

考虑机翼柔性影响的发动机安装 系统隔振设计研究

陈春兰, 陈永辉, 燕群

(中国飞机强度研究所 航空声学及动强度航空科技重点实验室, 西安 710065)

摘要: **目的** 研究综合考虑安装系统的隔振效率、振型解耦、机翼柔性等因素影响的涡桨发动机安装系统隔振设计方法。**方法** 首先对二自由度系统的动力学特性进行理论推导, 得出机翼柔性在安装系统隔振分析中的重要性。进一步将弹性中心理论应用于发动机安装系统设计中, 获得双平面五点式安装系统主要设计变量的优选参数。为分析柔性机翼对该设计过程的影响, 利用有限元和多体动力学方法建立安装系统的刚柔混合计算模型, 并进行分析。**结果** 机翼阻尼对高频共振响应影响较大, 垂向刚度比大于2时, 安装系统取得较好的减振效果。**结论** 综合考虑机翼柔性及振动解耦等因素的发动机安装系统隔振设计方法可以为航空发动机安装系统的工程设计提供参考。

关键词: 柔性机翼; 隔振; 振动解耦

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.07.012

中图分类号: TJ85 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2019)07-0051-04

Vibration Isolation Design of Engine Installation System Considering the Influence of Wing Flexibility

CHEN Chun-lan, CHEN Yong-hui, YAN Qun

(Aviation Science and Technology Key Laboratory of Aircraft Noise and Vibration Engineering,
Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China)

ABSTRACT: Objective To research the design method of vibration isolation system for turboprop engine installation system under the influences of many factors such as vibration isolation efficiency, vibration mode decoupling and wing flexibility. **Methods** Firstly, the dynamic characteristics of the two-degree-of-freedom system were theoretically derived, and the importance of the wing flexibility in the vibration isolation analysis of the installation system was obtained. Furthermore, the elastic center theory was applied to the design of engine installation system, and the optimal parameters of the main design variables of the two-plane five-point installation system were obtained. To analyze the influence of the flexible wing on the design process, the finite element method and multi-body dynamics method were used to establish a rigid-flexible hybrid calculation model of the installation system for analysis. **Results** The damping of the wing had a great influence on the resonance response of the high frequency. Good vibration damping effect can be realized when the vertical stiffness ratio was higher than 2. **Conclusion** The vibration isolation design method of the mounting system considering wing vibration damping effect and vibration mode decoupling could provide scientific basis for the engineering design of aeroengine mounting system.

KEY WORDS: flexible wing; vibration isolation; vibration decoupling

航空发动机安装系统的作用主要是传递发动机的推力,同时隔离发动机的振动,而螺旋桨类发动机的振动相比于其他发动机更为突出。标准规范明确要求必须对其安装系统进行隔振设计,隔振设计的效果对飞机的振动噪声水平产生了重要影响^[1]。工程上应用较多的是涡轮螺旋桨和活塞式螺旋桨发动机,对两类发动机隔振安装的研究也较多,活塞式螺旋桨发动机的安装系统通常采用单安装面会聚式。该形式的主要特点是将隔振器倾斜布置,以使隔振系统的弹性中心与发动机的重心重合,可较好地对接振系统的振动进行解耦。Taylor^[2]、Phillips^[3]、Swanson^[4]等学者在会聚式安装系统的设计方法上已有较多公开文献发表。涡轮螺旋桨发动机由于质量、载荷和尺寸都较大,同时扭转载荷也比较大,通常采用双安装面的形式,即前、后两个安装框,每个安装框上均布置隔振器,设计方法上较会聚式安装系统更为复杂。虽然主流的支线客机如ATR72、新舟600等均有相关产品出现,但其设计方法均由国外减振装置研制公司如Barry Control、Lord等掌握。陈永辉^[5]假设安装系统边界为刚性,以隔振和解耦为目标对发动机安装系统进行了优化设计,作了此类安装系统设计的初步探索。

