

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.02.015

某型辅助动力装置减振器高低温动态特性研究

王晗¹, 黄江彪², 沙景恬¹, 曾棟杰¹, 谭方²

(1. 上海飞机设计研究院, 上海 201210; 2. 株洲时代新材料科技股份有限公司, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 对某型民用飞机硅橡胶 APU 减振器高低温传递率进行试验研究, 并根据传递率数据分析动态刚度和阻尼损耗因子的变化规律。传递率试验结果显示: 温度升高, 共振频率和共振放大倍数随之增加; 温度降低, 共振频率随之略有减小, 同时共振放大倍数明显减小。在低温条件下, 减振器高频处传递率增加, 减振效会变差。随着温度上升, 阻尼损耗因子逐渐减小。动态刚度随温度变化不显著, 减振器动态刚度表现出较宽的温度适应性。

关键词: 民用飞机辅助动力装置; 减振器; 传递率; 温度; 动态刚度; 阻尼损耗因子

中图分类号: V228.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2026)02-0076-05

Research on Dynamic Characteristics of Vibration Isolator for Auxiliary Power Unit under High and Low Temperatures

WANG Han¹, HUANG Jiangbiao², SHA Jingtian¹, ZENG Dongjie¹, TANG Fang²

(1. Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China;

2. Zhuzhou Times New Material Technology Co., Ltd., Zhuzhou 412007, China)

Abstract: This article studies the transmissibility of the silicon rubber Auxiliary Power Unit (APU) vibration isolator for a civil aircraft under high and low temperatures, and analyzes the dynamic stiffness and damping loss factor variation patterns based on the transmissibility data. The results of the transmissibility tests indicate that with an increase in temperature, the resonance frequency and resonance amplification factor both increase, while with a decrease in temperature, the resonance frequency slightly decreases, and the resonance amplification factor significantly decreases. At low temperatures, the transmissibility increases at the high-frequency range, leading to a decrease in vibration reduction effectiveness. As the temperature rises, the damping loss factor gradually decreases. The dynamic stiffness shows little significant variation with temperature, demonstrating a broad temperature adaptability of the vibration isolator.

Keywords: APU; vibration isolator; transmissibility; temperature; dynamic stiffness; damping loss factor

0 引言

民用飞机辅助动力装置(auxiliary power unit, APU)的主要功能是为发动机启动和空调系统提供引气,同时可以通过驱动发电机来提供电功率^[1-3]。通常 APU 为小型燃气涡轮发动机,其工作时压气机、涡轮、发电机等部件的转动会产生振动^[4-5],在 APU 与飞机结构间安装减振器可以有效降低 APU 与飞机机体间振动传递,降低 APU 噪声传递,提高飞机的舒适性以及 APU 使用的可靠性^[6-8]。橡胶材料因其具有高弹性、大变形和良好的阻尼特性,被广泛应用于各类减振产品。硅橡胶减振器因其较高的温度适应性在航空领域应用更为广泛^[9-11]。

传递率、动态刚度和阻尼系数等特性是评价

橡胶减振器的减振性能以及进行减振系统设计的重要参数^[12-14]。温度对于橡胶减振器特性影响较为显著^[15-16],民用飞机 APU 减振器需要满足高低温环境要求。为此,本文针对某型民用飞机硅橡胶 APU 减振器高低温传递率进行了试验研究,同时根据传递率数据分析了动态刚度和阻尼损耗因子的变化规律,为同类型的民用飞机 APU 减振器设计提供基础参考数据。

1 试验

1.1 试验对象

通常民用飞机 APU 通过其发动机上的安装节、减振器以及拉杆与机身结构连接^[17-18],本文所研究的 APU 减振器如图 1 所示,主要由金属外壳、橡胶硫化体、金属盖板以及金属芯轴组成。金

第一作者简介: 王晗(1991—),男,河北怀安人,高级工程师,硕士,研究方向为飞机 APU 系统安装设计, wanghan1@comac.cc。

属材料均为不锈钢,橡胶为硅橡胶。其中金属外壳上带有耳片,与飞机上的拉杆及机身结构相连接,金属芯轴则通过支座与 APU 发动机安装节连接。APU 发动机产生的振动从金属芯轴经橡胶硫化体衰减后通过金属外壳传递至飞机机体结构。反之,机身产生的振动也经此路径反向传递给 APU。减振器中的橡胶硫化体成圆柱状,可以同时减小轴向和径向的振动传递。通常 APU 通过 3 个减振器与飞机进行连接,本文以其中一个减振器的轴向传递特性为代表进行研究。

