

Structural Strength Analysis and Vibration Reduction Design of Airborne Antenna Mounting Frame

Shirui Yao

The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract

For the airborne antenna support in the service environment of combined run-up take-off, random vibration and shock impact, as well as temperature and humidity cycles, a vibration and strength collaborative design method based on small deformation elasticity mechanics and finite element is constructed. Through parametric modeling and topological geometric collaborative optimization, considering multi-bolt pre-tightening and contact effects, combined with acceleration power spectral density and half-sine impact load, constraining natural frequency and damping ratio, polyether polyurethane is selected to configure the vibration isolation characteristics and perform equivalent linearization. Using Gaussian process surrogate and sequential quadratic programming to drive optimization, the test bench re-creates the interface stiffness of the actual installation and realizes the consistency alignment of the load spectrum and measurement points. Engineering cases show that the vibration transmission rate of the flange relative to the base is reduced from 0.6 to 0.3, and the nominal stress of the dangerous section is reduced from 300 MPa to 245 MPa, meeting the strength and resonance avoidance constraints. The results indicate that this method can significantly reduce wideband response and improve strength margin without increasing mass.

Keywords

airborne antenna bracket; random vibration; vibration reduction design; parametric modeling; finite element optimization

机载天线支架结构强度分析与减振设计

姚诗锐

中国电子科技集团公司第五十四研究所, 中国·河北 石家庄 050000

摘要

面向机载天线支架在滑跑起飞、随机振动与落震冲击交织以及温湿循环的服役环境, 构建以小变形弹性力学与有限元为基础的减振与强度协同设计方法。通过参数化建模与拓扑几何协同优化, 考虑多螺栓预紧与接触效应, 联合加速度功率谱密度与半正弦冲击载荷, 约束固有频率与阻尼比, 选用聚醚型聚氨酯配置隔振特性并进行等效线性化。以高斯过程代理与序列二次规划驱动寻优, 试验台架复现实装接口刚度并实现载荷谱与测点的一致性对齐。工程案例显示, 法兰相对基座的振动传递率由0.6降至0.3, 危险截面名义应力由300 MPa降至245 MPa, 满足强度与共振规避约束。结果表明, 该方法可在不增加质量的前提下显著降低宽频响应并提升强度裕度。

关键词

机载天线支架; 随机振动; 减振设计; 参数化建模; 有限元优化

1 引言

机载电子设备在飞行全包线内承受滑跑与起落冲击、机体气动激励以及舱内温湿循环的耦合作用, 支承结构需要在宽频随机激励与瞬态冲击下保持稳定承载并避免共振放大。尤其是整流罩内的天线支架, 既要兼顾法兰定位精度和电磁布局, 又要在多螺栓连接、开孔减重与维护包络等约束下实现高效减振, 这对结构刚度、阻尼与连接工艺的协同提出了更高要求^[1]。为此, 亟需面向工程判据的系统化方案,

将参数化建模、材料阻尼配置、接触与预紧建模以及随机振动与冲击谱的联合评估纳入一体化框架, 实现固有频率、阻尼比、传递率与名义应力的多目标权衡。本文围绕机载天线支架, 构建从设计域定义到仿真优化再到实验验证的闭环流程, 力求在质量与接口刚度受限条件下, 实现共振规避与承载可靠性的同步提升。

2 机载天线支架结构强度分析的理论基础

鉴于机载天线支架处于滑跑与起飞、气动激励与落震冲击交织的服役情境, 结构需在宽频随机振动、瞬态冲击与循环温湿变化下维持稳定承载。面向工程判据, 应力、应变与等效弯扭刚度作为核心指标, 同时把固有频率与阻尼比纳入共振规避约束。基于小变形弹性力学, 把支架视作连续体

【作者简介】姚诗锐(1990-), 男, 中国河北石家庄人, 本科, 工程师, 从事机械设计与制造研究。

并运用胡克定律描述线性本构；在多螺栓连接与开孔减重共存的几何中，借助有限元离散与接触、预紧建模及网格收敛评估来还原载荷路径与约束刚度。材料参数方面，若选用铝合金 6061-T6，弹性模量取 70 GPa，泊松比 0.33，屈服强度约 275 MPa，抗拉强度约 310 MPa；在巡航低温与机舱温升交替条件下，还需引入线膨胀系数 $23 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 导致的热应力。由此把名义承载与弯矩叠加为应力准则，服务于局部细节复核。

$$\sigma_{\max} = \frac{F}{A} + \frac{M}{W}$$

其中， $\sigma_{\max}$ 表示危险截面的最大名义正应力（单位：Pa）， F 为轴向载荷（单位：N）， A 为受力截面积（单位： m^2 ）， M 为关于该截面的弯矩（单位： $\text{N} \cdot \text{m}$ ）， W 为截面抵抗矩（单位： m^3 ）。

