

直升机平台振动环境预测与振动环境谱设计方法

陈雪晴¹, 刘瑜², 贺琼瑶³, 吴遥³

(1.中国航空综合技术研究所, 北京 100028; 2.中国兵器工业标准化研究所, 北京 100080;
3.西南技术工程研究所, 重庆 400039)

摘要: **目的** 基于直升机平台振动环境实测数据, 分析预测直升机振动环境, 设计直升机平台振动环境谱。**方法** 基于直升机振动由宽频域随机振动与周期性振动分量叠加而成的特性, 识别并分离周期信号, 提出基于主成分分析的周期幅值预测方法。在此基础上, 分别对周期信号和随机信号进行统计归纳和分析预测, 进而合成振动环境谱。**结果** 使用此方法对直升机平台的振动数据进行处理, 得到直升机平台的振动环境谱。**结论** 构建了直升机振动谱设计新范式, 实现了直升机环境条件设计方法突破。
关键词: 直升机; 周期信号; 主成分分析; 统计归纳; 分析预测; 振动环境谱
中图分类号: V216.5+1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9242(2025)04-0067-08
DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2025.04.009

Prediction of Vibration Environment of Helicopter Platforms and Design Method of Vibration Environmental Spectrum

CHEN Xueqing¹, LIU Yu², HE Qiongyao³, WU Yao³

(1. China Aviation Comprehensive Technology Research Institute, Beijing 100028, China; 2. China Ordnance Industrial Standardization Research Institute, Beijing 100080, China; 3. Southwest Institute of Technology Engineering, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: The work aims to analyze and predict the vibration environment of the helicopter, and design the vibration environmental spectrum of the helicopter platform based on the measured vibration environmental data of the helicopter platform. Based on the characteristic that helicopter vibration was composed of the superposition of broadband random vibration and periodic vibration components, the periodic signals were identified and separated, and a periodic amplitude prediction method based on principal component analysis was proposed. On this basis, statistical induction, analysis and prediction were carried out for the periodic signal and the random signal respectively, and then the vibration environmental spectrum was synthesized. This method was used to process the vibration data of the helicopter platform to obtain the vibration environment spectrum of the helicopter platform. It constructs a new paradigm for helicopter vibration spectrum design, achieving a breakthrough in the design method of helicopter environmental conditions.

收稿日期: 2025-02-20; 修订日期: 2025-03-13

Received: 2025-02-20; Revised: 2025-03-13

基金项目: 合作基金项目 (HDHDW59A010101)

Fund: Cooperative Fund Project (HDHDW59A010101)

引文格式: 陈雪晴, 刘瑜, 贺琼瑶, 等. 直升机平台振动环境预测与振动环境谱设计方法[J]. 装备环境工程, 2025, 22(4): 67-74.

CHEN Xueqing, LIU Yu, HE Qiongyao, et al. Prediction of Vibration Environment of Helicopter Platforms and Design Method of Vibration Environmental Spectrum[J]. Equipment Environmental Engineering, 2025, 22(4): 67-74.

KEY WORDS: helicopter; periodic signal; principal component analysis; statistical induction; analysis and prediction; vibration environmental spectrum

航空旋翼系统的振动谱呈现宽频域基底叠加离散谱线的复合特征。离散谱线源于旋翼系统旋转机械组件产生的周期激励信号,其基频与各部件转速及其谐波成分严格对应。宽频域基底由低能量级谐波分量与空气动力湍流激励的随机振动成分共同构成,符合GJB 150.16A—2009 军用装备振动试验要求的谱特性描述。现有研究表明,该振动系统的激励源具有多物理场耦合特征^[1-4]。工程实测数据显示,不同构型旋翼飞行器的振动能级分布及谱特征呈现显著差异性,同型机因振源空间配置、结构拓扑参数及动态刚度矩阵的差异,其振动响应谱方差可达12 dB以上^[5]。统计资料表明,航空电子设备约27%的功能失效溯源至此类复合振动环境作用^[6],而传统基于经验公式的振动环境预测方法难以精确表征直升机平台振动严酷程度,导致振动试验条件设计与实际工况存在显著偏差。鉴于此,GJB 150中推荐基于实测数据制定振动环境条件。