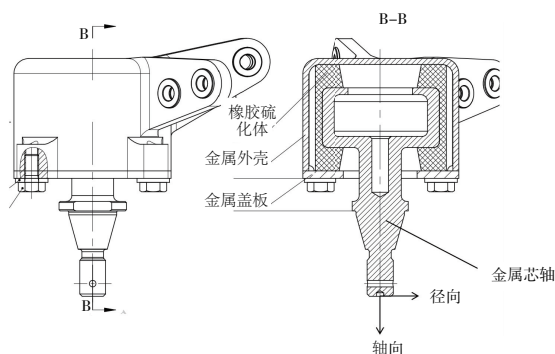


图1 某型 APU 减振器介绍

APU 工作时,包含发电机频率 200 Hz 和自身的转自频率 750~820 Hz,与减振器高频的衰减特性规律接近,因此 200 Hz 的作为典型的高频率,进行传递率随温度变化规律的研究。对于低频部分,共振放大倍数是重点考虑因素,因此通过试验系统重点研究共振放大倍数随温度的变化规律。

1.2 试验系统介绍

根据 GB/T15168—2013《振动与冲击隔离器静、动态性能测试方法》以及减振器的安装状态,设计试验台架系统如图 2 所示。试验台架由振动台、工装夹具、减振器、配重以及加速度传感器组成。壳通过壳体压板、工装盖板以及紧固件,将减振器外壳与工装主体进行连接。配重块则通过转接块及紧固件与减振器芯轴进行连接。工装主体则通过紧固件与振动台相连接。为避免温度对工装有所影响,所有工装均为 45 号钢材。配重是模拟被隔离系统的质量,减振器则为隔振系统提供需要的动态刚度和阻尼,工装主体和振动台连接提供所需的振动激励。

如图 2 所示,输入端加速度传感器(控制传感器)通过胶水粘接到减振器外上方工装盖板顶部,用于控制振动量值的输入。输出端加速度传感器

通过胶水粘接在配重块上表面靠近与芯轴连接的区域,用于测量经过减振器后配重块上的振动响应。测量传感器(输出端)与控制传感器(输入端)加速度传感器之比即为传递率。

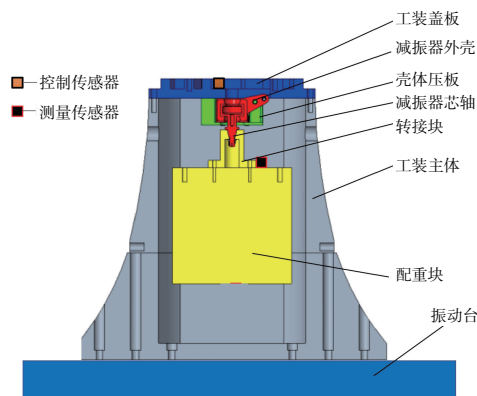


图2 试验系统台架介绍

1.3 试验件及试验设备

试验件为某型 APU 减振器,由金属外壳、橡胶弹性体以及金属芯轴等组成。橡胶弹性体为硅橡胶材料。

试验设备如表 1 所示,振动台和振动控制仪提供振动输入,三综合试验箱为减振器提供所需的环境温度,加速度传感器则用于测量减振器输入和输出端的振动加速度值。

表1 试验设备

设备名称	型号	用途
振动台	MPA3436/H1859A	提供振动激励
三综合试验箱	TH15-3000DHVB	控制试验件 周围环境温度
振动控制仪	VR9500	控制振动输入
加速度传感器	B02Y41 7253DM3-100	测量减振器输入 输出端的振动

1.4 试验方法

将试验件与实验工装、配重连接好后,安装配有三综合试验箱的振动台上,配重质量为 67.6 kg。将振动传感器按照图 2 所示安装到减振器输入端和减振器输出端。分别在常温(26℃)、-55℃、-35℃、80℃以及 121℃ 5 种温度条件下开展扫频试验,扫频加速度量值为 0.5g,频率范围为 10~1 000 Hz,扫频速率为 1 Oct/min。除了每个温度条件下保温至少 3 h 以使内部温度达到稳定。

2 分析讨论

2.1 高低温传递率试验结果

不同温度下的传递率曲线结果如图3所示。

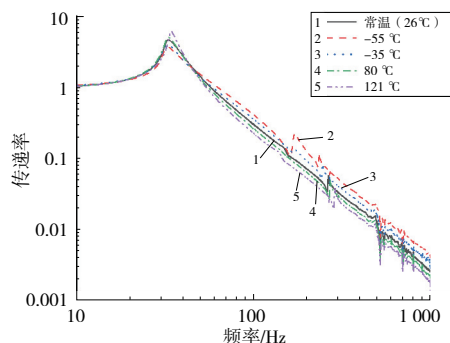


图3 不同温度传递率试验结果

由图3可以看出,与常温条件相比,随着温度的升高,传递率峰值向右移动,即共振频率增加,并且共振频率的传递率(即共振放大倍数)也增加;随着温度的降低,共振峰值略微左移,即共振频率略有减小,而共振放大倍数随之减小。

