

球形经纬仪四通结构分析与优化

王从敬, 牛文达, 王 冲, 闫佳钰, 王 晶

(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: 为提高四通刚度, 对直径 1 000 mm 的类球体四通进行结构优化。根据有限元法, 对负载条件下的四通进行静力学分析, 得到其最大变形量和最大应力值及所在位置。通过在四通应力较大、刚度较弱的部位增加加强板, 可以减小传感器安装板跨距, 同时形成更加稳定的三角形结构, 从而提高四通的承载能力。以光轴水平时为例, 优化后四通的最大变形量从 0.07 mm 减小至 0.04 mm, 最大应力值从 2.68 MPa 减小至 1.01 MPa。对比优化前后不同俯仰角下四通的变形情况, 结果表明优化后的四通不仅具有更小的变形量, 同时也具有更加稳定的结构; 经模态分析对比, 优化后的四通具有更好的动态刚度。

关键词: 球形经纬仪; 结构优化; 有限元; 四通

中图分类号: TH745

文献标识码: A

文章编号: 2095-509X(2023)03-0015-05

新型武器装备实验的场地称为靶场。光电经纬仪在靶场光学测量设备中占有重要地位, 是国内数量最多、发展成熟、功能齐全且具有代表性的靶场光学测量设备^[1]。光电经纬仪利用测角原理, 可以实时测量目标物体的飞行情况, 并且在记录飞行姿态和运动参数的同时可以输出实时影像。光电经纬仪可以在卫星、火箭等发射现场拍摄目标的运动轨迹并进行实时记录和反馈; 也可以对返回的载人航天飞船进行目标捕捉和跟踪拍摄, 从而确定降落点, 为相关工作人员提供参考和便利^[2]。

随着经纬仪应用范围的扩大, 光电经纬仪的结构形式也有很大变化。球形经纬仪具有较小的转动惯量, 可以满足在海洋环境条件下的使用需求, 其密封结构可以满足海洋条件对仪器提出的防潮湿、防盐雾和防腐蚀的要求^[3]。由于现在对数据的采集处理要求越来越高, 使得光电经纬仪向着大口径、高精度和高分辨率方向发展。随着光电经纬仪口径的增大, 随之带来的是对机械结构更高的刚度要求, 因此为了保证光电经纬仪的精度, 有必要对水平轴系及其关键部件的机械结构进行分析与优化。在前人研究中, 毛雨辉等^[4]对光电经纬仪水平轴系的设计和精度分析做了详细阐述; 司丽娜

等^[5]对高精度二轴跟踪系统进行了详细介绍, 并对四通刚度及光学偏角进行了分析; 杨立保等^[3,6]对球形照准架和米级口径跟踪架的结构设计进行了详细的阐述。四通是水平轴系的重要部件, 四通的支撑刚度直接影响着经纬仪的跟踪性能和精度^[7]。

本文以直径 1 000 mm 的类球体四通为研究对象。为提高四通的刚度, 提出一种基于有限元分析的四通结构优化方法。为提高四通部件的承载能力, 在四通应力较大、刚度较弱的部位增加加强板, 以减小传感器安装板跨距, 同时形成更加稳定的三角形结构。

1 水平轴系结构

1.1 水平轴系的设计

跟踪架是光电经纬仪的承载主体, 为跟踪、测量光学系统提供安装和回转平台^[2]。跟踪架的结构形式主要分为 U 型结构和 T 型结构。球形经纬仪采用 U 型跟踪架, 水平轴系位于跟踪架上部, 用于连接和支撑光学传感器, 并实现其俯仰方向的转动。水平轴系由左右立柱、左右轴承、四通、左右轴、电机、编码器、停挡机构、转台等组成。四通设

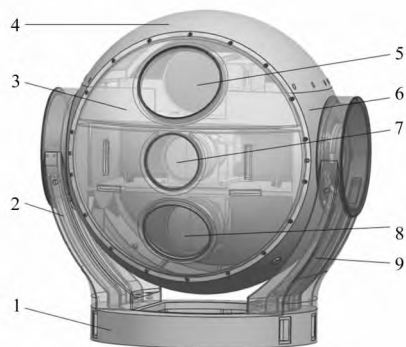
收稿日期: 2022-06-29

基金项目: 中国科学院战略高新技术创新基金资助项目(GORC-19-13)

作者简介: 王从敬(1997—), 女, 研究实习员, 硕士, 主要从事光电测控设备结构设计方面的研究工作, wangcongjing_2022@qq.com.

