

文章编号 1004-924X(2024)23-3446-11

空间二维转台模型参数响应面选调优化

张昊苏¹, 王振宇^{2*}, 曹 钰^{1,3}, 上官爱红¹, 谢友金^{1,3},

王 熹^{1,4}, 苏盛明^{1,4}, 姜泳帆^{1,4}

(1. 中国科学院 西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119;

2. 中国科学院 微小卫星创新研究院, 上海 201203;

3. 中国科学院 空间精密测量技术重点实验室, 陕西 西安 710119;

4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为提高空间光学系统的侦察和监视效能,降低星上产品质量及功耗,优化星上资源配置,针对空间二维转台进行轻量化设计以提高其负载比。提出了一种适用于空间二维转台的模型参数响应面选调优化方法,通过有限元仿真与力学试验结合的手段提升力学仿真的计算精度。首先,建立结构的有限元力学网格模型,通过显著性分析选取合适的仿真参数作为匹配对象,通过最小二乘法得到二次项响应面系数矩阵,并对响应面的有效性进行评价;最后,通过优化算法得到修正后的模型参数。采用匹配后的有限元模型对二维转台进行力学分析,得到了 100 Hz 内结构的模态频率、特征点低频正弦振动加速度响应、特征点随机振动应力响应等三类结构响应的分析结果,该结果与力学试验的最大误差相比匹配前分别由 8% 降至 3%, 17% 降至 4.9%, 8.5% 降至 2.2%。该方法有效提升了力学仿真的计算精度,并成功应用于某型号的二维转台研制,使其负载比由上一代型号的 0.6 提升到 1.6。

关键词:空间二维转台;力学仿真;计算精度;负载比

中图分类号:TH133;V11;V476 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20243223.3446

Response-surface selection optimization of FEA parameter for two-dimensional space turntable

ZHANG Haosu¹, WANG Zhenyu^{2*}, CAO Yu^{1,3}, SHANGGUAN Aihong¹, XIE Youjin^{1,3},

WANG Xi^{1,4}, SU Shengming^{1,4}, JIANG Yongfan^{1,4}

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences,

Xi'an 710119, China;

2. Innovation Academy for Microsatellites of Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201203, China;

3. Key Laboratory of Space Precision Measurement Technology, Chinese Academy of Sciences,

Xi'an 710119, China;

4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: xiner@opt.ac.cn

Abstract: To enhance the efficiency of reconnaissance and surveillance in space optical systems, reduce

收稿日期:2024-07-25;修订日期:2024-09-05.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 62301558);中国科学院青年创新促进会资助项目(No. 2022405)

the mass and power consumption of onboard payloads, and optimize onboard resource allocation, a light-weight design for a two-dimensional turntable is developed to improve its payload ratio. This paper presents an optimization method for selecting FEA parameter response surfaces tailored to two-dimensional turntables, enhancing mechanical simulation accuracy through the integration of FEA simulations and mechanical tests. First, an FE mechanical mesh model of the structure is established. Significant simulation parameters are identified as matching targets through significance analysis. The quadratic response surface coefficient matrix is then derived using the least square method, and the response surface's effectiveness is evaluated. Finally, the optimized model parameters are determined using an optimization algorithm. Utilizing the matched FE model, mechanical analysis of the two-dimensional turntable is conducted, and results for three structural responses below 100 Hz-modal frequency, low-frequency sinusoidal vibration acceleration response at characteristic nodes, and random vibration stress response at characteristic nodes-are obtained. Compared to dynamic tests, the maximum error in results decreased from 8% to 3%, 17% to 4.9%, and 8.5% to 2.2%, respectively. This approach significantly improves mechanical simulation accuracy, fulfilling engineering application requirements. It has been successfully applied to the development of a two-dimensional turntable, increasing its payload ratio from 0.6 in the previous generation to 1.6.

Key words: two-dimensional space turntable; mechanical simulation; calculation accuracy; payload ratio

1 引 言

为提高空间侦察和监视系统的效能,空间技术发展需要突破传统光学系统的限制^[1]。目前,多数具有通信或观测功能的卫星都安装有运动机构,如二维转台、一维转台等,可以实现对空间定向通信和空间目标的实时观测,从而简化卫星控制系统^[2]。

空间二维转台的负载比指的是转台搭载的有效载荷质量与其本身质量的比值。提高负载比不仅能优化星上载荷的资源配置,提升系统的探测效能^[3],还能降低发射成本,满足多样化的任务需求,拓宽产品的应用场景,顺应航天向商业卫星领域发展的趋势^[4]。提升转台负载比的主要途径是结构的轻量化设计。由于运载平台的多样化,转台在发射时主动段需要承受比以往更严酷的力学环境,对其抗力学性能的要求也更高^[5]。因此,研究人员提出多种空间二维转台结构轻量化方法,如基于目标遗传算法的二维转台轻量化优化方法^[6],用于星载激光通信指向机构的轴承弹簧单元等效建模方法^[7],以及空间二维转台振动试验力限控制技术^[8]等。然而,目前的研究主要集中在对力学分析方法优

化、力学模型局部参数优化以及力学试验条件控制等方面,对力学分析模型关键参数与力学试验结果匹配的研究未见报道。本文提出了一种空间二维转台模型参数匹配的力学优化方法,准确预测转台在严酷力学环境下的动态加速度响应和应力响应,为结构优化设计提供科学依据。