3 机载天线支架的减振设计方法

3.1 减振结构的参数化建模

在飞行载荷呈宽频随机与冲击叠加的语境下，把三维参数化建模作为减振结构设计的起点。本研究把几何尺寸、安装位置、材料参数与连接状态转化为可调用的设计变量，并在一体化有限元环境中完成几何与网格联动。关键变量覆盖隔振器中心距与极向角、筋板分区厚度、螺栓孔群坐标偏置，以及隔振器等效刚度与损耗因子的取值范围；结合机身接口与维护包络，把允许布置的区域定义为设计域，把天线法兰与走线区定义为不可变域。边界条件依据机载设备安装规范设置固定参考点与柔性约束，使连接刚度得到等效；载荷输入采用加速度功率谱密度与半正弦冲击叠加的谱线，频带覆盖 20 至 2000 Hz，并叠加典型温度历程以触发热弹耦合。为兼顾随机振动与共振规避，响应量选取位移传递率与等效应力峰值，约束一至三阶固有频率与阻尼比。拓扑优化在设计域内按密度法描述材料分布，把目标设定为提升模态刚度并降低传递率，同时限制总质量与接口刚度；迭代过程中由参数化几何驱动网格自动更新，内置灵敏度与过滤避免棋盘格，优化结果经几何重建转化为可制造的筋板与孔位布局，并回写主模型形成闭环^[2]。

3.2 减振材料的选型分析

在机载天线支架面临宽频随机振动与半正弦冲击叠加、伴随周期性温湿变化的工况下，减振材料选型被放到阻尼能力、温度稳定性以及重量约束的联立权衡中。把常见弹性体与金属阻尼材料进行对比可以看到，天然橡胶在中低频具备较高内耗，但在低温区易硬化，在温升时刚度下降且耐候性不足，且对航空燃油与液压油的耐受性偏弱。进一步观察金属阻尼材料，金属橡胶与金属丝网隔振元件在高温环境表现稳定，频幅依赖性明显，小应变下等效阻尼偏低，密度带来的质量惩罚较大，并且需要较高预紧来建立接触刚度。结合机身设备舱温度常年分布在 $-40 \sim 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、局部峰值不超过 80°C 以及质量控制目标，本研究把聚醚型聚氨酯弹性体当作

核心隔振材料来使用，其在 100 Hz 邻域可获得约 0.25 的阻尼比，密度约 1200 kg/m^3 ，力学参数对温度的敏感性适中，兼具耐水解与抗疲劳特性，并可通过硬度与配方微调来实现目标固有频率与损耗因子的协同配置。需重点关注的是，把聚氨酯与铝合金界面的粘接与防腐处理与预紧设计相匹配，把长时蠕变与热老化纳入寿命评估，便可在不增加额外质量的条件下稳定降低传递率^[3]。

3.3 减振结构的仿真优化

鉴于机载宽频随机与半正弦冲击叠加的载荷谱，本研究把隔振参数驱动的有限元仿真优化作为核心环节。把支架与隔振器耦合建模于有限元环境，按接触与预紧建模，凭借模态叠加获取频域频响函数，提取机身基座与天线法兰处的加速度与位移，并据此计算传递率。时域施加等效冲击谱，评估峰值位移与名义应力，将其并入约束集合以约束安全边界。目标在于把频带内传递率峰值压低至目标值，同时维持接口刚度与模态间隔。

$$T = \left| \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 + 2j\zeta\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)} \right|$$

其中， T 为振动传递率， ω 为激励圆频率， ω_n 为固有圆频率， ζ 为阻尼比， j 为虚数单位。

从参数角度来看，把隔振器等效刚度与阻尼比当作主变量，同时对中心距与极向角进行协同调整，并把预紧力作为调节接触刚度与能量耗散的杠杆。为提高收敛效率，先以拉丁超立方在参数空间生成样本，构建基于高斯过程的代理模型，再借助序列二次规划进行外层寻优，内层以有限元求解校正代理。全流程把一至三阶固有频率与阻尼比设为共振规避约束，把铝合金与聚氨酯在 -40 至 $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度依赖性写入材料卡片，并把网格收敛与接口刚度标定作为每轮迭代的前置校核。当频带内最大传递率不高于 0.3 且各约束满足时，更新参数至主模型以支撑后续工程定型。

4 机载天线支架结构性能的效果评估

4.1 强度与减振性能的实验测试

于支架在宽频随机振动与落震冲击交织的服役背景中承担载荷传递，本研究在机载设备安装刚度可复现实验台上构建静力与随机振动一体化测试平台，把优化后的支架与隔振器按规定预紧接入可调柔性夹具，并把接口刚度通过标准件与弹性插入件联合标定。静态强度试验依照设计工况把轴向与弯矩合成载荷加至设计载荷 1.2 倍，负载路径由伺服作动器在闭环力控下施加，危险截面以电阻应变花与数字图像相关同步观测，加载速率与保载时间按材料准则设定，用以稳定获取名义应力与应变分布。随机振动试验基于电动振动台实施控制，把基座三向控制加速度按 GJB150.16 规定谱在 20 至 2000 Hz 范围内闭环复制，驱动谱采用分段直线功率谱密度输入与宽带合成方法，控制通道与响应通道分别

