

新型副镜并联调整机构非线性特性及校正

叶 宇^{1,2,3}, 乐中宇^{1,2}, 顾伯忠^{1,2}, 杨世海^{1,2}

- (1. 中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所, 江苏 南京 210042;
2. 中国科学院天文光学技术重点实验室(南京天文光学技术研究所), 江苏 南京 210042;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为满足望远镜副镜结构定位精度的要求, 提出一种固定杆长杆端轴向平移运动模式的六杆并联机构。从微分几何的观点研究了该机构输入关节空间向量与输出工作空间向量之间的非线性运动学特性, 并采用曲率概念度量解轨迹的非线性弯曲。通过与雅可比矩阵的对比分析可知, 采用曲率度量并联机构的非线性和采用雅可比矩阵反映的瞬时线性性质一致, 所设计的副镜并联调整机构在整个运动行程范围内的最大非线性误差约为 $3.15 \mu\text{m}$ 。测试结果表明: 采用多项式误差曲线拟合校正之后, 该副镜调整机构三维平移重复定位精度小于 $2.6 \mu\text{m}$, 二维旋转重复定位精度小于 $1.8''$, 满足实际望远镜观测的需要, 采用的曲率度量法也可以为其他并联机构的非线性分析和校正提供一种新的思路。

关键词: 并联调整机构; 非线性特性; 曲率; 误差校正; 雅可比矩阵

中图分类号: TH751 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA202049.0114001

Nonlinear characteristic and correction for new-style parallel adjustment mechanism of secondary mirror

Ye Yu^{1,2,3}, Yue Zhongyu^{1,2}, Gu Bozhong^{1,2}, Yang Shihai^{1,2}

- (1. National Astronomical Observatories/Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China;
2. CAS Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Nanjing 210042, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to meet the structure positioning accuracy requirements of the telescope secondary mirror, a fixed length rod end axial translational motion model of hexapod was proposed. From the point of view of differential geometry, the nonlinear kinematics between the input joint space vector and the output workspace vector of the mechanism was studied, and the curvature concept was used to measure the nonlinear bending of the trajectory. Comparing with the Jacobian matrix, it was found that the curvature of the parallel mechanism was consistent with the instantaneous linear property reflected by the Jacobian matrix. The maximum nonlinearity error of the designed secondary mirror parallel adjustment mechanism was about $3.15 \mu\text{m}$ in the whole motion range. The test results show that after the

收稿日期: 2019-10-11; 修订日期: 2019-11-21

基金项目: 国家自然科学基金(11503060); 中国科学院天文财政专项(2911C09700)

作者简介: 叶宇(1982-), 男, 副研究员, 博士生, 主要从事天文仪器精密控制方面的研究。Email: yye@niaot.ac.cn

导师简介: 顾伯忠(1965-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事天文仪器精密设计方面的研究。Email: bzhgu@niaot.ac.cn

polynomial error curve fitting correction, the three-dimensional translational repeating positioning accuracy of the secondary mirror adjustment mechanism is less than $2.6\ \mu\text{m}$, and the two-dimensional rotation repeat positioning accuracy is less than $1.8''$, which meet the needs of actual telescope observation. At the same time, the curvature metric method can also provide a new idea for the nonlinear analysis and correction of other parallel mechanisms.

Key words: parallel adjustment mechanism; nonlinear characteristic; curvature; error correction; Jacobian matrix

0 引言

副镜并联调整机构是实现大口径天文望远镜光学系统主动准直的关键执行部件,开展天文望远镜副镜姿态实时调整机构的研究,对于我国天文望远镜技术的发展具有重要意义。副镜并联调整机构相比于传统的串联机构具有无累积误差、精度高、速度快、动态响应好;结构紧凑、刚度高、承载能力大;完全对称的并联机构具有较好的各向同性等优点,在天文望远镜观测中具有无与伦比的优势^[1]。目前,国内外一些近几年建成的天文望远镜上大多采用六杆并联机构作为副镜支撑结构^[2-4],然而并联机构的研究面临着诸多难点,其中非线性因素是并联机构研究中不容忽视的问题,分析和度量并联机构的非线性可以为系统模型参数选择、控制系统设计以及系统误差校正提供可靠依据。

传统并联机构非线性研究主要是对机构位置正解和逆解的研究。黄真等应用并联机构一阶、二阶影响系数矩阵从一定程度上反映了机构的非线性特性,但不能反映机构非线性特性的本质,也无法定量度量其非线性^[5]。Bates 和 Watts 从微分几何观点出发,提出了一种非线性曲线曲率的定义,这种曲率即可以度量其解轨迹在输入向量临域的弯曲程度,又可以度量相同的增量输入映射在解轨迹上的间距不等^[6]。汪劲松等研究了并联机床关节空间输入向量与工作空间输出向量之间的运动学非线性特性,以并联机床为例提出了应用正解解轨迹的曲率度量并联机构的非线性^[7]。杨晓钧等采用曲率法度量非线性运动误差和插补步长之间的关系,在满足插补精度的前提下,通过选取较大的直线插补步长,可以提高并联机床的加工效率^[8]。

