

文章编号:1001-5078(2024)06-0943-08

· 光电技术与系统 ·

某高精精密光电转台结构与模态分析

叶 栋, 吴 波, 郑宏军, 傅宏韬, 尤 磊

(中国电子科技集团公司第五十二研究所, 浙江 杭州 311121)

摘要:以某高精精密搜跟一体光电设备为目标对象,根据该产品的技术指标要求,设计了一种高精精密光电转台,对高精精密光电转台样机进行装配与检测,确保轴系晃动误差值满足技术指标要求运用 ANSYS 软件对光电转台的三维模型进行模态分析,得出高精精密光电转台的固有频率高于工作频率,不会产生共振现象。该高精精密光电转台的实际使用效果表明该结构设计是成功的,对同类型转台类产品结构设计具有参考借鉴意义。

关键词:高精精密;光电转台;轴系晃动误差;模态分析;结构设计

中图分类号:TP273;TN29 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2024.06.016

Structure design and modal analysis of a high-precision opto-electronic turntable

YE Dong, WU Bo, ZHENG Hong-jun, FU Hong-tao, YOU Lei

(The 52nd Research Institute of CETC, Hangzhou 311121, China)

Abstract: Taking a certain high-precision tracking and search integrated photoelectric device as the target object, a high-precision opto-electronic turntable structure is designed according to the technical specification requirements of the product. By assembling and testing the precision opto-electronic turntable, it is ensured that the error of axis sloshing meets the requirements of this structure. Using ANSYS software to conduct modal analysis on the three-dimensional model of the opto-electronic turntable and opto-electronic equipment, it is concluded that the intrinsic frequency of the high-precision opto-electronic turntable and opto-electronic equipment is higher than the operating frequency, and does not produce resonance phenomenon. The application of the opto-electronic turntable shows that the structure design of the high-precision opto-electronic turntable is successful and it can be used as a reference for the structure design of similar opto-electronic turntable.

Keywords: high-precision; opto-electronic turntable; error of axis sloshing; model analysis; structure design

1 引言

高精精密光电转台作为光电系统中的核心,应用于区域防护跟踪与搜索以及机载光电系统等。在光电系统中,光电转台既是光学系统的载体,又是控制系统的控制对象,要使转台系统安全可靠地工作,保证转台的跟踪精度,转台必须良好动态

特性^[1]。在设定的工作模式下,光电转台进行俯仰和方位两个方向上的转动,带动光电设备搜索和跟踪目标^[2]。光电转台较高的精度和良好的动态性能主要取决于光电转台俯仰轴系和方位轴系的机械结构设计。

本文以某高精精密搜跟一体光电设备为目标对

象,根据该产品的技术指标要求,完成高精光电转台的结构设计通过俯仰轴系和方位轴系的轴系晃动误差值检测,验证结构设计的合理性结合有限元设计与模态分析,求解该高精转台前六阶固有频率和振型。轴系检测和光电转台实际使用效果表明,该高精光电转台具有稳定性强、精度高、可靠性好等特点,能满足高精密搜跟一体光电设备的技术指标要求。

2 结构设计

2.1 转台主要技术指标

转台结构的技术指标为:转台负载,最大负载能力不超过 50 kg;转动范围,方位 $n \times 360^\circ$ 、俯仰 $-90^\circ \sim +55^\circ$;跟踪速度,俯仰 $\geq 60^\circ/\text{s}$ 、方位 $\geq 147^\circ/\text{s}$;最大角加速度,俯仰 $\geq 60^\circ/\text{s}^2$ 、方位 $\geq 113^\circ/\text{s}^2$;转台轴系精度,俯仰轴角晃动误差: $\leq 5''$ 、方位轴角晃动误差: $\leq 3''$;光电设备谐振频率 $> 50 \text{ Hz}$ 。

2.2 转台总体结构形式

常见的高精密两轴光电转台结构形式主要有 O 型、U 型和 T 型^[3]。根据三种形式转台结构优缺点结合本结构负载尺寸和技术指标要求,本高精光电转台选用 U 型转台形式。高精光电转台三维实体模型如图 1 所示。