不同温度下的共振频率、共振放大倍数以及200 Hz下的传递率结果如表2所示。

表2 不同温度传递率试验数据

温度/℃	共振频率/Hz	共振放大倍数	200 Hz处传递率
-55	32.8	3.68	0.125
-35	33.2	3.89	0.092
26(常温)	33.2	4.62	0.071
80	33.1	5.01	0.063
121	34.3	6.12	0.053

由表2可以看出,与常温条件相比,随着温度升高,共振放大倍数由4.62增加至6.12,共振频率由33.2 Hz增加至34.3 Hz。随着温度的降低,共振放大倍数由4.62降低至3.68,而共振频率则略有减小,由33.2 Hz略减小至32.8 Hz。

此外,与常温条件相比,随着温度的升高,高频部分的传递率减小,而随着温度降低高频处的传递率增大。以200 Hz处的传递率为例,与常温条件相比,随着温度的升高,200 Hz处的传递率由0.071减小至0.053;随着温度的降低,200 Hz处的传递率,由0.071增加至0.125。而APU本体相关转子频率均为高频振动。由此可以看出,低温条件下,减振器高频处传递率增加,减振效果会变差。

2.2 动态刚度及阻尼损耗因子计算方法

根据GB/T15168—2013《振动与冲击隔离器静、动态性能测试方法》,当激励为基础时,激励扫频法的测试动态刚度和阻尼损耗因子的力学模型如图4所示。

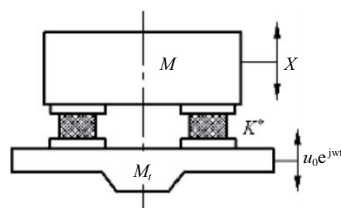


图4 基础激励减振系统力学模型^[19]

根据上述力学模型及相关理论,当系统假定为结构阻尼,刚度为线性复刚度,基础台面激励为 $u = u_0 e^{j\omega t}$ 时,有以下运动方程:

$$M\ddot{X} + KX(1+j\eta) = X(1+j\eta)u_0 e^{j\omega t} \quad (1)$$

式中: M 为系统中运动物体的质量,单位为kg; K 为弹性元件动态刚度,单位为N/m; η 为阻尼损耗因子; X 为运动物体的绝对位移,单位为m; $\ddot{X}$ 为运动物体的绝对加速度,单位为 m/s^2 ; ω 为激振圆频率,单位为 rad/s 。

求解运动方程式(1),可以得到以下关系式:

$$T = \frac{X_0}{u_0} = \frac{\sqrt{1+\eta^2}}{\sqrt{[1-(\omega/\omega_n)^2]^2 + \eta^2}} \quad (2)$$

式中: T 为振动传递率; ω_n 为系统的共振圆频率,单位为 rad/s ;

当测得最大传递率 $T_{\max}$ 时,阻尼损耗因子 η 可以按照以下公式求得:

$$\eta = \sqrt{\frac{1}{T_{\max}^2} - 1} \quad (3)$$

减振器的动态刚度则可以按照以下公式计算:

$$K_d = M \left(\omega_n / \sqrt{1 - \frac{\eta^2}{2}} \right)^2 \quad (4)$$

式中 K_d 为减振器的动态刚度,单位为N/m。

2.3 不同温度阻尼损耗因子计算结果

根据表2中的实测结果,按照式(3)和式(4)可分别计算得出不同温度下的阻尼损耗因子以及动态刚度值。

不同温度下的阻尼损耗因子变化情况如图5所示,可以看出阻尼损耗因子随温度变化较为明显,随着温度上升,阻尼损耗因子逐渐减小,在-55℃时阻尼损耗因子为0.28,约是常温条件

