

空间望远镜次镜六自由度调整机构精密控制

杨维帆,曹小涛,张彬,赵伟国,林冠宇

(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:为满足空间望远镜在轨主动光学控制需求,需要精密调整次镜相对于主镜的六自由度位姿,为此,针对 6-PSS Stewart 平台构型的次镜精密调整机构,设计完成了基于并联机器人关节空间方法的运动控制系统。以 DSP 和 FPGA 为核心处理器,编码器为反馈元件,集成电机三相桥为驱动元件,设计完成了次镜六自由度调整机构的运动控制电路。基于次镜调整机构的顶层逆运动学模型和底层连杆控制系统,设计完成了次镜六自由度调整机构的运动控制算法,该方法参数易于调整,利于工程实现,满足空间运动机构高可靠性调整需求。试验结果表明,该运动控制系统能够满足全行程内 $0.7\ \mu\text{m}$ (位移)和 $3''$ (角度)运动调整精度需求,能够满足空间望远镜主动光学调整任务。

关键词:空间望远镜; Stewart 平台; 逆运动学模型; 运动控制; 主动光学

中图分类号: TP394.1; TH691.9 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0718007

Six degree of freedom precision control for space camera secondary mirror adjusting mechanism

Yang Weifan, Cao Xiaotao, Zhang Bin, Zhao Weiguo, Lin Guanyu

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

Abstract: For the space camera on orbit active optics requirement, the position and orientation of secondary mirror relative to the primary mirror need to be adjusted. Based on the parallel robot joint space method, the motion control system of 6-PSS Stewart platform secondary mirror adjusting mechanism was designed. By use of DSP and FPGA as the core processor, linear encoder as the feedback element and the integrated three-phase bridge as driving element, the motion control circuit was completed. Based on the top level inverse kinematics model and the bottom level link control system, the motion control algorithm of the secondary six DOF adjusting mechanism was accomplished, the control parameters were easy to be adjusted and the algorithm was easy to be used in the engineering, the requirement of high reliability adjustment for space motion mechanism was satisfied. Experimental results indicate that the $0.7\ \mu\text{m}$ and $3''$ motion accuracy can be achieved, the demand of space camera active optics can be satisfied.

Key words: space camera; Stewart platform; inverse kinematics model; motion control; active optics

收稿日期:2018-02-05; 修订日期:2018-03-03

基金项目:国家自然科学基金重大科研仪器研制项目(41527806)

作者简介:杨维帆(1987-),男,助理研究员,博士,主要从事空间光学遥感器电子学及控制方面的研究。Email:yangweifan1987@sina.com

0 引言

目前,为实现空间目标的高质量成像,对空间望远镜的口径要求越来越大,望远镜口径增大有利于增强集光能力,提高分辨力,能够具有更强大的获取天体信息的能力。同时,主动光学的出现和应用使望远镜的设计思想有了重大转变,下一代地基大口径望远镜几乎全部计划采用主动光学技术。对于空间望远镜,由于在轨运行环境的非恒温因素,各镜体内部以及之间的温度分布是很难保证均匀一致的,这些热变形将会导致望远镜像质变差,此外,火箭发射带来的冲击振动、在轨重力释放和压力变化等因素均会造成各镜体组件间的位置关系,从而影响观测效果。为此,将主动光学技术应用到空间望远镜将是技术的发展趋势,对大口径空间望远镜进行在轨主动光学调整的需求将会越来越强烈,目前也有许多空间望远镜正在规划完成主动光学控制^[1-3]。

主动光学系统通常通过监测各个光学元件位置,或测量最后的波面误差,然后通过调整光学元件的位置和成像进行校正^[4-6],其中主镜与次镜的相对位姿是一项重要的调整任务。多维调整机构大致可以分为串联机构、并联机构以及串并联混合机构三大类。

目前,Stewart 平台结构形式^[7]的并联机构由于刚度大而结构稳定,末端无串联式结构的误差放大与积累而误差小精度高,同时载荷承重分散于六个支杆而承重自重比高,所以已经成为六自由度调整的一种重要结构形式,目前广泛应用于医疗设备、光学精密加工、主动振动抑制、航空航天等领域^[8-11]。HST 和 JWST 均采用 Stewart 机构对次镜进行位置调整,对次镜位姿的调整,一般要求达到微米和角秒级别精度。

