

# 液-弹隔振器设计与试验分析

钱峰, 程起有, 代志雄

(中国直升机设计研究所直升机旋翼动力学重点实验室, 江西 景德镇 333001)

**摘要:** **目的** 开展液-弹隔振器的设计及试验验证。**方法** 基于反共振原理建立的液-弹隔振器动力学分析模型, 推导了其动力学方程。**结果** 建立了液弹隔振器隔振频率与相关参数的关系, 依据相关参数完成了液-弹隔振器的设计, 并进行了液-弹隔振器动力学性能相关试验, 利用动刚度测试法和传递率测试法验证了液-弹隔振器性能, 试验验证了液-弹隔振器高静态刚度和隔振频率点下的低动态刚度特点。**结论** 实现了液-弹隔振器的设计, 同时液弹隔振器在隔振频率点下达到60%的减振效果。

**关键词:** 液-弹; 隔振; 验证

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2020.09.013

**中图分类号:** V222 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2020)09-0072-05

## Design and Test Analysis of Fluidlastic Isolator

QIAN Feng, CHENG Qi-you, DAI Zhi-xiong

(National Key Laboratory of Science and Technology on Rotorcraft Aeromechanics, China Helicopter Research and Development Institute, Jingdezhen 333001, China)

**ABSTRACT:** The work aims to carry out the design and test verification of fluidlastic isolator. Based on the anti-resonance principle, a dynamic analysis model of the fluidlastic isolator was established and its dynamic equation was derived. The relationship between the vibration isolation frequency of the fluidlastic isolator and related parameters was established and the model of fluidlastic isolator was designed according to related parameters. Then, the dynamic performance test was carried out to the fluidlastic isolator. The performance of fluidlastic isolator was verified by dynamic stiffness test and transmittance test. The test results verified the high static stiffness and low dynamic stiffness of the fluidlastic isolator at the vibration isolation frequency. The design of the fluidlastic isolator is realized, and the fluidlastic isolator achieves a 60% vibration reduction effect at the vibration isolation frequency point.

**KEY WORDS:** fluidlastic; vibration isolation; validation

直升机的主要振源是旋翼, 旋翼振动载荷通过主减系统传递到机身, 因此对直升机振动控制来说, 通过主减隔振措施, 降低振动载荷向机体传递是一种非常有效的方法<sup>[1-3]</sup>。先后发展并得到应用的主减被动隔振技术主要有节点梁隔振、聚焦式隔振、动力反共振隔振几种<sup>[4-9]</sup>。现阶段, 动力反共振隔振得以广泛

应用, 传统的动力反共振隔振器都是机械式结构, 需要杠杆摆臂, 受制于运动空间和可靠性, 使用不便。液-弹隔振器通过液压的放大作用来取代传统动力反共振结构的摆臂机构, 其更适合不同吨位的直升机, 并且可靠性高, 是当前研究和使用的新技术。

国内外许多专家学者对液-弹隔振器进行了一系

收稿日期: 2020-06-30; 修订日期: 2020-07-20

Received: 2020-06-30; Revised: 2020-07-20

作者简介: 钱峰(1985—), 男, 硕士, 高工, 研究方向为直升机振动控制。

**Biography:** QIAN Feng(1985—), Male, Master, Engineer, Research focus: helicopter vibration control.

列研究，Bell 公司与 Lord 公司合作研制了主减液-弹隔振系统，并成功应用于 Bell 427、Bell 430 等多个机型上；Dennis P.McGuire 对被动式、主动式液-弹隔振器研究情况进行了介绍；龚亮设计了一种新的液-弹隔振器实现形式，并建立了动力学模型<sup>[10-17]</sup>。

笔者基于动力反共振原理完成了液-弹隔振器动力学建模，基于动力学方程的分析进行了液-弹隔振器相关参数的设计，并对液-弹隔振器进行了静、动力学相关试验，得到了相关试验结论。

### 1 液-弹隔振器动力学建模

动力反共振隔振在常规的弹簧、阻尼单元的基础上附加了惯性元件，如图 1 所示。在进行力激励时，惯性元件  $m$  运动产生的惯性力在特定的频率上能抵消弹性力向隔振对象的传递，不考虑阻尼时，能达到传递率为 0 的隔振效果，考虑阻尼时，传递率也很小。