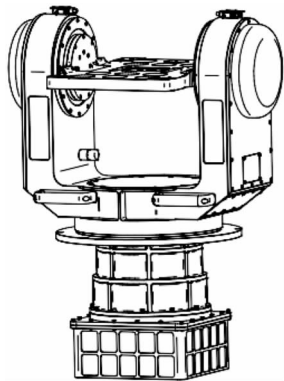


图 1 光电转台三维实体模型

Fig. 1 Three dimensional solid model of opto-electronic turntable

2.3 俯仰轴系设计

2.3.1 俯仰轴系结构设计

如图 2 所示,俯仰轴系主要由左轴轴系、右轴轴系、俯仰测角元件、俯仰电机、俯仰密封组件、负载支架、圆盘盖、U 型架等组成。

U 型架是俯仰轴系的主要支撑零件。U 型架采用整体式结构,由铝合金 7075-T6 机加工而成,具强度、承载能力强的特点。U 型架轴承安装部设计有

40 Cr 合金结构钢轴套,且在制造中进行调质处理,调质后硬度达到 HB240 ~ 280,以尽可能减小因环境温度变化和材料线膨胀系数不一致造成的相关误差。负载支架为承载部件,上下位置分别安装光电负载,负载重量 $\leq 50 \text{ kg}$ 。

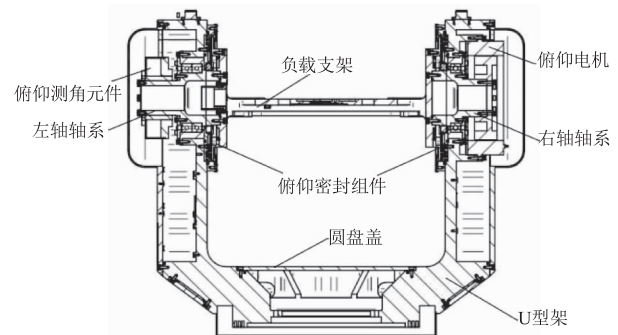


图 2 俯仰轴系机械结构

Fig. 2 The mechanical structure of vertical axis

俯仰轴系的左轴轴系为固定端轴系,采用一对 71916AC-P4 角接触轴承,"背靠背"安装作为支撑,该固定端轴系轴承方案既可同时承受轴向力、径向力和倾覆力矩,又便于预紧和减小游隙,提高轴承转动精度;右轴轴系为自由端轴系,采用单个 61916-P4 深沟球轴作为支撑,主要承受径向力。左右轴均采用空心轴结构,材料选用与轴套相同的 40 Cr 合金结构钢^[4],且在制造中进行调质处理,空心轴结构内部空腔可用于线缆布局,同时也可以降低轴系的转动惯量。在左轴末端安装有光电编码器作为俯仰轴测角元件用于保证俯仰轴系的测量精度;在右轴末端安装有直驱力矩电机。

通过机械限位、电气限位和软件限位三种限位方式共同作用实现俯仰轴系的转动范围技术指标要求。软件限位由控制软件实现;电气限位由电气限位器实现,电气限位角度为 $-90^\circ \sim +55^\circ$;机械限位由负载支架下部的机械限位挡块实现,机械限位角度为 $-92^\circ \sim +58^\circ$,大于电气限位角度,用做光电转台俯仰限位的最后的一道屏障。

2.3.2 电机的选取

高精光电转台俯仰电机需要克服的力矩主要有惯性力矩、风阻力矩和不平衡力矩等,俯仰力矩电机输出力矩应该大于这四种力矩的代数和,并确保有足够的系数^[5]。

(1) 惯性力矩

作用在转台俯仰轴系上的惯性力矩 M_j 为:

$$M_j = J\alpha \quad (1)$$

式中, J 为物体的转动惯量; α 为物体角加速度。

(2) 摩擦力矩

作用在转台俯仰轴系上的摩擦力矩主要由轴承的摩擦力矩和毛毡圈密封的摩擦力矩两部分组成。轴承摩擦产生的摩擦力矩为:

$$M_c = fN \frac{D+d}{4} \quad (2)$$

式中, f 为动摩擦系数, 常取 0.1 ~ 0.3; N 为接触面的法向压力; D 为轴承外径; d 为轴承内径。

毛毡圈密封产生的摩擦力矩为:

$$M_m = \frac{\pi d^2 L p f}{2} \quad (3)$$

式中, d 为轴径; L 为毛毡与轴的接触长度; p 为毛毡圈对轴产生的比压, 常取 $p = 10 \text{ kg/cm}^2$, f 为摩擦系数, 常取 0.06 ~ 0.11。

俯仰轴系摩擦力矩 M_f 为:

$$M_f = M_c + M_m \quad (4)$$

(3) 风阻力矩

作用于转台俯仰轴转动部分的风阻力矩 M_w 为:

$$M_w = \frac{1}{2} C_p v^2 A L \quad (5)$$

式中, C 为风力矩系数空气密度; ρ 为空气密度, 1.25 kg/m^3 ; v 为计算风速; A 为转动部分特征面积; L 为转动部分各部件距方位轴中心的距离。

(4) 不平衡力矩

作用于转台俯仰轴上的不平衡力矩 M_g 为:

$$M_g = Gd \quad (6)$$

式中, G 为绕俯仰轴系转动结构的总重量; d 为绕俯仰轴系转动结构重心偏离俯仰轴的距离。一般情况下, 可通过在俯仰轴轴系合理的结构布局以及采用恰当的结构配重等措施来减小转台结构的不平衡力矩。

经计算, 作用于俯仰轴系总力矩 $M_{\text{俯仰}}$ 为:

$$M_{\text{俯仰}} = \sum_{i=1}^4 M_i = 3.4 [\text{N} \cdot \text{m}] \quad (7)$$

综合计算结果和电气控制要求, 选取 J182LWX 型无刷直流力矩电机, 其主要技术参数为: 连续堵转转矩: $\geq 10 \text{ N} \cdot \text{m}$, 峰值堵转转矩: $\geq 20 \text{ N} \cdot \text{m}$, 电机额定转速 $100 (\text{r/min}) = 600^\circ/\text{s}^2$ 。

2.4 方位轴系设计

2.4.1 方位轴系结构设计

如图 3 所示, 方位轴系主要由基座、方位迷宫结构、方位上部轴系、光电滑环、方位电机、方位测角元件和电源箱等组成。

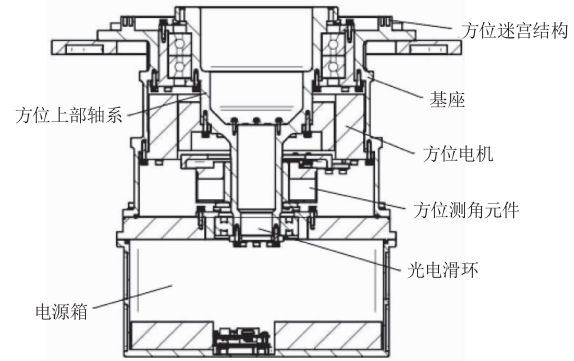


图3 俯仰轴系机械结构

Fig. 3 The mechanical structure of horizontal shafting

基座是方位座的主要支撑零件。基座采用整体式结构, 铝合金 7075 - T6 机加工而成。基座轴承部安装有 40 Cr 合金结构钢轴套, 且在制造中进行调质处理。

方位轴系的上部轴系为固定端轴系, 采用一对 71928AC-P4 角接触轴承, “背靠背”安装作为支撑, 该固定端轴系方案既可同时承受轴向力、径向力和倾覆力矩, 又便于预紧和减小游隙, 提高轴承转动精度; 方位下部轴系为自由端轴系, 采用单个 6210-P4 深沟球轴作为支撑, 主要承受径向力。方位轴设计同俯仰轴, 采用 40 Cr 合金结构钢的空心轴结构并, 在制造中进行调质处理。空心轴结构内部安装光电滑环, 降低轴系的转动惯量和实现方位轴系的 $n \times 360^\circ$ 的连续周转。方位固定端轴系下部安装有直驱力矩电机, 路局电机下部安装有光电编码器作为方位轴测角元件用于保证方位轴系的测量精度。电源箱安装于方位自由端轴系下部, 用于电源供应。

