

武器装备

典型仪器支架动力学管控方法研究

李雨青, 邵旭东, 李炳蔚

(中国运载火箭技术研究院, 北京 100076)

摘要: 航天工程中普遍采用支架进行设备的安装, 但是支架对振动环境的严重放大会影响设备的工作可靠性, 给飞行器飞行带来极大隐患, 需要开展典型支架的动力学管控方法研究。提出面向支架动特性管控的动力学特性指标, 可以全面表征仪器支架在随机振动激励下的动力学特性, 并可据此构造优化目标, 以对支架动力学特性进行有效管控。提出典型仪器支架的动力学管控方法, 实现了将支架动特性设计融入支架结构设计流程中。针对一种典型的仪器支架开展了随机振动试验与有限元仿真分析, 验证了随机振动响应预示方法的准确性, 并以此为基础, 对其进行了动力学管控。以某型支架为对象开展的动力学管控, 将支架上相对安装基础的振动量级放大倍数从 4.2 降低到 1.67。结果表明, 提出的典型仪器支架动力学管控方法可在研制初期改善仪器支架的动力学特性, 对提高飞行器可靠性和环境适应性具有重要意义。

关键词: 仪器支架; 随机振动; 动力学特性; 管控方法; 有限元法; 航天工程

中图分类号: TJ760.3; V19 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9242(2022)06-0044-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.06.000

Dynamic Control Method of Typical Equipment Supporter

LI Yu-qing, SHAO Xu-dong, LI Bing-wei

(China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

ABSTRACT: In aerospace engineering, equipment supporters are generally used to install equipment. However, the serious amplification of the vibration environment by the supporter will affect the reliability of the equipment, and may bring great hidden dangers to the flight of the aircraft. Therefore, it is necessary to research the dynamic control method of the typical equipment supporter. The dynamic characteristic indexes for supporter dynamic characteristic control is proposed, which can comprehensively characterize the dynamic characteristics of equipment supporter under random vibration excitation, and an optimization target can be constructed to effectively control the dynamic characteristics of support based on the proposed indexes. The dynamic control method of a typical equipment supporter is proposed, and the dynamic characteristic design of supporter is integrated into the structure design process. The random vibration tests and finite element simulations are carried out for a typical

收稿日期: 2021-12-13; 修订日期: 2022-03-08

Received: 2020-12-13; Revised: 2022-03-08

基金项目: 国家自然科学基金(11972377, 11902364)

Fund: The National Natural Science Foundation of China (11972377, 11902364)

作者简介: 李雨青(1996—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为飞行器结构动力学和载荷环境设计。

Biography: LI Yu-qing (1996-), Female, Master, Engineer, Research focus: structural dynamics, load and environment design of spacecraft.

通讯作者: 李炳蔚(1984—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为飞行器结构动力学和通用质量特性总体设计。

Corresponding author: LI Bing-wei (1984-), Male, Doctor, Researcher, Research focus: structural dynamics, general quality characteristics design of spacecraft.

引文格式: 李雨青, 邵旭东, 李炳蔚. 典型仪器支架动力学管控方法研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(6): 044-051.

LI Yu-qing, SHAO Xu-dong, LI Bing-wei. Dynamic Control Method of Typical Equipment Supporter[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(6): 044-051.

equipment supporter. The accuracy of the random vibration response prediction method is then verified, and the dynamic control is carried out on this basis. The dynamic control of the equipment supporter as an objective was dynamics controlled, and the vibration magnitude magnification of the supporter relative to the installation base was reduced from 4.2 to 1.67. The results show that the dynamic control method of the typical equipment supporter proposed can improve the dynamic characteristics of the equipment supporter in the early stage of development, which is of great significance to improve the reliability and environmental adaptability of the aircraft.

KEY WORDS: equipment supporter; random vibration; dynamic characteristics; control method; finite element method; aerospace engineering

随着高速飞行器技术的发展, 飞行器在极高飞行速度和大动压条件下, 往往会造成较高量级的飞行气动噪声和形成飞行振动环境, 这带来了严重的力学环境问题。高量级的振动环境会引起设备失效和结构破坏, 成为飞行器设计必须考虑的重要因素之一。为了避免飞行器的关键设备、结构在飞行条件下失效, 一方面, 在单机设计中需要提高设备的环境适应性; 另一方面, 需要进行舱段-支架-设备系统的动力学一体化设计, 通过科学的管控手段, 实现力学环境传递可控, 从而确保飞行器的飞行可靠性和环境适应性。

由于飞行器局部曲率的原因, 仪器、电缆等设备通常通过金属支架固定在舱壁上, 仪器支架是设备直接感受到机械振动、冲击的最后关键环节。在工程上最常见的 3 种支架几何模型分别为簸箕形、几字形、盒形, 如图 1 所示。