文中针对空间望远镜主动光学调整任务,以 Stewart 平台结构形式的次镜六自由度调整机构为研究对象,探讨其精密运动控制方法。精密运动控制系统采用直流无刷电机作为驱动元件,采用光电编码器作为角度反馈元件,设计完成了以 DSP 和 FPGA 为核心控制器,以集成三相桥为电机驱动器的电控系统。为便于空间可靠运行,采用易于工程实现的并联机器人关节空间控制方法,顶层控制基于逆运动学模型,将次镜的六自由度位姿解算为六个连杆的位移量,底层六个连杆的独立控制算法实现位移控制,该方法控制参数少且易于调整,可靠性高。最后,通过运动试验及测试,验证了文中方法的有效性。

1 次镜六自由度调整机构

1.1 六自由度调整机构的组成

为实现空间任务,适应空间环境,要求六自由度调整机构具有大刚度、高精度和高承载自重比等特性,经过分析,该系统采用悬臂较短的 6-PSS(直线副/球副/球副)构型,实物图如图 1 所示。



图 1 六自由度调整机构图

Fig.1 Block diagram of six DOF adjusting mechanism

结构设计采用定长杆结构,缩短动静平台悬臂长度,保证刚度指标;选用高精度、消间隙传动部件,编码器闭环,保证精度指标;采用导轨和定位销实现整体在轨维护;安装维护方向与设施发射方向一致。由直流无刷力矩电机、谐波减速器、光电编码器、丝杠轴、丝母、滚珠花键副构成直线促动器,然后经球铰、定长杆、球铰将运动传递至动平台。

1.2 逆运动学方程

并联机构的逆运动学方程是用来分析在已知动平台位姿的情况下,每个连杆对应的长度。由此方程,控制算法将根据设定的期望位姿,计算连杆长度,从而运行并联机构到达期望位姿。由图 2 中矢量

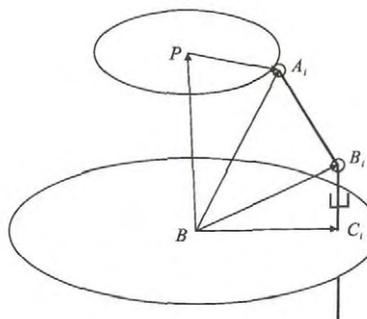


图 2 运动示意图

Fig.2 Block diagram of motion

关系可以推导如下：

$$\overline{BA_i} = \overline{BP} + \overline{PA_i} \quad (1)$$

根据坐标变换可以得到支杆上端点 A_i 在定平

$$R = \text{Rot}(z, \psi) \text{Rot}(y, \theta) \text{Rot}(x, \varphi) = \begin{bmatrix} \cos\psi\cos\theta & \cos\psi\sin\theta\sin\varphi - \sin\psi\cos\varphi & \cos\psi\sin\theta\cos\varphi + \sin\psi\sin\varphi \\ \sin\psi\cos\theta & \sin\psi\sin\theta\sin\varphi + \cos\psi\cos\varphi & \sin\psi\sin\theta\cos\varphi - \cos\psi\sin\varphi \\ -\sin\theta & \cos\theta\sin\varphi & \cos\theta\cos\varphi \end{bmatrix}$$

由矢量关系：

$$\overline{BB_i} = \overline{BC_i} + \overline{C_iB_i} \quad (3)$$

可以计算得到支杆下端点 B_i 在定平台坐标系

下的坐标 $(x_{B_i}^B, y_{B_i}^B, z_{B_i}^B)^T$ ，其中 $z_{B_i}^B$ 为待求解的杆长变量。

由于 BA_i 的长度 L_i 为已知常数，则由

$$|\overline{BA_i} - \overline{BB_i}| = L_i \quad (4)$$

可以计算得到连杆长度为：

$$z_{B_i}^B = z_{A_i}^B - [L_i^2 - (x_{A_i}^B - x_{B_i}^B)^2 - (y_{A_i}^B - y_{B_i}^B)^2] \quad (5)$$

