

DOI: 10.3969/j.issn.1009-9492.2024.06.039

姜家润, 邵帅. 激光发射系统轴头箱结构分析与优化 [J]. 机电工程技术, 2024, 53 (06): 170-173.

激光发射系统轴头箱结构分析与优化*

姜家润, 邵 帅*

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘要: 为提高轴头箱刚度, 对激光发射系统的轴头箱进行结构优化。基于现有轴头箱结构, 在光机装调完毕后, 安装侧盖时会导导致系统视轴与光轴之间的角度差变大, 导致不满足使用要求。根据有限元法, 对负载条件下的轴头箱进行静力学分析, 得到其变形情况。相机箱体变形情况影响电视视轴指向, 其角度变化可以直接用三角函数计算。反射镜法向量也会产生变化, 采用最小二乘法对反射镜反射面的节点数据进行拟合, 通过拟合数据获得反射镜的法向量, 计算其光轴角度变化情况。通过优化轴头箱结构形式, 改变轴头箱结构与箱体盖板之间的重量分配, 减少装调完后需要增加的负载重量, 从而改善跟瞄视轴与激光发射轴平行度的稳定性。根据有限元分析结果, 优化后的轴头箱结构, 安装侧盖对视轴与光轴之间角度差影响不超过1"。通过实验证明, 优化后的轴头箱结构具有更好的刚度。

关键词: 跟瞄转台; 视轴平行; 结构优化; 有限元

中图分类号: TH745

文献标志码: A

文章编号: 1009-9492(2024)06-0170-04

Structure Analysis and Optimization of Shaft Head Box of Laser Emission System

Lou Jiarun, Shao Shuai

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

Abstract: In order to improve the stiffness of the shaft head box, the structure of the shaft head box of the laser emission system is optimized. Based on the existing axle head box structure, after the installation of the optical machine, the angle difference between the system visual axis and the optical axis becomes larger when the side cover is installed, which meets the use requirements. According to the finite element method, the static analysis of the axle head box under load condition is carried out to obtain its deformation. The deformation of the camera box affects the direction of the TV visual axis, and its angle change can be calculated directly by trigonometric function. The mirror normal vector also changes. The least square method is used to fit the node data of the reflector surface, and the normal vector of the reflector is obtained by fitting the data, and the change of its optical axis Angle is calculated. By optimizing the structure of the shaft head box, the weight distribution between the shaft head box structure and the box cover plate is changed to reduce the load weight that needs to be increased after installation and adjustment, so as to improve the stability of the parallelism between the tracking shaft and the laser emission shaft. According to the results of finite element analysis, the influence of the installation side cover on the angle difference between the visual shaft and the optical shaft is less than 1". The results show that the optimized structure has better stiffness.

Key words: tracking turntable; parallel optic axis; structure optimization; finite element

0 引言

现代化光电对抗装备具有高度的集成性, 通常将跟瞄转台与激光发射系统组合在一起, 跟瞄转台完成对目标的捕获与跟踪, 激光发射系统完成对目标的干扰^[1]。跟瞄转台在捕获目标后, 会根据目标飞行姿态和运动参数进行跟踪, 并输出实时影像。当跟瞄转台稳定跟踪目标后, 激光发射系统发射激光, 完成对目标的干扰打击^[2]。因此, 通过设计与优化跟瞄转台的结构刚度, 保证激光的光轴与电视视轴的平行度具有重要意义。