通讯作者: 王晶, 女, 研究员, wangjing@ciomp.ac.cn.

计成类球体结构,光学传感器安装在四通组件内部。左轴上安装有编码器和密封组件等部件,右轴上安装有力矩电机和停挡机构等部件。利用 NX 软件建立水平轴系的结构模型,如图 1 所示。左右立柱采用弧形设计,转台与垂直轴系相连。



1—转台;2—左立柱;3—四通前盖;4—四通上盖;5—传感器 1;
6—四通;7—传感器 2;8—传感器 3;9—右立柱

图 1 水平轴系结构模型

根据传感器尺寸及分布要求,四通组件的球体直径确定为 1 000 mm。为方便传感器的安装,四通组件分为四通前盖、后盖和上盖。四通组件各部分的作用如下:

1) 四通用于安装传感器,连接左右轴系及其他部件。传感器分布如图 1 所示,传感器 1 位于四通上部第一层安装板上,通过螺栓孔固定在四通上;传感器 2 和传感器 3 则固定在四通第二层安装板上,其中传感器 3 为倒装。

2) 四通前盖上设计有 3 个保护玻璃窗口,可以在不遮挡光学传感器视场的情况下保护四通内部部件。

3) 四通后盖用于安装电控系统及平衡配重,保证水平轴系的稳定和顺滑运行。

4) 四通上盖、四通、四通前盖、四通后盖组合后进行密封设计,保护经纬仪内部传感器及其他组件不受海洋恶劣环境的影响。

为了保证四通组件刚度的同时不过度增加四通组件的质量,四通组件采用薄壁结构。由于四通直接连接左右轴,而左右轴系的刚度和同轴性对经纬仪的精度有决定性影响,因此在四通与左右轴系连接的地方采用密布加强筋的形式提高四通的局部刚度。同时四通的刚度也会决定传感器的光轴位置。为方便传感器的安装,仅第一层传感器安装板采用翻边结构以增加四通的刚度。四通结构

如图 2 所示。

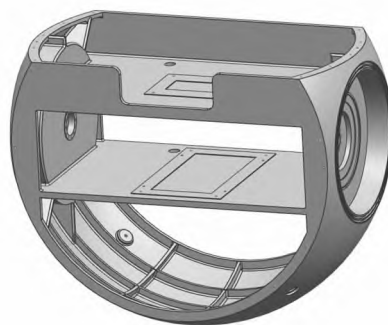


图 2 四通结构

1.2 部件材料属性

考虑到结构的整体质量要求,四通及主要部件的材料采用铸造铝合金 ZL114,ZL114 的密度较低,同时具有优良的铸造性能、较好的气密性和耐腐蚀性以及高强度。左右轴作为水平轴系的重要部件,其刚度直接影响水平轴系的精度,因此采用不锈钢材料 1Cr17Ni2,1Cr17Ni2 具有较好的硬度和耐腐蚀性以及高强度。各部件的材料及属性见表 1。

表 1 各部件材料及属性

名称	材料	密度 $\rho /$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	弹性模量 E / GPa	泊松比 μ
四通	ZL114	2.70	70	0.3
左右轴	1Cr17Ni2	7.75	210	0.3
左右立柱	ZL114	2.70	70	0.3
转台	ZL114	2.70	70	0.3

2 有限元仿真与结构优化

2.1 有限元模型的建立与分析

对水平轴系中主要部件进行静力学分析。以光轴水平时为例,忽略水平轴系中部分质量较小的非承重组件,如电机、编码器、停挡机构、密封盖板等,仅留下转台、左右立柱、左右轴系、四通组件及传感器等负载。为建立水平轴系的有限元模型,对各部件进行简化,去除多余特征及倒角^[8]。由于转台、四通组件等部件的结构较为复杂,因此采用四面体单元划分。考虑接触问题,四面体单元的类型为 C3D4,模型中网格数量为 522 808。利用 ABAQUS 中网格功能模块对划分的网格质量进行检查,没有“禁用”网格,“警告”网格不足 0.1% 且分布在部件边缘位置,网格质量符合要求。转台底部与垂直轴相连的部分采用固定约束,立柱与转台、立柱与左右轴系等利用螺栓连接的地方采用绑