2 次镜调整机构控制系统

2.1 调整机构控制系统动力学方程

并联机器人的控制主要分为基于操作空间和基于关节空间的控制方法，基于操作空间方法需要附加额外的传感器测量动平台位姿，将会增加成本及安装空间，显然对于结构尺寸、重量等严重受限的空间相机是不太适用的。因此，采用基于关节空间的控制方法，即依据动平台的期望位姿，由已推导得到的逆运动学方程，解算出支杆位移期望值，进而控制每一个支杆运动至期望位置，间接得到动平台的期望位姿。

通过 Lagrange 方程^[12]可以建立并联机构在关节空间的动力学模型如下所示：

$$H(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau \quad (6)$$

式中： $q = [q_1, \dots, q_6]^T$ 为驱动电机的旋转角度； $H(q)$ 为 6×6 的惯性矩阵； $C(q, \dot{q})\dot{q}$ 为 6×1 矩阵，代表离心力和哥氏力； $G(q)$ 为重力项， $\tau = [\tau_1, \dots, \tau_6]^T$ 为电机输出力矩。

由上式可知，并联机构的动力学模型为非线性强耦合系统，由于空间系统简单易行，可靠性高等要求，一些基于模型或复杂的算法比如计算力矩等^[11]并不太适用于该系统，需要设计完成一种不基于复杂动力学模型的控制方法。另一方面，从时间频率来看，主动光学是一种校正低时间频率波前误差的方法，通常是在低带宽下修正残余像差^[5]，因此可以将次镜调整系统视为一种慢变定位控制系统，可以对

台坐标系中的坐标为：

$$(x_{A_i}^B, y_{A_i}^B, z_{A_i}^B)^T = (x_{P_i}^B, y_{P_i}^B, z_{P_i}^B)^T + (x_{A_i}^P, y_{A_i}^P, z_{A_i}^P)^T \quad (2)$$

其中转换矩阵为：

上式进行如下简化：

(1) 由于运动速度不高，可以忽略离心力和哥氏力的影响，即 $C(q, \dot{q})\dot{q} \approx 0$ ；

(2) 忽略各连杆惯性矩阵的耦合项，且由于主动光学调整中次镜行程较小，惯性矩阵可以近似等效为常数对角阵，即 $H(q) \approx [h_1, \dots, h_6]^T$ ；

(3) 在地面试验环境中需要考虑重力项，与公式(2)相似，重力项也可以简化为常数，即 $G(q) \approx [g_1, \dots, g_6]^T$ 。

基于以上简化，次镜调整机构模型化为互相解耦的六个独立的二阶线性系统：

$$h_i \ddot{q}_i + g_i = \tau_i \quad (i=1, \dots, 6) \quad (7)$$

考虑无刷电机驱动模型如下：

$$V_i = R_i i_i + L_i di_i/dt + K_e i_i \quad (8)$$

$$\tau_i = K_T i_i \quad (9)$$

式中： V 和 i 为电机励磁回路电压和电流； R 和 L 分别为电机绕组的电阻和电感； K_T 为转矩系数； K_e 为反电势系数。

依据以上分析，可将复杂的多耦合非线性系统的动力学模型转换为独立的单支杆机电模型，如公式(7)~(9)所示。即将对于非线性系统的控制，转换为对于单支杆机电系统的控制。

由此，调整机构的运动控制系统可分解为顶层逆运动学解算和底层单支杆运动控制系统，二者相结合，即可完成对于次镜调整机构的六自由度控制。次镜六自由度调整机构运动控制系统框图如图 3 所示。

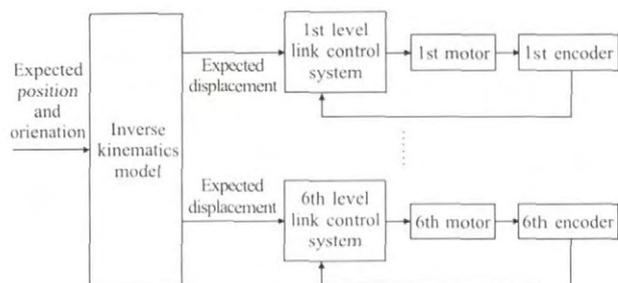


图 3 运动控制系统图

Fig.3 Block diagram of motion control system

2.2 单支杆运动控制系统控制策略

根据上述分析,对于次镜调整机构的控制,可转换为对调整机构单个支杆的独立控制。因此,调整机构的主要控制目标就是在常值扰动项 g_i 的影响下,使得支杆驱动电机实际的运动角度 q_i 稳定至期望的角度 q_{id} 。