对于T型发射系统而言, 因为其结构特点, 适合于可更换负载传感器, 以及多传感器共用等工况, 被广泛的应用于靶场光电测量系统^[3-4]。相比于U型发射系统而

言, T型发射激光发射因其结构特点, 对机械结构有更高的刚度要求。因此为了保证激光发射系统的精度, 有必要对水平轴系及其关键部件进行分析与优化。

栾云杰等^[5]采用连续体拓扑优化的方法对跟瞄转台的四通等关键部件提出了结构优化的设计方案, 并对优化后的结构组件进行力学分析, 获得具有最优拓扑构型的模型。陈卓等^[6-7]采用拓扑优化与工程经验相结合的方法, 完成了转台关键位置加强筋结构设计。并对转台框架进行有限元分析, 获得转台的基频为58 Hz, 分析结果表明, 优化后的转台结构强度和刚度满足设计要求。张戈等^[8]设计了一种组合式U型架跟踪转台, 为验证跟踪转台结构的结构强度, 使用ANSYS软件对跟踪转台进行

基金项目: 中国科学院重大创新项目 (E31371X6CZ00)

收稿日期: 2024-04-15

了冲击仿真, 并对样机进行了冲击试验, 仿真与试验结果表明组合式U型架具有良好的力学性能。王从敬等^[9]对负载条件下的四通进行静力学分析, 根据有限元分析结果, 对四通结构进行优化, 研究表明优化后的四通具有更加稳定的结构。

T型激光发射系统的轴头箱是承载光电载荷的重要载体, 其刚度稳定性关系到发射系统的精度。为了提高轴头箱的刚度, 提出了一种基于有限元分析的轴头箱结构优化方法。通过对轴头箱进行结构优化, 改变轴头箱结构与箱体盖板之间的重量分配, 减少装调完毕后因增加负载重量对光学系统的影响, 用以保证激光发射光轴与跟瞄转台相机视轴的平行度。

1 基本原理

1.1 转台结构与转台光路

跟瞄转台是各类光电传感器与激光发射系统的承载主体。T型跟瞄转台的跟踪结构如图1所示。跟踪架由垂直轴系与水平轴系组成, 跟踪架底部为垂直轴系, 负责转台水平范围内的连续回转; 水平轴系包含水平轴、横轴座、左轴头箱体、右轴头箱体、电机、编码器与停挡机构等结构。垂直轴系上端与横轴座相连, 横轴座支撑着水平轴。水平轴右端与右轴头箱相连, 水平轴左端与左轴头箱相连。左轴头箱前盖上设计有两个保护玻璃窗口, 可以在不遮挡光学传感器与激光发射的情况下保护轴头箱内部部件。轴头箱侧盖与轴头箱组合后完成密封设计, 保护跟瞄转台内部传感器及其他组件不受恶劣环境的影响。

本文的激光发射系统将激光器固定于基座上, 激光器发射激光后, 通过轴系内的库德反射镜导出, 其中库德反射镜1安装在垂直轴与水平轴交汇处, 激光沿着垂直轴系射向库德反射镜1。库德反射镜2安装在水平轴系左轴头箱内, 激光沿着水平系射向库德反射镜2, 激光经过库德反射2转折一定角度后, 完成发射任务。激光发射系统光路示意图如图2所示。

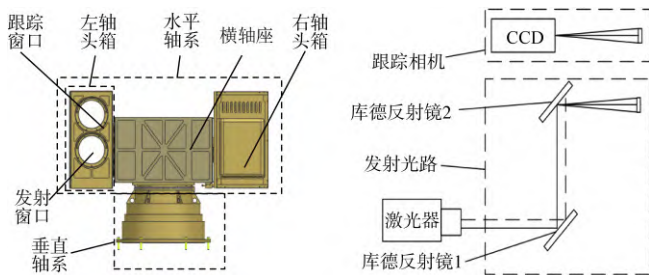


图1 转台结构示意图

图2 激光发射系统光路示意图

左轴头箱体内上部位置处安装电视跟踪相机, 负责对目标的捕获跟踪; 左轴头箱下部位置, 安装库德反射镜2, 负责激光的发射; 侧盖负责完成轴头箱的密封, 其结构如图3所示。为了在保证轴头箱刚度的同时不过度增加

轴头箱组件的质量, 轴头箱组件采用薄壁结构。左右轴头箱直接连接水平轴, 在轴头箱与水平轴连接的地方采用密布加强筋的形式以提高轴头箱的局部刚度。右轴头箱体内装其他传感器。

