

环形橡胶-硅油组合式减振器静态刚度特性研究

伍魏明,朱如鹏,李苗苗,张沁薇,时均浩
(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘要:以环形橡胶-硅油组合式减振器为研究对象,通过 ANSYS 开展了其静态刚度特性研究。通过橡胶样件的单轴拉伸试验,基于试验数据拟合确定了多种橡胶超弹性本构模型参数。分别建立了减振器固体有限元模型和流体有限元模型,进行静态刚度仿真。通过试验机开展了该减振器静态刚度试验。对比分析静态仿真与静态试验,选取了 Neo-Hookean 超弹性本构模型,分析了橡胶外径、橡胶内径和硅油粘度对静态刚度的影响。研究结果为该减振器的应用提供了支持。

关键词:减振器;橡胶;硅油;静态刚度

中图分类号:V215.3+6 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2019)05-0093-04

Study of Static Stiffness of Annular Rubber-Silicone Oil Damper

WU Weiming, ZHU Rupeng, LI Miaomiao, ZHANG Qinwei, SHI Junhao

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: This paper takes the annular rubber-silicone oil damper as research object, makes a study of its static stiffness characteristics by ANSYS. The uniaxial tension test of the rubber samples is carried out, a variety of rubber hyperelastic constitutive model parameters are determined based on the test data. The solid finite element model and fluid finite element model are built respectively and the static stiffness simulation is done. The static stiffness test of the annular rubber-silicone oil damper is carried out on the testing machine. The simulation results are compared with the test results, the Neo-Hookean hyperelastic constitutive model is selected. The effects of the rubber outer diameter, rubber inner diameter and viscosity on the static stiffness are analyzed. The paper provides support for its application.

Keywords: damper; rubber; silicone oil; static stiffness

0 引言

直升机尾传动系统是直升机传动系统的重要组成部分,具有传动链长、支承多和转速高的特点^[1]。尾传动轴系在高速运转时,弯曲振动是影响直升机尾传动轴系性能的重要原因^[2]。在支承中安装环形橡胶-硅油组合式减振器可以抑制尾传动轴系的弯曲振动。静态刚度是反映环形橡胶-硅油组合式减振器性能的重要指标。环形橡胶-硅油组合式减振器主体是橡胶材料,与金属材料不同,橡胶材料的特性受到配方、硬度、受力情况的影响,不能简单地用弹性模量、泊松比来表示^[3]。

在已有的文献中,彭彪^[4]基于经典弹性理论,利用欧拉方程组推导了橡胶筒承受径向载荷时的平面位移解析解。秦柏^[5]用 ANSYS 软件建立了实心橡胶减振器的有限元参数化模型,研究了实心橡胶减振器的径向刚度特性,但未能进行试验验证。本文开展了环形橡胶-硅油组合式减振器静态刚度仿真和试验研究,将试验获得的静态刚度结果和有限元仿真的静态刚度结果进行对比,验证有限元仿真的可靠性。

1 橡胶材料超弹性性能

橡胶材料是环形橡胶-硅油组合式减振器的主要组成部分。在静态载荷的作用下,橡胶材料表现出超弹性特征,橡胶的应力应变关系是非线性的,选择合适的本构模型来定义橡胶材料的超弹性至关重要^[6-7]。目前研究橡胶超弹性本构模型的理论已趋于成熟,主要分为两大类:分别是基于连续介质的现象学描述和基于分子热力学的统计理论。目前较为成熟的有现象学描述的多项式 Mooney-Rivlin 模型、Neo-Hookean 模型、Yeoh 模型和基于分子热力学的 Arruda-Boyce 模型^[8]。

为了确定橡胶的力学性能,本文开展了橡胶样件的单轴拉伸试验,通过单轴拉伸试验数据拟合出橡胶的超弹性本构模型参数。根据 GB/T 528-2009,选用 I 型哑铃状试样,在电子拉力机上进行 I 型哑铃状试样的单轴拉伸试验,如图 1 所示。通过单轴拉伸试验数据,得到多种超弹性本构模型的参数。根据吴梵的研究^[9],通过硬度计算得到邵氏 A80 硬度聚氨酯橡胶 Mooney-Rivlin 本构模型的经验参数。多种橡胶超弹性本构模型的拟合参数如表