定约束。将负载(传感器)简化为其等效质量块(30 kg),按照装配位置绑定在四通的内部位置上,如图 3(b)中 1、2、3。最后在整个模型上施加重力。有限元模型如图 3 所示。

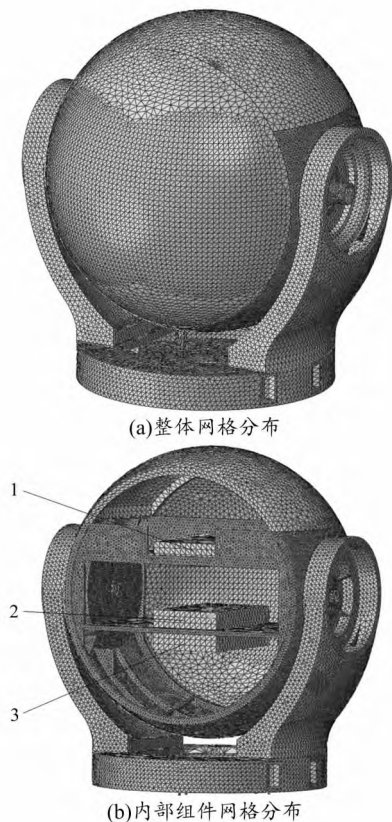


图 3 水平轴系有限元模型

水平轴系分析结果如图 4 所示。在所有承重部件中,受力后刚度最好的部件为转台,其次为左右立柱,变形最大的部件为四通。四通的最大变形位置为第二层传感器安装板,即传感器 2 和传感器 3 安装板,最大变形量为 0.07 mm。四通内部最大应力位置也在第二层传感器安装板上,最大应力为 2.68 MPa。

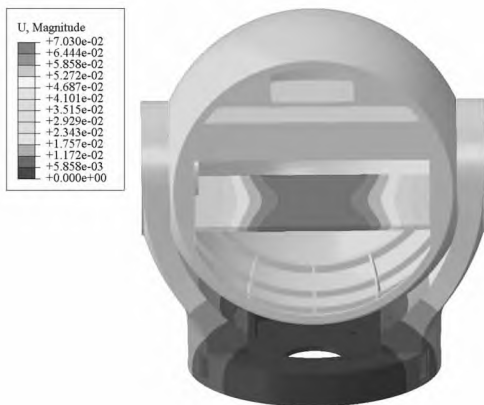


图 4 水平轴系位移云图

由于四通左右两侧分别连接左右轴系,四通的刚度会影响左右轴之间的同轴性,从而影响水平轴系的精度^[9];安装 3 个光学传感器后,四通的刚度也会对光学传感器的光轴位置造成影响。一般要求传感器安装部位的最大变形量不超过 0.05 mm,因此有必要对四通进行结构优化。

2.2 四通结构优化与分析

由于第二层传感器安装板的变形量最大,可能是由于第二层传感器安装板没有进行翻边设计且跨距过长所致,因此为增加四通部件的刚度,需要对四通进行结构优化。由于三角形结构具有更好的稳定性和应力性能,因此设计上拉下举的加强板结构,在减小传感器安装板跨距的同时形成更加稳定的三角形结构,优化后的四通结构如图 5 所示。

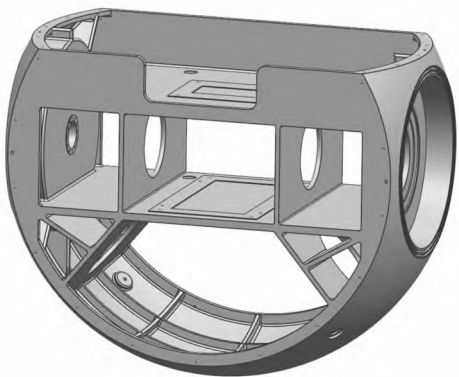


图 5 优化后的四通结构

对优化后的四通进行有限元分析,与优化前相比,除结构不同外,有限元模型相同。受力后四通最大变形位置在第二层传感器安装板上,最大变形量为 0.04 mm。四通内部最大应力位置也在第二层传感器安装板上,最大应力为 1.01 MPa。