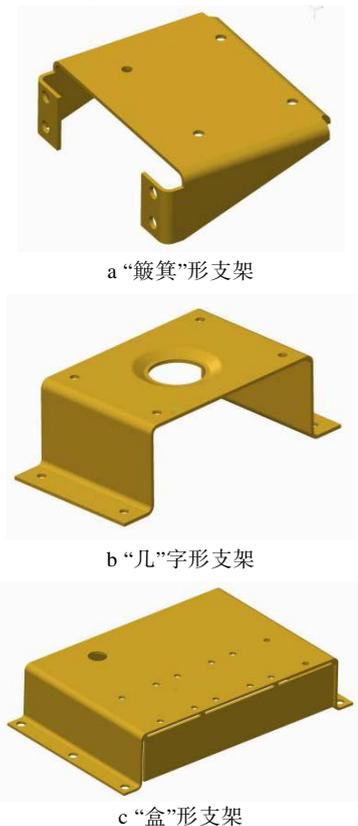


图 1 典型的支架形式

Fig.1 Typical support forms: a) "dustpan" shaped supporter; b) "W" shaped supporter; c) "box" shaped supporter

在航天工程中, 为了提高工艺可靠性, 降低加工成本, 金属支架往往为金属薄板通过钣金工艺得到。然而, 在工程实际中发现, 在舱段-支架-设备系统(见图 2)中, 从支架安装处到设备安装处的动力学传递特性有明显的放大特征, 设备安装处的振动响应总均方根值是支架安装处的振动响应总均方根值的几倍甚至 10 倍以上, 因此该系统的动力学响应主要由金属支架的动力学特性决定。从支架安装处到设备安装处动力学传递特性的显著放大会导致设备无法正常工作, 甚至会导致飞行失利, 严重影响飞行可靠性。然而, 在实际工程研制中, 对金属支架的设计一般只考虑结构、承载、接口等设计, 不进行动力学设计, 往往采取先设计、再生产、最后对整个系统进行试验验证的开环设计方法, 然后通过一系列的“试错”试验后, 把支架的结构方案确定下来, 耗费大量人力物力。因此, 如何将支架动力学设计融入支架结构设计, 实现系统动力学传递特性的优化成为了近年来航天工程关注的一个重要问题。

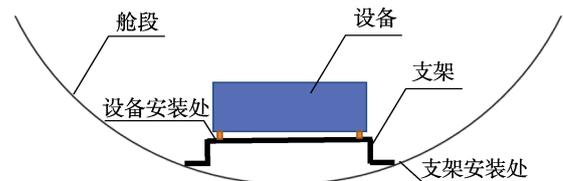


图 2 舱段-支架-设备

Fig.2 Schematic diagram of cabin-supporter-equipment

在飞行器的方案设计和工程研制阶段, 可以采用有限元法对飞行器结构进行动力学建模及数值仿真, 从而得到随机振动条件下的结构振动响应分布, 为结构优化设计打好基础。周芒等^[1]、唐远强等^[2]对典型结构的随机振动进行了试验和有限元仿真, 得到了结构的振动响应。卢其进等^[3]、陈前等^[4]对海洋风电支撑结构在海洋环境下的动力学特性进行了分析和优化。葛文韬等^[5]研究了车载设备安装支架的疲劳仿真分析方法。李敏浩等^[6]、卢剑等^[7]开展了基于疲劳分析的车载设备安装支架结构方案优化研究, 提高了支架的疲劳寿命。于忠杰等^[8]研究了船上设备支架的动力学特性, 为结构方案的优化设计提供了重要基础。唐波^[9]、周江贝等^[10]研究了机载设备支架的振动特性

和减振方案。张永存等^[11]研究了典型火炮结构在工作过程的瞬态响应,得到了前支架相关设计参数对振动响应的规律。徐立黄等^[12]、罗研朝等^[13]、张鹏飞等^[14]对飞行器设备支架结构的动特性进行了分析,获得了支架的模态、频响函数等特性参数。朱晓芳等^[15]、申智春等^[16]、王东升等^[17-18]对航天设备支架的振动响应进行了分析,并开展了方案的优化改进设计。柴国栋^[19]对某电台安装支架进行了随机振动分析。施云高等^[20]基于有限元对支架进行了轻量化力学分析。朱晓芳等^[21]研究了船舶尾轴架的固有频率计算方法,采用有限元法得到了支架的动力学特性参数。于韶明等^[22]研究了管路支架的振动试验方法,考核了支架及管路的环境适应性。张晓飞等^[23-24]、王云鹏等^[25]、文新海等^[26]研究了各种支架结构在外界振动环境作用下的应力和疲劳寿命分析方法。目前的工作主要集中在针对支架结构的动力学仿真分析及试验验证,对于工程上亟待解决的如何将支架动力学特性设计融入结构设计流程,以及如何通过支架的仿真分析、试验研究进行动力学特性设计的系统性研究较少。

基于此,文中提出了基于仪器支架随机振动响应预示的动力学特性管控方法,结合工程实际,设定动力学特性的优化目标,将支架动力学设计融入结构设计的流程中,形成了仪器支架的动力学特性管控方法,并在工程中得到应用。本文为支架结构振动分析和设计改进提供了可行的方法,避免了支架上设备安装处相对支架安装处的振动环境严重放大,为关键设备提供良好的力学环境,对飞行器环境工程和弹/箭环境适应性及可靠性提升具有重要意义。

1 仪器支架结构动力学

1.1 随机振动理论

复杂结构系统受到随机激励时,可以视为多自由度系统的受迫振动,其运动方程如下:

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{y}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{y}} + \mathbf{K} \mathbf{y} = \mathbf{X} \quad (1)$$

式中: \mathbf{M} 为质量矩阵; \mathbf{C} 为阻尼矩阵; \mathbf{K} 为刚度矩阵; \mathbf{y} 为系统响应; \mathbf{X} 为激励。

对于该系统,如果系统本身的结构动力学参数(\mathbf{M} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{K})都是确定的,而系统振源是随机的,则其输出响应也是随机的,所产生的振动就是随机振动。对于平稳随机过程,振源功率谱密度函数为 $S_{XX}(\omega)$, ω 为频率,则结构振动响应的功率谱密度函数可以表示为^[27]:

$$S_{YY}(\omega) = \mathbf{H}(\omega)^* S_{XX}(\omega) \mathbf{H}(\omega)^T \quad (2)$$

式中: $\mathbf{H}(\omega)$ 为系统的频率响应函数矩阵;上标“*”和“T”分别表示复共轭和转置。

对于时域上的平稳随机振动,其自相关函数为:

$$R(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t)x(t+\tau)dt \quad (3)$$

则功率谱密度为自相关函数的傅里叶变换为:

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (4)$$

功率谱密度函数在频率的积分的均方根值为:

$$G_{RMS} = \sqrt{\int_{\omega_1}^{\omega_2} S(\omega) d\omega} \quad (5)$$

由上述随机振动理论可知,在准确地确定结构模型参数后,就可以方便地获得结构各个部位的随机振动响应。

1.2 动力学特性指标

为了将支架动力学特性融入支架结构设计中,需要构造合理的目标函数来表征支架的动力学特性。为了对工程中关注的仪器支架的动力学特性进行量化,提出了仪器支架的动力学特性指标,将其作为目标函数和结构优化变量的桥梁,实现通过结构优化对动力学特性进行管控。仪器支架的动力学特性指标的表征对象为舱段-支架-设备系统,舱段为边界条件,设备为负载。兼顾工程需求和问题的简化,提出了以下3个动力学特性指标。

1) 基频值 f_0 。基频值指的是支架第一阶弹性振动频率,是支架整体刚度的表征,选取该值便于在工程上对支架及其安装的刚度进行控制。基频大小与支架刚度、支架边界条件、支架上设备等因素有关。控制该参数,还可以避免支架与飞行器、设备及减振器的固有频率发生耦合。

2) 放大倍数 E 。放大倍数定义为支架上关键设备安装处的振动响应均方根值与支架安装处的基础激励振动环境均方根值的比值。放大倍数的大小与输入环境、支架动力学特性等因素均有关系,控制该参数,可以控制响应与输入间的传递关系。

3) 一定频段内加速度幅频特性的最大值 A 。幅频特性 A 值是从支架安装处到设备安装处的传递函数在一定频段内谐振峰处的最大值。该值与结构设计、阻尼等因素有关。控制该参数,可以避免在特定频点发生异常的放大。

可根据不同情况选择其中的1个或几个来构造目标函数进行动力学特性的管控,也可以直接定义不同频段下从支架安装处到设备安装处的传递特性曲线作为控制要求。

2 随机振动响应分析

2.1 问题描述

以某热流变换器的盒形支架(见图3)为例开展振动响应的试验、建模和仿真分析研究工作。该支架上安装有3个热流变换器,分别为热流变换器1、热流变换器2、热流变换器3。热流变换器1—3通过螺接安装于顶部金属板上,其中热流变换器1、2质量为200g,热流变换器3质量为150g。

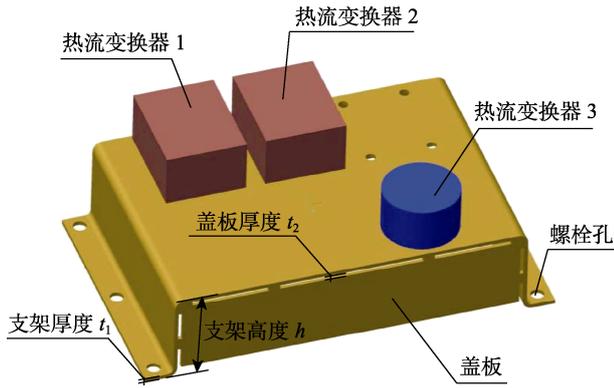


图 3 热流变换器支架模型
Fig.3 Model of heat flux converter supporter

支架由厚度为 t_1 的铝板经过钣金工艺, 然后焊接厚度为 t_2 的前后盖板得到。支架整体高度为 h , 通过 2 个侧方向翻边的 6 个螺钉孔与飞行器舱壁螺接。支架材料的弹性模量为 71 GPa, 泊松比为 0.33, 密度为 $2\ 700\text{ kg/m}^3$ 。

2.2 随机振动试验

为了得到支架的振动响应和放大情况, 开展了振动试验, 振动方向为垂直支架安装面。测点布置见图 4。试验中振动加速度控制点设为支架安装处 C_1 , 振动加速度响应测点设置在热流变换器 2 安装处 M_1 点。