近年来,不少研究人员针对直升机振动实测数据开展了振动预测和振动试验条件设计等研究工作。在直升机振动预测方面,部分研究人员基于实测数据,分析了飞行参数与振动量值之间的规律,实现故障诊断、健康管理和降低飞行风险等^[7-13]。部分研究人员基于理论推导^[14-16]或有限元建模^[17-20]分析了直升机振动量值变化规律,确定直升机的振动响应。直升机振动环境条件制定方面,主要集中在标准解读和标准应用方面^[21-24],缺少基于实测数据的振动环境条件设计方法研究。

针对上述问题,基于直升机振动由宽频域随机振动与周期性振动分量叠加而成的特性,本文提出了一套适用于直升机振动环境的预测方法和振动环境条件设计方法。首先,识别并分离周期信号,分析周期幅值随飞行参数的变化趋势;其次,提出基于主成分分析的周期幅值预测方法;最后,分别对周期信号和随机信号进行分析预测和统计归纳,进而合成振动试验谱。

1 一般流程

振动环境试验谱的构建过程主要分为3个阶段:数据预处理及特征分析阶段、数据特征归纳阶段、振动环境谱设计阶段。结合直升机振动信号的特点,构建了适用于直升机平台的振动环境谱设计标准化流程,其流程架构如图1所示。具体实施步骤阐述如下:根据典型任务状态截取振动样本数据;对振动样本进

行数据检查与修正,包括异常点剔除、趋势向消除等;对于周期分量,计算振动样本的傅里叶谱,确定振动的主导周期频率,基于功率谱密度分析,提取主导周期频率幅值,分析主导周期频率幅值随飞行状态参数的变化趋势对极限状态的主导周期频率幅值进行归纳或预测,确定主导周期频率极值,考虑不确定系数,形成周期振动谱;对于随机分量,计算振动样本的功率谱密度,结合周期频率,通过分离处理获取随机振动分量的功率谱密度,对随机功率谱密度统计归纳形成上限谱,计算上限谱的1/6倍频程谱,工程化处理

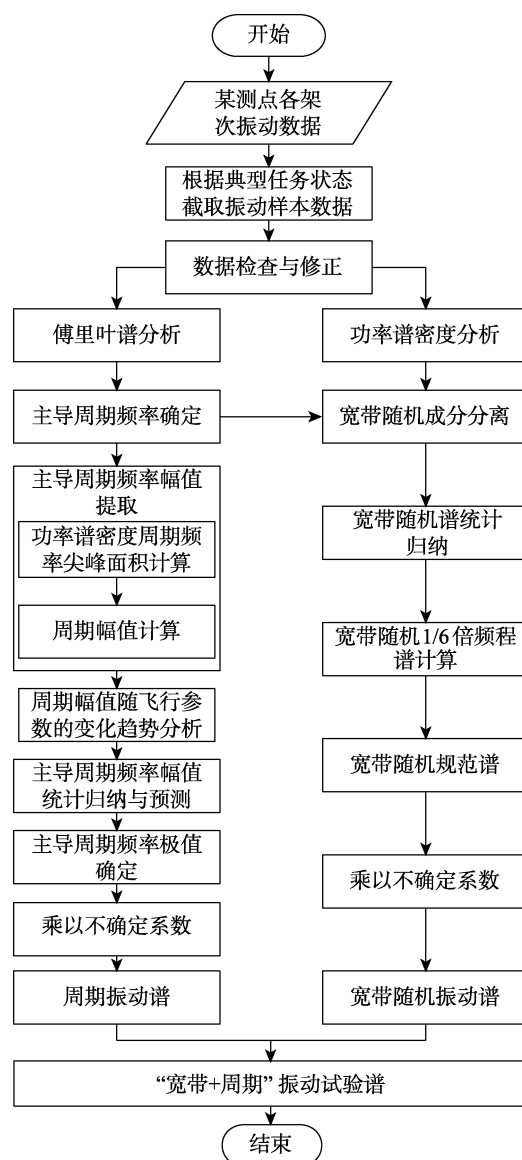


图1 直升机平台振动环境谱设计的一般流程
Fig.1 General process for design of vibration environment spectrum for helicopter platform