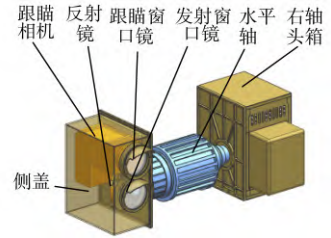


图3 轴头箱结构示意图

1.2 部件材料属性

水平轴作为轴系的重要部件, 其刚度直接影响轴系精度, 采用40Cr材料, 40Cr具有较高的刚度与强度。考虑到结构的整体质量要求, 轴箱体、电视跟踪相机箱体与镜座采用铝合金2A12, 同时兼具良好的耐腐蚀性与较好的弹性模量。各部件的材料及属性如表1所示。

表1 各部件材料属性

名称	材料	密度 $\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	弹性模量 E / GPa	泊松比
水平轴	40Cr	7.85	210	0.3
右轴头箱体	2A12	2.7	70	0.3
左轴头箱体	2A12	2.7	70	0.3
相机箱体	2A12	2.7	70	0.3
反射镜	JGS1	2.2	70	0.18

2 有限元仿真

光机装调时, 先对激光光轴与电视系统视轴标定平行, 待装调完毕后, 安装侧盖。因此轴头箱的刚度会对光学传感器及发射系统造成影响。一般要求装调完毕后, 安装侧盖等组件对光学系统造成角度差值不应该超过电视系统一个像元尺寸^[10]。

对于电视系统CCD相机, 像元尺寸为 $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$, 电视系统的焦距为300 mm, CCD中一个像元的角度值(分辨率)为^[11-12]:

$$\varepsilon = \arctan(af) \quad (1)$$

式中: a 为像元尺寸大小; f 为焦距。

通过计算可得 $\varepsilon = 10''$, 因此安装侧盖对光学系统造成角度差值不应该超过 $10''$ 。

2.1 有限元模型的建立与分析

在进行有限元分析时, 对一些质量较小的非承重组件进行忽略, 例如电机、停挡机构与编码器等, 留下水平轴、左轴头箱体、右轴头箱体组件^[13-14]。在建立有限元分析模型时, 在不影响精度的情况下, 可以对一些部件进行简化, 如去除一些小的螺纹孔与倒角等特征^[15-16]。因为水平轴系包含各种组件, 其总体结构较为复杂, 因此采用四面体单元对模型进行网格划分, 并利用UG中的网格质量分析功能, 对网格质量进行检测, 经检查后网格质量符合要求。其中水平轴系不带侧盖有限元模型网格数量为1 605 981, 水平轴系带侧盖有限元模型网格

数量为1 885 049。轴承支撑部分采用自定义约束,轴承固定端限制其3个方向的位移与绕轴线的转动,轴承游动端限制其非轴向位移与绕轴系转动。水平轴与轴头箱,镜座与轴头箱、相机与轴头箱等利用螺栓连接的地方采用绑定约束。本模型没有额外负载,只需要施加重力载荷。其具体有限元模型如图4~5所示。

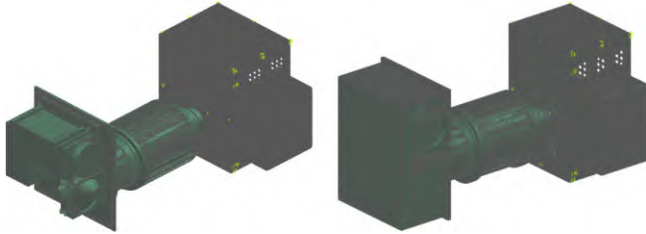


图4 轴头箱不带侧盖有限元模型 图5 轴头箱带侧盖有限元模型

轴头箱静力学分析结果如图6~7所示,在不同负载情况下,相机箱体变形情况影响电视视轴指向,其角度变化可以直接用三角函数计算。同时,镜子法向量也会产生变化,采用最小二乘法对反射镜反射面的节点数据进行拟合,通过拟合数据获得反射镜的法向量。可以计算轴头箱安装侧盖前、后镜子法线的空间指向变化情况,再利用式(2)可以获得激光光轴指向的变化情况^[17-18]。