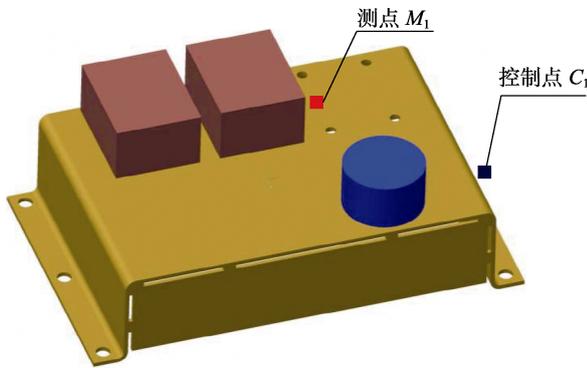


图 4 试验测点布置
Fig.4 Test point layout

试验采用电磁式振动台进行, 获得了支架安装处 (C_1) 及设备安装处 (M_1) 的振动响应, 功率谱密度曲线见图 5。可见该支架放大较严重, 支架安装处的振动响应总均方根值为 12.27g , 设备安装处测点的振动响应总均方根值为 51.06g 。图 5 中 100 Hz 以内的低频部分, 设备安装处和支架安装处有约 2 dB 的差异, 分析认为主要原因是, 振动台的振动传递到工装上在低频的存在一定的空间不均匀性, 而支架由于承受多点不均匀的随机振动激励, 导致低频并不是一比一的传递。

根据设备安装处测点与支架安装处测点振动响应的传递曲线 (见图 6) 可知, 支架在 200 Hz 以后有丰富的模态, 并且在高频有严重的放大, 是典型的壳体的振动响应。从传递函数曲线可以得到支架系统的

各阶频率, 前 3 阶频率分别为 285 、 370 、 425 Hz 。

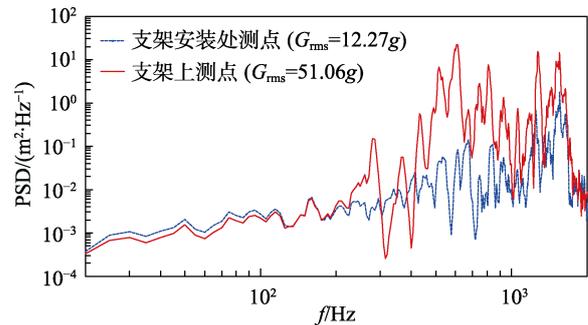


图 5 振动响应实测数据
Fig.5 Vibration response of measured data

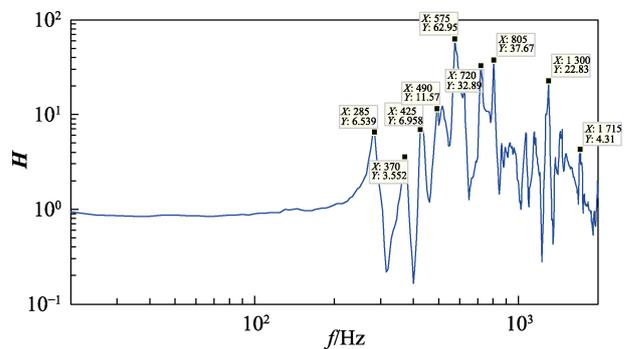


图 6 传递函数
Fig.6 Transfer function

2.3 仿真分析

2.3.1 有限元建模

支架建模过程中考虑了支架厚度、螺钉、螺钉安装孔、金属翻边、局部倒圆角等特征, 真实反映了支架的结构特性 (如图 7 所示), 为力学环境分析得到较为精确的分析结果提供了重要基础。在进行结构连接的建模中, 主要进行了如下的考虑: 设备上的螺钉与支架的螺钉孔采用固定连接; 支架上的螺钉孔与舱段边界刚性连接; 支架的翻边与舱段边界处理为接触连接。根据以往多次支架结构振动试验实测和模型修正的结果, 系统的阻尼系数取为 1.0% 。

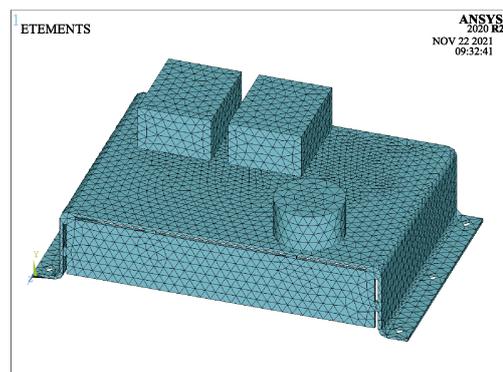


图 7 有限元模型
Fig.7 Finite element model

2.3.2 随机振动分析

采用 ANSYS 谱分析模块，给支架施加与试验中支架安装处振动响应一致的基础激励，可以得到结构各部位的振动响应。数值模拟得到的振动加速度响应云图见图 8，试验测点位置处的振动响应功率谱密度曲线见图 9。可见设备安装处振动量级的计算值为 53.68g，与实测值 51.06g 基本一致，并且功率谱密度曲线与试验实测曲线趋势一致，低频的谐振峰吻合较好。功率谱曲线低频的差异主要是由于数值仿真时对基础激励进行了平滑处理造成的。