2.4.2 电机的选取

高精光电转台方位电机需要克服的力矩主要有惯性力矩、风阻力矩和不平衡力矩等, 方位力矩电机输出力矩应该大于这四种力矩的代数和, 并确保有足够的安全系数^[5]。惯性力矩、摩擦力矩、风阻力矩和不平衡力矩的计算方法同方位部分类似。

经计算, 作用于方位轴系总力矩 $M_{\text{方位}}$ 为:

$$M_{\text{方位}} = \sum_{i=1}^4 M_i = 15.97 [\text{N} \cdot \text{m}] \quad (8)$$

综合计算结果和电气控制要求,选取 J230LWX001 型无刷直流力矩电机型,其主要技术参数为:连续堵转转矩: $\geq 33 \text{ N} \cdot \text{m}$,峰值堵转转矩: $\geq 66 \text{ N} \cdot \text{m}$,电机额定转速 $88 (\text{r}/\text{min}) = 528/\text{s}^2$ 。

3 结构装调与试验验证

在光电系统中,光电转台的系统精度是一项重要性能指标,影响光电转台系统精度的因素主要为光电转台结构的轴系误差,而轴系误差的来源主要为转台轴系的晃动。光电转台在装配的过程中通过反复进行轴系晃动误差检测,来实时优化光电转台结构进行装配过程,该过程称之为光电转台的装调。光电转台装调主要是通过轴系晃动误差数据结合装配工人经验来指导装配工人及时对轴系零件进行修配和轴系装配过程优化来实现的。本高精度光电转台装调过程中的装配工艺均采用热装工艺,反复装调多次后至轴系晃动值达到指标要求。本高精光电转台装调过程流程图如图 4 所示。

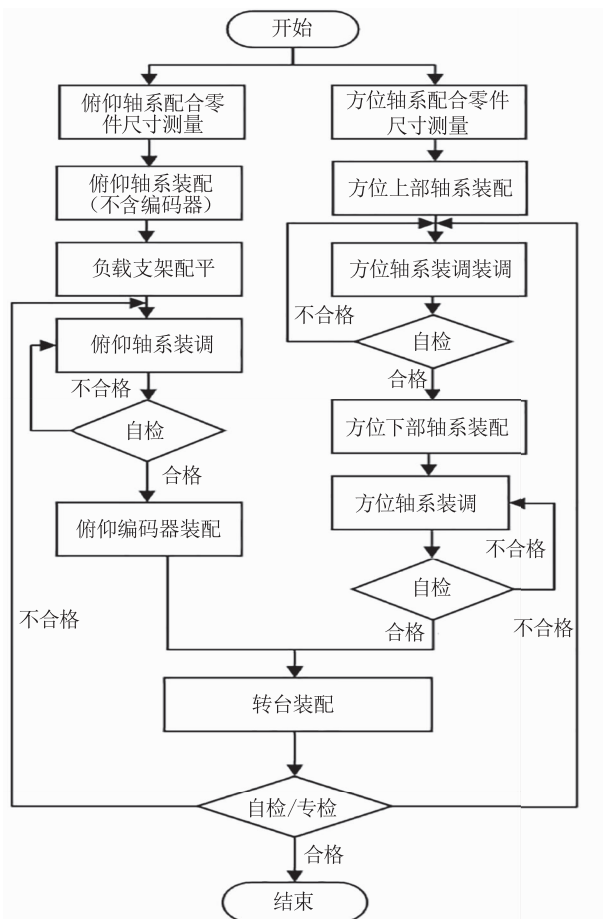


图 4 高精光电转台装调流程图
Fig. 4 The assembling and testing flowchart of precision opto-electronic turntable