2 空间二维转台的工作原理

星载空间二维转台具有以下核心功能:(1)为载荷提供安装和支撑条件,能够承受预定载荷,并能够适应运载火箭发射过程中的力学环境条件;(2)高精度角度测量、角度定位、惯性空间跟踪及通讯;(3)长期在轨连续工作或断电工作,能够进行轴系和机械安装等误差的地面标定。其设计难点主要包括:高负载比条件下的抗力学性能、空间约束条件下高精密度轴系、传动机构的一体化设计、结构装调工艺以及散热系统的优化设计。

以某型号空间二维转台为例,其主要结构包括方位驱动机构、俯仰驱动机构和锁紧机构等,如图 1 所示。俯仰驱动机构和方位驱动机

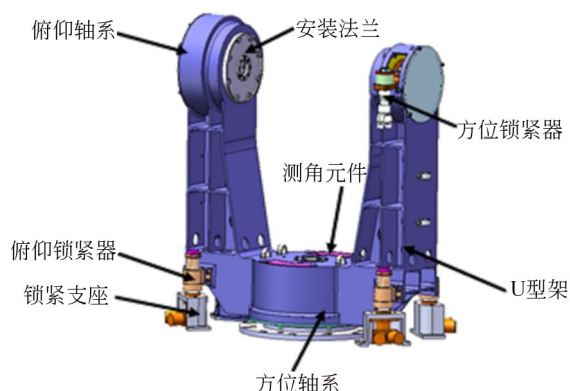


图1 空间二维转台结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of two-dimensional space turn-table

构主要由直流无刷力矩电机、精密轴系、谐波减速器和圆光栅组成。直流无刷电机安装在U型架上,通过谐波驱动减速器输入轴,带动载荷按规定的运动路径实现俯仰和方位的指向和跟踪。

俯仰锁紧的主要作用是限制载荷俯仰旋转的自由度;方位锁紧装置用于限制U型架及载荷方位旋转的自由度,避免在发射过程中相邻设备发生碰撞,并起到一定的辅助支撑作用。二维转台采用U型主体支撑结构,载荷1、载荷2和载荷3安装在载物台上,载物台通过左右法兰与二维转台的左右轴连接,俯仰右轴端设计锁紧接口与U型架连接,U型架设计锁紧接口与机构在卫星的安装面连接,发射阶段通过锁紧螺栓锁紧,约束机构与载荷转动,辅助支撑载荷,减小轴系承载。转台的设计带载能力为30 kg,需要尽可能减低转台本体的质量以提高负载比。

通过模型参数选调方法对二维转台结构形式进行优化。受卫星平台的尺寸限制,二维转台(含载荷)外形包络尺寸约束为510 mm×240 mm×460 mm,最终实际设计尺寸为505 mm×230 mm×449 mm。U型架是整个转台结构的主要零件之一,是其余零件及元、部件的基础安装平台,同时其质量在二维转台系统中占比最大,因此,轻量化工作主要针对U型架开展。在综合考虑加工结构的力学性能、热稳定性能、加工工艺和加工周期,U型架的主体材料采用7075高强度铝合金,通过机械加工保证关键尺寸精度及质

量。根据优化方法得到的有限元模型作为依据,合理布置加强筋的位置及壁厚,厚度基本控制在3.5~8 mm,承力部分(轴承及相关组件)安装位置壁厚为5 mm;螺钉安装孔位设有一定厚度的凸台,保证螺钉的拧合长度及局部强度,螺钉孔均安装钢丝螺套,减小螺钉拆装过程对U型架螺纹孔的损伤。

3 仿真分析

为提高空间二维转台力学仿真模型的计算精度,为正式产品的设计及试验提供依据,在项目研制初期设计制造了结构试验件以获取转台的力学试验数据,采用二次多项式响应面法,对有限元模型参数进行选调优化。

3.1 空间二维转台动力学模型

从转台的卫星安装面开始,二维转台内部传力路径上的部组件主要包括:方位锁紧机构、方位轴系、方位谐波减速器、U型架、俯仰轴系和俯仰谐波减速器,一直传递到与俯仰左右轴系连接的载物台及载物台上安装的3台载荷。从卫星安装面到转台,众多部、组件之间存在一定程度的耦合^[9]。如图2所示,仅在俯仰左轴系的传力路径上就有20余个零件,因此,需要找到有效的方法简化力学仿真模型并准确反映转台的动力学特性。

为了建立有限元力学模型与实际结构之间的联系,对力学试验结果与有限元分析结果进行相关性分析。二维转台的力学安装方式及试验

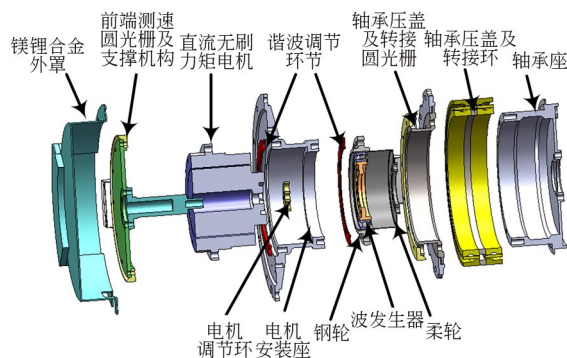


图2 俯仰轴系主要部组件爆炸图

Fig. 2 Explosive view of components of pitching shaft system

测点布置如图 3 所示,有限元分析与力学试验测点位置及对应情况如图 4 所示。其中, $A_1 \sim A_4$ 代表加速度传感器测点, $S_1 \sim S_4$ 代表应变传感器测点。空间二维转台结构主要关注在 100 Hz 以内的固有频率、低频简谐激励下的加速度响应,以及宽频带随机激励条件下的应力响应。考虑到优化算法及仿真计算的规模,采用结构模态的前三阶频率值 f_1, f_2, f_3 ,简谐激励下加速度响应的两个特征点 f_4, f_5 (对应 A_1, A_2),随机激励条件下结构的应力响应的两个特征点 f_6, f_7 (对应 S_1, S_{17})作为判断模型与试验相关性的主要指标。