文中结合望远镜副镜支撑机构的特点,从杆伸

缩运动、固定杆长杆端径向移动、固定杆长杆端轴向移动等几种运动模式中,提出设计了一种新型固定杆长杆端轴向平移运动模式的六杆机构。针对所设计的副镜并联调整机构利用解轨迹上的最大曲率对其在整个运动行程范围内进行非线性定量度量,同时采用小位移下的雅可比矩阵分析其不同位姿时的瞬时线性度,通过建立非线性曲率与误差之间的关系,得出非线性误差对系统精度的影响程度,并采用多项式误差曲线拟合对非线性误差进行补偿校正,最后搭建多自由度位姿检测平台对该机构进行了重复定位精度测试。

1 副镜调整机构的结构

新型副镜并联调整机构主要由动平台、静平台、支撑杆系以及驱动装置组成。该机构的平移驱动机构和位置传感器沿轴向布置,可以充分利用现有驱动结构降低成本,减少径向挡光,同时还能提高系统的结构刚度,能够实现三维平移运动和三维旋转运动,如图 1、2 所示。

新型副镜并联机构的基本技术指标如表 1 所示。

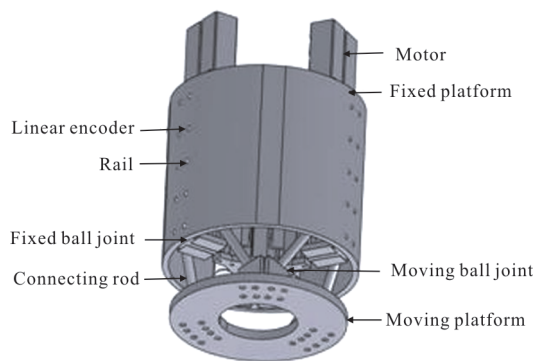


图 1 副镜调整机构

Fig.1 Secondary mirror adjustment mechanism

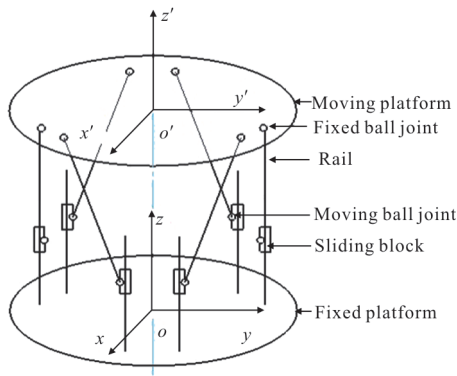


图 2 固定杆长杆端轴向平移运动模式

Fig.2 Fixed length rod end axial translational motion model

表 1 技术指标

Tab.1 Technical requirements

Performance	Focus	Translation	Tilt
Range	±6 mm	±6 mm	±1 200"
Accuracy	±8 μm	±8 μm	±2"
Max velocity	0.25 mm/s	0.25 mm/s	400"/s
Resolution	0.5 μm	0.5 μm	0.2"

表 2 动平台各球铰的初始位置(单位:mm)

Tab.2 Initial position of each ball joint of the mobile platform(Unit: mm)

Number	A	B	C	D	E	F
x_0	76.602	-76.602	-93.969	-17.365	17.365	93.969
y_0	-64.277	-64.277	-34.438	98.481	98.481	-34.438
z_0	0	0	0	0	0	0

表 3 滑块上各球铰的初始位置(单位:mm)

Tab.3 Initial position of each ball joint of the sliding block(Unit: mm)

Number	A'	B'	C'	D'	E'	F'
x_{h0}	43.667	-43.667	-118.632	-74.964	74.964	118.632
y_{h0}	-111.773	-111.773	18.069	93.704	93.704	18.069
z_{h0}	-84.840	-84.840	-84.840	-84.840	-84.840	-84.840

设计优化后的实验样机结构参数如下：平台重量 20 kg，平台最大外径 300 mm，动平台半径 $r=100$ mm，动平台结点记为 i ，动球铰夹角 20° ，平台高度 $h=87$ mm，定平台半径 $R=120$ mm，定平台结点记为 j ，定球铰夹角 43° ，杆长 $L=105$ mm。以动平台球铰分布圆的中心为系统坐标原点，建立系统坐标模型，如图 3 所示。动平台上的球铰编号为 A、B、C、D、E、F，初始坐标位置如表 2 所示，定平台上的球铰编号为 A'、B'、C'、D'、E'、F'，初始坐标位置如表 3 所示。