涡轮螺旋桨飞机通常将发动机安装在机翼下,机翼作为发动机振动向飞机传递的重要一环,其动态特性会显著影响飞机的振动响应。Eugene^[6]指出,系统隔振设计中,柔性基础是影响振动传递的重要因素,应加以考虑。谢向荣^[7]以船舶动力机械的隔振系统为研究对象,考虑了基座柔性的影响,提出了通过改变基座刚度来控制振动响应线谱,但模型简化成了单自由度,没有进一步拓展为多自由度隔振系统。Ashrafiun^[8]建立了考虑柔性基础下发动机振动传递响应的解析方法,分析表明,发动机向柔性基础的振动传递力受基础柔性特性的影响较大,但该研究中将基础设置为简单的板结构,没有涉及复杂基础结构的研究。周建鹏^[9]基于ANSYS、ADAMS仿真软件,提出了一种刚柔混合建模仿真方法,可为航空发动机安装系统设计提供借鉴。基于上述对于研究现状和研究必要性的分析,文中采用刚柔混合建模方法,研究了机翼柔性对发动机振动传递的影响,为航空发动机安装系统的工程设计提供了参考。

1 机翼-隔振系统二自由度振动分析

为了从理论上研究机翼柔性对发动机安装系统隔振性能的影响,首先对其进行简化。因发动机自身刚度很大,可简化成质量为 M 的刚体;而安装节自身与发动机质量相比很小,故将其简化成刚度为 K 的弹簧单元;机翼刚度较低,质量相对较大,其质量 m 与刚度 k 均需考虑。因此,发动机-安装系统-机翼可简化为典型的二自由度系统,如图1所示。

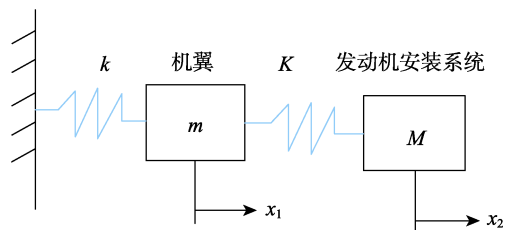


图1 典型二自由度系统

对图1所示的二自由度系统进行动力学分析。通过推导得到该系统的动力学微分方程:

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k+K & -K \\ -K & K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = 0 \quad (1)$$

令系统主振型 $x=X\cos\omega t$,其中, $x=[x_1, x_2]$,得到主振型方程:

$$\begin{bmatrix} k+K-m\omega^2 & -K \\ -K & K-M\omega^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = 0 \quad (2)$$

进一步得到特征方程:

$$\begin{vmatrix} k+K-m\omega^2 & -K \\ -K & K-M\omega^2 \end{vmatrix} = 0 \quad (3)$$

求解特征方程可得系统前两阶固有频率:

$$\begin{cases} \omega_1^2 = 1/2(K/M + k/m + K/m) - \\ \sqrt{1/4(K/M + k/m + K/m)^2 - kK/mM} \\ \omega_2^2 = 1/2(K/M + k/m + K/m) + \\ \sqrt{1/4(K/M + k/m + K/m)^2 - kK/mM} \end{cases} \quad (4)$$

分析式(4),并绘制系统第一阶频率与机翼频率 k/m 、发动机安装频率 K/M 的关系,如图2所示。

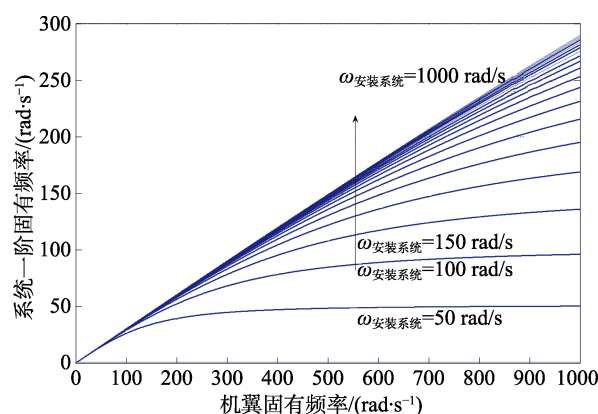


图2 系统一阶频率与机翼频率、安装系统频率的关系

通过图2可以得出以下结论:二自由度系统固有频率并不是两个单自由度系统的简单叠加,第一阶频率与基础固有频率(机翼频率)有关。当机翼频率与安装系统固有频率相比,趋于刚性时(10倍以上),系统一阶频率接近于安装系统固有频率;当机翼固有频率低于10倍安装系统固有频率时,机翼频率越低,系统一阶固有频率越低,且低于安装系统固有频率。