试验与仿真的相关性系数可以表示为:

$$r_i = \left| \frac{\tilde{f}_i - f_i}{f_i} \right| \times 100\%, \quad (1)$$

式中: r_i 表示有限元仿真与力学试验测量结果相对误差的百分数, $\tilde{f}_i$ 表示有限元计算结果, f_i 代表力学试验的测量结果。相关性系数 $r_i \geq 20\%$ 时,力学模型与实际结构的相关性较弱; $r_i < 20\%$ 时,则认为二者相关性较强。

模型参数选调响应面法的流程如图 5 所示。首先,需要根据力学仿真及试验的先验知

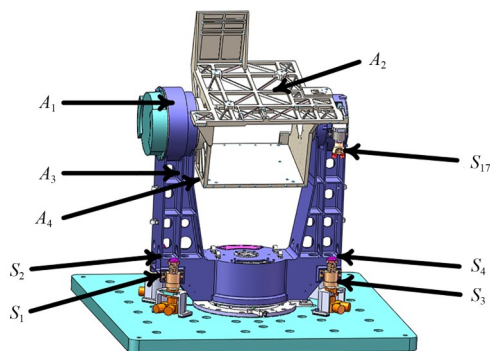


图 3 力学试验部分加速度测点及应变测点分布

Fig. 3 Distribution of acceleration measuring nodes and strain measuring nodes in mechanical test

识,确定有限元模型中待确认的参数 x_i 。针对待确认参数设计分析试验,通过有限元计算得到关注的响应 f_i ;接着,对待确认参数 x_i 进行归一化处理,并结合响应 f_i 通过最小二乘法得到响应面的二次项拟合系数,并对响应面的有效性做出判断;最后,通过响应面计算值与实际试验结果之间的偏差值构造目标函数,通过优化算法得到修正后的模型参数 x_i ,作为优化设计的依据。

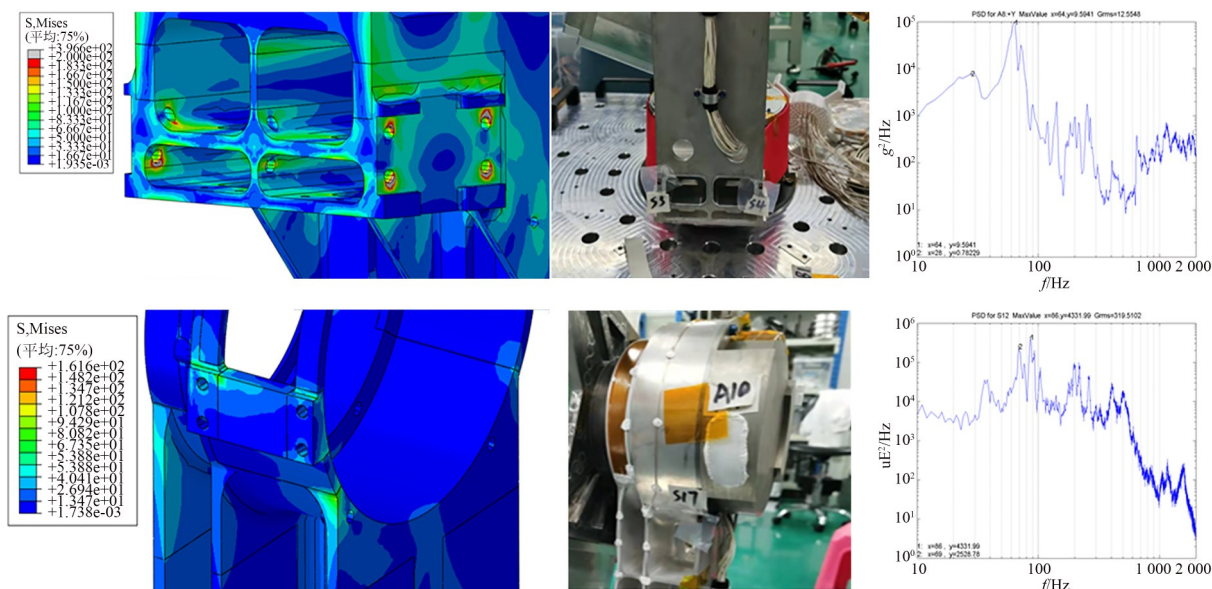


图 4 力学分析云图及对应的二维转台力学试验部分加速度、应力测点位置及实测频率响应曲线

Fig. 4 Cloud diagram of mechanical analysis and corresponding acceleration, stress measuring nodes position and measured frequency response curves of mechanical test of two-dimensional turntable

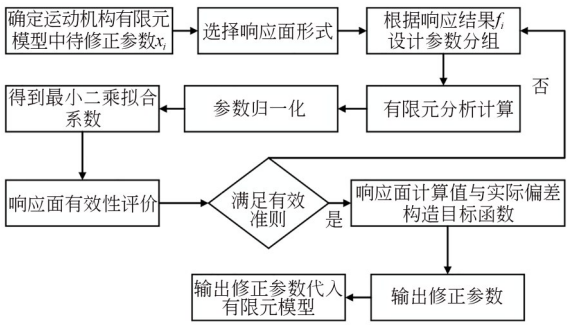


图5 二维转台模型参数选调响应面法修正流程

Fig. 5 Correction process of response surface method for parameter selection and adjustment of kinematic mechanism