的 1.3 倍,而在 121℃ 时阻尼损耗因子下降至 0.17,约为常温条件的 77%。

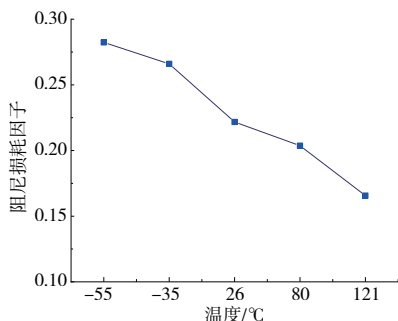


图 5 不同温阻尼损耗因子变化

根据式(2),当设频率比 $D = \frac{\omega}{\omega_n}$,则有:

$$T^2 = \frac{1+\eta^2}{[1-D^2]^2+\eta^2} = \frac{1+\eta^2-2D^2+D^4-(D^4-2D^2)}{[1-D^2]^2+\eta^2} = \frac{[1-D^2]^2+\eta^2-(D^4-2D^2)}{[1-D^2]^2+\eta^2} = 1 - \frac{D^4-2D^2}{[1-D^2]^2+\eta^2} \quad (5)$$

当考虑高频时, $\omega > \sqrt{2}\omega_n$, 即 $D > \sqrt{2}$, 当 D 保持不变时, 可知当 η 越大, T 越大, 因此低温条件下阻尼损耗因子较大, 高频处的传递率增大, 高频减振效果会变差。

2.4 不同温度动态刚度计算结果

不同温度下的动态刚度变化如图 6 所示。从图 6 可以看出, 动态刚度随温度变化不显著, 仅在高温情况下动态刚度略有增加, 其余温度变化不明显。总体来看, 动态刚度值保持在 3 000 N/mm 左右。这说明该减振器动态刚度表现出了较宽的温度适应性。

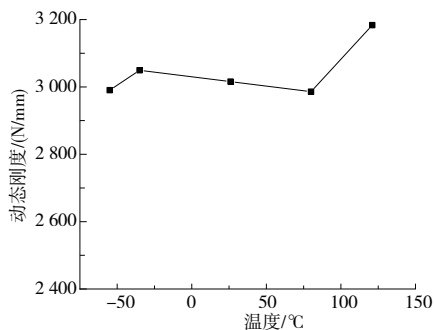


图 6 不同温度动态刚度变化

上文分析结果显示阻尼损耗因子随着温度变化较为显著, 而减振器动态刚度则变化并不显著。这是由于该减振器阻尼损耗因子主要取决于橡胶材料本身特性, 而橡胶材料本身特性受温度影响

较为显著, 因此阻尼损耗因子随温度变化较大。而减振器的动态刚度除了与橡胶材料本身特性相关外, 还与其结构形式密切相关。本文所述的减振器橡胶弹性体是封闭在金属壳体内的压装结构, 温度除了对橡胶材料本身影响外, 还会因为热胀冷缩等特性影响橡胶弹性体的与压缩量, 综合两种因素后减振器的动态刚度表现出了随温度变化不显著的特性。

3 结语

本文针对某型民用飞机硅橡胶 APU 减振器高低温传递率进行了试验研究, 同时根据传递率数据分析了动态刚度和阻尼损耗因子的变化规律, 结论如下:

1) 传递率测试结果显示, 与常温条件相比, 随着温度的升高, 共振频率增加, 共振放大倍数增加; 随着温度的降低, 即共振频率略有减小, 而共振放大倍数明显随之减小;

2) 低温条件下, 减振器高频处传递率增加, 减振效果会变差;

3) 阻尼损耗因子随温度变化较为明显, 随着温度上升, 阻尼损耗因子逐渐减小;

4) 动态刚度随温度变化不显著, 在橡胶材料特性和结构形式双重因素影响下, 减振器动态刚度表现出了较宽的温度适应性。

参考文献:

- [1] 《航空发动机设计手册》编委会. 辅助动力装置及起动力机[M]. 北京: 航空工业出版社, 2007: 1-2.
- [2] 马扬, 李彦双, 顾程, 等. 地面模拟高度导致辅助动力装置停车及限制[J]. 民用飞机设计与研究, 2024(3): 31-35.
- [3] 滕攀, 蓝天, 王吟, 等. 民用飞机辅助动力进气系统烟毒试验适航研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2024(4): 118-124.
- [4] 张继鑫, 吴蒙. 飞机辅助动力装置转子平衡优化研究[J]. 科技风, 2023(17): 13-15.
- [5] 熊帆. 航空辅助动力装置振动故障诊断技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
- [6] 李玲. APU 安装系统隔振器特性分析与优化研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2023.
- [7] 惠兴旺, 徐建伟, 王敏. 辅助动力装置后安装点强度分析[J]. 内燃机与配件, 2025(14): 127-129.
- [8] 黄飞, 姚平安, 缪志松. 拉杆吊挂式辅助动力装置安装系统设计[J]. 航空科学技术, 2017, 28(6): 26-29.
- [9] 王福军. 机载电子设备硅橡胶减振器振动特性研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2024.

- 收稿日期: 2023-12-25

究[D]. 北京:清华大学,2003.

- 收稿日期: 2024-01-29