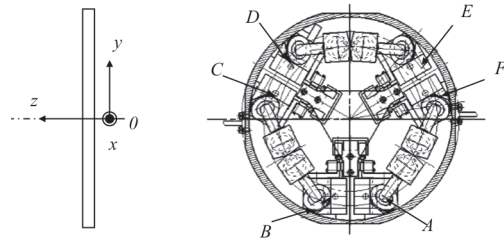


图 3 实验样机结构

Fig.3 Structure of experimental prototype

2 非线性特性

2.1 曲率法度量非线性

假设副镜并联调整机构末端位姿 Δ 关于驱动输入向量 z_h 存在二阶以上连续导数，则函数正解表达式可表示为：

$$\Delta=f(z_h) \quad (1)$$

式中： z_h 为 6 根滑块驱动输入向量； Δ 为六维末端位

姿输出向量。

当 z_h 发生改变时，向量 Δ 画出一个六维的曲面（笛卡尔坐标系下的六维坐标），在非线性回归样本空间中称为解轨迹 π ，在这里可以称为副镜并联调整机构的六维工作空间，如图 4 所示^[9]。

正解函数给出了 6 根驱动杆件到六维工作空间的一个映射，6 根杆的每一次运动 z_{h0} 映射为工作空间上的一个点 Δ_0 ；同样，关节空间中通过 z_{h0} 的线映

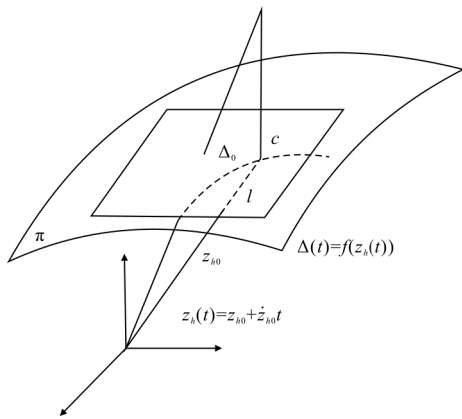


图 4 解轨迹映射

Fig.4 Solution trajectory map

射为工作空间中通过 Δ_0 的曲线。关节空间过 z_{h0} 的一条六维空间直线可以使用实变量 t 表示为：

$$z_{h0}(t) = z_{h0} + \dot{z}_{h0}t \quad (2)$$

这条直线通过正解函数映射到工作空间 Δ 中的运动曲线 c 上：

$$\Delta(t) = f(z_h(t)) \quad (3)$$

曲线 $t=0$ 在处的切线，对副镜调整机构位姿第 k ($k=1, 2, \dots, 6$) 个分量有：

$$\frac{d\Delta_k}{dt} = \sum_{i=1}^6 \frac{\partial f_k}{\partial z_{h0i}} \frac{dz_{h0i}}{dt} = \sum_{i=1}^6 J_{ki} \dot{z}_{h0i} \quad (4)$$

$$\frac{d^2 \Delta_k}{dt^2} = \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^6 \frac{\partial^2 f_k}{\partial z_{h0i} \partial z_{h0j}} \frac{dz_{h0i}}{dt} \frac{dz_{h0j}}{dt} = \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^6 H_{kij} \dot{z}_{h0i} \dot{z}_{h0j} \quad (5)$$

公式可以简写为：

$$\begin{cases} \dot{\Delta} = J \dot{z}_h \\ \ddot{\Delta} = \dot{z}_h^T H \dot{z}_h \end{cases} \quad (6)$$

式中： J 、 H 分别为副镜调整机构的雅克比矩阵和海森矩阵。海森矩阵是一个多元函数的二阶偏导数构成的方阵，相当于对雅克比矩阵再求雅克比矩阵，可以用来描述函数的局部曲率，因此可以定义曲率为：

$$K_{z_{h0}} = \frac{\|\ddot{\Delta}\|}{\|\dot{\Delta}\|^2} \quad (7)$$

在 z_{h0} 各方向寻找最大曲率，最大曲率定义为：

$$K = \max K_{z_{h0}} \quad (8)$$

根据副镜并联调整机构的结构特点以及刚度矩

阵的分析可知^[10]， z 轴运动是 6 根滑块沿相同方向移动相同的距离，类似于线性运动中相等的输入增量在解轨迹上的映射是等间距的，故不会带来非线性因素的影响。在副镜并联调整机构坐标系统中，取动平台的姿态 $z=0, \alpha=\beta=0$ 时搜索机构的最大曲率，得到曲率分布的三维图如图 5 所示。从图 5 中可以看出副镜并联调整机构平移运动时曲率分布以 y 轴对称，这是由于机构定、动平台结构关于 y 轴对称引起的，因而也可以知道在副镜调整机构工作空间内非线性运动误差的大小受机构结构形式的影响。图 6 给出了曲率分布的等高线图，从图中可以看出其非线性曲率从工作空间向四周加强，非线性曲率越大，机构非线性运动的误差也增大，副镜调整机构在整个平动范围内的最大曲率约为 6.8×10^{-4} 。由于副镜并联调整机构两维旋转轴运动的角度都很小，通过计算可以得到副镜并联调整机构在整个运动范围内的最大曲率小于 7.0×10^{-4} 。

