

文章编号 1004-924X(2014)04-0890-07

基于机构条件数的 30 m 望远镜三镜 Stewart 平台

张景旭¹, 安其昌^{1,2*}, 李剑锋¹, 杨 飞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:从误差传递的角度研究了 30 m 望远镜(TMT)三镜大型 Stewart 平台的转动精度。首先,利用奇异值分析 Stewart 平台速度雅克比矩阵,得出机构条件数与支腿伸长量的关系。利用条件数与系统误差传递系数的关系推导出 TMT 三镜特殊运动形式下支腿伸长量误差与平台姿态误差的关系,并使用 MATLAB 优化平台结构参数得出一组优化解。然后,利用 ADAMS 对之前的理论推导进行仿真验证。最后,利用已知误差传递模型结合精度实验数据进行实验,辨识得出 Stewart 支腿伸长误差为均匀分布、动平台转动误差向量模为双峰分布。利用 MATLAB 进行模拟,模拟结果显示:假设支腿伸长误差为 0 到 1 之间均匀分布,动平台转动误差向量模的期望会由优化前的 $5.345\ 4\times 10^{-4}$ 变为优化后的 $4.272\ 1\times 10^{-4}$,优化量约为 20%;转动误差分布的两个肩峰相互靠拢且向 0 点移动。

关键词:30 m 望远镜;Stewart 平台;条件数;误差传递;优化设计;误差分布

中图分类号:TH703;TH743 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142204.0890

Third mirror Stewart platform of TMT based on mechanism condition number

ZHANG Jing-xu¹, AN Qi-chang^{1,2*}, LI Jian-feng¹, YANG Fei¹

- (1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)
* *Corresponding author, E-mail: anjj@mail.ustc.edu.cn*

Abstract: The rotation accuracy of large Stewart platform of a three mirror system in a 30 m telescoping was explored based on the error transfer. Firstly, the singular value method was used to analyze the Stewart platform velocity Jacob matrix, and to obtain the relationship between mechanism condition number and leg elongation. Then, using condition number and system error transfer function, the relationship between the leg elongation error and the platform attitude error was discussed in TMT special kinematical forms, and a group of optimal solution was given out by the MATLAB optimization. After using the ADAMS to validate the theoretical derivation, the known error transfer model combined with precision experiment was used to identify the leg elongation error for evenly distribution and the mobile platform rotation error for bimodal distribution. The MATLAB simulation indicates

收稿日期:2013-11-07;修订日期:2013-01-07.

基金项目:中国科学院三期创新工程重大专项资助项目

when the leg elongation error is distributed from 0 to 1 evenly, the expectation of mobile platform rotation error vector norm has reduced from 5.3454×10^{-4} to 4.2721×10^{-4} with optimizing quantity by 20%. It concludes that the error distributions of the two shoulder peaks are close to each other and move to 0 point integratively.

Key words: Three Meter Telescope (TMT); Stewart platform; condition number; error translation; optimization design; error distribution

1 引言

30 米望远镜 (Thirty Meter Telescope, TMT) 是由美国加州理工学院 (Caltech)、加州大学系统 (UC) 和加拿大大学天文研究联盟联合发起的国际合作项目^[1-3], 它计划于夏威夷莫纳克亚峰建造一个世界领先的 30 米巨型光学-红外观测设备。在该项目中, 中国承担了三镜系统的设计与制造。TMT 的三镜为椭圆形平面镜, 长轴为 3.544 m, 短轴为 2.486 m。由于位于 TMT 奈氏平台两侧的光学仪器的光轴与俯仰轴不重合, 三镜反射后的光线轴线有多条, 故三镜系统具有跟踪和瞄准的功能, 该功能主要依靠 Tilt 与 rotate 两套调整机构来实现。经过方案论证, 本课题组提出设计一个大型的 Stewart 平台作为三镜系统的 Tilt 调整机构。

Stewart 平台是一种能够实现 6 个自由度调整的并联机构, 具有正向刚度大、承载能力强、位置误差不累计等特点^[4-8]。目前, 该平台主要用作大口径望远镜次镜的调整机构。由于 TMT 三镜系统的 Tilt 调整依赖于 3 个旋转自由度, 故平台旋转精度的分析变得尤为重要^[9-11]。如果结构设计的精度传递性能不好, 将会增加实际工程应用时制造与装调的难度, 而国内尚未开展关于 Stewart 平台转动精度分析的研究。本文使用支腿伸长量表示特定条件下的运动机构条件数, 利用两者之间的关系优化平台参数, 进而完成了 Stewart 平台转动精度的分析和优化。

