

文章编号:1000-6893(2008)06-1581-05

金属橡胶减振器用于发动机安装减振的研究

邓吉宏^{1,2}, 王轲¹, 陈国平¹, 张方¹, 施荣明², 陈忠明²

(1. 南京航空航天大学 振动工程研究所, 江苏 南京 210016)

(2. 沈阳飞机设计研究所, 辽宁 沈阳 110035)

Study on Effect of Engine Installation Metal Rubber Damper

Deng Jihong^{1,2}, Wang Ke¹, Chen Guoping¹, Zhang Fang¹, Shi Rongming², Chen Zhongming²

(1. Institute of Vibration Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

(2. Shenyang Aircraft Design and Research Institute, Shenyang 110035, China)

摘要: 为减小发动机传递至飞机机身结构的振动,设计了金属橡胶减振器用于航空发动机安装。对该金属橡胶减振器进行了动力学建模研究,采用有限元技术对安装减振器前后的飞机全机结构进行了仿真分析,初步表明了该设计对结构频率影响较小,但能引入较大阻尼,降低响应水平。在理论分析基础上,进一步将设计制造的金属橡胶减振器安装于某型飞机,进行地面开车,实测了应用减振安装前后飞机的动力学响应。结果证明了发动机减振安装的可行性与有效性。

关键词: 金属橡胶; 减振器; 发动机安装; 振动; 动力学

中图分类号: O322 **文献标识码:** A

Abstract: In order to reduce the vibration the engine transfers to the fuselage structure, a metal rubber damper is designed and used in the installation of a jet engine. A dynamics model of this metal rubber damper is built and a dynamics simulating analysis of the airplane structure with or without the damper is performed. It is demonstrated that this design introduces considerable damping and greatly reduces vibration response without much effect on structure frequency. After theoretical analysis the metal rubber damper so designed and built is used in a type of airplane. The response of the aircraft with and without the metal rubber damper is measured during the engine trial run on the ground. The results prove the feasibility and validity of the engine installation of metal rubber damper on an aircraft engine.

Key words: metal rubber; damper; engine installation; vibration; dynamics

航空发动机是飞机的主要振源之一,它在提供飞行动力的同时,也引起噪声和机体结构的振动,影响到机体结构、机载设备的安全与寿命,影响到乘员的舒适性。减少、降低发动机对飞机振动的影响是人们十分关注的问题。人们在发动机本身进行改进的同时,对发动机的安装减振也给予了很大的关注。美国军用规范和国军标等都提出应采用防振安装系统连接推进系统(发动机)和飞机。

降低发动机振动水平的常用措施是在其安装环节上布置减振器。但是由于飞机飞行环境恶劣,除了要求减振器能在较宽的频带范围内提供较大的阻尼外,还要求其具有抗冲击性能好、防高温、耐腐蚀等特性。近年来逐步得到推广应用的金属橡胶减振器恰好具有这些优良特性。但由于它又具有非线性的动力学特性,刚度和阻尼不仅

随运动状态发生变化,而且恢复力还取决于系统的变形历史,此外还有所谓的记忆特性,因此设计使用与分析这类减振器用于发动机安装减振具有相当的难度^[1-3]。

本文研究了某型飞机发动机安装金属橡胶减振器的设计方法与动力学建模,并对该减振器应用于某型飞机上的动力学特性和减振效果进行了仿真计算与实验研究。结果表明,这是一项能有效抑制飞机结构振动水平的新技术,对于中国飞机设计与改型具有重要的工程应用价值。

1 减振器设计与建模

某型飞机发动机安装连接杆固定在机身 47 框和 50 框上,其主交点在 47 框上,后固定点在 50 框上。双发发动机通过 5 根连接杆与机身相连,与 47 框连接的 2 根连接杆分别称为 SB1 和 SB2,与 50 框连接的 3 根连接杆分别称为 SK1, SK2 和 SK3。设计适宜于该飞机航空发动机安