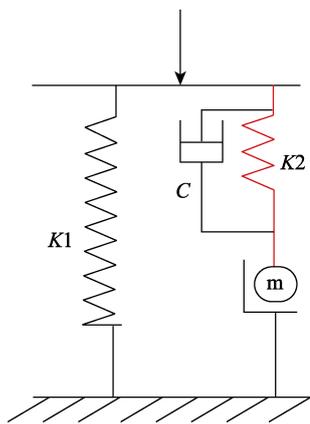


图 1 反共振系统的力学模型  
Fig.1 Mechanical model of anti-resonance system

液-弹隔振器采用动力反共振原理，利用高密度液体作为惯性元件，具有更大的放大比，同时其可设计成高静态刚度，而且在所要求的隔振频率下实现低动态刚度。

液-弹隔振器由内筒、外筒及橡胶等组成，其原理如图 2 所示。对液-弹隔振器进行建模分析，令隔振器上腔截面积为  $A$ ，惯性通道截面积为  $B$ ，下腔截面积为  $C$ ，橡胶刚度系数为  $K$ ，阻尼系数为  $c$ ，惯性通道内液体质量为  $m_2$ ，液体流动阻尼系数为  $C_2$ ，上端附加质量为  $M_1$ 。

假设隔振器大头端施加幅值为  $F$  的正弦力激励，对应的激励幅值为  $x_1$ （向上为正），通道内液体的位移为  $x_2$ （向上为正），隔振器小头端固定，小头端的约束反力为  $FC$ （向下为正）。上腔液体压强相对于平衡状态的增加值为  $P$ 。

根据体积相等及牛顿运动定律，通过推导，可以得到整个系统的力学方程：

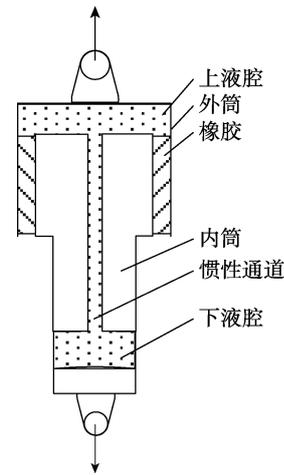


图 2 液-弹隔振器原理

Fig.2 Schematic diagram of fluidlastic isolator

$$Ax_1 = Bx_2 \tag{1}$$

$$m_2\ddot{x}_2 + c_2\dot{x}_2 + PB = 0 \tag{2}$$

$$F = M_1\ddot{x}_1 + c\dot{x}_1 + Kx_1 - PA \tag{3}$$

$$FC = c\dot{x}_1 + Kx_1 - P(A - B) \tag{4}$$

根据推导可得隔振系统的力传递率为：

$$\eta = \frac{FC}{F} = \frac{K - R^2m_2\omega^2 + Rm_2\omega^2 + i(c\omega + R^2c_2\omega - Rc_2\omega)}{K - M_1\omega^2 - R^2m_2\omega^2 + i(c\omega + R^2c_2\omega)} \tag{5}$$

激励力与激励位移之间的关系式为：

$$\frac{F}{x_1} = K - M_1\omega^2 - R^2m_2\omega^2 + i(c\omega + R^2c_2\omega) \tag{6}$$

约束反力与激励位移之间的关系式为：

$$\frac{FC}{x_1} = K - R^2m_2\omega^2 + Rm_2\omega^2 + i(c\omega + R^2c_2\omega - Rc_2\omega) \tag{7}$$

式中  $R = \frac{A}{B}$ 。式 (5)、(6) 中右端项即为动刚度，

其中，实部为弹性刚度，虚部为阻尼刚度。

无阻尼情况下，令约束反力  $FC$  等于 0 的频率即为系统的隔振频率，隔振频率为：

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m_2R(R-1)}} \tag{8}$$

液-弹隔振器中橡胶的刚度等效成动力反共振系统中的弹簧刚度，隔振器液腔与惯性通道的面积比等效成机械式反共振隔振系统中杠杆的长度比，惯性通道中的液体质量等效成杠杆上的惯性质量。