3.2 修正模型参数选择

3.2.1 有限元网格划分及模型参数选择

二维转台主要结构件的网格模型是后续优化处理的基础。采用分区域网格划分策略,同时保证网格质量及结构应力响应计算精度,主要零部件的网格模型如图6所示,模型的网格数约100万个。

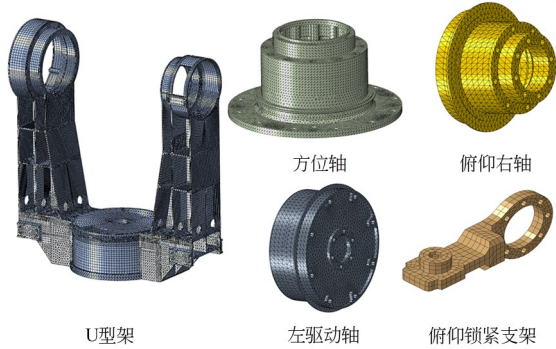


图6 二维转台主要零件的网格模型

Fig. 6 Grid model of main parts of two-dimensional turntable

转台内部的运动部件,如轴承滚子与滚道、谐波减速器柔轮与钢轮、钢轮与波发生器、锁紧机构与U型架之间大部分是非线性接触,难以通过模型精确描述^[10]。根据工程经验,解锁器-U型架联接约束形式 k_1 、俯仰谐波联接约束形式 k_2 、深沟球轴承连接刚度 k_3 、俯仰角接触球轴承连接刚度 k_4 、直接阻尼 c_1 、结构阻尼 c_2 等6个模型参数在初次建模中无法直接给出,需要结合分析及试验结果进行修正。

3.2.2 初始模型参数显著性分析

以前述6个参数作为变量, x_i 作为有限元分析的输入变量,如表1所示。再根据计算结果的方差来判断变量 x_i 对分析结果影响的显著性。其中, x_1 和 x_2 表示的是约束边界条件的加载方式,未在表中列出; k_3, k_4 表示弹簧单元的初始值; x_5 和 x_6 为阻尼比。前10次固有频率的有限元分析结果如表2所示。

表1 初始分析模型的调整参数

Tab. 1 Adjustment parameters of initial analysis model

分析次数	因素 x_3	因素 x_4	因素 x_5	因素 x_6
1	k_3	k_4	0.02	0.034
2	k_3	k_4	0.04	0.068
3	$1/10 k_3$	$1/10 k_4$	0.04	0.068
4	$10 k_3$	$10 k_4$	0.04	0.068
5	$100 k_3$	$100 k_4$	0.04	0.068
6	$100 k_3$	$100 k_4$	0.04	0.068
7	k_3	k_4	0.04	0.068
8	k_3	k_4	0.04	0.068
9	k_3	k_4	0.04	0.068
10	∞	∞	0.04	0.068

表2 初始分析模态频率响应结果

Tab. 2 Modal frequency response results of initial analysis (Hz)

分析序数	一阶	二阶	三阶	四阶	五阶	六阶
1	38.4	56.5	60.1	74.3	81.8	96.9
2	38.4	56.5	60.2	74.3	81.8	96.9
3	33.7	54.4	58.2	68.8	78.8	95.3
4	39.5	57.3	60.6	75.2	82.9	97.4
5	39.6	57.4	60.7	75.3	83.1	97.5
6	38.6	56.6	60.3	74.4	81.8	97.0
7	38.1	50.4	56.0	70.3	80.3	94.1
8	36.7	56.3	59.9	74.2	79.1	92.7
9	36.5	50.0	55.5	69.7	75.9	89.9
10	30.1	48.7	54.2	60.6	75.7	90.8

对试验结果进行显著性分析不仅可以筛选对结果影响度较小的参数,还可以检验力学试验的正确性。对于因素 x_i 的 k 水平试验, x_i 的 F 值为:

$$F_{x_i} = \frac{\sigma_{x_i}/f_{x_i}}{\sigma_e/f_e}, \quad (2)$$

式中: σ_{x_i} 为因素 x_i 的平方和, σ_e 为偏差 e 的偏差平

方和, f_{x_i} 和 f_e 为因素 x_i 和偏差 e 的自由度。

得到因素 x_i 的 F 值后, 查询 F 检验临界表, 在给定的显著性水平 α 下 (本文取 $\alpha = 0.05$), 若 $F_A > F_{1-\alpha}$, 认为参数 A 对计算结果的影响显著, 否则为不显著。对表 2 中的数据进行显著性分析, 可得表 3。

表 3 模态频率的显著性分析

Tab. 3 Significance analysis of modal frequency

参数	模态一阶 m_1	模态二阶 m_2	模态三阶 m_3	模态四阶 m_4	模态五阶 m_5	模态六阶 m_6
x_1	○	○	○	×	×	×
x_2	○	○	○	×	×	×
x_3	○	○	○	○	○	○
x_4	○	○	○	○	○	○
x_5	×	×	×	×	×	×
x_6	×	×	×	×	×	×

注: ○表示参数影响显著, ×表示影响不显著。

由表 3 可以看出: 改变约束 x_1, x_2 , 对三阶以内模态频率影响较大, 三阶以上模态频率影响较小; 轴承采用弹簧模拟时, 轴承弹簧刚度对模型特征频率影响较大, 能够同步改变模型特征频率; 直接模态阻尼及结构阻尼对模型特征频率的影响较小。