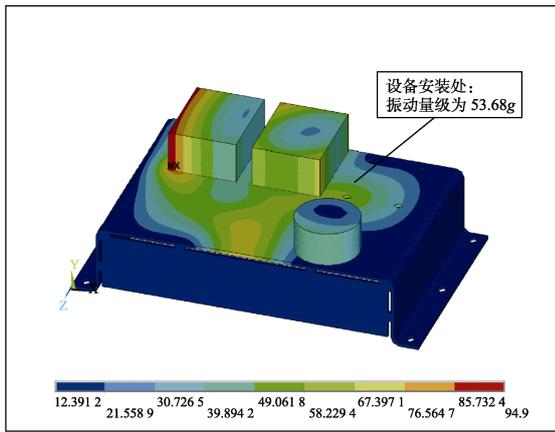


图 8 结构加速度响应云图

Fig.8 Contour of structure acceleration response

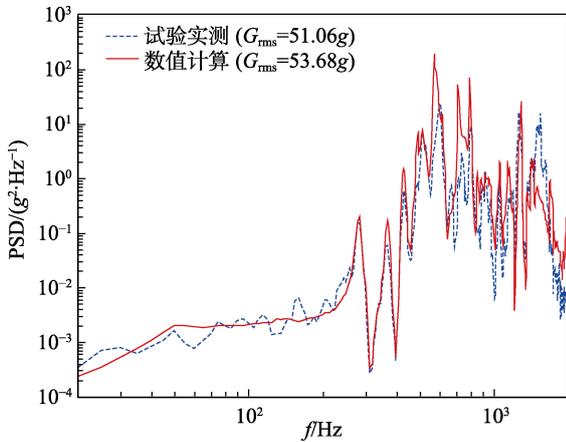


图 9 支架上测点处响应功率谱密度

Fig.9 Response power spectral density at the measuring point on the equipment supporter

由于支架结构尺寸、测点尺寸及质量的限制，随机振动试验只能得到少数位置的振动响应。通过数值仿真可以得到整个结构各处的随机振动响应，这是对随机振动试验的重要补充。该建模与仿真方法可以较为准确地预示支架的随机振动响应。

2.3.3 动特性指标分析

对该问题选择基频 f_0 和放大倍数 E 这 2 个动力学特性指标进行分析。从传递函数曲线（见图 6）可以得到支架系统的各阶频率，其一阶频率为 285 Hz。

分析支架安装处及设备安装处的振动响应，由图 9 可见，该支架放大较严重，支架安装处振动响应总均方根值为 12.27g，设备安装处的振动响应总均方根值为 51.06g，可见设备安装处相对支架安装处放大了 4.2 倍。

3 动力学管控方法

第 2 节采用的数值仿真方法可以较为准确地预示仪器支架的随机振动响应。在此基础上，提出了航天设备仪器支架动力学管控方法，将支架的动特性设计融入支架结构设计流程中，运用动力学仿真优化及振动试验验证的方法，实现了基于“仿真分析-设计优化迭代”与“振动试验确认”双链路的航天设备仪器支架动力学管控。

支架振动特性闭环管控实施方案如图 10 所示。具体流程为：明确支架动特性指标要求；对支架振动特性进行仿真分析；设置目标函数，开展迭代优化设计；对支架开展动力学试验，验证其动特性指标。

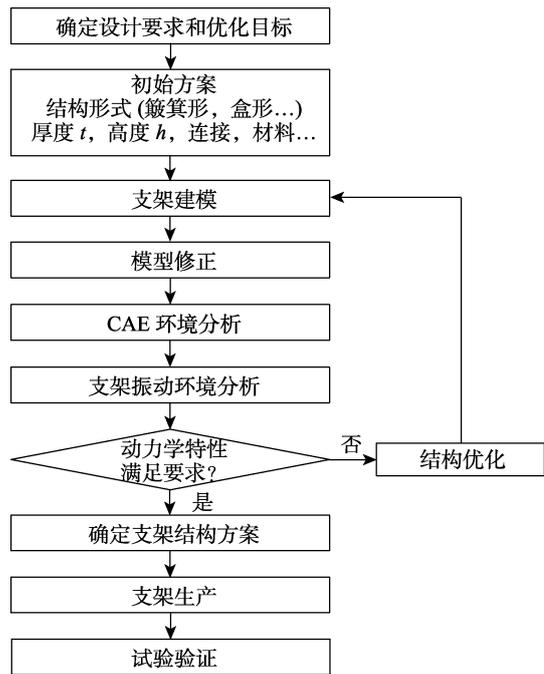


图 10 支架振动特性闭环管控实施方案

Fig.10 The implementation of closed-loop control of the vibration characteristics of the equipment supporter

以第 2 节研究的支架为例，对其进行动力学管控。根据工程需要，该支架的动力学特性设计要求为：一阶频率 f_0 高于 180 Hz，振动量级放大倍数 E 小于 2。