2 问题描述

TMT 庞大的体积增大了其库德光路的搭建难度, 并且长距离的光路势必会增加光线的损耗,

所以 TMT 将光学实验室安置在转台的两侧。伴随着望远镜俯仰轴的旋转, 三镜系统必须做出对应的旋转和倾斜, 以保证光学成像仪器与光学系统的准直。图 1 为望远镜的天顶角在 $0 \sim 65^\circ$ 变化时, 位于 Nasmyth 平台上的不同设备所对应的三镜系统的 Tilt 角度。

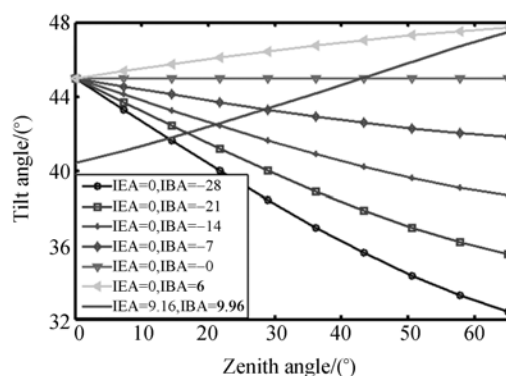


图 1 不同观测位置 Tilt 角度

Fig. 1 Tilt angles at different observation positions

IEA 称为仪器俯仰角, IBA 称为仪器方位角, 其中后者用来确定设备在望远镜上的位置。根据 TMT DRD (Design Requirements Document for Tertiary Mirror System) 要求^[10], 三镜 Tilt 轴系转动后的残差应小于 $9''$ 。

由此可知, 应用普通的大型轴系很难达到 TMT 这种非传统设备的要求, 因此需要设计一种机构来实现三镜 Tilt 的调整, 而 Stewart 平台是一个很好的选择。

3 Stewart 平台运动学模型描述

Stewart 平台是英国高级工程师 Stewart 在 1965 年提出的一种空间多环并联机构, 它由动、定平台及 6 根驱动杆组成, 这 6 根驱动杆可以独立地伸缩, 它们分别通过球铰和虎克铰与动、定平台联接。通常定平台是固定的, 动平台可以进行 6 自由度的独立运动, 即在三维空间做任意方向

的移动和轴线转动。在 TMT 三镜调整机构的设计中,规定 Stewart 平台的旋转轴为 X 轴。三镜调整系统如图 2 所示。

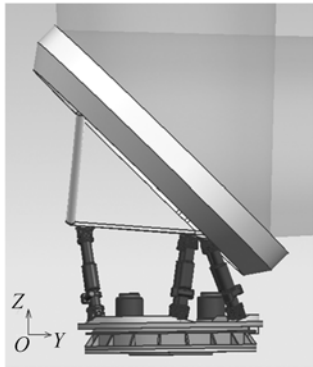


图 2 三镜 Stewart 简图
Fig. 2 Sketch of third mirror Stewart

目前,国内外已有众多学者采用不同的方法进行了 Stewart 6 自由度并联机构的运动学建模。20 世纪 80 年代之前,对于 Stewart 平台的研究方法主要基于李群的流形法;本世纪初,燕山大学的黄真教授等人利用旋量理论较好地解决了空间并联机器人的位型综合与运动学分析问题^[5-8]。在并联机构运动学分析中,黄真等人提出了一个很重要的概念——速度影响系数矩阵,即用机构速度的雅克比矩阵表示目标空间速度与关节空间速度之间的关系。Stewart 机构的运动学模型如图 3 所示,其中 P 为动平台,B 为定平台。

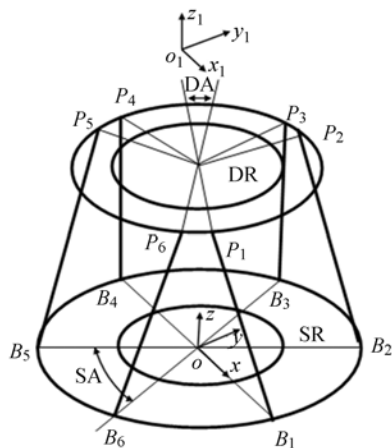


图 3 Stewart 运动学模型
Fig. 3 Dynamical model of Stewart

Stewart 平台的速度雅克比矩阵表示动平台的广义速度与支腿伸长速度之间的关系,具体表

达式为:

$$J = \begin{bmatrix} e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6 \\ r_1 \times e_1, r_2 \times e_2, r_3 \times e_3, r_4 \times e_4, r_5 \times e_5, r_6 \times e_6 \end{bmatrix}_{i=1 \dots 6}^T \quad (1)$$