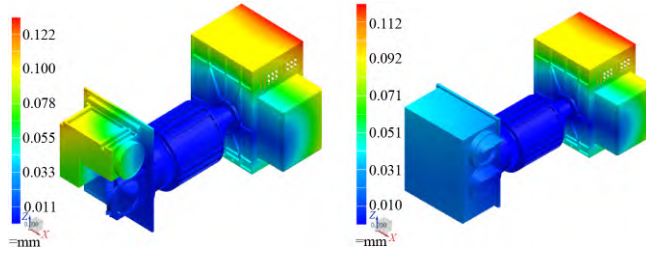


图6 轴头箱不带侧盖位移云图 图7 轴头箱带侧盖位移云图

$$R_i = M_i R_{i-1} \quad (2)$$

式中:入射光的单位矢量为 R_{i-1} ;反射光的单位矢量为 R_i ;镜面反射矩阵为 M_i 。

$$M_i = \begin{bmatrix} 1 - 2w_x^2 & -2w_x w_y & -2w_x w_z \\ -2w_y w_x & 1 - 2w_y^2 & -2w_y w_z \\ -2w_z w_x & -2w_z w_y & 1 - 2w_z^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: w_x 、 w_y 、 w_z 为该平面反射镜法线矢量 N_i 的方向余弦。

根据仿真结果,转化成角度进行计算,安装侧盖与不安装侧盖带来的视轴与光轴角度在3个方向的相对变化量为 $(31.77'', 0.42'', -16.91'')$,因此激光光轴与视轴相对变化量为 $36''$ 。

由于侧盖安装对视轴与光轴之间的角度影响较大,主要是因为后安装侧盖结构质量较沉重,因此将轴头箱做成一体结构,在需要维修的地方开侧盖维修口。装调时拆掉左侧2 mm厚度的薄板侧盖,以便于给相机以及反射镜调节角度与固定,图8所示为优化后轴头箱不带侧盖的模型。当装调完毕时,再安装左侧薄板,其中图9所示为优化后轴头箱带侧盖的模型。

对优化后的轴头箱结构进行仿真分析,其中不带侧

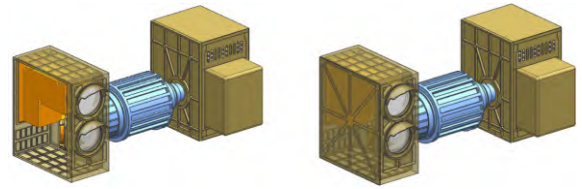


图8 优化后轴头箱不带侧盖模型 图9 优化后轴头箱带侧盖模型

盖的轴头箱有限元分析结果如图10所示,带侧盖的轴头箱有限元分析结果如图11所示。

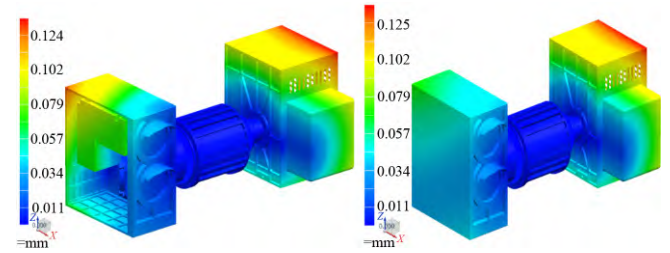


图10 优化后轴头箱不带侧盖位移云图

图11 优化后轴头箱带侧盖位移云图

与优化前的轴头箱相比,优化后的轴头箱因安装侧盖带来的视轴与光轴角度在3个方向的相对变化量为 $(0'', 0.22'', -0.41'')$,因此激光光轴与视轴相对变化量为 $1''$,满足使用要求。

