踪仪转镜倾斜误差的标定及修正[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(5):1205-1212.
ZHANG Z L, ZHU H, ZHOU W H. Error calibration and correction of mirror tilt in laser trackers[J]. *Opti. Precision Eng.*, 2015, 23(5):1205-1212. (in Chinese)
- [14] 胡庆磊,李忠. 潜望式光电仪器轴系误差的精确数学模型及计算[J]. *光学与光电技术*, 2013, 11(1):60-62.
HU Q L, LI ZH. A shafting error simulating method of electro-optics periscope instrument[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2013, 11(1):60-62.
- [15] 王伯平. 互换性与测量计算基础[M]. 北京:机械工业出版社, 2012,
WANG B P. *Fundament of Interchangeability and Measurement Calculation*[M]. Beijing:China Machine Press, 2012. (in Chinese)
- [16] 戴华. 矩阵论[M]. 北京:科学出版社, 2006.
DAI H. *Theory of Matrices*[M]. Beijing:Science Press, 2006. (in Chinese)

作者简介:



黄龙(1988—),男,河南洛阳人,硕士研究生,主要从事航天器天线及电子设备结构设计方面的研究。E-mail: 493610415@qq.com



张文会(1978—),男,河南南阳人,学士,高级工程师,主要从事空间天线结构及机构方面的研究。E-mail: 13909243052@163.com