其中: e_i 为第 i 个支腿的方向单位向量, r_i 为动平台原点到动平台第 i 个铰点的向量。

设 6 根支腿的长度变化向量为 δq , 平台的广义位移向量为 δQ , 那么有:

$$\delta q = J \delta Q = J \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(2)被称为 Stewart 并联机构的运动学模型。由式(2)可知,雅克比矩阵的秩直接与并联机构的自由度相关。如果对于某一位置雅克比矩阵降秩,那么该位形就为机构奇异位型(如死点、失稳点、运动不连续点等);但是,对于雅克比矩阵的条件数,目前还没有建立从数学空间到机构空间的映射,只是笼统地认为是机构可操作性能的表征,称之为“灵巧度”。本文通过奇异值分解建立了雅克比矩阵的条件数从数学空间到机构空间的映射,并进行了仿真验证。

4 Stewart 平台模型数学分析

4.1 奇异值分解与谱范数

奇异值分解是线性代数中一种重要的工具,在信号处理、数理统计中都有重要的应用。

设 A 为 $m \times n$ 阶复矩阵, $A^H A$ 的 n 个特征值的算术平方根 $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$ 称为矩阵的奇异值。则必定存在 m 阶酉矩阵 U 与 n 阶酉矩阵 V , 使得 $A = USV^H$, 其中 $S = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n)$, V^H 为 V 的共轭转置矩阵。

对于 $n \times n$ 的实矩阵 J , 必定存在 n 阶正交阵 P, Q , 使 $A = PSQ^T$ 。

矩阵的谱范数定义为:

$$\|J\| = \max_{\|x\|=1} \|Jx\| \quad (3)$$

则有:

$$\|J\|^2 = \max_{\|x\|=1} x^T J^T J x \quad (4)$$

由上式可得, J 的谱范数 $J^T J$ 的最大特征值的算术平方根, 即 J 的最大奇异值。

4.2 基于奇异值的条件数分析

在一个很小的时间段内, 认为机构的位形没

有发生变化,雅克比矩阵也为定值,由式(2)可得支腿的长度变化量与动平台广义位移量的关系;同理,两者误差量也服从相同的传递关系。对于非奇异位形,机构的雅克比矩阵可逆,故有:

$$\begin{cases} \mathbf{J}^{-1} \delta \mathbf{q} = \delta \mathbf{Q} \\ \delta \mathbf{q}' = \mathbf{J} \delta \mathbf{Q}' \end{cases}, \quad (5)$$

其中:支腿的长度变化向量误差为 $\delta \mathbf{q}'$,平台的广义位移向量为 $\delta \mathbf{Q}'$ 。

两边取谱范数可得:

$$\frac{\|\delta \mathbf{Q}'\|}{\|\delta \mathbf{Q}\|} \leq \|\mathbf{J}\| \|\mathbf{J}^{-1}\| \frac{\|\delta \mathbf{q}'\|}{\|\delta \mathbf{q}\|}, \quad (6)$$

其中: $\|\mathbf{J}\| \|\mathbf{J}^{-1}\| = \frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\min}}$, 称为并联机构的条件数, λ_{\max} , λ_{\min} 分别为 \mathbf{J} 的奇异值 λ_i 的最大值和最小值。

目前,机构条件数只是作为纯数学空间的指标,并没有指出其在机构空间的意义。本文从奇异值的基本定义出发进行推导,得到了从数学空间到机构空间的映射。

取式(2)及其转置得:

$$\begin{aligned} \delta \mathbf{q} &= \mathbf{J} \delta \mathbf{Q}, \\ \delta \mathbf{Q}^T \mathbf{J}^T &= \delta \mathbf{q}^T. \end{aligned}$$

两者相乘得:

$$\delta \mathbf{Q}^T \mathbf{J}^T \mathbf{J} \delta \mathbf{Q} = \delta \mathbf{q}^T \delta \mathbf{q}. \quad (7)$$