收稿日期:2007-09-29; 修订日期:2008-01-09
基金项目:国家级项目
通讯作者:邓吉宏 E-mail: 601jhdeng@sina.com

装减振用的减振器主要需要满足以下几个条件:

(1) 飞机发动机安装形式及连接杆交点位置不可变。各连接杆长度及安装角度也不可变。

(2) 飞机发动机安装区域属于高温区域,要求减振设计具有抗高温能力。

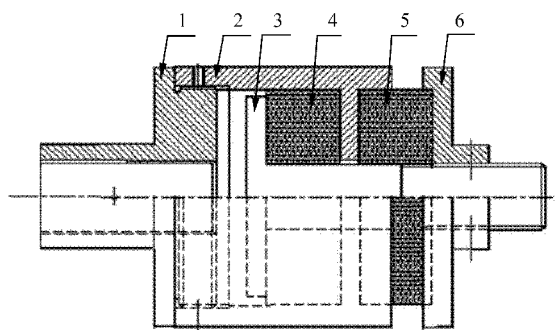
(3) 由于飞机发动机在垂直飞机轴线的平面内的载荷都要由发动机安装连接杆承担,因此各连接杆设计载荷较大。此外,飞机需要经常在空中做机动飞行,随飞行状态不同,其发动机连接杆所承受的载荷方向也会变化,时而受拉,时而受压,因此要求设计的减振器能承受双向大载荷,结构能满足强度要求。

(4) 航空发动机安装要求自身与机体牢固连接,不允许在飞行中产生较大的刚体位移。同时飞机上发动机安装所能占用的空间狭小,且不允许对具体结构做大的修改,这样减振器本身必须具有大的静刚度才能保证整根连接杆有合适的刚度。而且要求安装减振器后的连接杆拉压刚度的变化不至引起发动机与机体的碰撞,即存在刚度上的约束。

(5) 从动力学角度而言,进行发动机安装减振的局部设计必须保证设计前后的结构共振频率变化不大,尽可能避免结构共振。此外,由于安装减振器的目的是增加阻尼降低响应水平,因此要求减振器在满足前面特定的刚度、强度等条件下,具有较大的阻尼。

由于 SK1 和 SK3 长度很短,刚度较大,且连接杆附近空间狭小,因此只能在 SB1, SB2 和 SK2 上安装减振器。其中 SB1 和 SB2 可在紧靠下端长度为 210 mm,直径为 45 mm 的范围内设计减振装置;SK2 可在紧靠下端长度为 100 mm,直径为 48 mm 的范围内设计减振装置。为保证所设计的金属橡胶减振器在振动过程中具有较好的减振性能,设计中采用两块金属橡胶垫用以吸收振动能量。其具体结构如图 1 所示。

实际应用中,将图 1 所示的减振器装入到需减振的结构中就可以构成减振结构。减振器两端的连接零件分别为端盖 1 和运动轴 3,具体连接形式可根据实际结构设计。在图 1 中,端盖 1 和套筒 2 通过螺纹联接,在减振器运动过程中使之成为一个运动整体。同样,压盖 6 和运动轴 3 亦通过螺纹组成一个运动整体。这两个运动整体又通过金属橡胶垫 4 和 5 相连,由于金属橡胶垫具有很大的摩擦阻尼,因此它在运动轴 3 和端盖 1 之间起到了阻碍振动的作用。



注: 1-端盖; 2-套筒; 3-运动轴; 4,5-金属橡胶垫; 6-压盖

图 1 减振器结构示意图

Fig. 1 Structure of metal rubber damper

由于金属橡胶垫存在时滞性,当减振器向一个方向运动时,主要起作用的是受压块,而另一块由于压力放松,在一定时间内起的作用较小。具体地说:当运动轴 3 由平衡位置向左运动时,主要是金属橡胶垫 5 起减振作用;向右运动时,主要是金属橡胶垫 4 起减振作用。当图 1 结构右端承受压载荷时,压盖 6 压迫金属橡胶垫 5 并通过它将力传递至套筒 2 和端盖 1。反过来,若结构右端承受拉伸载荷时,运动轴 3 向右运动压迫金属橡胶垫 4,该金属橡胶垫再将载荷传至套筒 2 和端盖 1。由于金属橡胶在制造中细微结构和广义密度具有分散性,因此实际生产出的减振器与设计目标往往有一些差异,金属橡胶减振器要能根据其需要在小范围内调整其密度大小,以增加使用的灵活性和保证减振器工作在最佳状态。这可通过压盖 6 和运动轴 3 的螺纹连接来调节金属橡胶的压缩量来实现。