单支杆的驱动电机为直流无刷电机,对于无刷电机的控制系统,通常采用由内至外的电流、转速和位置的三闭环构架,系统控制原理框图如图 4 所示。当将整个闭环系统设计为 I 型以上系统时,可以使得系统的稳态误差为零^[13-14],即保证系统无静差。

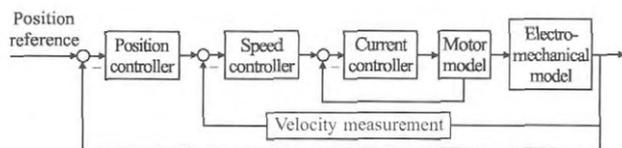


图 4 无刷电机控制系统框图

Fig.4 Block diagram of control system for brushless motor

在设计电流环调节器时,需要实时采集电流信息,不仅增加了硬件电路的复杂程度,增大了软件的工作量,同时电流环的数字化也增大了电流的误差量。为了简化设计,选用内部集成电流环的电机驱动芯片,将电流环设计为模拟环路,不仅简化了软件的工作量,降低了硬件电路的复杂程度,并且能够将电流环可以设计为很高的带宽,通常为几 kHz 平率的带宽,实现电流的快速响应。

在电流闭环设计完成之后,对于外环的设计,可以将电流闭环近似为 1^[14],系统控制对象由电流给定值到速度输出值可等效为 $\frac{K_r}{Js+B}$,其中 J 为单支杆系统的转动惯量, B 为轴系摩擦系数。根据实际工程经验,对已实现电流闭环的系统控制对象进行频率响应测试,其频率特性实测曲线和拟合曲线如图 5 所示。

可以看出,单支杆控制系统速度环的控制对象模型是简化的一阶惯性环节,可依据实测数据对控制对象模型参数进行辨识。为实现转速无静差,具有较好的抗扰动性能,将速度环校正为典型 II 型系统,调节器采用 PI 调节器。所设计的速度环具有比较大的稳定裕度,调节器比例积分系数可以根据系统动态性能要求在一定范围内自由取值^[14]。但由于积分环节对偏差的积累作用使调节器进入深度饱和状态,将引起输出过大超调,甚至系统的剧烈振荡。文中在速度环采用积分分离 PI 控制器,其基本的思路

是:当系统给定值与输出值存在较大偏差时,取积分的作用,避免积分作用使系统的稳定性降低、超调量增大;当输出值接近给定值时,引入积分控制,消除静差,提高控制精度。

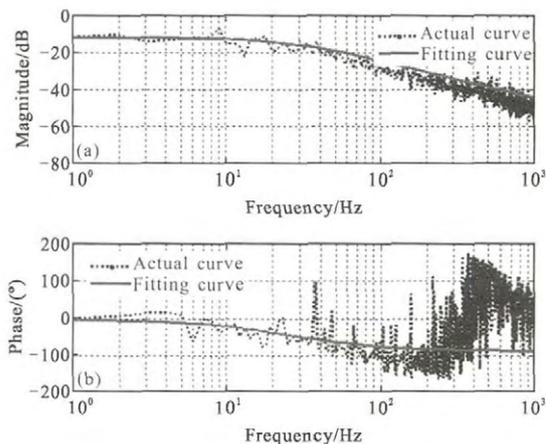


图 5 频率响应曲线

Fig.5 Curve of frequency response

PI 控制器因其固有的特性,其输出易出现超调现象。在文中研究的系统中,单支杆的定位是不允许超调出现。文中采用了带有微分负反馈的 PI 控制,可以使得调节器的退饱和点向前移动,从而使得系统能够快速进入稳态,降低甚至消除超调量^[14]。在速度环采用微分负反馈,不仅可以抑制甚至消除转速超调的现象,还能降低负载扰动引起的动态速降,增强速度环抗负载扰动的作用。引入微分负反馈,符合现代控制理论中的全状态反馈最优控制思想,将显著改善反馈控制系统的动态响应性能。

速度环经校正后,系统为一个高阶、非线性的系统,在采用双滞后-超前校正环节作为位置调节器时,需对其做降阶或用反映速度环主要特性的环节来等效处理。双滞后-超前控制器的形式为 $\frac{K(T_1s+1)^2}{(T_2s+1)^2}$,通过合理设计时间常数 T_1 和 T_2 ,可使得具有良好的动态性能且无超调,同时能够尽可能降低系统位置环的闭环误差,提高系统的定位精度。