3.1 俯仰轴系装调

采用自准直仪检测方法进行光电转台俯仰轴系晃动误差值测量。本高精光电转台俯仰轴系晃动误差值测量采用 0.2"CCD-AI 型双轴自准直仪,检测俯仰轴系晃动误差的实物及过程如图 5 所示。

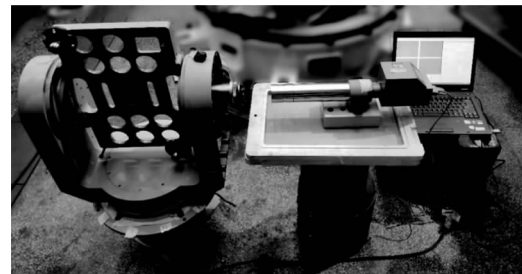


图 5 俯仰轴系检测状态

Fig. 5 Detection status of vertical axis

首先对负载支架进行结构配平,然后将平面反射镜安装在固定端轴系上的编码器处检测前调整自准直仪与平面反射镜的相对位置使得光电自准直仪对平面反射镜中心后,旋转负载支架使得俯仰轴上零部件与 U 型架上零部件产生相对运动。为方便检测,测量前先去除了的机械限位。旋转负载支架时,按照顺时针→顺时针→逆时针→逆时针的原则旋转四周,俯仰轴系周转 $0 \sim 360^\circ$ 在转动方向上分成 12 等分,在旋转过程中每间隔 30° 测量一次,分别记录自准直仪的读数。所有经过整理后得到俯仰轴系晃动误差曲线,如图 6 所示。

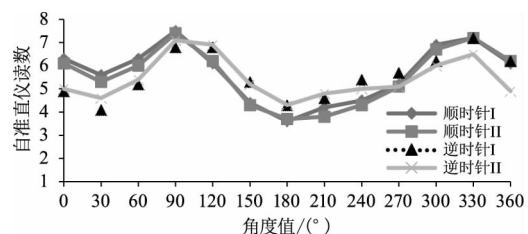


图 6 俯仰轴系晃动误差曲线

Fig. 6 The shafting error curve of vertical axis

俯仰轴系晃动误差为:

$$\Delta_{\text{俯仰}} = \begin{aligned} & \text{Max}[(x_i - x_a) - (A\cos\alpha + B\sin\alpha)] - \\ & \text{Min}[(x_i - x_a) - (A\cos\alpha + B\sin\alpha)] \end{aligned} \quad (9)$$

式中, x_i 为自准直仪各读数值; α 为角度值; $x_a = \frac{1}{12} \sum x_i$; $A = \frac{1}{6} \sum (x_i - x_a) \cdot \cos\alpha$; $B = \frac{1}{6} \sum (x_i - x_a) \cdot \sin\alpha$ 。

通过相关计算得到该高精光电转台俯仰轴系

的晃动误差值 $\Delta_{\text{俯仰}}$ 为 $2.78''$, 小于设计指标要求 $5''$, 证明在装调结束后得到的高精密光电转台俯仰轴系精度满足设计要求。

3.2 方位轴系装调

采用水平仪检测方法进行转台方位轴系晃动误差值测量。本高精精密光电转台方位轴系晃动误差值测量采用 $0.1''$ 数字式电子水平仪。检测方位轴系晃动误差的实物及过程如图 7 所示。