形成随机规范谱, 考虑不确定系数, 形成随机振动谱; 将周期成分归纳幅值和随机成分的规范谱叠加, 形成“宽带+周期”的振动谱。

2 关键处理方法

直升机振动环境条件设计的核心技术手段涵盖 2 个维度: 首先是宽带随机振动与周期振动信号的分离技术; 其次是依托主成分分析技术的周期频率幅值预测方法。

2.1 周期频率幅值提取与宽带随机成分分离

首先需要结合直升机旋转部件信息和傅里叶谱峰值频率确定主导周期频率。通常直升机主导周期振动频率主要为旋翼基频及倍频、尾桨基频及倍频、主减速器、中减速器、尾减速器输入(输出)基频等。考虑到不同飞行状态下, 各周期频率幅值大小存在变

化, 因此在确定主导周期频率时, 需结合各个飞行状态的周期频率幅值综合确定主导周期频率。

其次, 确定主导周期频率幅值。传统确定周期频率幅值的方法主要有 2 种: 一是对原始振动时域数据进行带通滤波, 提取滤波后的周期幅值; 二是计算傅里叶谱, 提取周期频率附近最高谱值作为周期幅值。这 2 种方法均存在缺陷——提取的周期幅值均混有随机成分。另外, 由于傅里叶谱周期频率峰值附近总会存在多个幅值较高的频率, 通过傅里叶谱周期频率附近最高峰值提取的周期幅值偏小。因此, 借鉴文献[25]中的工程截取等效法, 分析计算振动样本的功率谱密度, 如图 2 所示。在主导周期频率两侧存在明显转折点(如图 2 中的 161、174 Hz)处拦腰截断, 计算截线以上的功率谱密度曲线所围成的面积 A , 则周期幅值 A 等于 $\sqrt{2A}$ 。除掉功率谱密度中的周期成分, 经分离处理后剩余的信号成分即对应随机振动分量的功率谱密度。

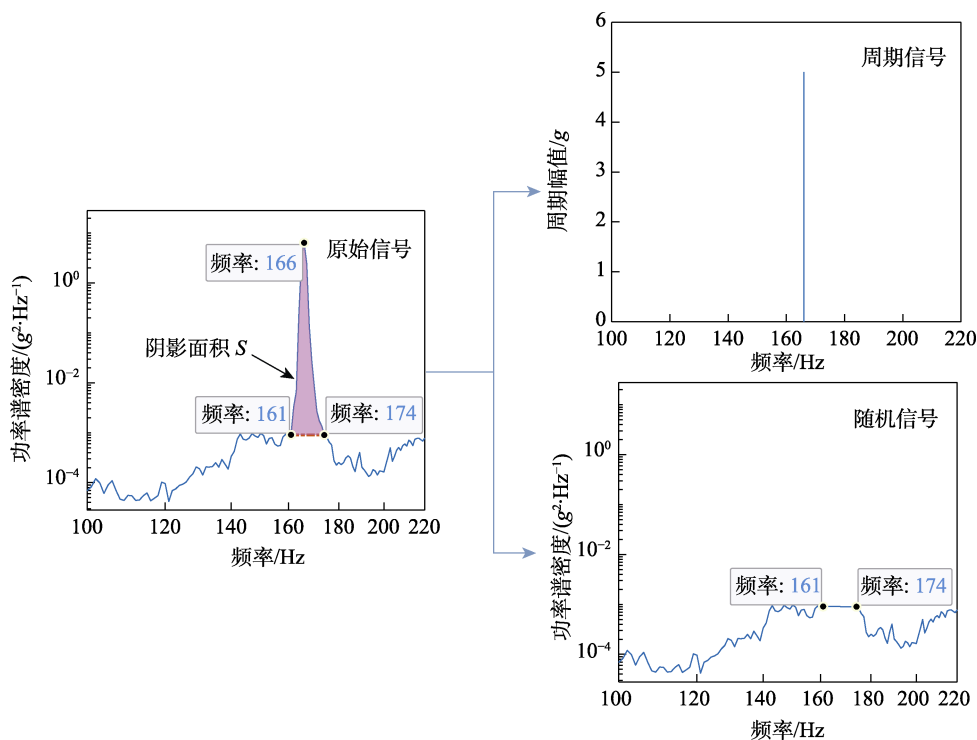


图 2 周期信号与随机信号分离示意

Fig.2 Schematic diagram of separation of periodic signals and random signals

2.2 基于主成分分析的周期频率幅值预测

受限于成本、时间等因素, 收集的振动实测数据覆盖的状态是有限的。当实测数据未覆盖振动极限状态时, 则需要结合振动量值与飞行参数的变化趋势, 建立振动预测模型。通常与周期频率幅值呈现相关性的飞行参数较多, 如总压、表速、纵向过载、滚转角、发动机动力涡轮输出扭矩等。若使用所有与周期频率幅值相关的飞行参数建立待拟合方程, 则待回归的未