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51375226)

作者简介:伍魏明(1994—),男,安徽合肥人,硕士研究生,研究方向为机械振动学。

1 所示。

表 1 多种橡胶超弹性本构模型的拟合参数

超弹性本构模型	拟合参数
Neo-Hookean	$C_{10} = 3.184\ 4E6$
Mooney-Rivlin	$C_{10} = 2.450\ 6E6, C_{01} = -9.577\ 7E5$
1 阶 Yeoh	$C_{10} = 1.592\ 2E6$
2 阶 Yeoh	$C_{10} = 1.499\ 3E6, C_{20} = 9.821\ 8E5$
3 阶 Yeoh	$C_{10} = 1.648\ 5E6, C_{20} = -4.284\ 1E6, C_{30} = 3.242\ 7E6$
Arruda-Boyce	$C_{10} = 3.231\ 6E6, C_{20} = 10.18$
经验参数	$C_{10} = 1.252\ 0\ E6, C_{01} = 0.313\ 0\ E6$

2 环形橡胶-硅油组合式减振器静态刚度仿真

2.1 环形橡胶-硅油组合式减振器的结构

环形橡胶-硅油组合式减振器的结构如图 2 所示。该减振器的橡胶材料为环形空心结构,在橡胶材料的外环面开设了 2 个对称的注油嘴,通过注油嘴注射和密封流体。该减振器由金属衬套、橡胶材料、填充硅油、注油嘴、密封圈和堵头组成。减振器安装在轴承和基座之间,其外环面和基座配合,金属衬套内环面和轴承外圈配合。

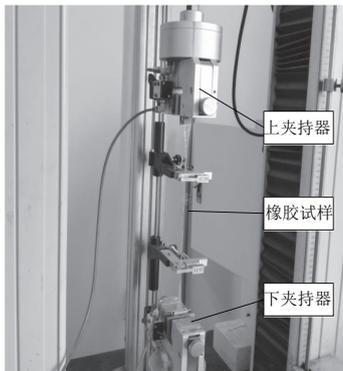


图 1 橡胶材料的单轴拉伸试验

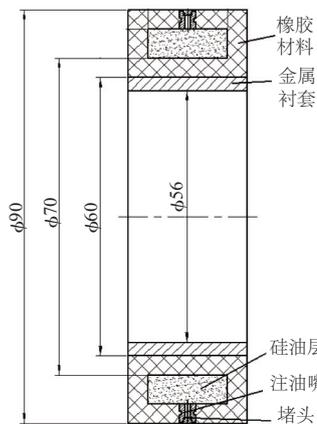


图 2 环形橡胶-硅油组合式减振器的结构

2.2 环形橡胶-硅油组合式减振器静态刚度有限元分析

在 ANSYS 软件中分别建立固体域有限元模型和流体域有限元模型。通过 Static Structural 模块开展固体域仿真,通过 Fluent 模块仿真开展流体域仿真,通过 System Coupling 模块实现双向流固耦合仿真。

1) 固体域有限元模型

考虑到金属注油嘴尺寸较小且和外层橡胶粘接固定,在建立固体有限元模型时,将注油嘴忽略不计。通过 Mesh 模块划分固体域网格,固体域网格如图 3 所示。环形橡胶-硅油组合式减振器中橡胶是重要的减振材料,选择合适的超弹性本构模型定义橡胶的材料特性至关重要。本文分别采用了表 1 中的多种超弹性本构模型的参数,开展多种超弹性本构模型下的静态刚度仿真。

2) 流体有限元模型

流体的结构是根据减振器实体内部充满流体时流体的形状确定的,本文研究的减振器内部是充满硅油流体,在建模时要将流体域单独生成一个结构体。通过 Mesh 模块进行流体域的网格划分。流体仿真对网格质量的要求更加严格,本文流域网格划分结果如图 4 所示。