采用同样的方法, 对特征点 $A_1 \sim A_3$ 的正弦振动加速度响应、 $S_1 \sim S_4$ 以及 S_{17} 的随机振动应力响应进行显著性分析, 可得表 4。

表 4 特征点正弦振动加速度响应、随机振动应力响应的显著性分析

Tab. 4 Significance analysis of sinusoidal vibration acceleration response and random vibration stress response at characteristic points

参数	A_1	A_2	A_3	S_1	S_2	S_3	S_4	S_{17}
x_1	○	○	○	○	○	○	○	○
x_2	○	○	○	○	○	○	○	○
x_3	○	○	○	○	×	○	×	○
x_4	○	○	○	○	×	○	×	○
x_5	×	×	×	×	×	×	×	×
x_6	○	○	○	○	○	○	○	○

由表 4 可以看出, 约束方式、轴承弹簧刚度及结构阻尼, 对给定关键点正弦响应加速度响应的影响较大。从 x_3, x_4 行对随机振动应力响应的显著性可以看出, 轴承采用弹簧单元建模时, 轴承弹簧刚度对 S_1, S_3 点 (分别为 U 型架左、右侧前方

位置) 的应力响应影响显著, 对 S_2, S_4 (分别为 U 型架左、右侧后方位置) 点的应力响应影响不显著。经过分析, 这是由于在仿真过程中采用弹簧代替轴承刚度时, U 型架产生的扭转导致同侧前后位置响应点的应力差异较大。这与试验情况有较大出入, 需要对轴承仿真方法进行改进和修正。

3.2.3 修正后的模型参数显著性分析

对轴承仿真方法进行修正。首先, 轴承仍采用弹簧单元模拟, 在设置轴承径向、轴向刚度的基础上, 增加扭转刚度 T_i 的设置。然而, 通过计算发现, 改变 T_i 的取值对 $S_1 \sim S_4$ 点的应力响应影响很小, 不能解决 U 型架的扭转问题。采用实体单元模拟轴承连接刚度, 通过更改单元弹性模量的方式进行仿真, 结果如表 5 所示。由 13~20 对

表 5 模型调整参数变化

Tab. 5 Parameters after model parameter adjustment				
分析 序数	因素 3 x_3	因素 4 x_4	因素 5 x_5	因素 6 x_6
13	E_3	E_4	0.04	0.068
14	$1/10E_3$	$1/10E_4$	0.04	0.068
15	$1/100E_3$	$1/100E_4$	0.04	0.068
16	$1/200E_3$	$1/200E_4$	0.04	0.068
17	$1/500E_3$	$1/500E_4$	0.04	0.068
18	$1/500E_3$	$1/500E_4$	0.08	0.136
19	$1/1000E_3$	$1/1000E_4$	0.04	0.068
20	$1/1000E_3$	$1/1000E_4$	0.08	0.136

随机振动应力进行显著性分析,如表6所示。

从表6可以看出,采用实体单元对轴承建模,可以解决U型架扭转带来的应力响应前后侧不一致的问题,同时,对模态频率、加速度响应、应力响应的显著性也很明显,可以采用此种方式进行建模。

表6 特征点正弦响应加速度响应及随机振动应力响应显著性分析

Tab.6 Significance analysis of sinusoidal response, acceleration response and random vibration stress response of characteristic points

参数	$M_1 \sim M_6$	A_1	A_2	A_3	S_1	S_2	S_3	S_4	S_{17}
x_1	○	○	○	○	○	○	○	○	○
x_2	○	○	○	○	○	○	○	○	○
x_3	○	○	○	○	○	○	○	○	○
x_4	○	○	○	○	○	○	○	○	○
x_5	×	×	×	×	×	×	×	×	×
x_6	○	○	○	○	○	○	○	○	○

由于因素 x_1, x_2 的约束形式根据试验结果很好确认,因素 x_5 对响应结果的影响不显著。因此,选取因素 x_3, x_4, x_6 作为模型的主要参数进行修正。

3.3 二次项响应面法

在确认转台有限元模型及待修正的模型参数后,采用响应面函数形式进行修正。为保证有限元模型的计算精度及效率,响应面函数应能够高精度模拟实际结构的函数关系,其形式应尽可能简单以提高计算效率。二次多项式响应面具有此特点,且对线性关系的拟合精度较高,是目前广泛应用的一种函数形式,其表达式为:

$$\hat{y}(x) = a + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n c_i x_i^2 + \epsilon, \quad (3)$$

其中: $A=[a, b_i, c_i]$ 为待定系数, $x_i(i=1, 2, \dots,$

$n)$ 为有限元模型待匹配参数, n 为模型待匹配参数的个数, $\hat{y}(x)$ 为二次多项式响应面模型的响应值, ϵ 为计算值与真实值之间的误差。

将式(3)以矩阵形式表示为:

$$\hat{X}A + \xi = \hat{Y}(x), \quad (4)$$

其中: $\hat{X}=[I, X, X^2], A=[a, b, c]^T, \hat{Y}(x)=[\hat{y}^{(1)}(x), \hat{y}^{(2)}(x), \dots, \hat{y}^{(k)}(x)]^T, \xi=[\epsilon^{(1)}, \epsilon^{(2)}, \dots, \epsilon^{(k)}]^T, X=[x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n]^T, x_i=[x_i^{(1)}, x_i^{(2)}, \dots, x_i^{(k)}]^T, b_i=[b_i^{(1)}, b_i^{(2)}, \dots, b_i^{(k)}]^T, c_i=[c_i^{(1)}, c_i^{(2)}, \dots, c_i^{(k)}]^T, k$ 为试验次数。