知系数极多, 在实测数据样本收集量有限的情况下, 利用回归计算来确定未知系数时, 会产生较大误差, 这样很难构建出具有可信度的预计模型。实际上, 各个飞行参数之间存在着相关性, 并非处于完全相互独立的状态。鉴于此, 可以先运用主成分分析方法对飞行参数展开分析, 从中挑选出累计贡献率超过 90% 的主成分, 进而构建与周期频率幅值相关的预测模型。这样会显著减少未知系数的个数, 回归计算得到的未知系数的误差会减小。

主成分分析的核心在于通过正交线性变换,将存在潜在相关性的变量集合转换为彼此线性无关的变量组合。这些新生成的变量即为主成分。主成分 $\mathbf{S}$ 与原矩阵 $\mathbf{X}$ 、正交变换矩阵 $\mathbf{C}$ 之间的函数关系如公式 (1) 所示。

$$\mathbf{S} = (\mathbf{X} - \boldsymbol{\mu}) \cdot \mathbf{C} \quad (1)$$

式中: $\boldsymbol{\mu}$ 为表原始数据矩阵中各个飞行参数变量的算术平均值。

给定飞行参数矩阵 $\mathbf{X}$ (行为样本,列为不同飞行参数),通过主成分分析会得到主成分 $\mathbf{S}$ 、正交变换矩阵 $\mathbf{C}$ 以及 $\mathbf{S}$ 中每列向量的占比。假如 $\mathbf{S}$ 中第一列 S_1 占比超过 90%,就可以创建一个关联 S_1 和周期频率幅值的预测模型。

3 工程实例

为优化某型直升机平台振动环境条件的制定方法,开展了平台振动环境的实测研究。经数据分析表明,该直升机平台的振动信号呈现出“宽带随机信号叠加周期信号”的复合特征。现选取某测点振动数据作为典型案例,系统阐述直升机平台振动环境谱的设计实施流程。

3.1 主导周期频率确定

对某一测点所有振动样本进行傅里叶谱分析,绘制瀑布图,如图 3 所示。直升机振动环境分析频率上限一般为 2 000 Hz,本示例仅展示 100 Hz 以内的频谱。可以看出,21.2、42.4、63.6、84.4 Hz 处的幅值较大,结合直升机旋转部件信息,以上频率分别为旋翼叶片通过基频、旋翼叶片通过二倍频、旋翼叶片通过三倍频和尾桨叶片通过基频,因此可确定为主导周期频率。从图 3 中还可以看出,除了以上频率外,还存在很多幅值较小的频率。由于其幅值与宽带背景量值接近,因此可将低量值的周期幅值按宽带信号处理。

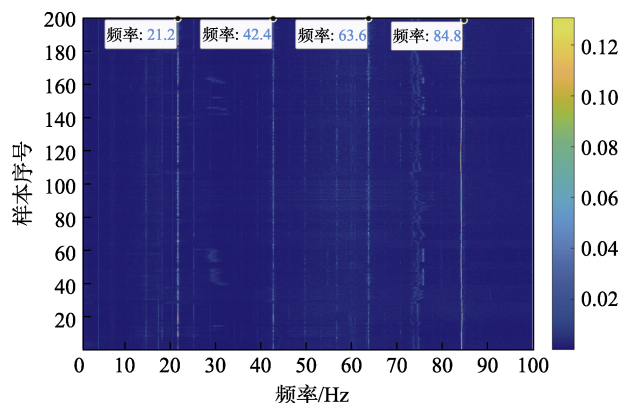


图 3 振动样本傅里叶谱瀑布图

Fig.3 Fourier spectrum waterfall diagram of vibration samples

3.2 主导周期频率幅值提取与随机成分分离

根据 2.1 节所述方法,首先依据功率谱密度曲线,确定截取主导周期频率的上下限范围。其次,计算截取尖峰的面积 Δ ,进而计算周期幅值 A 等于 $\sqrt{2\Delta}$ 。最后,截掉尖峰后的剩余部分即为随机成分,如图 4 所示。

