

新型金属橡胶减振器的性能仿真与测试研究

Characteristics Simulation and Test Analysis for New Type of Metal Rubber Absorber

■ 赵奎 陈俊杰 金招省 操军 / 中国航发动控所

金属橡胶减振器具有高弹性、大阻尼、质量轻、抗腐蚀、抗辐射、耐受高低温作用、不老化等一系列优点，可适用于更广泛的工作环境，具有较好的应用前景。

航空发动机控制器在工作时会受到发动机产生的振动载荷、飞机着陆时的冲击载荷以及气动颤振等振动载荷的作用，为了保证控制器的可靠性^[1]，需要减振器能极大地降低传递到控制器的振动，需要对减振器进行深入的理论和试验研究，建立三向耐振减振器的正向设计方法。

目前航空发动机电子控制器使用的主要有金属锥形弹簧减振器、橡胶减振器和金属橡胶减振器。其中，金属橡胶减振器在受到外部振动冲击时，通过弹性元件变形产生的结构阻尼和元件内部金属丝接触点产生的干摩擦实现阻尼减振。

国际上，俄罗斯具备金属橡胶结构特性的定性和定量研究能力，设计的金属橡胶零件已成熟应用在航空航天领域。美国在金属橡胶方面的研究报道主要集中在低、高温环境下和转子支承结构的减振器设计，说明其已具备了系统而深入的金属橡胶的力学性能数据和分析方法。从20世纪90年代开始，国内很多学者和研究机构认识到金属橡胶技术的重要应用价值^[2]，并致力于该技术的研究开发，取得了一系列有建树性的研究成果^[3-8]。

本文采用理论分析、有限元仿

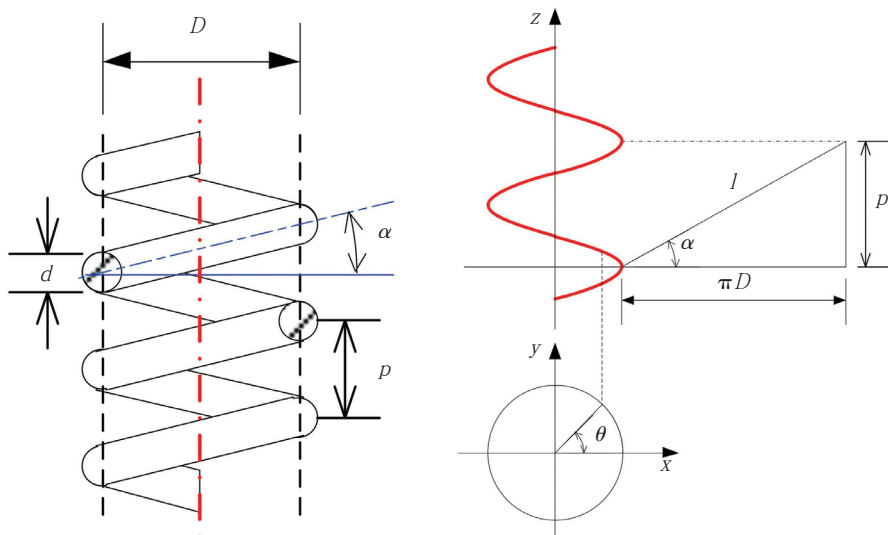


图1 螺旋卷结构

真分析和试验验证相结合的方法，系统地分析了不同组合工艺参数下金属橡胶的特性，并建立了金属橡胶减振器的设计和动力学特性的仿真分析方法；同时，设计、制作了一款上下对称的新型金属橡胶减振器，验证了仿真方法的可行性。