3 电控系统设计与实现

3.1 电控系统组成及工作原理

次镜六自由度调整机构控制系统的原理图及实物图分别如图 6 和图 7 所示,控制系统主要由通信电路、控制电路、驱动电路和反馈电路等组成。

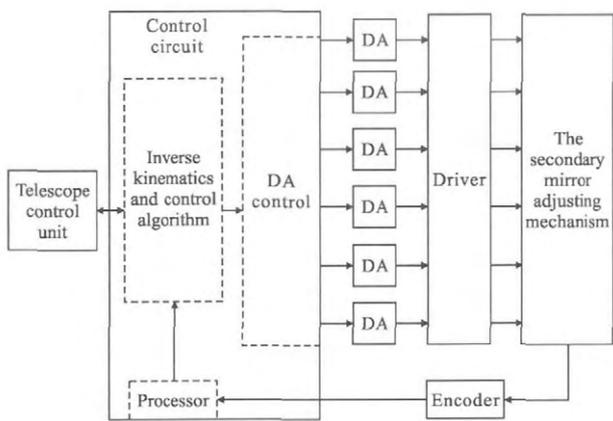


图 6 次镜六自由度调整机构控制系统图

Fig.6 Block diagram of control system of secondary mirror six DOF adjusting mechanism

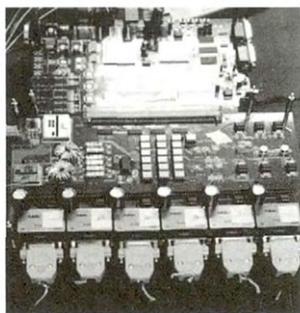


图 7 调整机构电控系统

Fig.7 Control system of adjusting mechanism

控制电路经由 RS422 总线与望远镜总控单元进行通信,接收控制指令、期望位姿等,反馈次镜六自由度调整机构控制单元的状态数据。控制电路采用“浮点型处理器(DSP)+可编程门阵列(FPGA)”架构。其中浮点型处理器采用 TI 公司生产的型号为 SMJ320C6701 的 DSP,其主要实现控制系统的运控流程控制、逆运动学计算、位置环和转速环的控制算法、与望远镜总控单元的通信管理等功能;可编程门阵列采用 XILINX 公司生产的型号为 XQR2V3000 的 FPGA,其主要实现地址译码、编码器信息采集、电流传感器信息采集、驱动电路控制、内外部通讯接口等功能。DSP 与 FPGA 之间通过 DSP 的外部地址、数据和控制总线进行互联。

驱动电路主要基于集成无刷电机驱动芯片 MSK4364 进行设计。MSK4364 驱动芯片内部集成有三相桥、三相桥驱动电路和霍尔换相电路,并集成有内部的电流放大电路。在驱动芯片外部外接一个阻容网络,与内部电流放大电路相结合,能够实现电流闭环的模拟控制电路,如图 8 所示,其中 R26 和 C41 即为外部配置电阻和电容。通过配置阻容网络的电阻和电容值,可以对电机电流环进行调节,最终实现电流的快速、准确控制。利用频率特性分析仪,对电流闭环频率特性进行实测,得到电流闭环的频率特性曲线如图 9 所示,其 -3 dB 闭环带宽为 1.98 kHz,