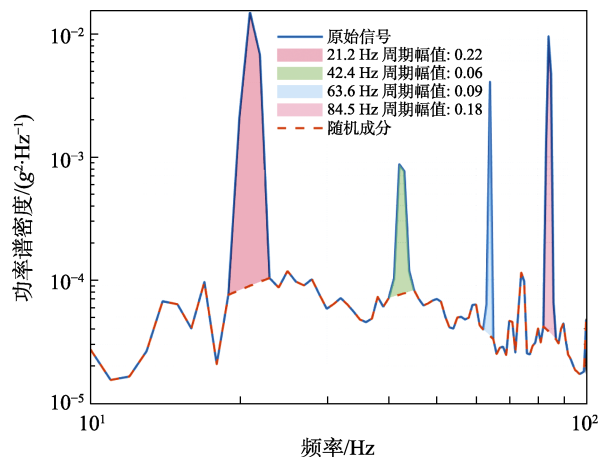


图 4 主导周期频率幅值提取与随机成分分离

Fig.4 Extraction of dominant cyclic frequency amplitude and separation of random components

3.3 主导周期频率幅值统计归纳与预测

选取 21.2、42.4、63.6、84.4 Hz 的幅值,分析幅值与飞行参数的相关系数,如图 5 所示。

从图 5 中可以看出,21.2、42.4、63.6 Hz 周期频率幅值与飞行参数的相关性不明显 (相关系数小于 0.7),难以建立可信的振动预测模型。因此,这 3 个周期频率幅值直接以统计归纳上限作为振动条件即可。84.4 Hz 周期频率幅值与总压、纵向过载、水平速度、侧滑角、左发输出扭矩、右发输出扭矩、表速有明显的相关性 (相关系数大于 0.7),可考虑将上述飞行参数作为振动预计模型的输入参数。同时,又考虑到水平速度和表速以及左发输出扭矩和右发输出扭矩是相似参数,总压与速度相关,因此只需将纵向过载、水平速度、侧滑角、左发输出扭矩作为振动预计模型的输入参数。

对周期幅值随纵向过载、水平速度、侧滑角以及左发输出扭矩的变化趋势展开分析,如图 6 所示。由图 6 可见,周期幅值随水平速度、纵向过载、侧滑角及左发输出扭矩的变化趋势呈现相似特征,表明这 4 个飞行参数之间存在显著相关性。基于此,可采用主成分分析 (PCA) 方法对上述参数进行降维处理,从而减少拟合方程中待回归参数的数量。

根据 2.2 节所述方法,运用主成分分析方法处理水平速度、纵向过载、侧滑角与左发输出扭矩参数,由此得到主成分矩阵 $\mathbf{S} = [S_1 \ S_2 \ S_3 \ S_4]$ 以及各主

直升机平台振动环境谱通常采用“宽带随机+周期”的形式。对于宽带随机振动谱,可直接对随机成分进行统计归纳并工程化处理,得到宽带随机规范谱。对于周期振动谱,依次预测各个主导周期频率幅值。同时,考虑不确定系数,叠加形成振动环境谱,如图8所示。