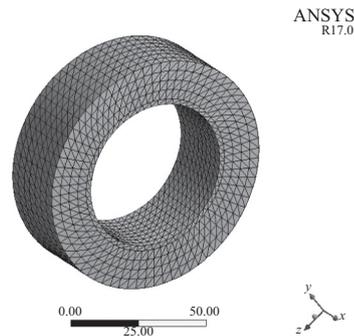


图 3 固体域网格

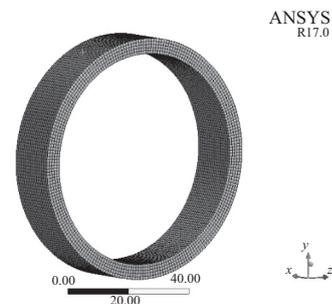


图 4 流体域网格

3) 环形橡胶-硅油组合式减振器静态刚度仿真

环形橡胶-硅油组合式减振器的静态刚度仿真曲线如图 5 所示。在 0.6 mm 变形范围内,减振器的载荷和位移成正相关,并且随着位移的增加,载荷的增长趋势较稳定。分别采用表 1 中多种超弹性本构模型开展减振器的静态刚度仿真,获得多种超弹性本构模型对应的静态仿真刚度,如表 2 所示。

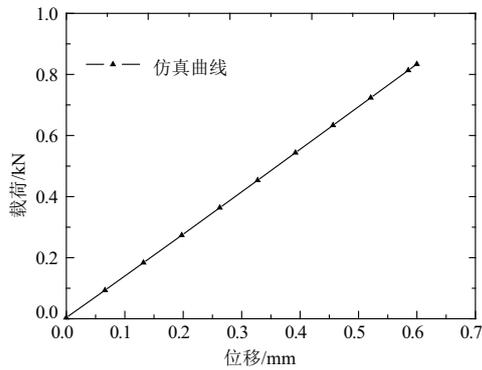


图5 环形橡胶-硅油组合式减振器的静态刚度仿真曲线

表2 静态试验刚度与多种超弹性本构模型的仿真刚度

超弹性模型	仿真静态刚度/(kN/m)	试验静态刚度/(kN/m)	误差/(%)
Neo-Hookean	1.4377×10^6		5.04
Mooney-Rivlin	1.3498×10^6		10.85
1阶Yeoh	1.4372×10^6		5.08
2阶Yeoh	1.3738×10^6	1.5141×10^6	9.27
3阶Yeoh	1.4203×10^6		6.20
Arruda-Boyce	1.6285×10^6		7.56
经验公式	1.7826×10^6		17.73

2.3 环形橡胶-硅油组合式减振器静态刚度特性分析

基于 Neo-Hookean 超弹性本构模型,分析了橡胶外径、橡胶内径以及硅油粘度对环形橡胶-硅油组合式减振器静态刚度的影响。

1) 橡胶外径对环形橡胶-硅油组合式减振器静态刚度的影响

保持环形橡胶-硅油组合式减振器的内径和硅油粘度(12500 CS)恒定,改变减振器的外径尺寸,外径尺寸分别为 86 mm、88 mm、90 mm、92 mm、94 mm。比较不同橡胶外径下减振器的静态仿真结果,橡胶外径对减振器静态刚度的影响如图 6 所示。随着橡胶外径的增大,其静态刚度随之减小。在 86 mm~94 mm 外径尺寸范围内,静态刚度减小了 19.70%。

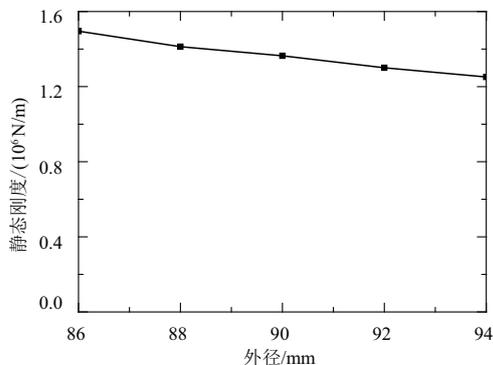


图6 橡胶外径对环形橡胶-硅油组合式减振器静态刚度的影响

2) 橡胶内径对环形橡胶-硅油组合式减振器静态刚度的影响

保持环形橡胶-硅油组合式减振器的橡胶外径和硅油粘度(12500 CS)恒定,改变减振器的内径尺寸,内径尺寸分别为 56 mm、58 mm、60 mm、62 mm、64 mm。比较不同橡胶内径下减振器的静态仿真结果,橡胶内径对减振器静态刚度的影响如图 7 所示。随着减振器橡胶内径的增大,仿真静态刚度随之增大。在 56 mm~64 mm 橡胶内径范围内,静态刚度增大了 29.83%。