3 分析验证

3.1 模态分析

为了保证系统具有较好的动态刚度,在跟瞄发射系统动作过程中不存在共振现象,一般地要求系统固有频率大于50 Hz。因此对系统结构进行模态分析,在模态分析过程中,常将系统视为无阻尼自由振动状态^[19-20]。其动力学方程为:

$$M\ddot{x} + Kx = 0 \quad (4)$$

式中: M 为系统质量矩阵; K 为刚度; x 为自由振动响应。

通过计算可得:

$$(K - \omega^2 M)X = 0 \quad (5)$$

式中: X 为振型向量。

令矩阵 $K - \omega^2 M$ 的行列式等于0,便得到计算固有频率的特征方程。在计算固有频率以后,通过计算的伴随矩阵可以得其振型向量。因此可以利用有限元法对优化后的结构进行校核。模态分析结果中,前6阶固有频率分别为131、242、344、450、551、663 Hz,系统固有频率大于50 Hz,表明优化后的系统结构刚度满足设计要求,其分析结果如图12所示。

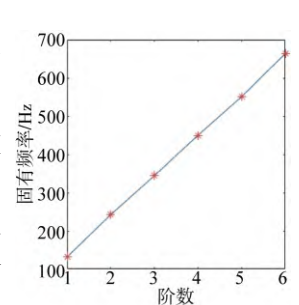


图12 模态分析结果

3.2 试验验证

激光光轴与视轴平行度检测原理示意图如图13所示^[21-22],将跟瞄转台安装至光管前,并要求跟踪相机窗

口与激光发射窗口在光管口径内。调整跟瞄转台直至光管的像在相机视场中心, 即跟踪相机脱靶量显示为 (0, 0)。调整徕卡经纬仪角度, 使光管成像在徕卡经纬仪视场中心。此时安装侧盖, 转动转台保证光管成像在徕卡经纬仪视场中心, 观察跟踪相机脱靶量值, 其变化量即为安装侧盖带来的角度变化。根据前文计算结果可知, 跟踪相机变化一个码值, 角度变化 $10''$ 。

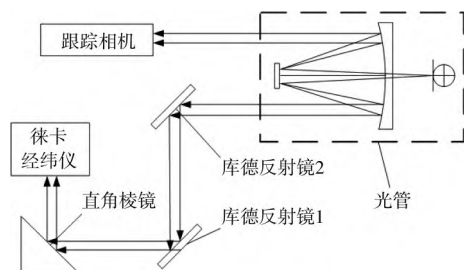


图 13 视轴与光轴标定原理示意图

光轴与视轴平行标定后, 安装侧盖前相机显示脱靶量值为 (0, 0), 如图 14 所示。安装侧盖后相机显示脱靶量值为 (-3, -2), 如图 15 所示。



图 14 安装侧盖前相机显示脱靶量值



图 15 安装侧盖前相机显示脱靶量值

对优化后的跟瞄发射系统进行光轴与视轴平行标定, 对比其安装侧盖前、后相机显示脱靶量值, 经过实验验证相机脱靶量值皆为 (0, 0), 其光斑在相机视场内情况如图 16 所示。

经实验验证, 优化后的系统光轴与视轴具有更好的稳定性, 受侧盖安装影响更小。表明优化后的轴头箱具有更好的结构刚度。



图 16 轴头箱优化后的视轴平行情况

4 结束语

本文提出一种基于有限元分析的轴头箱结构优化方法, 通过将轴头箱的板状结构更改为框架结构, 改变轴头箱结构与箱体盖板之间的重量分配, 减少装调完毕后需要增加的负载重量, 当系统装调完毕后, 增加负载对轴头箱变形量影响变小。经过有限元对比分析, 在安装侧盖与不安装侧盖两种情况的对比下, 系统光轴与视轴的变化量由原来的 $36''$ 降低为 $1''$ 。对系统进行模态分析, 优化后的轴头箱结构具有较好的刚度, 满足设计要求。最后通过实验证明, 优化后的系统光轴与视轴具有更好的稳定性, 受侧盖安装影响更小, 表明优化后的轴头箱具有更好的结构刚度。