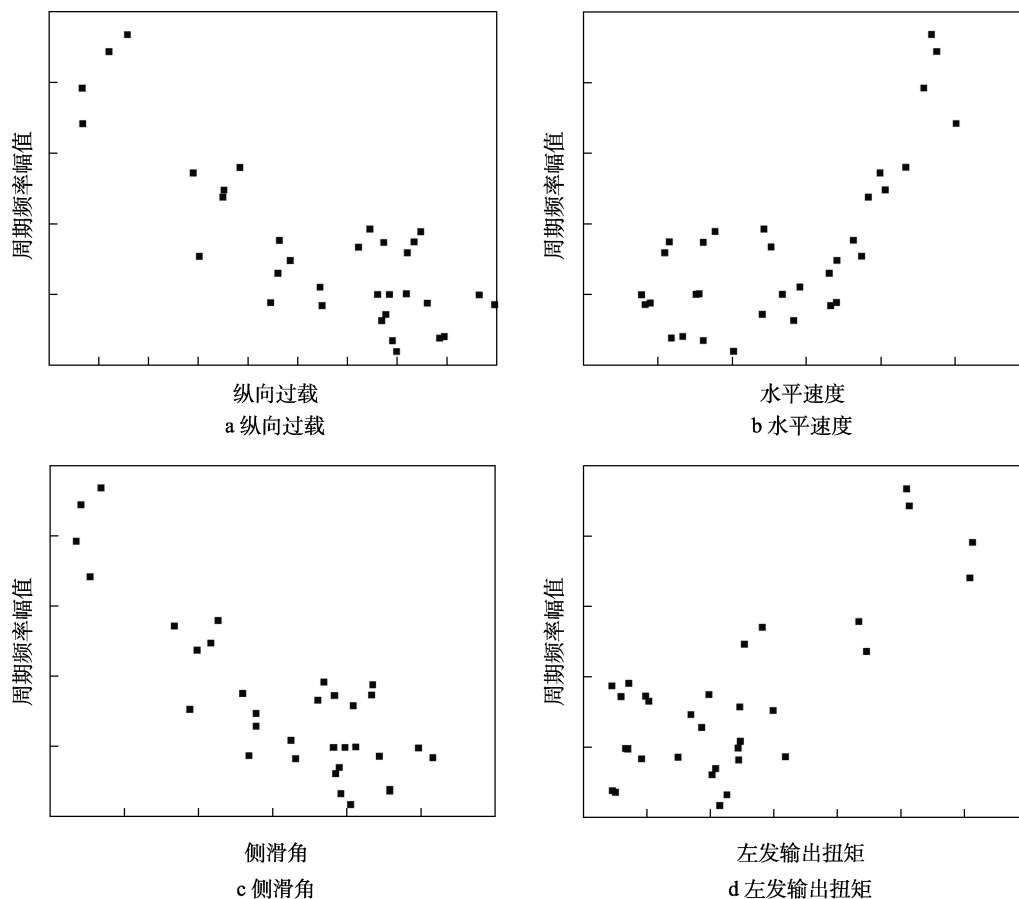


图 6 周期幅值随飞行参数变化趋势

Fig.6 Variation trend of cyclic amplitude with flight parameters: a) vertical overload; b) horizontal speed; c) side slip angle; d) left engine output torque

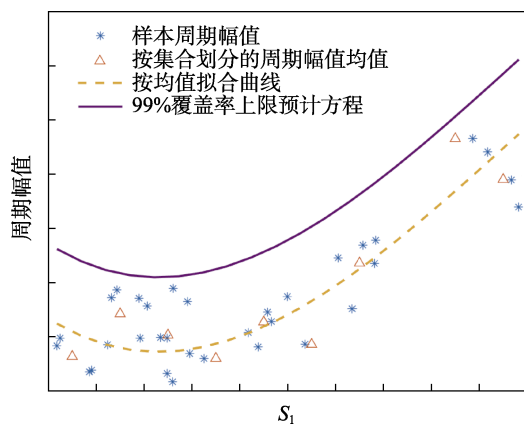
图 7 周期幅值随主成分 S_1 变化规律

Fig.7 Variation law of cyclic amplitude with principal component S_1

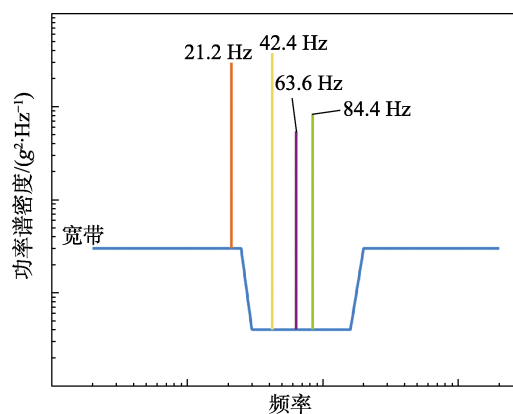


图 8 直升机平台振动环境谱示意

Fig.8 Schematic diagram for vibration environmental spectrum of helicopter platform

4 结论

文中提出了一种直升机平台振动环境的预测方法和振动环境谱设计方法, 经由工程实际案例, 检验并确认了此方法的可行性, 得出以下结论:

1) 提出的周期和随机分离方法适用于具有“宽带随机叠加窄带尖峰”复合振动信号特征的信号分离处理与特征归纳。

2) 构建的振动环境谱设计方法为直升机平台振动环境条件设计开辟了新路径, 对提升直升机平台环境适应性设计与验证能力具有重要参考价值。

参考文献:

- [1] 余瑾, 李建伟, 金坤健, 等. 直升机小速度前飞状态下的振动机理研究[J]. 直升机技术, 2024(2): 5-13.