根据前文所述响应面分析的结果,响应值分别取模型的一到六阶基频 $M_1, M_2, M_3, M_4, M_5, M_6$ 、加速度响应点 A_2, A_3 、应力响应点 S_3, S_{17} ,待修正参数取 x_3, x_4, x_6 。由此可知,响应值矩阵为: $\hat{Y}=[M_1, M_2, M_3, A_2, A_3, S_3, S_{17}]$,待修正参数的输入矩阵为: $\hat{X}=[x_3, x_4, x_6]$ 。

通过式(5)对待修正参数进行归一化处理,得到:

$$\tilde{x}_i = \frac{x_i - x_{i\min}}{x_{i\max} - x_{i\min}}. \quad (5)$$

归一化后待修正参数的输入矩阵为:

$$\hat{X} = \begin{bmatrix} 1 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.25 & 0.25 & 0.25 \\ 1 & 0.5 & 0 & 0 & 0.25 & 0 & 0 \\ 1 & 0.5 & 1 & 1 & 0.25 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0.5 & 0 & 0 & 0.25 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0.5 & 0 & 1 & 0.25 \\ 1 & 1 & 0.5 & 1 & 1 & 0.25 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0.5 & 1 & 0 & 0.25 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

根据转台仿真计算结果,模态频率及响应点组成的矩阵为:

$$\begin{bmatrix} 36.7 & 56.3 & 60 & 74.3 & 81.8 & 96.9 & 130 & 125 & 35 & 19 \\ 36.5 & 52 & 55.5 & 74.3 & 81.8 & 96.9 & 120 & 128 & 36 & 18 \\ 30.1 & 48.2 & 54.2 & 68.8 & 78.8 & 95.3 & 119 & 120 & 28 & 26 \\ 33.8 & 56.2 & 63.6 & 75.2 & 82.9 & 97.4 & 135 & 118 & 25 & 28 \\ 33.8 & 56.1 & 63.3 & 75.3 & 83.1 & 97.5 & 138 & 128 & 27 & 30 \\ 32.4 & 53.9 & 59.3 & 74.4 & 81.8 & 97 & 120 & 119 & 38 & 17 \\ 32.4 & 53.9 & 59.3 & 70.3 & 80.3 & 94.1 & 143 & 130 & 40 & 24 \\ 38.4 & 56.5 & 60.2 & 74.2 & 79.1 & 92.7 & 140 & 135 & 36 & 22 \\ 38.6 & 54.3 & 57.1 & 69.7 & 75.9 & 89.9 & 132 & 113 & 34 & 18 \end{bmatrix}.$$

当试验次数 $k > 2n + 1$ 时, $\mathbf{X}^T \mathbf{X}$ 非奇异,由最小二乘法得:

$$\xi(A)^2 = (\hat{Y}(x) - \hat{X}A)^T (\hat{Y}(x) - \hat{X}A)$$
$$\frac{\partial \xi(A)^2}{\partial A} = 2(\hat{Y}(x) - \hat{X}A)^T \hat{X} = 0$$
$$A = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Y}.$$

(6)

由式(6)计算出六阶模态频率、应力响应点

S_3, S_{17} 以及加速度响应点 A_2, A_3 的响应面系数矩阵,如表 7 所示。

响应面可以表示为:

$$\hat{Y} = \hat{X}A,$$

(7)

其中: $\hat{Y} = [M_1, M_2, M_3, A_2, A_3, S_1, S_2], \hat{X} = [I, \mathbf{X}, \mathbf{X}^2]_{1 \times 7}.$

表 7 二次多项式响应面系数矩阵

Tab. 7 Coefficient matrix of quadratic polynomial response surface

项目	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>b</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>c</i>	<i>c</i>
<i>M</i> ₁	36.4	1.3	−5.2	2.3	1.9	2.7	−6.5
<i>M</i> ₂	56.1	−12.4	5.1	7	11.9	−7.9	−8.5
<i>M</i> ₃	62.1	−18.8	7.9	4.2	15.6	−10.8	−4
<i>M</i> ₄	76.7	−6.4	−1.7	6.5	2.9	−1.9	−8.1
<i>M</i> ₅	82.9	−3	3.8	2.3	−1.1	−6.3	−1.7
<i>M</i> ₆	97.1	1.3	3.4	2.3	−6.4	−5	−1.4
<i>S</i> ₃	131.1	−39.3	22.3	−0.3	46.7	−31.3	4.7
<i>S</i> ₁₇	123.7	6.3	−11	20.3	−2	−2	−14
<i>A</i> ₂	28.2	5.3	1	18.7	1.3	−0.7	−18.7
<i>A</i> ₃	24.8	−12.3	4.3	−13.3	8.7	−7.3	18.7

3.4 响应面有效性评价

采用相对均方根误差法判断响应面模型与有限元仿真值的拟合程度及有效性。响应面中各参数的均方根误差如下:

$$RMS_{error} = \frac{1}{k\bar{y}} \sqrt{\sum_{i=1}^k (y_i - \hat{y}_i)^2},$$

(8)

式中: k 为试验次数, $\bar{y}$ 为 k 次仿真响应的平均值, y_i 为第 i 组参数的仿真结果, $\hat{y}_i$ 为第 i 组参数的二次项响应面计算结果。