金属橡胶是减振器的核心,金属橡胶本身物理参数中最主要的是广义密度,它对减振器特性的影响很大,为此用相同工艺压制了若干种不同密度的金属橡胶垫,分别测试其受压刚度,并在不同配重质量情况下进行振动实验。表明不同密度的金属橡胶垫其阻尼性能和刚度性能差别很大。比较测试结果数据可知:密度小于 0.7 g/cm^3 的金属橡胶垫具有很好的减振性能,但抗变形能力太小;而密度为 1.65 g/cm^3 以上的金属橡胶虽然有较大的刚度,但阻尼却逐渐减小。综合考虑,选取广义密度为 0.90 g/cm^3 左右的金属橡胶垫制造减振器,能同时提供满足需要的较大刚度与阻尼。

考虑减振器的有关非线性时滞特性,采用恢复力模型^[4]

$$R(y, \dot{y}, t) = h(y) + g(\dot{y}) + z(t) \quad (1)$$

式中: R 为总恢复力; h 为非线性弹簧提供的恢复力; g 为非线性阻尼恢复力; z 为记忆恢复力; y 为偏离静平衡点位移。

根据受拉、受压情况不同,式(1)中与位移有关的非线性恢复力由不同的位移奇数幂次项线性组合而成,可表示为

$$h(y) = \begin{cases} \sum_{i_1=1}^{n_1} a_{i_1} y^{2i_1-1} & y \geq 0 \\ \sum_{i_2=1}^{n_2} b_{i_2} y^{2i_2-1} & y < 0 \end{cases} \quad (2)$$

而与运动速度有关的恢复力可表示为

$$g(\dot{y}) = \begin{cases} \sum_{i_3=0}^{n_3} c_{i_3} |\dot{y}|^{2i_3-1} \text{sgn}(\dot{y}) & \dot{y} \geq 0 \\ \sum_{i_4=0}^{n_4} d_{i_4} |\dot{y}|^{2i_4-1} \text{sgn}(\dot{y}) & \dot{y} < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: a_i, b_i, c_i 和 d_i 分别为待识别参数; n_1, n_2, n_3 和 n_4 分别为求和项数。

$z(t)$ 用增量形式给出

$$dz(t) = \begin{cases} \frac{k_t}{2} [1 + \text{sgn}(z_t - |z(t)|)] dy & \dot{y} \geq 0 \\ \frac{k_s}{2} [1 + \text{sgn}(z_s - |z(t)|)] dy & \dot{y} < 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$k_t = z_t / y_t, \quad k_s = z_s / y_s \quad (5)$$

式中: y_t 和 y_s 为迟滞阻尼减振器产生宏观滑移的极限值; z_t 和 z_s 为最大滑移力值; k_t 和 k_s 为滑移刚度;下标 t 和 s 分别表示受拉和受压。

有关参数可通过实验识别得到^[4-7];参数识别现场如图 2 所示。



图 2 减振器参数实验识别

Fig. 2 Parameter identification of damper

2 发动机安装减振仿真与实验分析

分别通过有限元仿真分析^[8-10]和飞机地面开车实验对金属橡胶减振器用于飞机发动机安装前后的动力学特性改变进行研究,以验证其减振效果。

在仿真分析中,首先建立含金属橡胶减振器的飞机-发动机复杂结构有限元模型。发动机模拟件用一根推力销和多个连接杆与机身模拟段连接,连接杆上串联减振器,模型网格划分如图 3 所示。考虑减振器刚度根据安装状态不同会在一定范围内变化,对各种典型的连接杆刚度组合情况进行分析,计算出发动机整体结构的前若干阶共振频率的变化范围,模态频率计算结果如表 1 所示。与未进行减振安装相比,除 4 阶外结构模态频率和振型变化不大,这是由于发动机本身刚度较大,当减振器的刚度变化不够大时,以发动机刚体运动为主的几阶模态减振前后比较近似,如 1~3 阶。