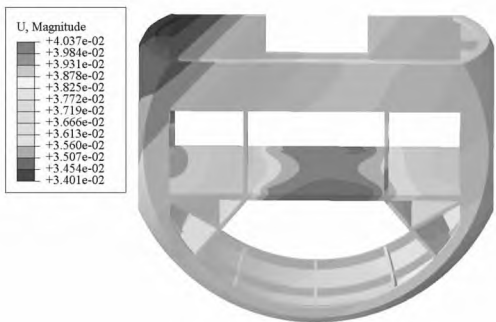


图 6 优化后水平轴系位移云图

与优化前四通相比,优化后四通的最大应力值从 2.68 MPa 减小至 1.01 MPa,最大变形量从 0.07 mm 减小至 0.04 mm,符合传感器安装部位的最大变形量不超过 0.05 mm 的要求。

3 结果对比

3.1 不同俯仰角下四通静力变形分析

以光轴平行于地面时俯仰角为 0° , 分别对不同俯仰角下的四通变形进行静力学分析。优化前四通的最大变形位置主要集中在第二层传感器安装板上。优化后随着俯仰角的变化四通的最大变形位置从第二层传感器安装板逐渐变换至四通下表面。由于四通下表面的变形对传感器光轴位置及轴系精度没有影响^[10], 因此忽略此位置。除四通下表面外, 变形的最大位置为传感器安装板, 变形量如图 7 所示。

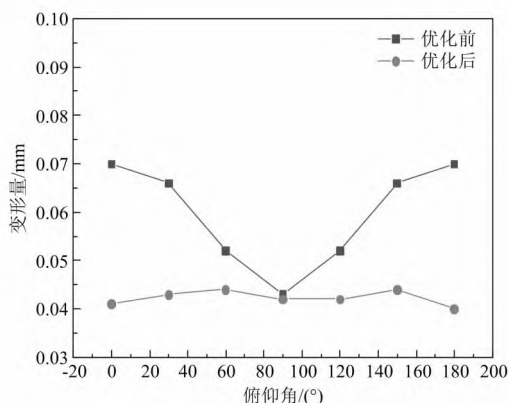


图7 不同俯仰角下四通变形

由图中可以看出, 随着俯仰角的增大, 优化前四通变形量先减小后增大, 呈对称分布, 俯仰角为 0° 时变形量最大, 俯仰角为 90° 时变形量最小。优化后不同俯仰角下四通的变形量略有波动, 总体趋势平稳。相比于优化前的四通, 优化后的四通不仅最大变形量减小了, 结构的稳定性也增加了。

3.2 模态分析

通过求解结构的特征方程得到结构的振型和固有频率。机械结构的模态与外载荷无关, 仅与结构的固有特性有关^[11]。机械结构中, 固有频率与刚度和质量的关系可由式(1)近似表达:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (1)$$

式中: f 为四通结构的固有频率; K 为四通结构的刚度; M 为四通结构的质量。

基频为结构的第一阶振动频率, 可以反映机械结构的刚度。由式(1)可知, 固有频率越高, 机械结构的动态刚度越好。模态分析时, 常将结构视为无阻尼自由振动状态, 其动力学方程为:

$$M\ddot{u} + Ku = 0 \quad (2)$$

式中: M 为质量矩阵; K 为刚度矩阵; u 为位移。

对公式(2)进行求解, 得

$$(K - \omega^2 M) \phi = 0 \quad (3)$$

式中: ω 为圆频率; ϕ 为特征向量。

由于机械结构的基频一定存在, 即式(3)一定存在非零解, 得

$$|K - \omega^2 M| = 0 \quad (4)$$

对式(3)和式(4)计算可得到机械系统的 n 阶振型与固有频率。通常低阶模态的固有频率会对机械结构的动力学响应产生较大影响, 所以利用有限元法对结构优化前后四通的前 6 阶模态进行分析, 分析结果如图 8 所示。