金属橡胶本构模型

金属橡胶微观力学分析方法

金属橡胶是一种均质的弹性多孔材料，其制作工艺主要包括编织和模压两步：先把金属丝卷制成螺旋卷，如图1所示，再对螺旋卷进行

编织、冲压成形^[9]。其成形工艺决定了金属橡胶材料主要承受压缩载荷，并且在成形方向和非成形方向具有不同的压缩力学性能，如图2所示（成形方向即模压时的加载方向 z ，非成形方向为模压方向的正交方向，即 x 、 y 向），即金属橡胶是一种典型的横观各向同性弹性阻尼材料。根据各项异性材料体的本构关系，可以获得横观各向同性金属橡胶的本构关系。在各向同性面即非成形面内，可建立弹性模量与剪切模量的关系，并且成形面和非成形面具有正交特性。

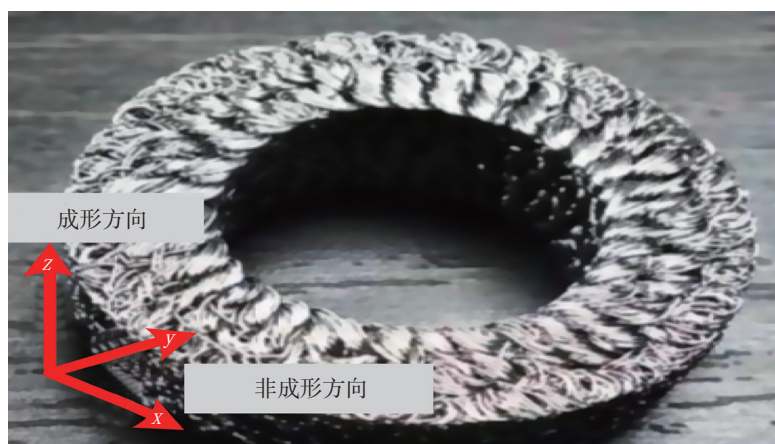


图2 金属橡胶承载方向

大量金属橡胶材料试验表明,在弹性范围内和小应变条件下金属橡胶材料在成形和非成形两方向受压缩载荷时,材料的泊松比约为0。因此不考虑金属橡胶的剪切作用时,可以获得金属橡胶材料受压力学本构关系,即金属橡胶材料的宏观应力、应变和弹性模量之间的关系。成形方向和非成形方向的本构关系相互独立,可以分别单独考虑。

金属橡胶材料加工成形后,内部螺旋卷的排列是随机分布、不规则的,但是其任意受力状态都可以正交分解为轴向、横向加载。分别对这两种载荷状态下的螺旋微元体进行受力和变形分析,可得螺旋微元体的轴向刚度和横向刚度。

金属橡胶宏观本构关系的建立方法

基于对金属橡胶螺旋微元体及其接触状态的力学分析,借助取向角的概率分布修正以及宏观应变对接触状态演化规律影响的定量描述,可以建立基于平均状态因子内变量、实现不同接触状态统一定量描述的金属橡胶细观单元体刚度模型。

金属橡胶宏观结构由一定数目

的细观单元体阵列组成。考虑承载厚度、承载面积、沿承载方向的层数及所分布细观单元体的数量等,可得到金属橡胶材料的宏观弹性模量。引入应变影响因子,则得到更新后的金属橡胶宏观弹性模量。此弹性模量与金属橡胶材料的宏观应变有关,其描述的是一定应变下的弹性模量,即是该应变下的切线弹性模量,据此可积分得到金属橡胶材料的宏观应力应变本构关系。

金属橡胶减振器的设计和建模仿真方法

金属橡胶减振器的设计方法

金属橡胶减振器的正向设计流程分为减振器总体方案设计、减振器材料设计、减振器刚度范围设计、减振器参数优化和金属橡胶参数设计共5个步骤。

减振器总体方案设计中,需要考虑减振器的安装位置和接口尺寸。为使不同安装条件下减振器均具有优异的力学性能,有两种可行路径:一是针对不同的安装角度,设计不同的减振器,但这种设计方式难以从根本上解决多角度安装问

题,且不具备普适性;二是设计“各向同性”减振器,通过合理的结构设计,使减振器在3个方向的力学性能相似,以减小其性能对安装角度的敏感性,这种设计方式从根本上解决了多角度安装问题,且具备统一性和普适性。