- YU J, LI J W, JIN K J, et al. Research on the Mechanism of Vibration of the Helicopter in Low Advance Ratio[J]. Helicopter Technique, 2024(2): 5-13.
- [2] 程巾英, 佟勇, 张冰. 直升机细长尾传动轴振动过大影响因素及改善措施分析[J]. 中国机械, 2024(7): 14-17.
CHENG J Y, TONG Y, ZHANG B. Analysis of Influencing Factors and Improvement Measures of Excessive Vibration of Helicopter Slender Tail Transmission Shaft[J]. Machine China, 2024(7): 14-17.
- [3] 郑坤, 薛晨, 吕一鸣, 等. 某型直升机空中低频振动原因分析及问题处理[J]. 河南科技, 2023, 42(10): 44-47.
ZHENG K, XUE C, LYU Y M, et al. Cause Analysis and Problem Solving of a Fault on Low Frequency Vibration in Air Condition of a Certain Helicopter[J]. Henan Science and Technology, 2023, 42(10): 44-47.
- [4] 沈安澜, 侯宝红, 李平, 等. 直升机空中异常筛振现象分析[J]. 直升机技术, 2023(1): 52-55.
SHEN A L, HOU B H, LI P, et al. Analysis of Abnormal Sieve Vibration of a Helicopter[J]. Helicopter Technique, 2023(1): 52-55.
- [5] 军用装备实验室环境试验方法 第16部分: 振动试验: GJB 150.16A—2009[S].
Laboratory environmental test methods for military materiel. Part 16: Vibration test: GJB 150.16A—2009[S].
- [6] 刘世卿. 航电设备结构的抗振性设计[J]. 机械工程师, 2014(5): 66-69.
LIU S Q. Avionics Architecture Design under Vibration Environment[J]. Mechanical Engineer, 2014(5): 66-69.
- [7] 张武林, 樊征兵, 高文涛. 直升机传动系统振动预测技术研究[J]. 航空科学技术, 2017, 28(7): 1-6.
ZHANG W L, FAN Z B, GAO W T. Study on Vibration Prediction Technology of Helicopter Transmission System[J]. Aeronautical Science & Technology, 2017, 28(7): 1-6.
- [8] 张武林. 基于振动预测的直升机振动故障分析[J]. 现代机械, 2019(5): 26-30.
ZHANG W L. Vibration Fault Analysis of Helicopter Based on Vibration Prediction Technology[J]. Modern Machinery, 2019(5): 26-30.
- [9] 张武林, 李小路, 高文涛. 基于振动预测的直升机监控方案设计[J]. 中国测试, 2020, 46(2): 117-123.
ZHANG W L, LI X L, GAO W T. Design of Helicopter Monitoring Program Based on Vibration Prediction Technology[J]. China Measurement & Test, 2020, 46(2): 117-123.
- [10] 高文涛. 某型直升机输入级振动问题研究[J]. 航空科学技术, 2017, 28(2): 25-28.
GAO W T. Study on the Input Stage Vibration Problem for a Helicopter[J]. Aeronautical Science & Technology, 2017, 28(2): 25-28.
- [11] 冯维超. 基于机载振动监测系统的直升机飞行状态识别方法[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(7): 133-136.
FENG W C. Helicopter Flight Status Recognition Method Based on Airborne Vibration Monitoring System[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2020, 39(7): 133-136.
- [12] 林泽力, 王景霖, 郑国, 等. 基于灰色预测的直升机齿轮箱状态预测方法[J]. 计算机测量与控制, 2016, 24(6): 24-26.
LIN Z L, WANG J L, ZHENG G, et al. State Prediction of Helicopter Gearbox Based on Grey Prediction Method[J]. Computer Measurement & Control, 2016, 24(6): 24-26.
- [13] 张毅. 直升机异常振动分析[J]. 科学技术创新, 2024(10): 203-206.
ZHANG Y. Analysis of the Abnormal Vibration of the Helicopter[J]. Scientific and Technological Innovation, 2024(10): 203-206.
- [14] 朱艳, 凌爱民, 陈全龙. 机体振动响应预测与减振分析[J]. 直升机技术, 2015(1): 13-18.
ZHU Y, LING A M, CHEN Q L. Fuselage Vibration Response Forecast and Vibration Reduction Research[J]. Helicopter Technique, 2015(1): 13-18.
- [15] 姚颂, 芮筱亭, 王景弘. 直升机悬停状态下的振动计算[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021, 53(6): 104-111.
YAO S, RUI X T, WANG J H. Calculation of Helicopter Vibration in Hovering State[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 53(6): 104-111.
- [16] 王司文, 韩景龙, 员海玮. ABC 共轴直升机旋翼/机身耦合振动响应分析[J]. 振动工程学报, 2023, 36(5): 1318-1325.
WANG S W, HAN J L, YUN H W. Analysis of Coupled Rotor/Fuselage Vibration Response of ABC Coaxial Helicopter[J]. Journal of Vibration Engineering, 2023, 36(5): 1318-1325.
- [17] 虞汉文, 韩普祥, 郭光海. 直升机振动响应计算方法研究[J]. 直升机技术, 2006(1): 17-22.
YU H W, HAN P X, GUO G H. Investigation of Calculation Method on Helicopter Vibration Response[J]. Helicopter Technique, 2006(1): 17-22.
- [18] 冯志壮, 代志雄, 刘晨. 基于直升机耦合分析的振动响应预测研究[J]. 装备环境工程, 2020, 17(9): 7-14.
FENG Z Z, DAI Z X, LIU C. Vibration Response Prediction Based on Helicopter Coupling Analysis[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(9): 7-14.
- [19] 王影, 王文涛, 习娟. 旋翼激励下直升机振动响应预计及实测对比[J]. 应用力学学报, 2023, 40(2): 253-258.
WANG Y, WANG W T, XI J. Prediction and Comparing with Measurement of Helicopter Vibration Response Excited by Rotors[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2023, 40(2): 253-258.
- [20] 蒋函成, 魏静, 张爱强, 等. 某直升机主减传动系统振动能量传递特性研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(7): 95-104.
JIANG H C, WEI J, ZHANG A Q, et al. Vibration Energy Transfer Characteristics of Main Reducer Transmission System of a Helicopter[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(7): 95-104.
- [21] 张曾锟, 章光裕. 直升机机载设备飞行振动环境试验