实际应用中，机翼频率较低，与安装系统固有频率相比，不能按刚性处理，故在进行发动机安装系统动力学分析时，应考虑机翼的柔性影响。

2 刚性基础下安装系统的隔振设计研究

首先对刚性基础下的安装系统进行隔振设计与分析。目前较为先进的主流发动机安装系统为双平面五点式安装。文中以此为背景，建立了类似安装形式的研究模型，如图 3 所示。模型中，发动机质量为 14.7 kg，转动惯量 I_{xx} 、 I_{yy} 、 I_{zz} 分别为 0.062、0.124、0.124 kg·m²。图 3 中 1—5 安装点的坐标分别为(0.0637,0.0705,0)、(0.0637,-0.0705,0)、(0.0637,0,-0.07)、(-0.134, 0.0705, 0)、(-0.134, -0.0705,0)，单位为 m。

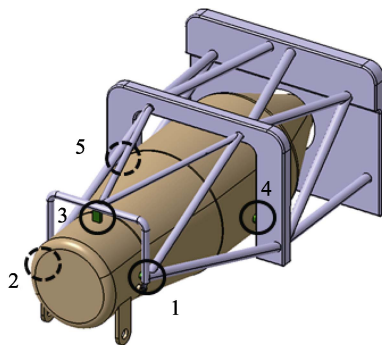


图 3 双平面五点式发动机安装系统

在进行发动机安装系统动力学设计时，弹性非耦合支撑是较为理想的状态，此时所有自由度或惯性方向的振动进行了解耦，则独立方向的振动可应用单自由度隔振理论进行设计^[10]。振动解耦需要两个条件：发动机的重心和减振系统的弹性中心重合；通过发动机重心的惯性主轴与安装系统的弹性主轴重合。当发动机旋转时，产生力矩使旋转轴方向改变的轴线称为惯性主轴；当载荷方向和弹性位移方向一致，而且不发生角位移的轴线称为弹性主轴；弹性主轴的交点称为弹性中心。基于上述理论，可开展安装系统振动的解耦设计工作。为便于研究，将图 3 所示的研究模型简化为图 4 所示的安装示意图，图 4 给出了各安装点刚度方向、各安装点与发动机重心的相对位置。

发动机振动主要由螺旋桨气动不平衡引起，该旋转不平衡振动主要在垂向和侧向两个方向产生较大的激励力。因此，尽量使安装系统垂向和侧向的振动为独立振动，便于应用单自由度隔振理论进行设计。从传递发动机推力的角度上，为便于设计分析，后安装面的隔振器一般无航向刚度。安装系统的 x 、 y 、 z 三个方向的弹性主轴分别用 E_x 、 E_y 、 E_z 表示，通过调配隔振器刚度，使 E_y 、 E_z 分别与对应坐标轴重合，则可获得侧向和垂向的独立振动，如图 5 所示。