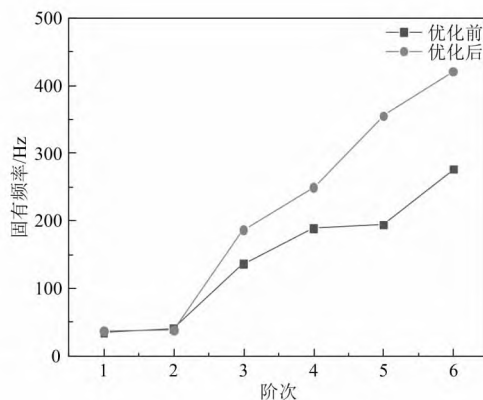


图8 不同阶次下四通的固有频率

由图中整体趋势可以看出, 结构优化后四通的固有频率相比优化前更高, 表明优化后四通结构具有更好的动态刚度。

4 结束语

本文提出一种基于有限元分析的四通结构优化方法, 通过在四通应力较大、刚度较弱的部位增加加强板, 可减小传感器安装板跨距, 同时形成更加稳定的三角形结构, 从而提高四通的刚度。经有限元分析结果对比, 光轴水平时, 优化后四通的最大变形量从 0.07 mm 下降至 0.04 mm, 符合变形不大于 0.05 mm 的要求, 最大应力从 2.68 MPa 下降至 1.01 MPa。对不同俯仰角下的四通变形情况进行分析, 结果表明优化后的四通结构不仅变形量减小了, 结构稳定性也增加了。经模态分析对比, 优化后的四通结构不仅具有更好的静态刚度, 还具有更好的动态刚度。

参考文献:

- [1] 王从敬. 1 m 口径光电经纬仪主镜及其支撑结构研究[D]. 长春: 长春光学精密机械与物理研究所, 2021.
- [2] 谢军. 基于接触和振动仿真的经纬仪结构设计及轻量化研究

- [D]. 长春: 长春光学精密机械与物理研究所, 2017.
- [3] 杨立保. 球形照准架系统的研究 [J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2012, 35(4): 10–13.
- [4] 毛雨辉, 张进, 李国华. 光电经纬仪跟踪架水平轴系设计及精度分析 [J]. 机械工程师, 2013(10): 109–111.
- [5] 司丽娜, 高云国, 聂晓倩, 等. 高精度二轴跟踪系统四通结构的设计与分析 [J]. 激光与红外, 2010, 40(10): 1106–1110.
- [6] 杨立保, 王晶, 史国权. 米级口径跟踪架的设计与模态分析 [J]. 光电工程, 2015, 42(6): 45–49.
- [7] 王涛. 基于桁架结构的大型四通设计 [J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2013, 36(3/4): 85–87.
- [8] 郭宁利. 基于有限元分析法的立式精密磨床立柱优化设计 [J]. 机械设计与制造工程, 2020, 49(9): 28–32.
- [9] 谭玉凤. 地基大口径望远镜结构设计及主镜热控研究 [D]. 北京: 中国科学院光电技术研究所, 2018.
- [10] 赵学颜, 李迎春. 靶场光学测量 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- [11] 邝泳聪, 洪海生, 梁经伦, 等. 基于动态特性的横梁结构优化设计 [J]. 机械设计与制造工程, 2018, 47(1): 35–39.

Analysis and optimization of the four-way body for spherical theodolite

Wang Congjing, Niu Wenda, Wang Chong, Yan Jiayu, Wang Jing
(Changchun Institute of Optics Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Jilin Changchun, 130033, China)

Abstract: In order to improve the stiffness of the four-way, the structure of sphere-like four-way with a diameter of 1 000 mm is optimized. The static analysis of the four-way under load conditions is carried out by using the finite element method. Then the maximum deformation and maximum stress value and location of the four-way are obtained. The reinforcing plate is added to the part where the stress is large and the rigidity is weak. So the span of the sensor mounting plate is reduced, and a more stable triangular structure is formed. The bearing capacity of the four-way is increased. Taking the optical axis as an example, the maximum deformation of the optimized four-way is reduced from 0.07 mm to 0.04 mm, and the maximum stress value is reduced from 2.68 MPa to 1.01 MPa. The results of the four-way under different pitch angles show that the optimized four-way has smaller deformation and better structural stability. The modal analysis of four-way indicates the optimized one also has better dynamic stiffness.

Key words: spherical theodolite; structural optimization; finite element; four-way