对 $\mathbf{J}^T \mathbf{J}$ 进行特征值分解,同时考虑其对称性得:

$$\mathbf{J}^T \mathbf{J} = \mathbf{S}^T [\mathbf{\Lambda}] \mathbf{S}$$

带入式(7)可得:

$$\begin{aligned} \delta \mathbf{Q}^T \mathbf{S}^T [\mathbf{\Lambda}] \mathbf{S} \delta \mathbf{Q} &= \delta \mathbf{q}^T \delta \mathbf{q} \\ \lambda_i^2 &= \frac{\delta \mathbf{q}_i^T \delta \mathbf{q}_i}{(\mathbf{S} \delta \mathbf{Q})^T \mathbf{S} \delta \mathbf{Q}} \end{aligned}, \quad (8)$$

其中: $\delta \mathbf{q}_i$ 为支腿伸长量。

结合式(6)、式(7)可得:

$$\frac{\|\delta \mathbf{Q}'\|}{\|\delta \mathbf{Q}\|} \leq \frac{|\delta q_{i\max}|}{|\delta q_{i\min}|} \frac{\|\delta \mathbf{q}'\|}{\|\delta \mathbf{q}\|}. \quad (9)$$

由上式可以得到支腿伸长量与平台位置误差以及支腿伸长量误差的关系。对于处在某位型下做微小运动的 Stewart 平台,可以忽略其机构位形的改变。那么,认为机构的雅克比矩阵是不变的,由式(2)可知,机构输出只与支腿长度的变化有关。在此情况下,如果各支腿的伸长量相差十分悬殊,那么将导致输入输出的严重失真,即少量的输入误差将会导致动平台姿态的巨大误差。

4.3 基于 ADAMS 的运动学仿真

为了验证上述理论模型的正确性,利用 AD-

AMS 建立了 PI 公司 M-850 Stewart 平台模型,如图 4 所示。

建立与图 2 相同的坐标系,将沿 Z 轴负方向移动 0.1 mm 作为目标运动。方案一设定为一根支腿(P4-B4)以 0.1 mm/s 的速度伸长 8.5 s 来完成目标运动 ($\frac{|\delta q_{i\max}|}{|\delta q_{i\min}|} \rightarrow \infty$)。如果对该主动杆运动速度附加 10% 的误差,动平台沿 X 轴方向的移动量由附加误差前的 1.875 mm 变为附加后的 1.900 mm,两者之差为 0.025 mm;方案二设定为 6 根支腿以 0.1 mm/s 等速伸长 10.1 s 来完成目标运动 ($\frac{|\delta q_{i\max}|}{|\delta q_{i\min}|} \rightarrow 1$)。同样对 P₄-B₄ 支腿附加 10% 的误差,得到动平台沿 X 轴方向的移动由附加误差前的 0 mm 变为附加后的 0.000 95 mm,两者之差为 0.000 95 mm。

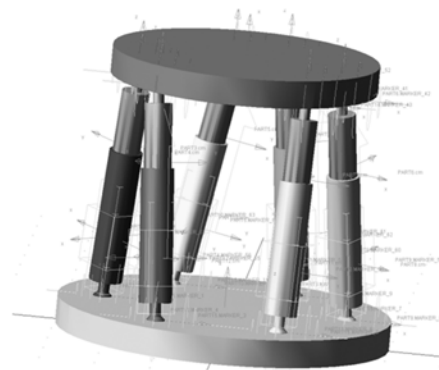


图 4 PI 公司 M-850 Stewart ADAMS 模型
Fig. 4 ADAMS model of PI M-850 Stewart

Stewart 平台为 6 自由度并联机构,由自由度理论可知,在两套方案中,5 根被动杆的伸长量都没有产生变化,即被动杆的伸长量一致。另外,动平台在进行 Z 轴运动时,在 X-Y 平面内的运动为附加运动,由运动的分解可知该运动并没有影响动平台在 Z 轴方向的移动(目标移动),故可以单独分离出作为误差评判的标准。以上分析也说明各方向的耦合是 Stewart 平台误差的重要来源。

对比两方案可知,由一根主动杆驱动的 Stewart 平台的误差为由 6 根杆驱动的平台 26.3 倍,即对于处在某位型下做微小运动的 Stewart 平台,如果各支腿的伸长量相差十分悬殊,将导致并联机构的运动学误差剧烈地增大,由此验证了式(9)的正确性。