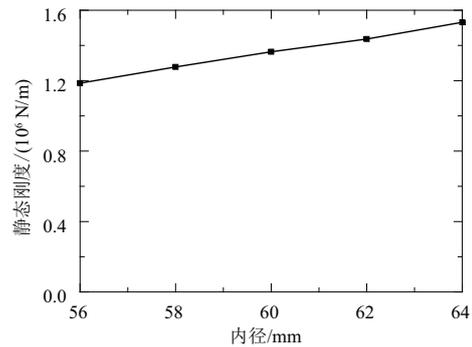


图7 橡胶内径对环形橡胶-硅油组合式减振器静态刚度的影响

3) 硅油粘度对环形橡胶-硅油组合式减振器静态刚度的影响

保持环形橡胶-硅油组合式减振器的橡胶外径(90 mm)、橡胶内径(60 mm)不变,开展了 100 CS、1000 CS、12500 CS 3种硅油粘度下的静态刚度仿真。3种粘度的仿真结果如图 8 所示。硅油粘度对减振器的静态刚度影响较小,硅油粘度在 100 CS~12500 CS 范围内,静态刚度的变化范围<0.5%。

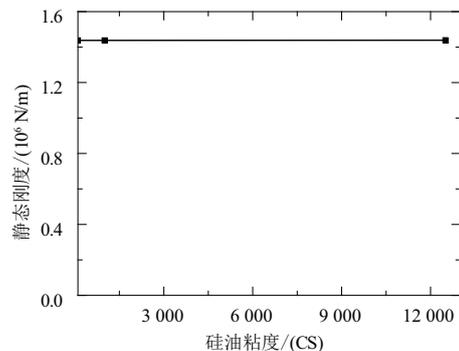


图8 硅油粘度对环形橡胶-硅油组合式减振器静态刚度的影响

综上所述:橡胶外径增大会使得减振器的静态刚度减小,橡胶内径增大会使得减振器的静态刚度增大。硅油粘度对静态刚度的影响远远小于橡胶外径和橡胶内径的影响,在初步设计时可暂时不考虑硅油对静态刚度的影响。

3 试验分析

为了验证仿真刚度的可靠性,加工邵尔 A80 硬度环形橡胶-硅油组合式减振器的样件,如图 9 所示,进行静态试验。

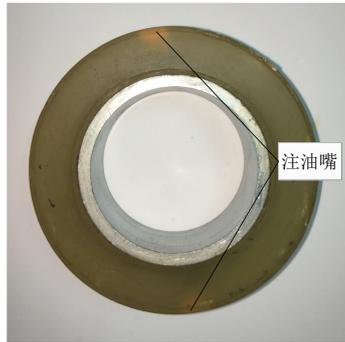


图9 环形橡胶-硅油组合式减振器实物

通过 PA-100 电液伺服动静万能试验机上开展环形橡胶-硅油组合式减振器的静态拉伸试验,试验夹具如图 10 所示,获得试验曲线如图 11 所示。由图 11 可以看出:在试验过程中,减振器的力-位移并不是完全的线性关系,计算得到静态刚度为: $K_0 = 1.5141 \times 10^6 \text{ N/m}$ 。开展了减振器静态仿真和静态试验的对比分析,如图 11 所示。对比分析减振器静态刚度试验值和多种超弹性本构模型静态刚度仿真值,如表 2 所示。Neo-Hookean 超弹性本构模型下的静态刚度仿真和试验值最为接近,误差是 5.04%。进行邵氏 A80 硬度聚氨酯橡胶仿真时,在 20% 应变下选用 Neo-Hookean 超弹性本构模型模型。