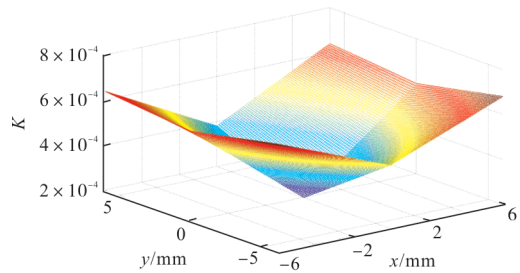


图 5 曲率分布三维图

Fig.5 Curvature distribution in three dimensions

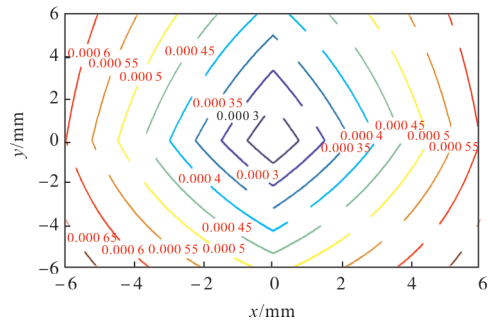


图 6 曲率分布等高图

Fig.6 Contour map of curvature distribution

2.2 雅克比矩阵分析瞬时非线性

雅可比矩阵可以用来表示一个可微方程与给定点的最佳线性逼近，也可以理解为某点的一阶展开，雅可比矩阵类似多元函数的导数，只是这里的函数是函数组^[11]。为了验证并联调整机构曲率度量法的

正确性,采用逆解模型分别在两组不同位姿下求取小位移下副镜并联调整机构的雅可比矩阵,通过分析两组雅可比矩阵之间的相互关系,一定程度上可以反映机构雅可比矩阵的变化量。由公式(1)可知,机构的驱动输入和动平台输出位姿之间可以建立如下位置关系式:

$$z_{hi}=g_i(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma) \quad i=(1, 2, \dots, 6) \quad (9)$$

式中: z_{hi} 为输入滑块的移动量 $x, y, z, \alpha, \beta, \gamma$ 分别为输出动平台的六维位姿。

将位置关系式(9)对时间 t 微分,可以得到:

$$\begin{pmatrix} \dot{z}_{h1} \\ \dot{z}_{h2} \\ \vdots \\ \dot{z}_{h6} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x} & \frac{\partial g_1}{\partial y} & \frac{\partial g_1}{\partial z} & \frac{\partial g_1}{\partial \alpha} & \frac{\partial g_1}{\partial \beta} \\ \frac{\partial g_2}{\partial x} & \frac{\partial g_2}{\partial y} & \frac{\partial g_2}{\partial z} & \frac{\partial g_2}{\partial \alpha} & \frac{\partial g_2}{\partial \beta} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial g_6}{\partial x} & \frac{\partial g_6}{\partial y} & \frac{\partial g_6}{\partial z} & \frac{\partial g_6}{\partial \alpha} & \frac{\partial g_6}{\partial \beta} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{pmatrix} \quad (10)$$

式中: $\dot{z}_{hi}=\dot{d}z_{hi}/dt, \dot{x}=\dot{d}x/dt$,其他类似。根据公式(6)的雅可比矩阵定义可知,当雅可比矩阵为非奇异阵时,公式(10)可简写为:

$$\dot{z}_h=J^{-1}\dot{\Delta} \quad (11)$$

根据前面对机构的描述,并联调整机构杆端点坐标示意图如图 7 所示。

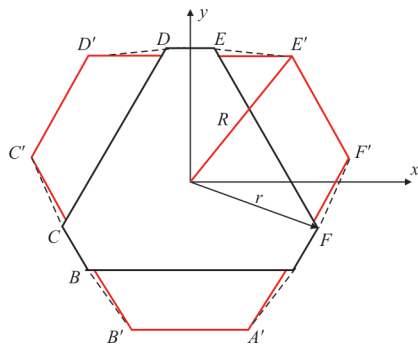


图 7 杆端点坐标示意图

Fig.7 Schematic diagram of rod endpoint coordinates

根据动平台、定平台的结点坐标和杆长可以建立如下关系:

$$(x_i-x_j)^2+(y_i-y_j)^2+(z_i-z_j)^2=L^2 \quad (12)$$

由此可以解得定平台滑块的移动量:

$$z_j=\sqrt{L^2-(x_i-x_j)^2-(y_i-y_j)^2}+z_i \quad (13)$$

采用适当的假设,在小位移条件下,可以推导出直接表达的位移关系式。对公式(13)进行微分可得:

$$dz_j=\frac{\partial z_j}{\partial x_j}dx_i+\frac{\partial z_j}{\partial y_j}dy_i+\frac{\partial z_j}{\partial z_j}dz_i=\frac{2(x_{0i}-x_j)dx_i+2(y_{0i}-y_j)dy_i}{2\sqrt{L^2-(x_{0i}-x_j)^2-(y_{0i}-y_j)^2}}dz_i \quad (14)$$

式中: x_{0i}, y_{0i} 为动平台结点的位置,在小位移条件下,上式根号项可以用 $z_{0i}-z_j=h$ 近似,进而有:

$$dz_j=\frac{1}{h}\begin{bmatrix} (x_{0i}-x_j) & (y_{0i}-y_j) & h \end{bmatrix} \begin{pmatrix} dx_i \\ dy_i \\ dz_i \end{pmatrix} \quad (15)$$

用顶点位移量取代微分量,可以得到:

$$\Delta z_j=\frac{1}{h}\begin{bmatrix} x_{ij} & y_{ij} & h \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \delta x_i \\ \delta y_i \\ \delta z_i \end{pmatrix} \quad (16)$$

动平台结点位移的近似表达式为:

$$\begin{pmatrix} \delta x_i \\ \delta y_i \\ \delta z_i \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -y_{0i} \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & x_{0i} \\ 0 & 0 & 1 & y_{0i} & -x_{0i} & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{pmatrix} \quad (17)$$

由公式(16)、(17)可以得到,滑块移动量与动平台刚体位移之间的关系式为:

$$\begin{pmatrix} z_{AA'} \\ z_{BB'} \\ z_{CC'} \\ z_{DD'} \\ z_{EE'} \\ z_{FF'} \end{pmatrix} =$$

$$\frac{1}{h} \begin{pmatrix} x_{AA'} & y_{AA'} & h & hy_{0A} & -hx_{0A} & y_{AA}x_{0A}-x_{AA}y_{0A} \\ x_{BB'} & y_{BB'} & h & hy_{0B} & -hx_{0B} & y_{BB}x_{0B}-x_{BB}y_{0B} \\ x_{CC'} & y_{CC'} & h & hy_{0C} & -hx_{0C} & y_{CC}x_{0C}-x_{CC}y_{0C} \\ x_{DD'} & y_{DD'} & h & hy_{0D} & -hx_{0D} & y_{DD}x_{0D}-x_{DD}y_{0D} \\ x_{EE'} & y_{EE'} & h & hy_{0E} & -hx_{0E} & y_{EE}x_{0E}-x_{EE}y_{0E} \\ x_{FF'} & y_{FF'} & h & hy_{0F} & -hx_{0F} & y_{FF}x_{0F}-x_{FF}y_{0F} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{pmatrix} \quad (18)$$

式中: $X_{AA}=x_{0A}-x_{A'}, Y_{AA}=y_{0A}-y_{A'}$,其他类似。

分别代入数据并求矩阵的逆可以求得在初始位姿和某个极限位姿下的近似雅可比矩阵数值表达式。

$$[J]_1 = \begin{bmatrix} 0.324 1 & -0.324 1 & 0.172 4 & 0.496 5 & -0.496 5 & -0.721 4 \\ 0.385 2 & 0.385 2 & -0.471 7 & 0.086 5 & 0.086 5 & -0.471 7 \\ 0.166 9 & 0.166 9 & -0.166 1 & 0.167 0 & 0.167 0 & 0.166 1 \\ -0.001 8 & -0.001 9 & -0.001 4 & 0.003 3 & 0.003 3 & -0.001 4 \\ -0.002 8 & 0.002 8 & 0.000 3 & 0.000 3 & -0.000 3 & -0.003 0 \\ 0.000 0 & -0.000 0 & 0.000 0 & -0.000 0 & 0.000 0 & -0.000 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$[J]_2 = \begin{bmatrix} 0.323 9 & -0.323 9 & 0.172 3 & 0.496 2 & -0.496 2 & -0.172 3 \\ 0.385 4 & 0.385 4 & -0.471 9 & 0.086 5 & 0.086 5 & -0.471 9 \\ 0.143 1 & 0.220 8 & 0.131 3 & 0.160 4 & 0.225 5 & 0.118 8 \\ -0.001 9 & -0.001 9 & -0.001 4 & 0.003 3 & 0.003 3 & -0.001 4 \\ -0.002 8 & 0.002 8 & 0.003 0 & 0.000 3 & -0.000 3 & -0.003 0 \\ 0.000 0 & -0.000 0 & 0.000 0 & -0.000 0 & 0.000 0 & -0.000 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