在减振器材料选取的时候,需要综合考虑减振器的载荷条件、质量限制及使用环境。其中,减振器的载荷条件与减振器的应力分布密切相关,在材料选取时,应保证材料的弹性极限高于实际载荷条件下的应力最大值;减振器的选材也与其质量密切相关,在总质量受限的情况下,其选材也受限。但强度及质量问题均在具体的参数优化时予以考虑,在初步设计阶段,主要根据材料的使用环境要求,以及参照现有减振器的常用材料,决定减振器的选材。

减振器的刚度与控制器系统的固有频率密切相关,其刚度设计范围由控制器系统的谐振频率要求、相邻结构件的共振频率限制和现有减振器的刚度设计范围共同确定。首先,需要根据载荷谱条件,确定减振器的谐振频率范围,进而确定减振器的初始刚度范围。此外,为避免控制器系统与相邻结构件发生耦合振动,应将控制器系统的固有频率避开相邻结构件的固有频率。同时,在确定刚度设计范围时,可以借鉴已有经验,参照现有减振器的刚度设计范围。三者结合,即可确定减振器的初始刚度范围,作为下一步参数优化时初始刚度值选取及刚度优化范围的依据。

在具体的参数优化阶段,需要考虑具体的载荷条件及响应指标要

求，分析在每种载荷条件下，最关心或最危险的响应指标，将其作为优化目标，选取对优化目标影响最大的参数，将其作为优化参数进行减振器的优化设计。

参数优化的顺序如图3所示，先进行减振器结构参数的优化，确定金属橡胶的安装空间；再进行金

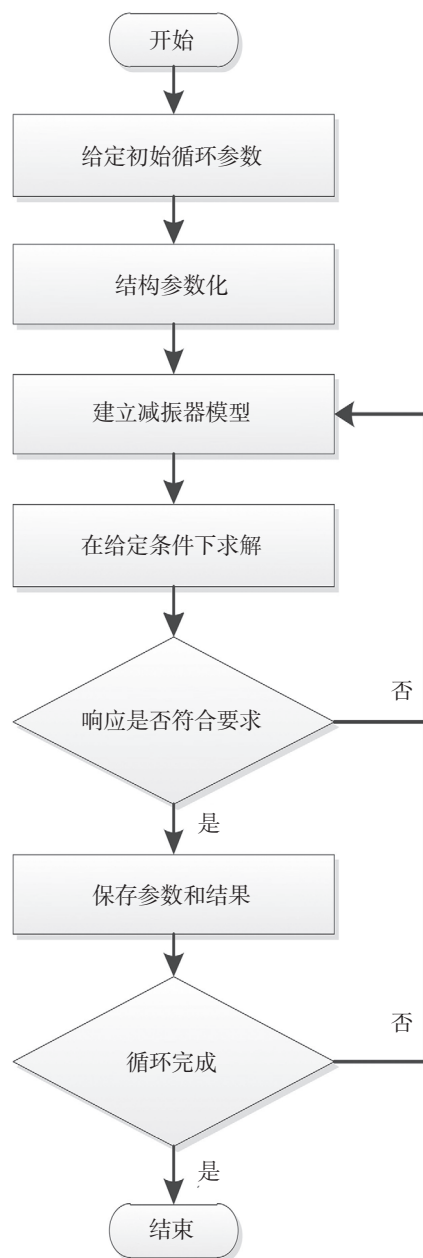


图3 结构参数优化设计过程

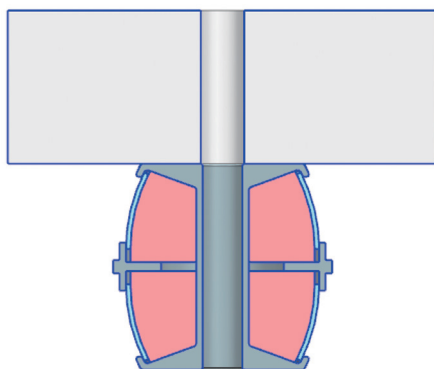


图4 新型减振器结构

属橡胶参数的优化，金属橡胶的参数包括材料参数、工艺参数、装配参数和性能参数。优化过程主要是确定金属橡胶的刚度等性能参数。

金属橡胶减振器的动力学建模方法

考虑到金属橡胶受压时力学性能稳定，受拉时力学性能不稳定，为保证无论在何种安装角度下金属橡胶均受压，在发动机电子控制器的减振器设计中，采用了支撑面在中间、整体上下对称放置金属橡胶的结构形式，如图4所示。