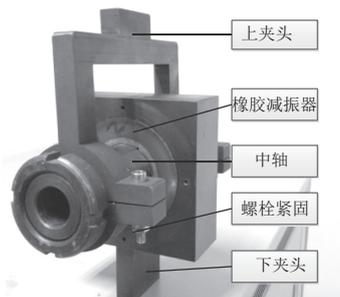


图10 环形橡胶-硅油组合式减振器的夹具

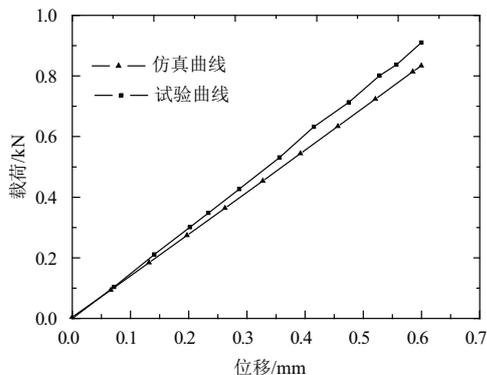


图11 静态刚度仿真与试验曲线

4 结语

本文以环形橡胶-硅油组合式减振器为对象,研究了其静态刚度特性。根据 I 型哑铃状橡胶样件的单轴拉伸试验数据,拟合多种橡胶超弹性本构模型的参数。分别建立了固体域模型和流体域模型,开展了减振器静态刚度仿真,获取了多种橡胶超弹性本构模型的静态仿真刚度。分析了橡胶外径、橡胶内径和硅油粘度对减振器静态刚度的影响。通过试验机开展了减振器静态试验,对比分析了静态仿真和静态试验,选择适合的橡胶超弹性本构模型。主要得到如下几点结论:

1) 环形橡胶-硅油组合式减振器的静态刚度和变形程度为非线性关系。在 20% 应变范围内,开展了橡胶材料样件的单轴拉伸试验数据,获取了多种超弹性本构模型参数,对比分析了静态仿真刚度值和静态试验刚度值,Neo-Hookean 超弹性本构模型仿真效果较好。

2) 橡胶外径增大会使得环形橡胶-硅油组合式减振器的静态刚度减小,橡胶内径增大会使得环形橡胶-硅油组合式减振器的静态刚度增大。硅油粘度对静态刚度的影响远小于橡胶内径和外径的影响,在初步设计时可暂时不考虑硅油对静态刚度的影响。

参考文献:

- [1] 倪德,李科锋,刘建武. 基于分布质量轴模型的尾传动轴系临界转速分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2016, 48(6): 822-827.
- [2] 朱自冰,朱如鹏,鲍和云,等. 刚度对直升机尾传动系统弯曲振动固有频率影响的分析[J]. 航空动力学报, 2009, 24(1): 176-180.
- [3] 田春蓉,梁书恩,王建华. 聚氨酯弹性体性能的影响因素[J]. 合成橡胶工业, 2008, 31(6): 441-445.
- [4] 彭彪,朱石坚. 有限长橡胶筒径向刚度精确解[J]. 工程力学, 2009, 26(4): 202-206.
- [5] 秦柏,邵俊鹏,张艳芹,等. 环形橡胶径向刚度特性仿真分析[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2009, 14(3): 51-55.
- [6] 王文涛,胡春平,肖苏华,等. 车用橡胶悬置静态刚度预测计算的影响因素研究[J]. 现代制造工程, 2014(8): 45-49.
- [7] 胡小玲,刘秀,李明,等. 炭黑填充橡胶超弹性本构模型的选取策略[J]. 工程力学, 2014, 31(5): 34-42.
- [8] Carlescu V, Prisacaru G, Olaru D. FEM simulation on uniaxial tension of hyperelastic elastomers [J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 659: 57-62.
- [9] 吴梵,宋世伟. 材料硬度对 C 形密封圈密封能力的影响研究[J]. 船舶工程, 2010(6): 68-71.

收稿日期:2018-03-06