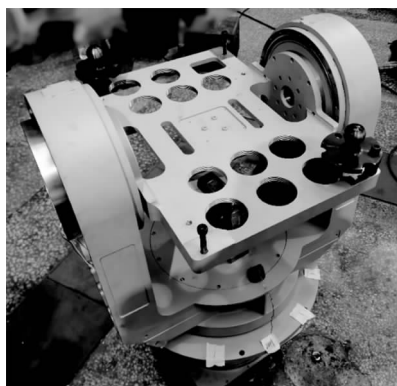


图 7 方位轴系检测状态

Fig. 7 Detection status of horizontal axis

将 $0.1''$ 数字式电子水平仪放置在方位轴系圆盘盖上, 检测前通过底部调平机构将底座调平, 旋转 U 型架使俯仰轴系与方位轴系产生相对转动。旋转 U 型架时, 按照顺时针 \rightarrow 顺时针 \rightarrow 逆时针 \rightarrow 逆时针的原则旋转四周, 方位轴系周转 $0 \sim 360^\circ$ 在转动方向上分成 12 等分, 在旋转过程中每间隔 30° 测量一次, 分别记录电子水平仪的读数。所数经过整理后得到俯仰轴系晃动误差曲线, 如图 8 所示。

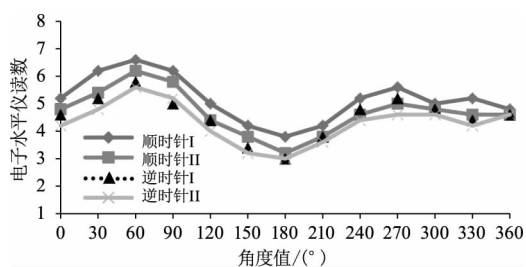


图 8 俯仰轴系晃动误差曲线

Fig. 8 The shafting error curve of horizontal axis

水平轴系晃动误差的计算方法同俯仰轴系。通过相关计算得到方位轴系的晃动误差 $\Delta_{\text{方位}}$ 为 $1.41''$, 小于设计指标要求 $3''$, 证明在装调结束后得到的高精密光电转台方位轴系精度满足设计要求。

4 模态分析

模态分析是动力学分析的基础, 主要研究系

统在无阻尼状态下自身的固有频率与振型等动态特性^[6]。当系统自身结构固有频率与使用环境的激励频率接近或相等时会引发结构共振现象, 从而对系统自身结构造成损坏, 影响系统寿命, 甚至引发安全事故。另外, 结构的模态特性对光电伺服系统的带宽也有重要影响^[7]。因此, 对高精精密光电转台进行模态分析是十分必要的。相对高阶模态特性, 低阶模态频率和振型对系统的影响更明显。

4.1 光电的有限元模型

因光电结构复杂, 在模态分析前需对结构进行结构简化处理。对光电中不属于承载结构的零件和部件进行简化处理, 如: 光电滑环、轴承、编码器、电机等; 去除结构中尺寸或质量较小的非承载结构件, 如: 标牌、航插、线缆等; 去除零件的倒角、圆角、螺钉、垫片等对模态分析影响较小的特征^[8]。

4.2 模态分析

光电的材料不仅要满足结构强度要求, 还应尽可能降低结构的质量与转动惯量, 以提高光电转台的跟踪精度及响应速度。U 型架、基座、负载支架等主要承载零件选用 7075-T6 铝合金; 左右侧盖、圆盘盖、电源箱等非承载零件选用 5083 铝合金; 左右轴、主轴、轴套等零件采用 40Cr 结构合金钢; 轴承采用 GCr15 轴承钢在 ANSYS 软件中, 对简化后模型的各零件根据实际情况赋予材料属性, 如表 1 所示。

表 1 高精精密光电转台零件材料属性

Tab. 1 Material property of precision opto-electronic turntable

| 材料 | 弹性模量 E /GPa | 泊松比 | 密度 ρ /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) |
|-----------|---------------|-----|--|
| Al7075-T6 | 71 | 0.3 | 2.81 |
| Al5083 | 70 | 0.3 | 2.71 |
| 40Cr | 205 | 0.3 | 7.85 |
| GCr15 | 206 | 0.3 | 7.9 |

对各零件赋予材料属性后, 进行高精精密光电转台和光电设备有限元模型网格划分、施加相关约束等步骤, 并进行模态分析, 获取模态分析分析结果。因低阶模态特性对系统影响比高阶大, 因此重点关注其低阶模态, 提取该高精精密光电转台和光电设备前六阶固有频率值^[9], 如表 2 和表 3 所示。