在这种结构设计下，当减振器的中间法兰部位与上下端面之间存在相对运动时，会挤压内部的金属橡胶。并且，金属橡胶在组装后有一定的预压缩量，保证无论何种安装角度、何种受力情况下，上下对称放置的金属橡胶均为受压状态，能保证金属橡胶具有稳定的性能和更长的寿命。此外，采用聚四氟乙烯衬套的设计，实现对金属橡胶的包裹，使其不裸露。

基于有限元法（FEM）的仿真分析需将连续结构进行网格离散。因此，在几何模型导入仿真分析软件前，必须进行合理的模型简化。

减振器零件形状不规则，采用四面体单元进行网格划分。

材料的密度、弹性模量和泊松比是振动仿真的必要参数。金属橡胶为编织而成的多孔结构，可用等效密度（质量与体积的比值）作为金属橡胶的密度。

减振器的底部端面与支撑位置相连，中间法兰部位与电子控制器连接。在仿真中为实现相对运动，可以在减振器底部端面施加固定约束，减振器法兰部位与电子控制器同步运动；也可以固定减振器的法兰部位，则减振器的上下端面需要与电子控制器同步运动。

金属橡胶减振器的动力学仿真

减振器的实际负载较为复杂，在分析单个减振器的性能时，采用理想的模拟负载进行分析，简化后的减振器分析模型如图5所示。

金属橡胶减振器涉及的材料为金属结构件、金属橡胶和聚四氟乙烯。其中金属橡胶的等效密度为 1950kg/m^3 ，泊松比取0.1，计算得到的弹性模量为 4.7MPa 。

在减振器法兰上施加固定约束，并划分网格。采用该有限元模型，计算减振器轴向的模式频率为 65.7Hz ，在设计值 65Hz 附近。

金属橡胶减振器测试验证

为验证上述设计方法的可行性及仿真方法的准确性，制作了4个金属橡胶减振器，并进行了振动试验测试。测试条件为常温常压的环境温度；试验设备包括ES-10-240振动台、Vibstar振动控制仪、加速度传感器等。