5 TMT 三镜 Stewart 的结构优化与误差分析

5.1 TMT 三镜 Stewart 平台的结构优化

根据 TMT 三镜调整系统的设计要求, Stewart 平台结构设计的初始参数设定如表 1 和图 3 所示。

表 1 Stewart 平台结构的初始设计参数
Tab. 1 Initial parameters of Stewart platform

设计参数	数值
高度 H/m	1.000
定平台支撑半径 R_S/m	0.900
动平台支撑半径 R_D/m	0.750
定平台相邻支撑点夹角 $A_S/(\circ)$	60
动平台相邻支撑点夹角 $A_D/(\circ)$	10

由于 TMT 三镜 Stewart 平台要实现绕某根轴的倾斜运动, 故其转动误差为主要误差。图 2 中的 X 轴为根据招标方要求确定的旋转轴。优化目标函数定为绕 X 轴转动 1° 时支腿长度的最大变化量与最小变化量之比, 利用并联机构反解得到目标函数:

$$F = \min \left\{ \left| \frac{\delta q_{\max}}{\delta q_{\min}} \right| \right\}. \quad (8)$$

根据 TMT 三镜结构空间要求取边界条件为:

$$\begin{cases} 0.850 \leq R_S \leq 1.050 \\ 0.500 \leq R_D \leq 0.850 \\ 10 \leq A_S \leq 75 \\ 0 \leq A_D \leq 35 \end{cases}.$$

使用 MATLAB 优化工具箱优化平台参数, 结果如表 2 所示。

表 2 Stewart 平台参数优化解
Tab. 2 Optimized parameters of Stewart platform

设计参数	数值
高度 H/m	1.000
定平台支撑半径 R_S/m	1.000
动平台支撑半径 R_D/m	0.774
定平台相邻支撑点夹角 $A_S/(\circ)$	20
动平台相邻支撑点夹角 $A_D/(\circ)$	0

5.2 基于 MATLAB 仿真和实验的误差模型分析

为了建立 Stewart 平台的误差模型, 需要对输入误差进行辨识。机械系统比较常见的误差分布为均匀分布与正态分布, 故认为支腿伸长误差为两者中的一种。对于一个系统, 如果知道其误差传递函数, 就可以利用统计的方法评估其性质。将式(5)作为已知的误差传递模型。假设支腿的伸长量误差为 $[0, 1]$ 上的均匀分布, 利用 MATLAB 生成一个六维向量作为杆长误差向量, 带入式(5)求得机构旋转误差的向量模, 重复进行计算得到机构旋转误差向量模的期望为双峰分布; 同理, 当假设支腿伸长误差为标准正态分布时, 机构旋转误差向量模的期望为均匀分布。

实验采用平行光管测试 PI 公司 M-850 Stewart 平台的三维旋转角度, $0.3''$ 平行光管的测角精度为 $1''$ 左右, 而 Stewart 平台的最小角度行程为 $0.36''$, 因此平行光管不合适测量 Stewart 平台的最小行程。角度测量采取 Stewart 平台每次移动 10 倍最小行程也就是 $3.6''$, 每次测量移动 20 次 ($72''$), 重复测试 4 次, 从而得到 Stewart 平台角度位移的线性度。另外多次让平台从初始位置任意移动到一个位置, 然后再回到初始位置。实验装置如图 5 所示。

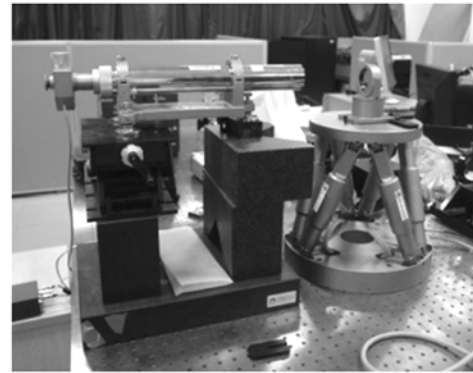


图 5 Stewart 平台实验装置

Fig. 5 Experiment installation of Stewart

处理测得的数据, 得到绕 X 轴的转动误差 θ 分布概率直方图, 如图 6 所示。由图可知, 其分布明显更接近双峰分布, 故支腿误差服从均匀分布。由于 TMT 三镜 Stewart 平台支腿采用与 PI 公司 M-850 平台支腿相同的设计, 有着相同的误差来源与分布, 故认为其伸长量误差服从均匀分布。