由于选用了 2 个动特性指标，在优化分析中需要综合考虑这 2 个指标。采用统一目标函数进行优化分析，具有线性加权平方和的形式，见式 (6)。

$$f(X) = \sum_{p=0}^l (w_p f_p(x))^2 \tag{6}$$

式中, 加权因子 $w_p(p=1,2,\dots,l)$ 的选取使得各分目标函数 $w_p f_p(X)$ 成为具有等量级数值的无量纲函数。各分目标函数为:

$$\begin{cases} f_1(X) = Y_1 / y_1 \\ f_2(X) = y_2 / Y_2 \end{cases} \quad (7)$$

式中: $Y_1、Y_2$ 为给定的动力学特性指标值; $y_1、y_2$ 为仿真计算得到的动力学特性指标值。在本算例中, $Y_1=180, Y_2=2, w_1=0.3, w_2=0.7$ 。

对该支架进行随机振动仿真分析, 得到的动特性指标为: 一阶频率为 285 Hz, 振动量级放大倍数为 4.2。

优化设计的方法有很多, 如结构拓扑优化、参数

灵敏度分析等。由于支架设计不仅受动特性约束, 主要还受空间、负载、接口的约束, 以满足结构设计需求为主, 设计变量的变化范围相对较小, 因此采用灵敏度分析的方法, 对支架结构进行优化设计。

在工程设计中, 各参数一般进行圆整化处理, 对支架厚度、盖板厚度、螺栓数量、支架高度 4 个参数在合理范围内进行灵敏度分析, 结果如图 11 所示。根据灵敏度分析结果, 选择支架厚度为 4 mm、盖板厚度为 2 mm、螺栓数量为 8 个、支架高度为 45 mm, 进行仿真。仿真得到的动特性指标为: 一阶频率为 183 Hz, 振动量级放大倍数为 1.67, 满足指标要求。

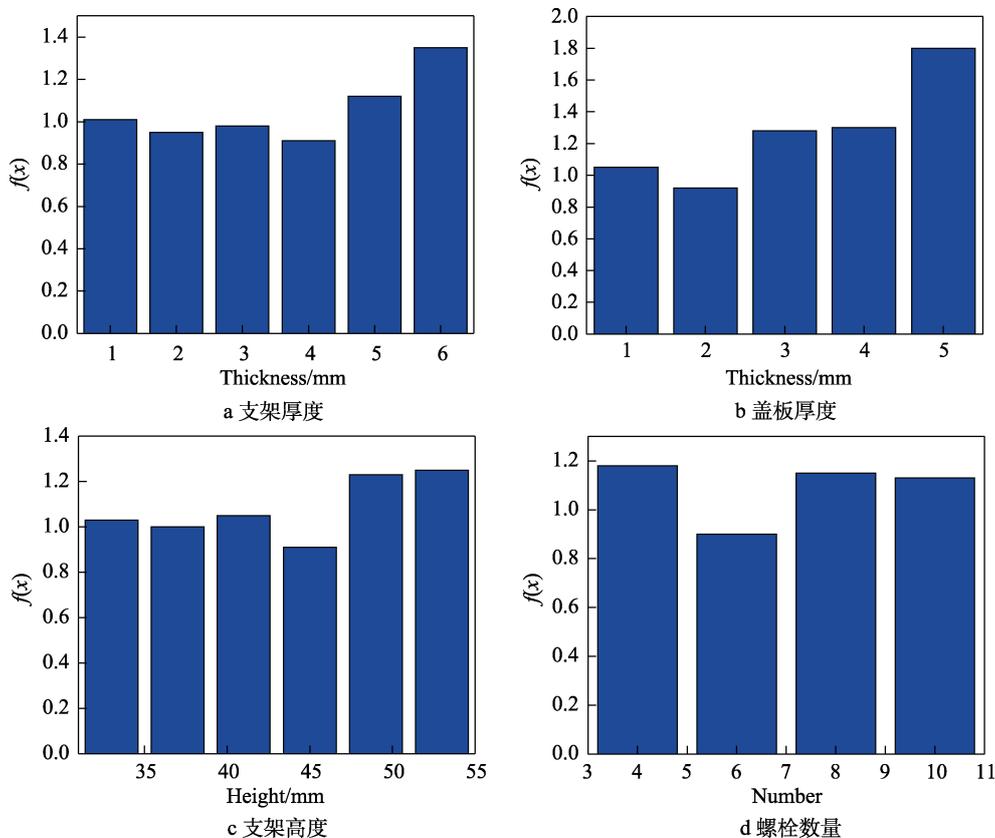


图 11 各参数灵敏度分析结果

Fig.11 Sensitivity analysis results of each parameter: a) thickness of supporter; b) thickness of cover plate; c) height of supporter d) number of bolts

4 结论

本文基于典型仪器支架精确预示方法, 提出了仪器支架的动力学特性管控流程, 以动特性指标要求为目标, 以随机振动响应的精确预示为途径, 对仪器支架的动特性进行优化和管控, 为支架结构振动分析和改进设计提供了可行的方法, 可以降低对电子设备的环境适应性要求, 降低研制成本。通过本文的工作可以得到如下结论。

1) 通过对支架结构、连接、阻尼等进行合理建模, 可以得到振动响应量级、低频功率谱密度曲线与

试验吻合较好的数值仿真结果, 实现了对仪器支架随机振动响应的精确预示。

2) 提出了面向支架动特性管控的动力学特性指标: 基频值 f_0 、放大倍数 E 、一定频段内加速度幅频特性的最大值 A 。这 3 个动力学特性指标可以全面表征仪器支架在随机振动激励下的动力学特性, 并可据此构造优化目标以对支架的动力学特性进行有效管控。