- 条件设计[J]. 直升机技术, 1996(4): 29-34.
- ZHANG Z C, ZHANG G Y. Design of Vibration Environment Test Conditions for Helicopter Equipment[J]. Helicopter Technique, 1996(4): 29-34.
- [22] 马旭东. 欧美直升机机载设备振动环境试验要求通用规范发展探讨[J]. 中国设备工程, 2018(7): 171-172.
- MA X D. Discussion on the Development of General Specification for Vibration Environment Test Requirements of Helicopter Airborne Equipment in Europe and America[J]. China Plant Engineering, 2018(7): 171-172.
- [23] 温青山, 王峰, 时丽, 等. 直升机机载设备振动试验谱实测剖面制定方法研究[C]// 第二十届中国航空测控技术年会论文集. 西安: 航空工业测控技术发展中心, 2023.
- WEN Q S, WANG F, SHI L, et al. Research on the Method for Developing the Measured Profile of Helicopter Airborne Equipment Vibration Test Spectrum[C]// Proceedings of the 20th China Aviation Measurement and Control Technology Annual Conference. Xi'an: Measurement and Control Technology Development Center of Aviation Industry, 2023.
- [24] 姜甲玉, 王光芦, 王武. 关于 GJB 899A 军用直升机综合环境条件的探讨[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2020, 38(3): 67-72.
- JIANG J Y, WANG G L, WANG W. Discussion on Comprehensive Environmental Conditions of Military Helicopter in GJB 899A[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2020, 38(3): 67-72.
- [25] 申加康, 张建军, 傅耘. 一种飞机发动机影响区设备的可靠性试验剖面设计方法[J]. 装备环境工程, 2021, 18(7): 29-37.
- SHEN J K, ZHANG J J, FU Y. Design Method for Reliability Test Profile of Equipment in the Affected Area of Aircraft Engine[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(7): 29-37.