二次项响应面的计算误差在 10^{-3} 数量级,有限元模型与响应面模型与差异很小,可代替有限元模型进行后续的修正计算。

3.5 修正参数优化求解

以三阶模态频率、两个关键点应力响应、加速度响应为目标函数,根据二次多项式响应面系

表 8 结构响应值的均方根误差

Tab. 8 RMS error of structural response value

项目	均方根误差/%
<i>M</i> ₁	0.14
<i>M</i> ₄	0.32
<i>M</i> ₂	0.80
<i>M</i> ₅	0.28
<i>M</i> ₃	0.60
<i>M</i> ₆	0.56
<i>S</i> ₃	0.7
<i>S</i> ₁₇	0.5
<i>A</i> ₁	0.4
<i>A</i> ₂	0.4

数矩阵,采用退火模拟算法,得到的参数修正值如表 9 所示。

表 9 优化后模型参数修正值

Tab. 9 Modified values of model parameters after optimization

深沟球轴承连接刚度 <i>k</i> ₃ (等效弹性模量/MPa)	俯仰角接触球轴承连接刚度 <i>k</i> ₄ (等效弹性模量/MPa)	结构阻尼 <i>c</i> ₂
59.32	73.2	0.053

3.6 结果分析

采用参数响应面选调方法后,部分响应点计算与试验响应曲线如图 7 所示。二维转台的主要抗力学性能参数包括前三阶模态、关键点的加速度以及应力响应,与试验结果的误差均

优于 5%,如表 10 所示。其中,模态频率误差由最大 8% 降低至 3%,应力响应误差由最大 17% 降低至 4.9%,加速度响应误差由最大 8.5% 降低至 2.2%,修正效果较好且能满足工程应用要求。

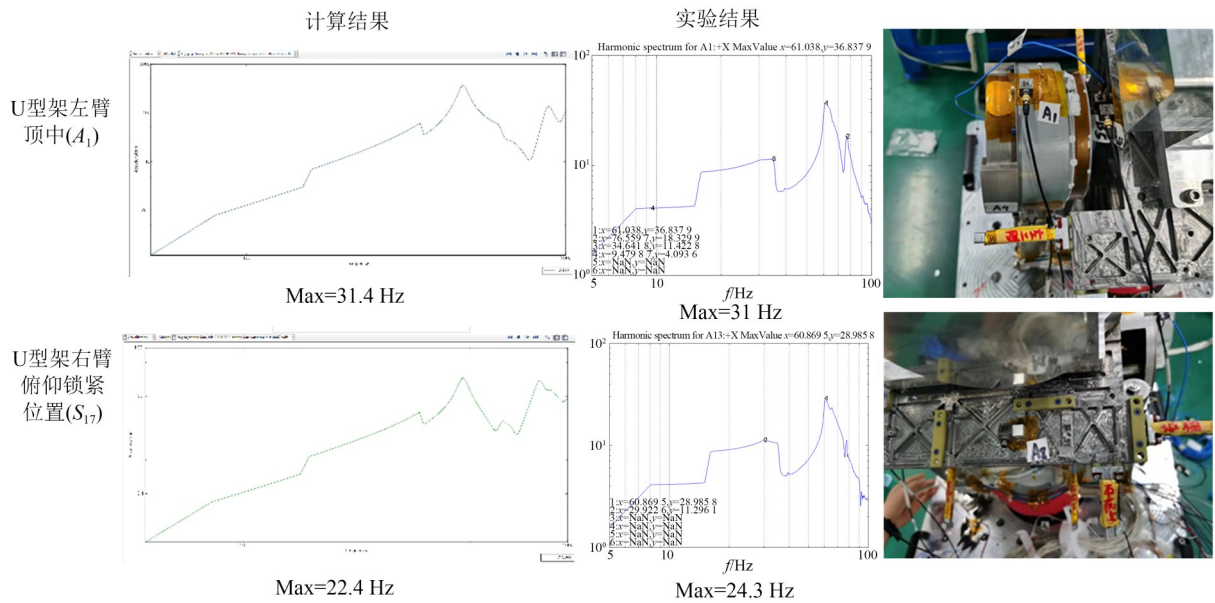


图 7 部分测点计算结果与力学试验结果对比

Fig. 7 Comparison between calculation results of some measuring nodes and mechanical test results

表 10 响应面法修正前后响应结果对比

Tab. 10 Comparison of response results before and after correction of response surface method

项目	力学实验结果	修正前	修正后	修正前误差/%	修正后误差/%
M_1	33.9	31.2	32.8	8.0	3.0
M_2	55.2	51.8	54.3	6.0	1.6
M_3	59.9	55.3	58.6	7.7	2.2
S_3	141.2	127.1	135.6	10	4.0
S_{17}	132.4	110.2	125.8	17	4.9
A_1	31.4	28.9	31.0	8.0	1.3
A_2	22.4	24.3	22.9	8.5	2.2