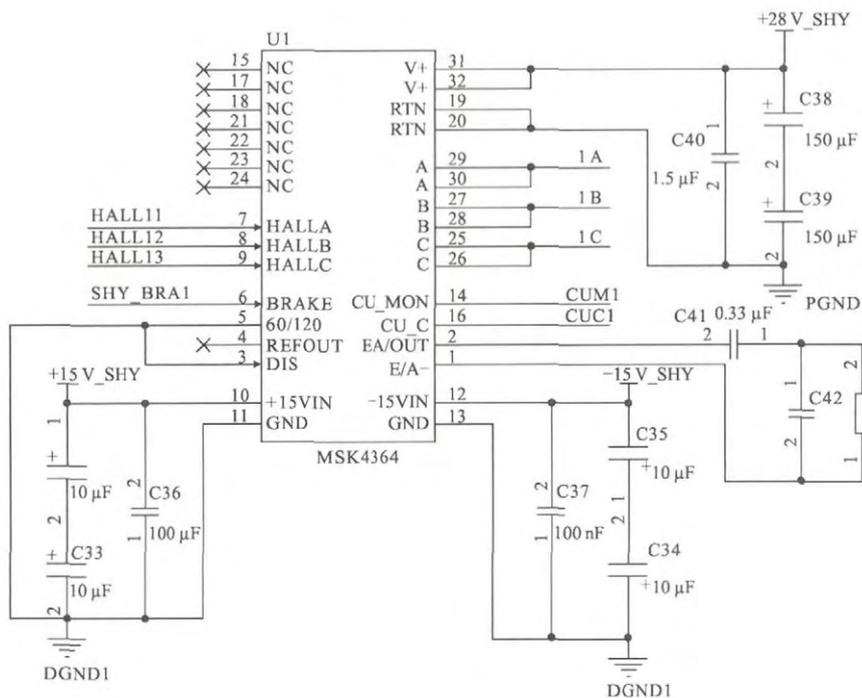


图 8 电机驱动电路原理图

Fig.8 Block diagram of motor driving circuit

满足应用需要。

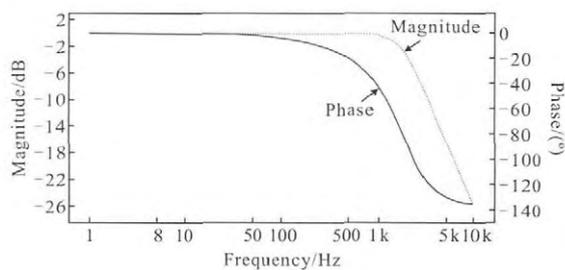


图 9 电流环幅频特性和相频特性曲线

Fig.9 Curves of magnitude-frequency and phase-frequency characteristics for current loop

采用 16 位 DA 转换器 AD768 将控制电路计算得到的转速环输出数字信号转化为模拟信号。

系统工作原理如下：

(1) 望远镜总控单元向控制系统发送次镜的六自由度期望位姿，控制电路依据此期望位姿进行逆运动学计算，进而得到六个支杆的期望位移量；

(2) 反馈电路实时采集六个支杆的编码器信息，并发送至控制电路中，由控制器完成位置环和转速环控制算法；

(3) 由速度环控制算法计算得到的是电机运动所需的电流值，将此电流值经由 DA 转换器转换为模拟量，该模拟量为模拟电流环输入值，经由驱动电路中的模拟电流环实现电流的闭环控制，进而驱动各个支杆运动至期望位移处。

3.2 软件流程

软件设计流程如图 10 所示，首先初始化 EMIF

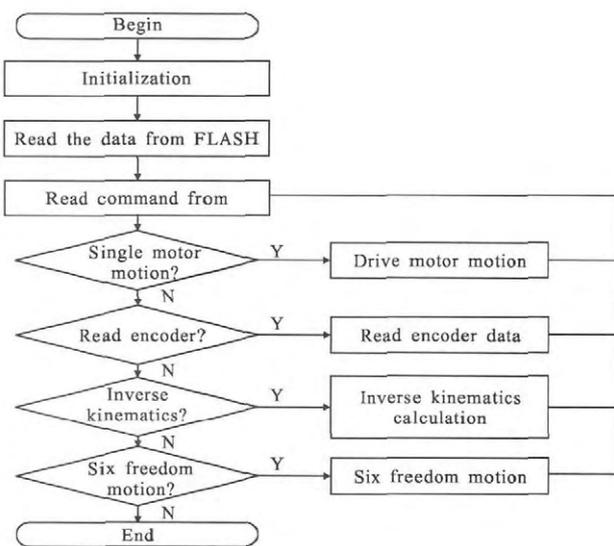


图 10 软件流程图

Fig.10 Block diagram of program flow

接口和定时器，从 Flash 中读取参数和数据，完成参数和数据的初始化。然后从异步串行通信接口读取串口命令并进行解析，对不同的命令进行处理。

4 试验与结果

4.1 单支杆运动控制试验

次镜调整机构经过标定之后，结构参数中的确定误差可以被补偿，但结构参数仍会存在随机误差，此时，结构参数误差可以近似认为是呈正态分布的。因此，可以依据并联机构的正逆运动学方程，经过概率计算和蒙特卡洛模拟^[15]，完成误差分配。单支杆运动系统的误差分配为 0.3 μm（以编码器码值为参照）。经过试验，单支杆运动系统的定位误差为编码器的正负一个码值，折合直线位移为 0.5 μm，满足指标要求。单支杆定位试验结果如图 11 所示，误差分布如图 12 所示。