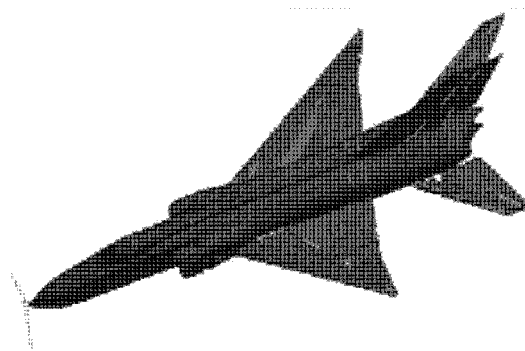


图 3 全机有限元模型网格图

Fig. 3 Web of fighter's FEM

表 1 减振安装前后发动机整体振动模态频率

Table 1 Engine modal frequencies with and without damper

模态频率/Hz	模态阶数				
	1	2	3	4	5
减振前	11.1	23.0	28.0	35.3	54.4
减振后	10.2	22.3	26.2	42.4	56.0

施加发动机动载荷后,计算安装减振装置前后发动机关键部位(如安装加强框、座舱和设备舱等)的结构动力学响应随频率变化的关系。图 4 为施加幅值为 1 000 kN 垂直向简谐激励后,某加强框处实施发动机减振安装设计前后的响应比较。未安装减振器结构的频响函数(FRF)曲线的峰值会对应模态频率,但不是所有模态频率一定对应频响函数峰值;安装减振器后的频响函数值则会随激励变化。在此定义一定幅值的单频激励

下,结构上某点的稳态响应最大值与载荷幅值之比为安装减振器时的非线性系统在该点该频率处的频响函数。结果证明使用减振连接杆后,各关键部位的动响应大幅下降。

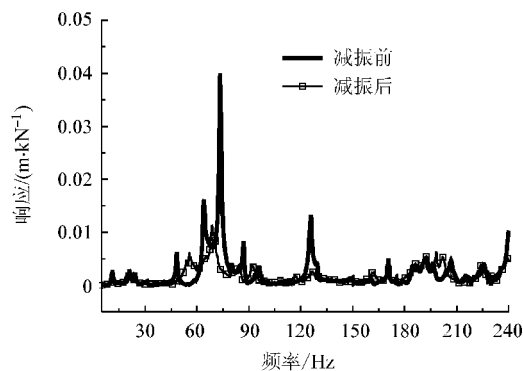


图4 减振前后频响函数比较

Fig. 4 FRF comparison with and without damper

根据仿真分析结果,将设计制造的减振连接杆安装在某型飞机上,进行发动机地面开车响应实验。在不同发动机开车工况下,实测飞机结构各关键监控点上的加速度大小。与使用普通连接杆时测得的结果相比较,分析验证金属橡胶减振连接杆的减振效果。

以发动机开车作为自然激励,具体类型分为发动机慢车开车和巡航状态开车。分别使用普通拉杆与减振拉杆,按慢车—巡航—慢车—巡航—慢车—巡航顺序加力。

实测得到不同状态下,各测点各测量方向上的加速度时间历程。某典型部位不同工作状态下的功率谱如图5和图6所示。通过计算机分析处理得到的某典型部位垂向加速度的最大值、最小值和均方值如表2所示。