布置在机身接口参考点与天线法兰位置。数据采集以同步触发方式开展，把加速度计、应变计与位移光学测量的采样频率统一至带宽十倍以上，并把系统传递函数以汉宁窗与平均技术进行频域处理。由此把仿真与实验在载荷谱、边界约束与测点位置三方面进行对齐，进一步把一致性评估纳入误差

阈值判定，包括最大应力的相对误差、主模态频率与阻尼比偏差以及传递率峰值偏差等指标，相关设置与判据见表1。需重点关注的是，预紧力与接触摩擦参数在试前通过扭矩角法与超声法联合校核，并把该标定结果回写至有限元模型，以减少由连接非线性引入的对比偏差^[4]。

表1 支架性能测试结果对比表

测试项目	输入条件	观测量	仿真对齐方法	一致性判据	备注
静态强度试验	合成载荷为设计载荷1.2倍，加载速率与保载时间按材料准则设定	危险截面最大应力与局部应变场	加载路径一致，夹具柔度按接口刚度标定，测点与网格节点对应	最大应力相对误差不超过10，名义应力低于材料屈服	应变花与数字图像相关同步采集
随机振动试验	GJB150.16分段直线功率谱密度，20至2000 Hz，基座三向闭环复制	法兰三向加速度、位移传递率、谱内峰值	基座控制谱匹配，传感器位置一致，频域处理参数一致	传递率峰值偏差不超过0.05，模态频率偏差不超过5，阻尼比偏差不超过0.02	加速度计与力锤在试前完成溯源校准
预紧与接触标定	预紧力按装配规范设定，摩擦系数按表面处理工艺取值	接口等效刚度与滑移阈值	扭矩角法与超声法联合校核，接触参数回标至有限元模型	接口刚度偏差不超过15，滑移阈值偏差不超过10	用于支撑仿真与实验一致性对比

4.2 工程案例验证

鉴于机背整流罩内通信天线对宽频随机与冲击耦合激励的敏感性，本研究选取一型中程无人机整流罩内通信天线支架作为工程对象，把参数化建模、减振材料选型与仿真优化贯穿于定型流程。围绕隔振器中心距与极向角、筋板分区厚度、螺栓孔群偏置以及预紧力开展协同配置；激励谱在20至2000 Hz范围内复现实装环境并叠加半正弦冲击，材料卡片写入温度依赖。在统一边界与接口刚度标定条件下，优化收敛时关键指标对比为振动传递率由0.6降至0.3，最大名义应力由300 MPa降至245 MPa。由此能够把共振风险在主肋带内进行有效规避，并把强度裕度回归至屈服以下的安全域；进一步观察表明，前者来源于固有频率与阻尼的协同调校，后者归因于筋板路径重构与接触刚度调节引起的载荷再分配。参数更新同步回写至主模型与工艺文件，隔振件按硬度分档进行配置，装配规范明确扭矩角区间与防腐体系，使优化方案在生产线实现闭环复现并具备跨机型的移植性^[5]。

5 结语

本文提出并验证了面向机载天线支架的减振与强度协同设计路径，通过三维参数化建模将几何尺寸、安装位置、材料与连接状态转化为可优化变量，结合拓扑与几何重建

形成可制造布局；在有限元中引入多螺栓预紧与接触摩擦，联合加速度功率谱密度与半正弦冲击进行频域与时域评估，并以固有频率、阻尼比、接口刚度与名义应力构成约束集；在材料层面选用聚醚型聚氨酯配置隔振特性，实现固有频率与损耗因子的协同调校。工程应用显示，传递率峰值显著压低，危险截面应力回归安全域，验证了方法的有效性与可落地性。后续工作将面向隔振件非线性与温度老化的长期效应开展识别与建模，完善疲劳与耐久准则，进一步引入鲁棒优化与制造偏差建模，并探索健康监测与参数回标机制，以提升跨平台推广与全寿命周期保障能力。

参考文献

[1] 彭磊.某机载相控阵天线振动故障分析及验证[J].环境技术,2025,43(06):90-96.

[2] 高爱国,郁大照,黄鹤翔.机载微带天线高功率微波耦合效应研究[J].系统工程与电子技术,

[3] 孙远涛,王小宇,田凤桢.可扩展片式天线结构设计及力学环境适应性分析[J].雷达科学与技术,2025,23(02):176-181+191.

[4] 杨瑛杰,商龙,吴军锋.基于信号与系统理论的机载设备电磁辐射特性分析与设计[J].电子元器件与信息技术,2025,9(06):116-118.

[5] 乔建江,王宝宝,张冰,张少辉,于卫东.结构因素对遥感天线跟踪精度影响分析及对策[J].无线电通信技术,2024,50(01):213-218.