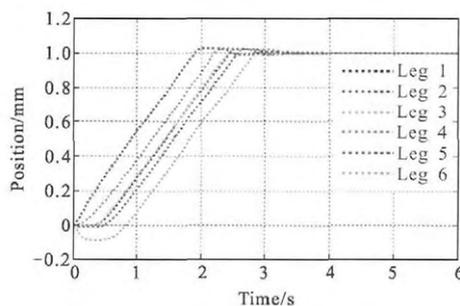


图 11 支杆定位试验结果

Fig.11 Result of position test for leg

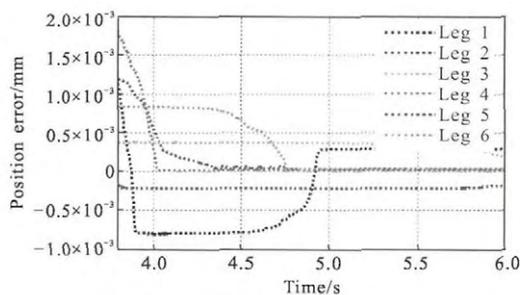


图 12 支杆定位试验误差

Fig.12 Error of position test for leg

4.2 次镜调整试验

试验中，采用双频激光干涉仪分光测量 X、Y 两轴(水平两轴)平移和 Z 轴(铅垂轴)平移；采用两台经纬仪测量三轴旋转角度，如图 13 所示。



图 13 试验现场图

Fig.13 Diagram of test scene

平移调整以类似于图 14 所示方向运动,在平台四个对角线方向的调整精度(双向重复精度)如表 1 所示。

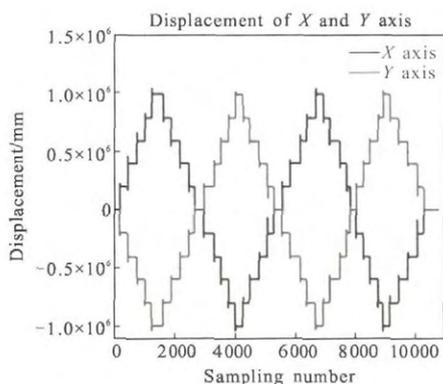


图 14 沿(1, -1, 1)对角线的位移

Fig.14 Diagram of translation along (1, -1, 1) diagonal line

表 1 平移方向调整精度表

Tab.1 Adjusting precision of translation

Direction of diagonal line	X/ μm	Y/ μm	Z/ μm
(1, 1, 1)	± 0.3	± 0.3	± 0.5
(-1, 1, 1)	± 0.3	± 0.3	± 0.4
(1, -1, 1)	± 0.2	± 0.3	± 0.5
(-1, -1, 1)	± 0.3	± 0.3	± 0.7

由表 1 可知,次镜调整机构在平移方向的最大重复定位精度不超过 $0.7 \mu\text{m}$ 。

对操作空间的八个边缘位姿点进行调整,其角度误差如图 15 所示。

由图 15 可知,次镜调整机构在 X 轴旋转方向的最大重复角度定位精度不超过 $2.7''$;Y 轴旋转方向不超过 $1''$;Z 轴旋转方向不超过 $0.9''$ 。