对比公式(19)、(20)可知,两个位姿下的近似雅可比矩阵非常接近,由于 z 方向的运动不会带来非线性因素的影响,而在其他位姿下的最大变化量可以视为平均曲率约为 6.0×10^{-4} ,与曲率度量法计算出的最大曲率结果相接近,因此可以验证在不同位姿状态下雅可比矩阵反映的瞬时线性性质与曲率度量法反映的非线性相一致,也进一步说明副镜并联调整机构在整个运动行程范围内非线性强度较弱。

2.3 曲率与非线性误差之间的关系

根据新型副镜调整机构的运行特点,输入操作空间中 6 根滑块的线性运动转化为输出运动空间动平台六维姿态的非线性运动,动平台的实际运动轨迹在空间中形成一个曲面,为了便于分析,取过 xoy 面的一条曲线,如图 8 所示。

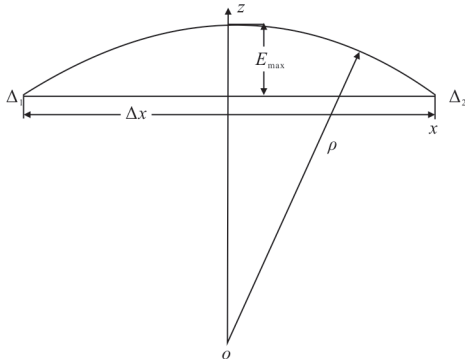


图 8 非线性误差曲率度量

Fig.8 Nonlinear error curvature metric

- (1) 初始位姿取: $x=0, y=0, z=0, \alpha=0, \beta=0, \gamma=0$
- (2) 极限位姿取: $x=-6 \text{ mm}, y=6 \text{ mm}, z=0, \alpha=1 \text{ } 200'', \beta=-1 \text{ } 200'', \gamma=0$

图中, E_{\max} 为最大非线性误差, ρ 为圆弧半径, Δx 为 x 轴运动范围,由曲率的定义可知: $K=1/\rho$ 。由于 E_{\max} 远小于 ρ ,可以建立曲率与非线性误差之间的关系:

$$E_{\max} = \rho - \sqrt{\rho^2 - (\Delta x/2)^2} \approx \frac{\Delta x^2}{8\rho} = \frac{\Delta x^2 K}{8} \quad (21)$$

由前文计算可知,副镜并联调整机构在整个运动范围内的曲率取最大值约为 7.0×10^{-4} , x 轴运动行程为 $-6 \sim 6 \text{ mm}$,由于曲率分布关于 y 轴对称,取 $\Delta x=6 \text{ mm}$,可以得到系统的最大非线性引起的误差约为 $E_{\max}=3.15 \text{ }\mu\text{m}$ 。

3 误差补偿与校正

由于副镜并联调整机构在整个行程范围内的最大非线性引起的误差约为 $3.15 \text{ }\mu\text{m}$,会影响系统的运行精度,必须采取有效的措施来补偿校正非线性因素引起的误差。文中采用分段插补法对系统进行非线性误差校正^[12]。取图 6 中过 $y=0$ 的一条直线,由公式(21)可知,当 $\Delta x=3 \text{ mm}$ 时,最大曲率约为 4.0×10^{-4} ,得到的最大线性误差约为 $0.45 \text{ }\mu\text{m}$,由此可知,当运动行程在 $-3 \sim 3 \text{ mm}$ 范围内时,可以不用对系统进行校正。由于机构非线性引起的误差关于 y 轴对称,现讨论当机构在 x 轴上 $3 \sim 6 \text{ mm}$ 范围内运动时系统非线性误差校正方法。