表 2 高精精密光电转台前六阶固有频率
Tab. 2 First six natural frequencies of precision opto-electronic turntable

| 阶次 | 固有频率/Hz |
|----|---------|
| 1 | 104.11 |
| 2 | 134.17 |
| 3 | 217.05 |
| 4 | 266.33 |
| 5 | 293.88 |
| 6 | 334.6 |

表 3 高精精密光电设备前六阶固有频率
Tab. 3 First six natural frequencies of precision opto-electronic device

| 阶次 | 固有频率/Hz |
|----|---------|
| 1 | 77.74 |
| 2 | 91.45 |
| 3 | 186.61 |
| 4 | 210.7 |
| 5 | 217.09 |
| 6 | 241.09 |

提取该高精精密光电转台前六阶固有频率对应的振型图,如图 9 所示。

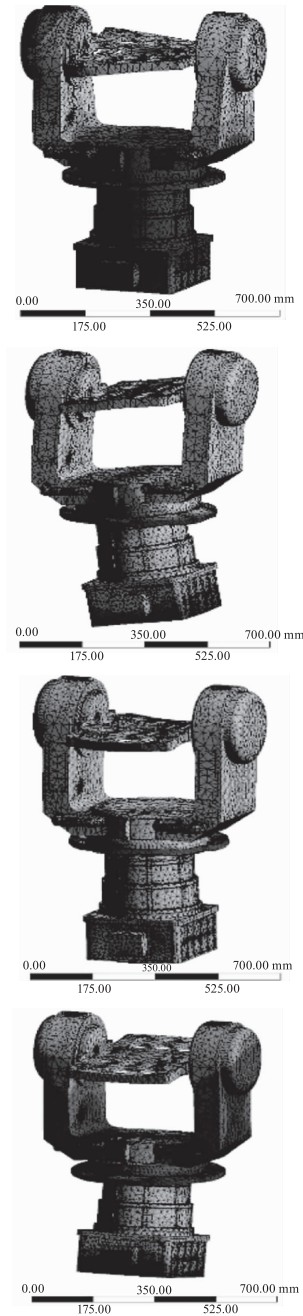
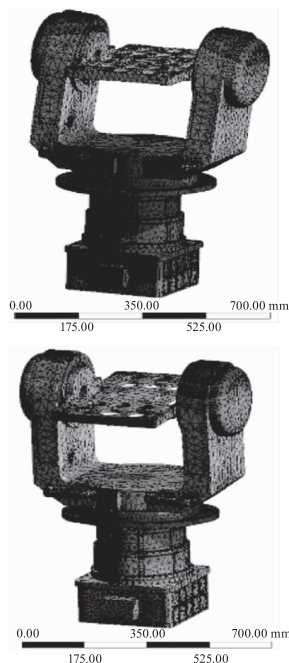


图 9 精密光电转台前六阶振型

Fig. 9 First six mode shapes of precision opto-electronic turntable

提取该高精精密光电设备前六阶固有频率对应的振型图,如图 10 所示。

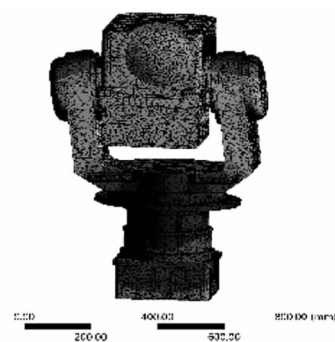


图 10 精密光电设备前六阶振型

Fig. 10 First six mode shapes of precision opto-electronic device



图10 精密光电设备前六阶振型

Fig. 10 First six mode shapes of precision opto-electronic device

由图9和图10可见,高精密光电转台和光电设备的前六阶模态振型形态几乎一致。第一阶振型主要为俯仰轴系沿 Z 方向左右摆动;第二阶振型为整机沿 X 方向前后摆动;第三阶振型主要为俯仰轴系沿 Z 轴扭转;第四阶为整机沿 X 轴扭转;第五阶为整机沿轴系沿 Z 轴扭转;第六阶为整机沿 Z 轴扭转。由第一阶到第六阶模态振型的分析可知,本高精密光电转台和光电设备的振动主要集中在 U 型架附近。本高精密光电转台一阶固有频率为 104.11 Hz ,光电设备一阶固有频率为 77.74 Hz ,高于光电设备谐振频率 50 Hz ,所以该高精密光电转台和光电设备在工作状态下结构本身不会产生共振,结构设计的方案安全可行。