参考文献:

- [1] 赵宏达, 李顺合, 江涛, 等. 离散式光学系统光轴指向误差建模与数字化标校[J]. 光学学报, 2023, 43(18): 313-32.
- [2] 余毅, 刘震宇, 孙志远, 等. 靶场光电测量设备发展现状及展望[J]. 光学学报, 2023, 43(6): 24-40, 343.
- [3] 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: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2017.
- [4] 赵学颜, 李迎春. 靶场光学测量[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- [5] 栾云杰. 轻量化高机动性光测设备跟踪架结构优化设计技术研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2023.
- [6] 陈卓, 胡庆龙, 李朝辉. 基于碳纤维框架天基目标探测二维跟踪转台结构优化[J]. 光学精密工程, 2021, 29(3): 547-557.
- [7] 陈卓. 一种天基二维跟踪指向机构的结构设计和力热特性分析[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2021.
- [8] 张戈, 刘芬, 宋煜明. 大型车载搜索与跟踪转台 U 型架的结构设计[J]. 电视技术, 2022, 46(8): 41-45, 50.
- [9] 王从敬, 牛文达, 王冲, 等. 球形经纬仪四通结构分析与优化[J]. 机械设计与制造, 2023, 52(3): 15-19.
- [10] 李霖, 段金升. 光电经纬仪 CCD 相机作用距离分析研究[J]. 舰船电子工程, 2022, 42(11): 181-184.
- [11] 陈昌博. 多波长激光合束系统中光束监测装置的设计[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2020.
- [12] 陈昌博, 韩旭东, 徐新行. 用于激光合束系统的光束位置监测装置设计[J]. 激光与红外, 2020, 50(2): 204-210.
- [13] 李博, 张正栋, 赖宝. 大口径高精度波束波导天线保型设计方法研究[J]. 机电工程技术, 2023, 52(8): 59-63.
- [14] 王健, 张美君, 虞林瑶, 等. 卡塞格林系统结构设计与仿真[J]. 机电工程技术, 2022, 51(5): 84-86, 97.
- [15] 闫佳钰, 牛文达, 王冲, 等. 高温工况下经纬仪立柱材料对横轴差影响分析[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2022, 45(5): 1-7.
- [16] 张岩, 陈宝刚, 李洪文, 等. 700 mm 光学望远镜结构设计与分析[J]. 光学技术, 2020, 46(4): 385-390.
- [17] 徐凡琳. 搜索跟踪转台的总体设计及其指向精度分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- [18] 刘政麟, 汪逸群. 星间激光通信机光轴指向误差源分析与补偿控制[J]. 宇航学报, 2023, 44(3): 454-464.
- [19] 曹树谦, 张文德, 萧龙翔. 振动结构模态分析: 理论、实验与应用[M]. 天津: 天津大学出版社, 2001.
- [20] Singiresu, S Rao. 机械振动[M]. 4 版. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- [21] 项能全, 何炬, 杨涛, 等. 光电跟踪仪光轴平行性要求分析和误差分配[J]. 光学与光电技术, 2023, 21(6): 34-43.
- [22] 蒋志雄, 解平, 严伟. 激光光束管控中光瞳光轴自动准直技术的应用[J]. 强激光与粒子束, 2023, 35(8): 43-48.

第一作者简介: 姜家润 (1996—), 男, 硕士, 研究实习员, 研究领域为机械设计及理论以及激光发射系统结构设计光束控制, 已发表论文 4 篇。

※通讯作者简介: 邵帅 (1978—), 女, 博士, 研究员, 研究领域为精密机械结构设计与激光发射系统结构设计, 已发表论文 39 篇。