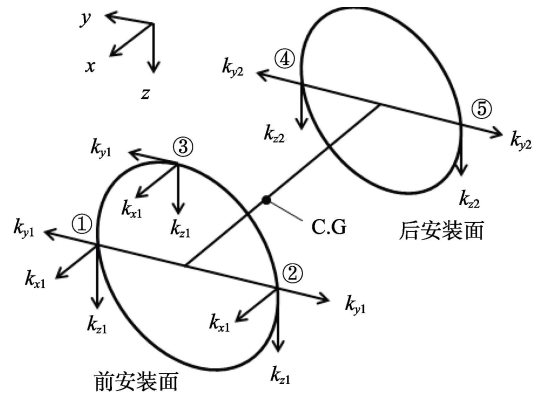


图 4 发动机五点式安装形式

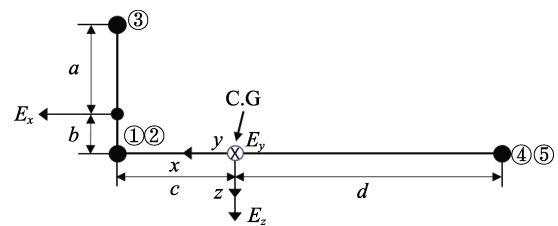


图 5 安装系统解耦布局

当载荷的作用线穿过弹性中心时，发动机在该方向只有平移运动，此时该方向处于力矩平衡的状态。因此，若要得到如图 5 所示解耦，则需满足式（5）所示的力矩平衡方程。

$$\left. \begin{aligned} 2 \cdot k_{x1} \cdot b &= k_{x1} \cdot a \\ a + b &= 0.07 \\ 3 \cdot k_{y1} \cdot c &= 2 \cdot k_{y2} \cdot d \\ 3 \cdot k_{z1} \cdot c &= 2 \cdot k_{z2} \cdot d \\ k_{y1} &= k_{z1}, k_{y2} = k_{z2} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

根据式（5）求得： $a=0.046$ ， $b=0.023$ ， $k_{y1}=1.4k_{y2}$ ， $k_{z1}=1.4k_{z2}$ 。当发动机的一阶激励频率为 66 Hz，激励频率与安装系统的固有频率之比大于 $\sqrt{2}$ 时，系统才处于隔振状态。经过优化选取，1、2、3 号隔振器的三向刚度为(50 000,14 000,14 000)、4、5 号隔振器的三向刚度为(1,10 000,10 000)，单位是 N/m。经计算，安装系统的固有频率分布在 10~20 Hz 之间。根据隔振原理，该系统具备隔振作用，同时发动机侧向和垂向振动获得了 80% 以上的解耦率，进一步基于该模型考虑机翼柔性的影响。

3 柔性基础下安装系统振动传递分析

首先研究了柔性基础特性对发动机安装系统隔振设计的影响。由于机翼柔性在垂向表现较为明显，因此，文中主要开展发动机垂向振动传递的研究。将机翼与减振系统在垂直方向上的静刚度比定义为 R ，其中假定机翼刚度不变，改变安装系统的刚度。以机翼振动响应作为判别发动机安装系统隔振效果的显性指标，得到 R 对发动机传递到机翼的振动响应的影

的规律,结果如图6所示。纵坐标定义为机翼上观察点在5~2000 Hz全频段的振动有效值。

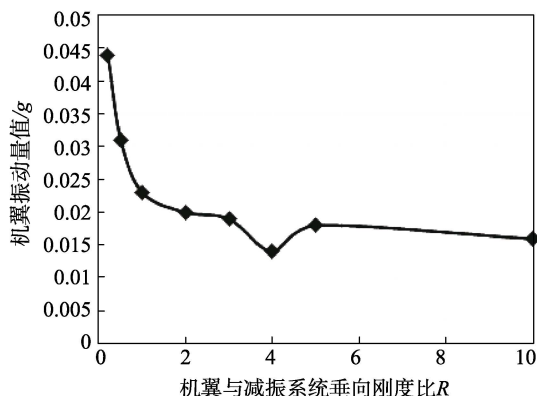


图6 刚度比对机翼振动响应的影响

由图6可见,随着刚度比 R 的增大,机翼振动响应降低。这符合常规的变化趋势,因为安装系统的刚度在不断降低。当 $R \geq 2$ 时,机翼振动量值开始趋于稳定,增大刚度比,对于降低传递到机翼上的振动量值不再有显著影响。当 $R=4$ 时,机翼响应出现局部谷值,在设计过程中,可首先尝试在该点进行隔振设计。综合判断,在减振系统设计时,应合理选择安装系统的刚度,使得机翼刚度与减振器整体垂向刚度的比值大于2。同时,该约束条件应与基于弹性中心理论的刚度设计中式(5)相结合进行新一轮迭代,最终得到合理的隔振器取值范围。