5 结论

本文根据某高精密搜跟一体光电设备的技术指标,确定了二维光电转台的结构形式,完成了高精密光电转台的结构设计,并对高精密光电转台样机进行轴系重点技术指标检测,检测结果俯仰轴晃动误差值为 $2.78''$,方位轴晃动误差之为 $1.41''$,满足技术指标要求。依据高精密光电转台的结构和相关机械性能要求,利用ANSYS软件对光电转台进行模态分析,提取转台前六阶模态,获取相应的固有频率和振型图。分析结果表明,高精密光电转台的固有频率值高于工作频率,不会发生共振现象,该高精密光电转台结构设计方案的合理性得到了可靠的验证。

参考文献:

- [1] Li Jie. Static and dynamic analysis of the precession opto-electronic tracking turntable frame [J]. Opto-Electronic Engineering, 2010, 37(1): 61 - 64. (in Chinese)
李杰. 精密光电跟踪转台框架的静动态特性分析[J]. 光电工程, 2010, 37(1): 61 - 64.
- [2] Gao Guohua, Wang Jin. Structure design and modal analysis of a servo tracking turntable [J]. Journal Article, 2018, 35(1): 151 - 154. (in Chinese)
高国华,汪进. 某伺服跟踪转台结构与模态分析[J]. 机械设计, 2018, 35(1): 151 - 154.
- [3] Sun Lijun. Discussion of structure schemes of fine electro-optical turret [J]. Electro-Optic Technology Application, 2013, 28(1): 54 - 59. (in Chinese)
孙利军. 精密光电转台的结构方案探讨[J]. 光电技术应用, 2013, 28(1): 54 - 59.

- [4] Shi Yaohui, Liu Shunfa, Xiang Chunsheng. Temperature deformation analysis photo-electronic theodolite mechanical structure [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2013, 40(6):31-36. (in Chinese)
石要辉,刘顺发,向春生. 光电经纬仪机架温度变形分析[J]. *光电工程*, 2013, 40(6):31-36.
- [5] Guo Jun, YaoYongqing. Structure design of a photoelectric comprehensive calibration rotating pedestal [J]. *Electro-Mechanical Engineering*, 2013, 29(5):21-24. (in Chinese)
郭军,姚永庆. 某光电综合标校转台结构设计[J]. *电子机械工程*, 2013, 29(5):21-24.
- [6] Meng Peng, GuLibin, ZhaoXuanrong. Structure design of high accuracy and single-axis servo turntable[J]. *Electro-Mechanical Engineering*, 2019, 35(5):4-8. (in Chinese)
孟鹏,顾立彬,赵选荣. 高精单轴伺服转台结构设计[J]. *电子机械工程*, 2019, 35(5):4-8.
- [7] Zou Ji, San Xiaogang, Li Yaobin, et al. Dynamic characteristics study of opto-electronic theodolite turntable [J]. *Laser & Infrared*, 2019, 49(1):93-98. (in Chinese)
邹冀,伞晓刚,李耀彬,等. 光电经纬仪转台动态特性研究[J]. *激光与红外*, 2019, 49(1):93-98.
- [8] Hu Jianfei, Liu Hongxu, Wen Qingrong, et al. High-precision single-axis turntable structure design and simulation analysis [J]. *Laser & Infrared*, 2019, 50(6):718-723. (in Chinese)
胡建飞,刘宏旭,温庆荣,等. 高精度单轴转台结构设计及仿真分析[J]. *激光与红外*, 2020, 50(6):718-723.
- [9] Paiva W P, Sollero P, Albuquerque E L. Modal analysis of anisotropic plates using the boundary element method [J]. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2011, 35(12):1248-1255.