假设支腿的伸长量误差为 $[0, 1]$ 上的均匀分布, 并利用相同的方法进行 10^6 次重复计算可得

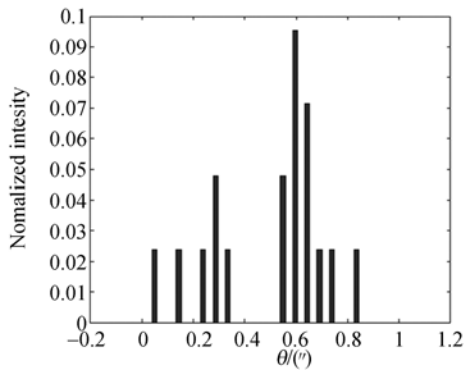


图 6 X 轴的转动误差分布概率直方图

Fig. 6 Histogram of X-rotation error probability

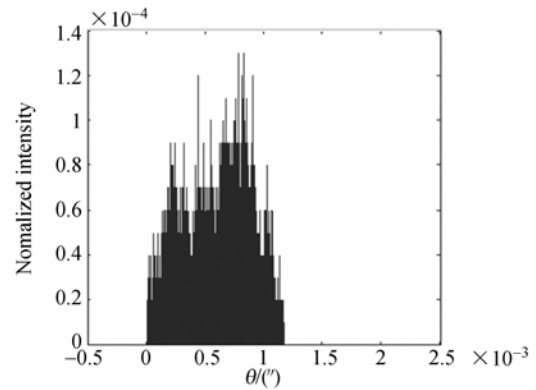


图 8 优化解转动误差模概率密度分布

Fig. 8 Distribution of optimized rotate error probability

机构旋转误差向量模的期望优化前为:

$$\delta Q_{\text{formal}} = 10^{-3} \times [-0.2085, 0.3792, -0.3138]';$$

优化后为:

$$\delta Q_{\text{after}} = 10^{-3} \times [0.2464, -0.2943, 0.1875]'$$

优化函数 F 的值为 3.7372 与 2.0003, 转动误差向量的模由优化前的 5.3454×10^{-4} 减少为优化后的 4.2721×10^{-4} , 优化量约为 20%。

绘制原始方案与最优方案的转动误差模期望——概率密度分布图, 分别如图 7、图 8 所示。由图可知, 相比原始方案, 最优方案的两个肩峰明显距离更近、分布的均值更小, 具有更好的精度传递性能。在实际工程应用中, 采用优化设计方案可以降低支腿安装精度与运动精度的要求, 节约成本, 提高装调效率。

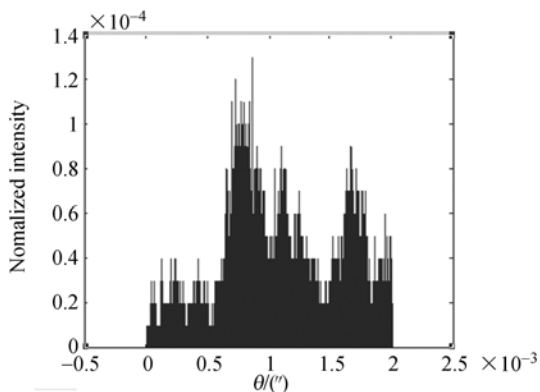


图 7 原始方案转动误差模概率密度分布

Fig. 7 Distribution of original rotate error probability

综上所述, 即使支腿长度误差达到 5%, 最优方案依旧可以将转动误差控制在 $0.1'$ 以内, 小于 DRD 文件中提出的 $9''$ 。本文结构或运动误差小于 5% 的直线促动器都可以满足 Stewart 平台精度。

6 结 论

本文首先利用奇异值分析了 Stewart 平台运动雅可比矩阵, 得出机构条件数与支腿最大伸长量与最小伸长量之比的绝对值的关系。然后利用条件数与系统误差传递系数, 得出在 TMT 三镜要求的运动形式下支腿伸长量误差与平台姿态误差的关系, 并使用 MATLAB 优化得出一组平台结构参数。利用 ADAMS 对理论推导进行验证, 得到由一根主动杆驱动的 Stewart 平台的误差为由六根杆驱动的平台 26.3 倍。最后利用已知的误差传递模型进行了实验和误差模拟。模拟结果显示, 在支腿伸长误差为 $[0, 1]$ 均匀分布时进行 10^6 次重复运算, 转动误差向量模优化前为 5.3454×10^{-4} , 优化后为 4.2721×10^{-4} , 优化量约为 20%, 支腿长度误差达到 5%。得到的优化设计方案可以将转动误差控制在 $0.1'$ 以内, 满足 TMT DRD 文件中提出的 $9''$ 的要求。