将此方法应用于研发多个结构形式类似的转台,修正后的仿真结果与力学试验结果误差均控制在 5% 以内,证明了该方法的通用性及有效性。

4 空间二维转台结构优化

根据响应面法确定了力学仿真参数后,由于

力学分析结果与试验结果的符合程度较高(误差低于 5%),故以力学仿真结果为依据,对二维转台结构进行优化。

这里主要介绍 U 型架的结构优化工作。对 U 型架左侧区域进行划分,如图 8 所示,右侧区域与左侧区域对称共 18 处。表 11 为 U 型架不同区

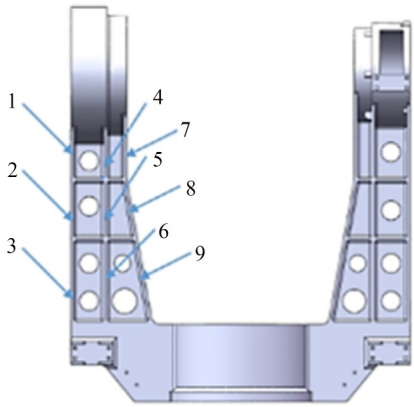


图 8 U 型架区域划分示意图

Fig. 8 Schematic diagram of U-frame area division

表 11 优化前后 U 型架不同区域的厚度变化
Tab. 11 Thickness changes in different areas of U-frame

区域代号	优化后厚度/mm	优化前厚度/mm
1,2	3.5	4
3	3.5	5
4,5	3	3.5
6	3	4
7,8	3.5	4
9	3.5	5

域厚度优化前后对比。U 型架优化前质量为 10.3 kg,优化后为 5.3 kg;转台整机优化前质量为 45 kg,优化后为 20 kg,减重比达到 55%,负载比达到 1.6。转台顺利通过了单机及整星鉴定级力学试验,且力学试验前后系统的精度、电性能无明显变化,结构抗力学性能良好。

参考文献:

[1] 刘铁军. 高精度空间二维转台轻量化结构设计与分析[D]. 长春: 长春工业大学, 2013.
LIU T J. *Design and Analysis of Lightweight Structure of High-precision Two-dimensional Space Turntable* [D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2013. (in Chinese)

[2] 赵健, 杨芳. 中国高分辨率敏捷小卫星的技术创新及应用实践[J]. 航天器工程, 2021, 30(6): 23-30.
ZHAO J, YANG F. Technical innovation and application of Chinese agile small satellites[J]. *Spacecraft Engineering*, 2021, 30(6): 23-30. (in Chinese)

[3] 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.
CHEN ZH, HU Q L, LI ZH H. Structural optimization of 2-D tracking turntable with carbon fiber framework for spatial target detection[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29(3): 547-557. (in Chinese)

[4] 杨成武, 谌明, 刘向南, 等. 小卫星激光通信终端技术现状与发展趋势[J]. 遥测遥控, 2021, 42(3): 1-7.
YANG CH W, CHEN M, LIU X N, *et al.* Current status and development trends of minisatellite laser communication terminal technology[J]. *Journal*

4 结 论

本文针对严酷力学条件下空间二维转台的轻量化要求,提出了一种模型参数匹配力学优化方法。通过二次项响应面法并结合力学试验结果,对二维转台有限元模型的主要参数进行匹配。采用匹配后的有限元模型对二维转台进行力学分析,得到的 100 Hz 以内模态频率、低频正弦振动加速度响应、随机振动应力响应结果与力学试验的最大误差相比匹配前分别由 8% 降低至 3%, 17% 降低至 4.9%, 8.5% 降低至 2.2%。最后,采用参数匹配后的有限元模型作为某型号二维转台结构优化设计的依据。优化前后转台的质量分别为 45, 20 kg, 减重比达到 55%, 负载比达到 1.6。该方法有效提升了力学分析的计算精度,已成功应用于某型号二维转台的研制。该转台顺利通过了单机及整星鉴定级力学试验,力学试验前后系统的精度、电性能无明显变化,结构抗力学性能良好。

of Telemetry, Tracking and Command, 2021, 42(3): 1-7. (in Chinese)

[5] 宗旭. 某型卫星结构分析与减振优化[D]. 长沙: 国防科技大学, 2017.
ZONG X. *Structural Analysis and Vibration Reduction Optimization of a Certain Satellite* [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017. (in Chinese)

[6] 李旭鹏, 张文会, 黄龙, 等. 空间激光终端二维转台 U 型架结构优化设计[J]. 电子机械工程, 2024, 40(3): 17-21.
LI X P, ZHANG W H, HUANG L, *et al.* Optimization design of U-shaped frame structure for a 2D gimbaled space laser communication terminal [J]. *Electro-Mechanical Engineering*, 2024, 40(3): 17-21. (in Chinese)

[7] 秦涛, 郭骏立, 张美丽, 等. 星载二维转台结构设计及刚度分析[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(5): 300-308.
QIN T, GUO J L, ZHANG M L, *et al.* Structure design and stiffness analysis of spaceborne two-dimensional turntable [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(5): 300-308. (in Chinese)

[8] 彭加力. 空间二维转台振动试验力限控制技术研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所,

- 2023.
- PENG J L. *Research on Force Limited and Control Technology of Space Two-dimensional Turntable Vibration Test* [D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2023. (in Chinese)
- [9] 陈英华, 陈静. 全机有限元模型修正及验证方法研究[J]. 航空工程进展, 2017, 8(2): 149-153.
- CHEN Y H, CHEN J. The research of whole aircraft FEM modal updating and verification method [J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2017, 8(2): 149-153. (in Chinese)
- [10] 谢雪峰. 航天器连接结构非线性力学行为研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- XIE X F. *Study on Nonlinear Mechanical Behavior of Spacecraft Connecting Structure* [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017. (in Chinese)

作者简介:



张昊苏(1985—),男,陕西西安人,博士,高级工程师,2020年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事空间光学结构设计力学仿真、高精度空间运动机构结构设计及力学仿真等方面的研究。E-mail:zhanghaosu@opt.ac.cn

通讯作者:



王振宇(1983—),男,安徽宿州人,硕士,高级工程师,2009年于西北工业大学获得硕士学位,主要从事空间结构与机构总体技术、空间结构轻量化技术的研究。E-mail:wangzy@micro-sate.com