上述工作从刚度的角度研究了振动传递的特性,同时,阻尼作为动态特性的另一重要参数,主要影响结构的振动响应,有必要开展其对振动传递的影响规律。结合实际机翼的阻尼值,分别选取机翼阻尼比为0.01、0.03、0.05,代入上述分析模型进行计算,得到如图7所示的结果。

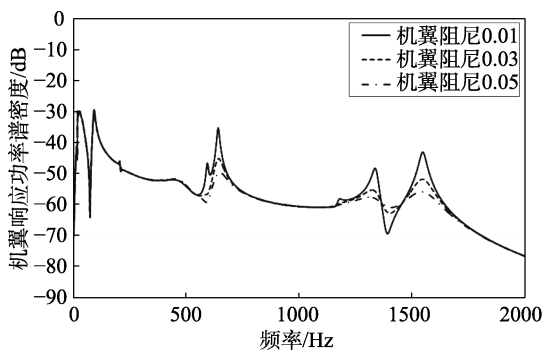


图7 阻尼比对机翼振动响应的影响曲线

由图7可知,在500 Hz以上频段,阻尼有效降低了共振频率处的峰值,说明机翼阻尼对传递到机翼振动的响应的影响主要体现在较高的频段,而对机翼的较低频段的响应影响较小。同时,由于隔振系统可视为振动低通滤波器,高频振动在很大程度上被有效隔离,其隔振性能设计上主要关注较低频段

的特性。因此,在隔振系统设计时可暂时不考虑机翼阻尼的影响。

4 结论

文中提出了一种综合考虑机翼柔性影响及振动解耦两种因素的发动机安装系统隔振设计方法,分析了翼吊式发动机安装系统的动力学特性,得到了如下研究结论。

1) 柔性机翼对安装系统模态的影响是整体的,并非刚性基础下安装系统模态与柔性基础下模态的简单叠加。因此,系统建模计算时,就应考虑成刚柔混合的分析模型。

2) 在垂直方向上,机翼刚度与减振器整体刚度的比值大于2应作为设计的约束条件之一,与发动机安装系统隔振、振动解耦共同组成涡桨发动机安装系统设计的约束条件。

3) 机翼阻尼比对其振动响应的影响主要体现在较高频率的共振峰值处,在隔振系统设计时,可暂时不考虑机翼阻尼的影响。

文中主要对考虑机翼柔性影响的发动机安装系统隔振设计方法进行了理论研究及仿真分析,后续将进一步开展模型试验研究,为该设计方法的工程应用提供技术支持。

参考文献:

- [1] SHMYROV V F. Airplant Power Plants Systems Designing[M]. Kharkiv: National Aerospace University, 2010.
- [2] TAYLOR E S. Vibration Isolation of Aircraft Power Plants[J]. Journal of the Aeronautical Sciences, 1938, 6(2): 43-48.
- [3] WILLIAM H P. Effect of Structural Flexibility on the Design of Vibration-isolating Mounts for Aircraft Engines[J]. NASA Technical Memorandum, 1984, 15: 85725.
- [4] SWANSON D A. Optimization of Aircraft Engine Suspension Systems[J]. Journal of Aircraft, 1993, 30(6): 490-496.
- [5] 陈永辉, 陈春兰, 苏尔敦, 等. 涡桨发动机安装系统设计技术[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(28): 9-13.
- [6] EUGENE I R. 被动隔振[M]. 朱石坚, 译. 武汉: 海军工程大学, 2004.
- [7] 谢向荣, 俞翔, 朱石坚, 等. 基于 ADAMS 的柔性基础振动系统隔振性能分析[J]. 振动与冲击, 2010, 29(3): 185-188.
- [8] ASHRAFIUON H. Dynamic Analysis of Engine Mount Systems[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 1992, 114: 79-83.
- [9] 周建鹏, 张志谊, 等. 柔性基础动力机械主被动隔振系统的建模与仿真[J]. 振动与冲击, 2008, 27(11): 97-100.
- [10] 户原春彦. 防振橡胶及其应用[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1982.