为模拟减振器的仿真过程，将减振器的法兰部位进行固定，在减

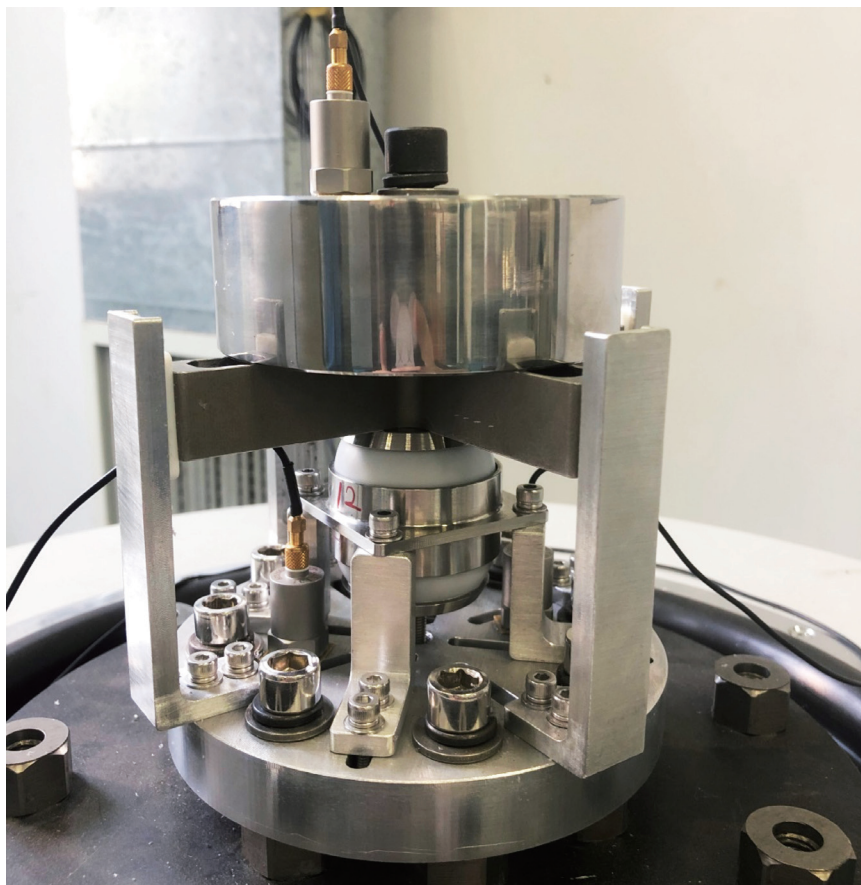


图5 减振器的安装

表1 减振器仿真测试误差

减振器序号	频率/Hz			偏差/%		
	0h	1h	2h	0h	1h	2h
1	64.6	64.5	63.3	1.7	1.9	3.8
2	80.5	80.1	78.1	18.4	18.0	15.9
3	66.5	65.8	65.5	1.2	0.2	0.3
4	67.9	65.1	64.5	3.2	0.9	1.9

振器上端面施加2kg的质量块，如图5所示；在减振器轴向方向，按HB 5830.5施加扫频谱载荷；单个减振器的振动时间为2h，记录每个减振器在0h、1h、2h时的扫频曲线和谐振频率，见表1。

仿真的轴向谐振频率为65.7Hz，对比减振器仿真结果和测试结果，

并计算频率偏差（|仿真值-测试值|/测试值），汇总见表1。

从上表可以看出，4个金属橡胶减振器经过2h振动试验后，谐振频率均随时间的延长而呈降低趋势，但仿真值与测试值的偏差均不超过20%。

结束语

金属橡胶作为一种新型减振材料，在航空发动机控制器的减振中具有重要的应用价值。通过金属橡胶减振器的性能仿真和测试研究，加强了金属橡胶减振器的桌面设计和虚拟验证能力，对提升数字式电子控制器的抗振性能有较强的实用价值。 **航空动力**

（赵奎，中国航发动控所，工程师，主要从事发动机电子控制器的结构抗振设计工作）

参考文献

- [1] 赵东远,樊虎,任志久.可靠性工程与应用[M].北京:国防工业出版社,2009.
- [2] 张大义,夏颖,张启成,等.金属橡胶力学性能研究进展与展望[J].航空动力学报,2018,33(6).
- [3] 高笛,马艳红,洪杰.压缩比对金属橡胶结构和压缩力学性能影响[J].航空动力学报,2016,31(3).
- [4] 马艳红,陆宏伟,朱海雄,等.弹性环金属橡胶支承结构刚度设计与试验验证[J].航空学报,2013,34(6).
- [5] 朱彬,马艳红,洪杰.金属橡胶刚度阻尼模型理论分析[J].北京航空航天大学学报,2011,37(10).
- [6] 洪杰,朱彬,马艳红等.金属橡胶颗粒静态特性试验[J].北京航空航天大学学报,2012,38(2).
- [7] 朱芹.金属丝网减振器参数辨识与性能试验研究[D].太原:中北大学,2018.
- [8] 朱彬,马艳红,张大义,等.金属橡胶迟滞特性本构模型研究[J].物理学报,2012,61(7).
- [9] 刘泽.金属丝网橡胶减振器振动及抗冲击力学性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2016.