由试验结果可知,次镜调整机构平移方向的重复定位精度不超过 $0.7 \mu\text{m}$;旋转方向的重复定位精

度不超过 $3''$ 。

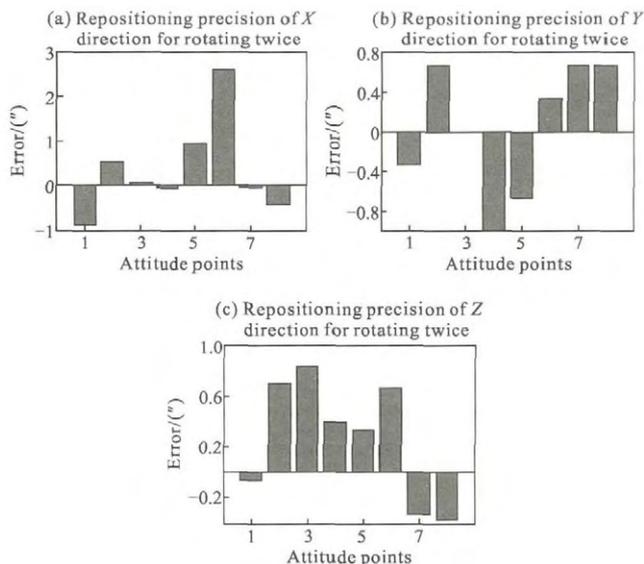


图 15 旋转角度误差图

Fig.15 Diagram of rotation error

5 结论

文中针对空间望远镜在轨次镜位姿调整的任务需求,基于逆运动学方程和关节空间控制策略,设计完成了 6-PSS 型次镜并联调整机构的精密控制系统,该方法无需基于复杂的非线性耦合动力学模型,调整参数较少,利于空间可靠应用。试验结构表明,单支杆控制能够实现编码器的正负一个码值的定位精度;次镜调整机构在平移方向能够实现 $0.7 \mu\text{m}$ 的重复定位精度;旋转方向能够实现 $3''$ 的重复定位精度,满足空间望远镜次镜微米和角秒级别调整精度需要。

参考文献:

- [1] Contors A R, Acton D S, Barto A A, et al. Verification of the James Webb Space Telescope (JWST) wavefront sensing and control system [C]//SPIE, 2008, 7010: 70100S.
- [2] Laslandes M, Hugot E, Ferrari M, et al. Space active optics: toward optimized correcting mirrors for future large spaceborne observatories [C]//SPIE, 2011, 8163: 816313.
- [3] Yue Dan. Co-phasing of the segmented telescope and image retrieval based on phase diversity algorithm [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)
- [4] Wu Yaping, Zhang Tianxu, Sang Nong, et al. Imaging of active optical imaging system with a wide field of view[J].

- Opt Precision Eng*, 2000, 8(2): 106–109. (in Chinese)
- [5] Pierre Y B. The Design and Construction of Large Optical Telescopes [M]. New York: Springer, 2003.
- [6] Lin Xudong, Chen Tao, Wang Jianli, et al. Active optics figure control of segmented mirror [J]. *Opt Precision Eng*, 2009, 17(1): 98–103. (in Chinese)
- [7] Cao Xiaotao, Sun Tianyu, Zhao Yunlong, et al. Current status and development tendency of image stabilization system of large aperture space telescope [J]. *Chinese Optics*, 2014, 23(6): 1650–1656. (in Chinese)
- [8] Gu Yingying, Huo Qi, Li Ang, et al. Six of platform applied in ground test of optical remote sensor alleviation margin in satellite micro-vibration environment [J]. *Opt Precision Eng*, 2016, 24(9): 2200–2207. (in Chinese)
- [9] Deng Sai, Jing Fengshui, Liang Zize, et al. Research on pose distribution algorithm of FAST feed support system [J]. *Opt Precision Eng*, 2017, 25(2): 375–384. (in Chinese)
- [10] Zhang Jingxu, An Qichang, Li Jianfeng, et al. Third mirror Stewart platform of TMT based on mechanism number [J]. *Opt Precision Eng*, 2014, 22(4): 890–896. (in Chinese)
- [11] Kelly R, Santibanez V, Loria A. Control of Robot Manipulators in Joint Space [M]. New York: Springer, 2005.
- [12] Wang Shixiang, Guo Jin, Gan Xinji, et al. Dynamic analysis and control of mini three degree-of-freedom robot applied in laser focusing [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(9): 0918003. (in Chinese)
- [13] Yang Weifan, Xu Shuyan, Cao Xiaotao, et al. Design of scanning control system for space optical remote sensor [J]. *Opt Precision Eng*, 2014, 22(2): 397–405. (in Chinese)
- [14] Hu Shousong. Automatic Control Theory [M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese)
- [15] Yan Dejie, Xu Shuyan, Han Chengshan. Effect of aircraft attitude on image motion compensation of space camera [J]. *Opt Precision Eng*, 2008, 16(11): 2219–2203. (in Chinese)