本文使用支腿伸长量表示特定运动要求下机构的条件数这个纯数学空间的指标, 为研究 Stewart 平台提供了新思路; 同时, 在实际 Stewart 平台的装调与检测过程中, 支腿的伸长量远比平台的位置参数要容易获得, 本文方法可以简单地得到 Stewart 平台的可操作数, 而不需要繁琐的机构正解。但本文对支腿伸长量误差模型只做了简单的假设, 今后将通过实验进一步地辨识其误差模型。另外, 文中并未充分考虑系统的模态与静力学性质, 以上两点将会是下一步工作的重点。

参考文献:

- [1] 王富国,杨飞,赵宏超,等. TMT 望远镜三镜系统的研究进展[J]. 中国光学,2013,10(6):643-651.
WANG F G, YANG F, ZHAO H CH, *et al.*. Progress in TMT M3 system [J]. *Chinese Optics*, 2013,10(6):643-651. (in Chinese)
- [2] TMT Group. *Design Requirements Document for Tertiary Mirror System (M3S)* [Z]. TMT. OPT. DRD. 07. 006. REL29, 2012.
- [3] 张景旭. 地基大口径望远镜系统结构技术综述[J]. 中国光学,2012,5(4):327-336.
ZHANG J X. Overview of structure of technologies of large aperture ground based telescope[J]. *Chinese Optics*, 2012,5(4):327-336. (in Chinese)
- [4] 程景全. 天文望远镜原理和设计[M]. 北京:中国科学技术出版社,2003.
CHENG J Q. *Principles of Astronomical Telescope Design* [M]. Beijing:China Science & Technology Press, 2003. (in Chinese)
- [5] 李维嘉. Stewart 运动平台的雅克比矩阵条件数的研究[J]. 华中科技大学学报,1997,25(11):33-35.
LI W J. Study on the condition number of Jacobian matrix of Stewart platforms [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology*, 1997,25(11):33-35. (in Chinese)
- [6] EI-KHASAWNEH B S, FERREIRA P M. Computation of stiffness and stiffness bounds for parallel link manipulators [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 1999, 39 (2):321-342.
- [7] 黄真,孔令富,方跃法. 并联机器人机构学理论及控制[M]. 北京:机械工业出版社,1997.
HUANG ZH, KONG L F, FANG Y F. *Mechanism Theory and Control of Parallel Manipulators* [M]. Beijing: China Machine Press, 1997. (in Chinese)
- [8] 徐刚,杨世模. Gough-Stewart 平台机构的普适工作空间及其几何求解[J]. 光学精密工程,2008,16(4):257-264
XU G, YANG SH M. A kind of workspace with universal characteristics of Gough-Stewart manipulator and its analytical resolution [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(4):257-264. (in Chinese)
- [9] BELY P Y. *The Design and Construction of Large Optical Telescopes* [M]. Springer-Verlag, 2003.
- [10] 王槐,代霜,张景旭. 大型地平式望远镜的方位轴系支撑结构[J]. 光学精密工程,2012,20(7):1509-1516.
WANG H, DAI SH, ZHANG J X. Azimuth shafting bearing structure in a large alt-azimuth telescope[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012,20(7):1509-1516. (in Chinese)
- [11] 张丽敏,张斌,杨飞. 主动光学系统力促动器得设计和测试[J]. 光学精密工程,2012,20(1):38-44.
ZHANG L M, ZHANG B, YANG F, *et al.*. Design and test of force actuator in active optical system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012,20(1):38-44. (in Chinese)

作者简介:



安其昌(1988—),男,山西太原人,硕士研究生,2011年于中国科学技术大学获得学士学位,主要从事空间机构学的研究。E-mail:anj@mail.ustc.edu.cn



张景旭(1965—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要研究方向为大型光电经纬仪的结构设计。E-mail:zhangjx@ciomp.ac.cn