通过上文对机构非线性曲率的分析可知,当机构设计和加工完成之后,系统非线性曲率的大小只

与机构的构型有关,并且是动平台在工作空间中位姿的函数,曲率反映的是机构本身固有的一种性质。因此根据公式(21),通过数值计算可以得到轴在 3~6 mm 范围对应的非线性误差,通过二次项数据拟合如图 9 所示,可以得到该范围内的非线性误差校正函数为:

$$E=0.1375x^2-0.4943x+0.7054 \quad (22)$$

同理,可以得到其他姿态时系统的非线性误差校正函数。

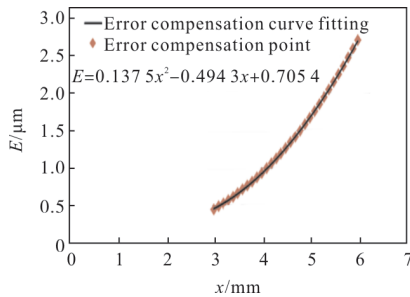


图 9 非线性误差校正曲线拟合

Fig.9 Nonlinear error correction curve fitting

在实际望远镜观测中,机构除了需要补偿由于结构平台本身引起的误差(包括机构误差和非线性误差等)外,还需补偿由于望远镜周围环境温度变化引起的桁架杆温差和望远镜高度角变化引起的主副镜相对位姿的变化。温度补偿可以在望远镜桁架杆上布置多个温度传感器,通过实测主副镜间不同位置的温度差,然后根据桁架杆的材料和长度,计算温度差的补偿量。以 1 m 地平式望远镜为例,桁架杆选用钢材,长度按 3 m 计算,工作温度范围为 -30~30 ℃,温度变形引起的最大补偿量约为 2.25 mm。望远镜高度角变化对主副镜相对位置的影响也可以通过实测来进行,每隔几度进行测试标定,然后根据实测数据拟合成直线或者曲线方程,通过实时监测望远镜高度角来补偿,高度角变化引起的侧向最大补偿量约为 1 mm。

4 精度测试

在完成副镜并联调整机构非线性分析和补偿校正之后,机构被安装到一台望远镜机架上,采用一种基于光纤准直技术的多自由度误差同时测量法^[13-15],对机构进行位姿重复精度测试,如图 10 所

示。检测过程中用到的装置主要有色散共焦位移计,点光源发生系统(包括光源和光纤),两台 CCD 相机,电子自准直仪和 3 块平面反射镜。色散共焦位移计量程 1.2 mm,精度 0.5 μm,主要用于一维平移轴精度标定测试,验证光纤准直 CCD 成像检测法是否满足测试精度要求,同时验证像元比例尺的精度。光源采用单光孔卤素灯,光色温 3 200 K,光照度 1 600 000LX,光纤类型为 HCS,直径 mm,透过率 ≥65%,主要用于点光源的产生和传输。CCD 采用可变光圈镜头控制,120 万像素,分辨率 1 292(H)×964(V),像元尺寸 3.75 μm×3.75 μm 主要用于点光源的成像。光源、光纤和两台 CCD 相机构成一套三维平移测量系统。基于旋转轴的测量原理,本课题采用商用电子自准直仪,分辨率 0.01",精度 0.2",测角范围 35',操作简单,测量精度高,可以同时测量二维旋转轴。



图 10 检测装置

Fig.10 Detection devices

五自由度测试原理图如图 11 所示,CCD1 用于测试 x 轴平移和 y 轴平移,CCD2 用于测试轴平移,考虑到自准直仪不便于直接安装在望远镜上,故采用两块可调平面镜把自准直仪发出的光通过 3 次反射后再进入自准直仪中,电子自准直仪用于测试绕 x 轴旋转 α 和绕 y 轴旋转 β,由于五自由度可以同时

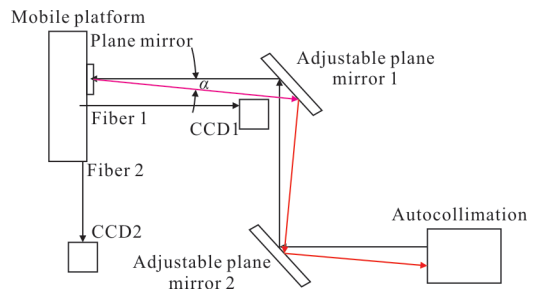


图 11 测量原理图

Fig.11 Measurement schematic diagram

检测,故也可以在测试一维运动的同时,检测其他自由度的变化量。

通过搭建测试平台,完成测试结果如下:平移装置的测量精度小于 $0.5 \mu\text{m}$,旋转轴的测量精度小于 $0.2''$ 。图 12 为 x, y, z 三轴平移重复定位精度,从图中可以看出在整个行程范围内 x 轴重复定位精度小于 $1.7 \mu\text{m}$, y 轴重复定位精度小于 $2.6 \mu\text{m}$, z 轴重复定位精度小于 $2 \mu\text{m}$ 。图 13 为 α/β 的重复定位精度,从图中可以看出 α 轴的最大重复定位精度小于 $1.8''$, β 轴的最大重复定位精度小于 $1.5''$, 所有测试结果都优于系统的设计指标。