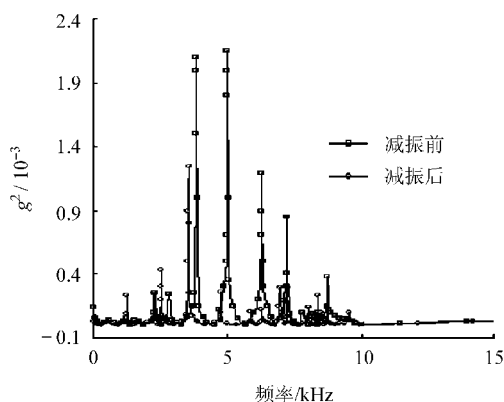


图5 前轮舱垂直向发动机减振前后慢车功率谱对比
Fig. 5 Trotting power spectrum of vertical acceleration in front gear cabin with and without damper

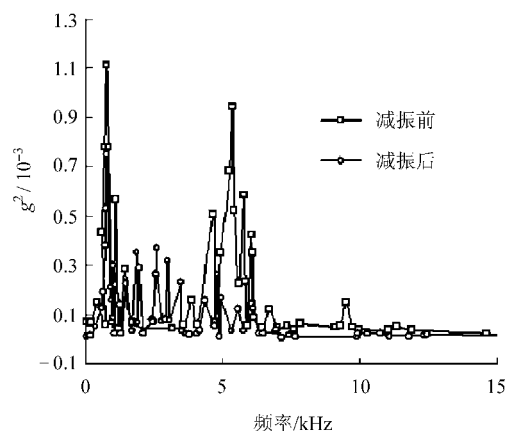


图6 前轮舱垂直向发动机减振前后巡航功率谱对比
Fig. 6 Cruising power spectrum of vertical acceleration in front gear cabin with and without damper

表2 发动机减振前后前轮舱垂直向加速度最大值、最小值和均方根值 (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)

Table 2 Max, min, and root of mean square of the vertical acceleration in front gear cabin with and without damper (Unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)

状态	最大值	最小值	均方根值
普通安装发动机慢车	9.93	-10.10	7.30
普通安装发动机巡航	10.50	-10.50	8.70
减振安装发动机慢车	7.30	-7.50	4.20
减振安装发动机巡航	7.60	-7.00	4.50

3 结论

仿真和实验表明,采用金属橡胶减振连接杆后,能有效降低机体的振动响应。特别是对于安装大量电子设备的飞机前设备舱,响应水平得到较大幅度降低。按测试结果,发动机慢车时,水平向减振约9%,垂直向减振约42%;发动机巡航时,水平向减振约31%,垂直向减振约48%。这可以有效改善前设备舱振动环境,提高电子设备工作寿命。此技术应用于新机设计或现役飞机改装对提高飞机性能,延长飞机寿命具有重要意义。

参考文献

- [1] Enelund M, Olsson P. Damping described by fading memory—analysis and application to fractional derivative models[J]. International Journal of Solids and Structures, 1999, 36(7):939-970.
- [2] Majid A A, Dufour R. Formulation of a hysteretic restoring force model[J]. Application to Vibration Isolation, Nonlinear Dynamics, 2002, 27(1):69-85.
- [3] Mattias S L K. Nonlinear isolator dynamics at finite de-

- formations; an effective hyperelastic fractional derivative, generalized friction model[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2003, 33(3): 323-336.
- [4] Masri S F, Caughry T K. A nonparametric identification technique for nonlinear dynamic problems [J]. *J Appl Mech ASME*, 1979, 46(2): 433-447.
- [5] 王轲,李伟,朱德懋. 非线性迟滞阻尼减振器动力学模型参数识别[J]. *华东交通大学学报*, 1999, 16(4): 1-5.
Wang Ke, Li Wei, Zhu Demao. The parameter identification of the dynamic model for a group of nonlinear hysteretic dampers[J]. *Journal of East China Jiaotong University*, 1999, 16(4): 1-5. (in Chinese)
- [6] 王轲,张福祥. 钢丝网垫减振器结构动响应计算[J]. *兵工学报*, 2004, 25(3): 308-311.
Wang Ke, Zhang Fuxiang. Calculations of the dynamic response for the steel-net pad vibration damper[J]. *Journal of China Ordnance*, 2004, 25(3): 308-311. (in Chinese)
- [7] Ni Y Q, Ko J M, Wong C W. Identification of nonlinear hysteretic isolators from periodic vibration tests[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1998, 217(4): 737-756.
- [8] Pesheck E, Boivin N, Pierre C, et al. Nonlinear modal analysis of structural systems using multi-mode. *Invariant Manifolds*[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2001, 25(1-3): 183-205.
- [9] Ying Z G, Ni Y Q. A new stochastic optimal control strategy for hysteretic MR dampers[J]. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2004, 17(3): 223-229.
- [10] Moreau X, Ramus-Serment C, Oustaloup A. Fractional differentiation in passive vibration control, vibration control[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2002, 29(1-4): 343-362.