3) 提出的典型仪器支架的动力学管控方法, 实现了将支架动特性设计融入支架结构设计流程中, 可在研制初期实现对支架动力学特性的有效管控。

本文给出了典型仪器支架的振动响应分析和动力学管控方法,将支架动特性设计融入支架结构设计的流程中,并经过航天工程实践验证有效,对于支架结构振动分析和设计改进提供了依据,对提高弹、箭环境适应性和可靠性具有重要意义。

参考文献:

- [1] 周芒,刘敏,郑建勇,等.导管随机振动响应分析与实验验证[J].强度与环境,2013,40(5):30-36.
ZHOU Mang, LIU Min, ZHENG Jian-yong, et al. The Random Vibration Response Analysis of Catheter and Experimental Verification[J]. Structure & Environment Engineering, 2013, 40(5): 30-36.
- [2] 唐远强,舒大文,赖兴华. ANSYS 在梁-板壳结构随机振动分析中的应用[J]. 新技术新工艺, 2009(12): 39-42.
TANG Yuan-qiang, SHU Da-wen, LAI Xing-hua. The Application of ANSYS on the Random Vibration Analysis of Beam-Shell Structure[J]. New Technology & New Process, 2009(12): 39-42.
- [3] 卢其进,杨和振.海洋风电支撑结构的随机性动力优化设计[J].振动与冲击,2013,32(17):46-51.
LU Qi-jin, YANG He-zhen. Probabilistic Dynamic Optimization Design for Support Structure of Offshore Wind Turbines[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(17): 46-51.
- [4] 陈前,付世晓,邹早建.海上风力发电机组支撑结构动力特性分析[J].振动与冲击,2012,31(2):86-90.
CHEN Qian, FU Shi-xiao, ZOU Zao-jian. Dynamic Characteristics Analysis for Support Structure of an Offshore Wind Turbine[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(2): 86-90.
- [5] 葛文韬,黄晖,段龙杨,等.基于实测道路谱的纯电动轻卡电池包支架动态载荷仿真及疲劳分析[J].振动与冲击,2020,39(9):267-273.
GE Wen-tao, HUANG Hui, DUAN Long-yang, et al. Dynamic Load Simulation and Fatigue Analysis of a Pure Electric Light Truck Battery Bracket Based on Measured Road Load Spectrum[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(9): 267-273.
- [6] 李敏浩,邓赛帮,刘向征,等.车身控制模块支架的随机振动有限元疲劳分析及优化[J].现代制造工程,2018(6):64-68.
LI Min-hao, DENG Sai-bang, LIU Xiang-zheng, et al. The Random Vibration Fatigue FEA Analysis and Optimization for Body Control Module Bracket[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2018(6): 64-68.
- [7] 卢剑,钟自锋.发电机支架振动疲劳分析及其优化设计[J].机械强度,2019,41(5):1244-1248.
LU Jian, ZHONG Zi-feng. Vibration Fatigue Analysis and Optimal Design of Alternator Bracket[J]. Journal of Mechanical Strength, 2019, 41(5): 1244-1248.
- [8] 于忠杰,叶文荣,姚欣鹏.某船用主机中间支架振动特性分析[J].中国修船,2019,32(5):21-23.
YU Zhong-jie, YE Wen-rong, YAO Xin-peng. Analysis of Vibration Characteristics of a Marine Mainframe[J]. China Shiprepair, 2019, 32(5): 21-23.
- [9] 唐波.基于随机振动分析的隔振支架结构优化研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2014,33(5):157-160.
TANG Bo. Research on Structure Optimization of Support Structure Based on Random Vibration Analysis[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2014, 33(5): 157-160.
- [10] 周江贝,白春玉,李意达.机载设备支架系统振动特性研究与振动控制[J].工程与试验,2021,61(2):38-40.
ZHOU Jiang-bei, BAI Chun-yu, LI Yi-da. Vibration Control and Research on Vibration Characteristics of Airborne Equipment Support System[J]. Engineering & Test, 2021, 61(2): 38-40.
- [11] 张永存,吴雪云,刘书田.典型火炮结构振动分析与前支架设计改进[J].工程力学,2013,30(6):308-312.
ZHANG Yong-cun, WU Xue-yun, LIU Shu-tian. Vibration Analysis of Typical Artillery and Improvement of Front Bracket[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(6): 308-312.
- [12] 徐立黄,李强,孙茂强,等.箭载光纤陀螺支架减振器特性分析[J].弹箭与制导学报,2019,39(6):134-137.
XU Li-huang, LI Qiang, SUN Mao-qiang, et al. Analysis of Shock Absorber Characteristics of Fiber Optic Gyroscope Support for Rocket[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2019, 39(6): 134-137.
- [13] 罗研朝,王闯,张焯.基于FE-SEA方法的航天器含支架组件噪声分析[J].航天器环境工程,2014,31(3):262-266.
LUO Yan-zhao, WANG Chuang, ZHANG He. Acoustic Response Prediction for a Spacecraft Unit with Bracket Based on FE-SEA Method[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2014, 31(3): 262-266.
- [14] 张鹏飞,苏华昌.仪器舱惯组支架角振动传递特性分析[J].强度与环境,2014,41(4):1-5.
ZHANG Peng-fei, SU Hua-chang. Analysis of Angle Transfer Characteristic of Inertial Measure Unit Bracket of Instrument Cabin[J]. Structure & Environment Engineering, 2014, 41(4): 1-5.
- [15] 朱晓芳,夏利娟,金咸定.星上飞轮支架组件的模式和响应控制初探[J].振动与冲击,2005,24(1):63-65.
ZHU Xiao-fang, XIA Li-juan, JIN Xian-ding. Preliminary Study on Mode and Response Control of Satellitic flywheel-Bracket-Groupware[J]. Journal of Vibration and Shock, 2005, 24(1): 63-65.
- [16] 申智春,梁鲁,郑钢铁,等.某型卫星有效载荷支架振动抑制[J].宇航学报,2006,27(3):503-506.
SHEN Zhi-chun, LIANG Lu, ZHENG Gang-tie, et al. Vibration Suppression of a Payload Bracket in a Satellite[J]. Journal of Astronautics, 2006, 27(3): 503-506.
- [17] 王东升,周桐,李健.振动、冲击环境下支架减振器刚度优化设计[J].航天器环境工程,2006,23(2):86-89.