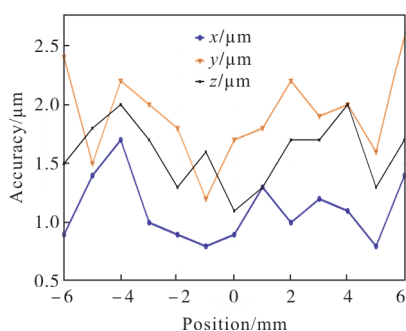


图 12 x, y, z 平移重复定位精度

Fig.12 Repeated positioning accuracy of x, y, z

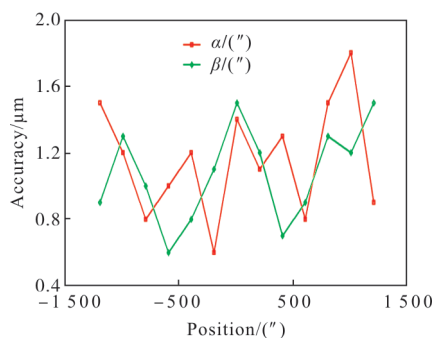


图 13 α, β 重复定位精度

Fig.13 Repeated positioning accuracy of α, β

5 结论

文中提出一种新型副镜并联调整机构,利用解轨迹上的最大曲率在整个运动行程范围内对机构进行非线性定量度量,得到机构的最大非线性曲率约为 7.0×10^{-4} ,并采用小位移下的雅可比矩阵分析在不同位置时的瞬时线性度。通过建立曲率与非线性误差之间的关系,得出非线性误差对系统精度的影响小于 $3.15 \mu\text{m}$,并采用多项式误差曲线拟合对非

线性误差进行校正,最后通过搭建多自由度误差检测平台对系统进行位姿测试,得到机构的三维平移重复定位精度小于 $2.6 \mu\text{m}$,二维旋转轴重复定位精度小于 $1.8''$,能够满足实际望远镜观测的需要。同时,文中采用的曲率度量法对分析其他并联机构的非线性也具有现实的指导意义。

参考文献:

- [1] Yang Weifan, Cao Xiaotao, Zhang Bin, et al. Six degree of freedom precision control for space camera secondary mirror adjusting mechanism[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(7): 0718007. (in Chinese)
- [2] Neill D R, Sebag J, Gressler W. Baseline design of the LSST hexapods and rotator [C]//SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation, 2014, 9151: 91512B.
- [3] Yao Rui, Li Qingwei, Sun Jinghai, et al. Accuracy analysis on Focus cabin of fast[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(17): 36-42. (in Chinese)
- [4] Han Chunyang, Xu Zhenbang, Wu Qingwen, et al. Optimization design and error distribution for secondary mirror adjusting mechanism of large optical payload[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24 (5): 1093-1103. (in Chinese)
- [5] Huang Zhen. Space Institutional Research [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1991. (in Chinese)
- [6] Bates D M, Watts D G. Relative curvature measures of nonlinearity [J]. *Journal of the Royal Statistical Society*, 1980, 42(1): 1-25.
- [7] Wang Jinsong, Wang Zhonghua, Huang Tian, et al. Nonlinearity for a parallel kinematic machine tool and its application to interpolation accuracy analysis [J]. *Science in China*, 2002, 45(1): 97-105.
- [8] Yang Xiaojun, Li Bing, Zhang Donglai. Linear interpolation step length of Stewart platform-based kinematics machine [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2009, 43(3): 33-36. (in Chinese)
- [9] Wang Xinzhou. Theory and Application of Parameter Estimation for Nonlinear Models [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2002. (in Chinese)
- [10] Li Shujun, Zhang Yu, Meng Qiaoling. Stiffness characteristics of a 6-PSS spatial parallel mechanism [J]. *China Mechanical Engineering*, 2009, 20 (21): 2521-2525. (in Chinese)
- [11] Hu Qiqian, Yao Zhenqiu. Design of Astronomical

- Telescope [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2012. (in Chinese)
- [12] Li Dongdong, Zhang Weimin, Sui Haonan, et al. Singularity analysis and non-linear error control of five-axis machining [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, 5: 1-13. (in Chinese)
- [13] Lv Yong, Feng Qibo, Liu Lishuang, et al. Six-degree-of-freedom measurement method based on multiple collimated beams [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(11): 3597-3602. (in Chinese)
- [14] Gao Yue, Liu Wei, Lv Shimeng, et al. Six-degree-of-freedom displacement and angle measurement system based on two-dimensional position-sensitive detector [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(12): 2930-2939. (in Chinese)
- [15] Liu Lishuang, Lv Yong, Meng Hao, et al. New method for measuring 6-DOF micro-displacement based on multi-collimated beams [J]. *Infrared and Laser Engineering*, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1261.tn.20190328.1156.012.html>.