作者简介:

邓吉宏(1969—) 男,博士,高级工程师。主要研究方向:结构动力学。

Tel: 024-86368001

E-mail: 601jhdeng@sina.com

施荣明(1940—) 男,研究员,博士生导师。主要研究方向:结构动力学。

Tel: 024-86368012

(责任编辑:徐晓)

北京航空航天大学诚聘英才

北京航空航天大学坐落在北京市海淀区中关村科技园核心区,是一所具有航空航天特色和工程技术优势的多科性、开放式、研究型大学。北京航空航天大学创建于1952年,是新中国第一所航空航天高等学府,56年来一直属于国家重点建设的高校,是国家“211”工程、“985工程”建设的重点高校和国防科工委、教育部、北京市人民政府与中国工程院共建高校。

面对中国高等教育发展的新机遇和创建高水平研究型大学的发展目标,北京航空航天大学有责任承载祖国科教事业发展的重大使命,我们将以优秀的师资队伍、丰硕的科研成果、卓越的人才培养和积极的社会服务报答祖国。

北京航空航天大学竭诚欢迎海内外优秀人才加盟,我们致力于为每一位投身北京航空航天大学的教学科研工作者提供良好的学术环境、展现才华的舞台和不断成长的沃土。学校为此专门制定航空科学与技术国家实验室“航空百人”人才引进行动计划,提供事业发展的平台,有竞争力的协议年薪和必要的生活条件,希望能和优秀科技人才一起,把握机会,共创辉煌。

根据我校《十一五师资队伍建设工程》和学科建设需要,现面向海内外公开招聘教授、副教授及骨干教师。

招聘学科方向

材料科学与工程、信息与通信工程、电子科学与技术、控制科学与工程、动力工程及工程热物理、航空宇航科学与技术、计算机科学与技术、机械工程、管理科学与工程、力学、数学、物理、光学工程、仪器科学与技术、电气工程、交通运输工程、生物医学工程、公共管理、外国语、法学、艺术设计。

招聘条件

(1) 具有博士学位,在海内外高校或科研机构有科研工作经历,在本研究领域取得突出成绩。

(2) 应聘教授岗位年龄一般在40岁以下,对于长江学者、杰出青年基金获得者等特别优秀的人才以及人文社会科学特别优秀的人才,年龄可以适当放宽。应聘副教授岗位年龄一般在35岁以下,应聘骨干教师岗位年龄一般在32岁以下。

(3) 学风严谨,求真务实,素质优良,富有创新和团结协作精神。

待遇优厚

对于引进的高层次人才,将按照学校有关规定提供安家费、条件建设经费、购房补贴等,对于特别突出的优秀人才,相关待遇可以面议,详情可与我们联系。

注意事项及联系方式

(1) 应聘人员需提交:《北京航空航天大学新进教师申请审批表》(2008年最新表)可从北京航空航天大学网站:<http://www.buaa.edu.cn> 下载,并按要求填写及提供相关附件材料。

(2) 应聘人员可通过电子邮件、传真、邮寄等方式向有关院系或人事处递交应聘材料。

联系地址:北京航空航天大学人事处(100191)

联系人:郭姝,唐莉;联系电话:86-10-82317779/82317776

FAX:86-10-82317781;E-mail:rsc@buaa.edu.cn