- WANG Dong-sheng, ZHOU Tong, LI Jian. Optimal Design of Bracket Isolator Stiffness in Vibration and Shock Environment[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2006, 23(2): 86-89.
- [18] 王东升, 陈颖, 周桐. 支架结构随机振动响应优化研究[J]. 航天器环境工程, 2005, 22(1): 38-40.
WANG Dong-sheng, CHEN Ying, ZHOU Tong. The Optimization of Random Vibration Response for Bracket Structures[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2005, 22(1): 38-40.
- [19] 柴国栋. 基于某电台及其安装架的随机振动分析[J]. 微计算机信息, 2009, 25(4): 272-273.
CHAI Guo-dong. Random Vibration Analysis for Shock Absorber of Transmitter-Receiver Module[J]. Microcomputer Information, 2009, 25(4): 272-273.
- [20] 施云高, 杨爽, 陈红, 等. 基于有限元法的轻量化支架力学分析[J]. 机械制造, 2020, 58(8): 10-13.
SHI Yun-gao, YANG Shuang, CHEN Hong, et al. Mechanical Analysis of Lightweight Support Based on Finite Element Method[J]. Machinery, 2020, 58(8): 10-13.
- [21] 朱晓芳, 杜志鹏, 金咸定. 浸入水中的船舶尾轴架固有频率的计算方法探讨[J]. 振动与冲击, 2005, 24(2): 111-115.
ZHU Xiao-fang, DU Zhi-peng, JIN Xian-ding. Study on Calculation Method for Natural Frequency of Bracket in a Fluid Medium[J]. Journal of Vibration and Shock, 2005, 24(2): 111-115.
- [22] 于韶明, 卫国, 任冬辉, 等. 管路及支架振动试验技术[J]. 导弹与航天运载技术, 2019(2): 106-109.
YU Shao-ming, WEI Guo, REN Dong-hui, et al. Vibration Testing Technology of Pipeline and Bracket[J]. Missiles and Space Vehicles, 2019(2): 106-109.
- [23] 张晓飞, 谷晓梅, 李良碧, 等. 焊接残余应力对船舶减振支架振动疲劳寿命影响分析[J]. 舰船科学技术, 2018, 40(15): 41-44.
ZHANG Xiao-fei, GU Xiao-mei, LI Liang-bi, et al. Effect of Welding Residual Stresses on Vibration Fatigue Life of the Shock Reduction Support of a Ship[J]. Ship Science and Technology, 2018, 40(15): 41-44.
- [24] 张晓飞, 李良碧, 谷晓梅. 连接刚度对船舶减振支架振动疲劳寿命的影响[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2018, 32(4): 472-476.
ZHANG Xiao-fei, LI Liang-bi, GU Xiao-mei. Influence of Connector Stiffness on Vibration Fatigue Life of Vibration Damping Bracket in Ship[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2018, 32(4): 472-476.
- [25] 王云鹏, 肖伟, 田肖庆, 等. 航空发动机支架零件振动疲劳及结构优化[J]. 计算机辅助工程, 2020, 29(4): 65-70.
WANG Yun-peng, XIAO Wei, TIAN Xiao-qing, et al. Vibration Fatigue and Structural Optimization of Aeroengine Support Part[J]. Computer Aided Engineering, 2020, 29(4): 65-70.
- [26] 文新海, 邱星. 基于激励谱的随机振动疲劳的分析方法研究[J]. 科技视界, 2017(13): 11-12.
WEN Xin-hai, QIU Xing. Research on Analysis Method of Random Vibration Fatigue Based on Excitation Spectrum[J]. Science & Technology Vision, 2017(13): 11-12.
- [27] 邹经湘. 结构动力学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1996.
ZOU Jing-xiang. Structure Dynamics[J]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1996.

责任编辑: 刘世忠