### 2 液-弹隔振器设计

适用于直升机主减隔振的液-弹隔振器设计，要

结合试验机来确定隔振器的主要设计参数。通过旋翼激励振频率  $N\Omega$ ,也即隔振频率来设计液-弹隔振器的尺寸。设液-弹隔振器上腔的半径为  $r_u$ , 下腔的半径为  $r_d$ , 通道半径为  $r_0$ , 则系统隔振频率为:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_1}{mR(R-1)}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_1}{\rho\pi L \left(\frac{r_u^2}{r_0^2} - 1\right) r_u^2}} \tag{9}$$

从式(9)可以看出, 系统的隔振频率与橡胶刚度、液体密度、惯性通道长度、放大比、以及上腔半径等参数有关, 这些也是隔振器的主要设计参数。

根据上述分析, 针对某民用直升机, 基于液-弹隔振器结构原理,同时结合主减结构完成了液-弹隔振器相关参数的设计。设计参数如下: 橡胶静刚度为 2500 N/mm, 放大比为 78, 通道内质量为 49 g。

### 3 液-弹隔振器性能测试及分析

为了验证液-弹隔振器的性能, 一般采用动刚度测试法, 如图 3 所示。



图 3 液-弹隔振器刚度试验  
Fig.3 Stiffness test of fluidlastic isolator

从图 4—5 中可以看出, 橡胶的静刚度约为 2478 N/mm, 与设计值接近, 误差很小, 橡胶的动刚度随频率的变化逐渐增大, 这也符合橡胶的特性<sup>[18-20]</sup>。从图 6—7 中可以看出, 液-弹隔振器的静刚度试验值约为 3038 N/mm, 动刚度随着频率增大逐渐变小, 在隔振频率点附近达到极值, 然后随着频率的增大而增加, 液-弹隔振器的动刚度在隔振频率点处约为 700 N/mm, 是静刚度的 25%左右, 验证了液-弹隔振器具有高静态刚度, 在隔振频率下具有低动态刚度的特点。

为了验证动力学模型的准确性, 将橡胶、液体的相关结构参数带入公式 (7), 可以得到液-弹隔振器的动刚度计算值, 试验值与计算值对比结果如图 8 所示。

从图 8 可以看出, 液-弹隔振器动刚度设计值与试验结果的吻合度很高, 验证了分析模型的合理性。

为了模拟直升机主减结构的悬挂状态, 设计了传递率测试法, 利用质量块来模拟代替主减机构质量和机体质量, 试验分别在液-弹隔振器上下两端附加质量块组成液-弹隔振系统, 测量经过液-弹隔振器隔振后质量块上的响应, 试验现场如图 9 所示。

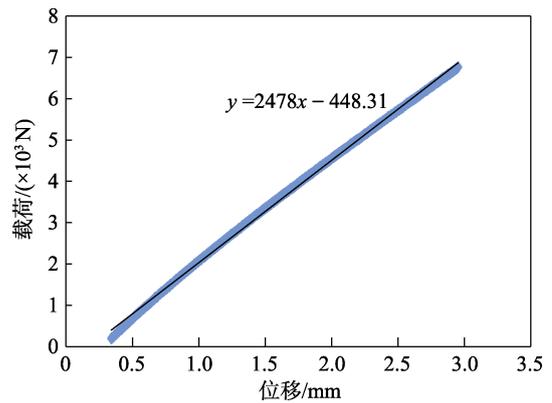


图 4 橡胶静刚度  
Fig.4 Static stiffness of rubber

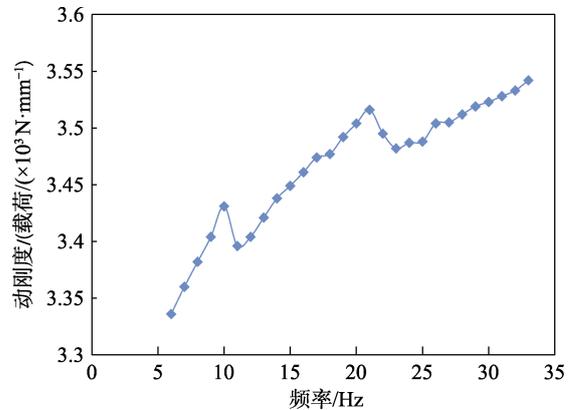


图 5 橡胶动刚度  
Fig.5 Dynamic stiffness of rubber

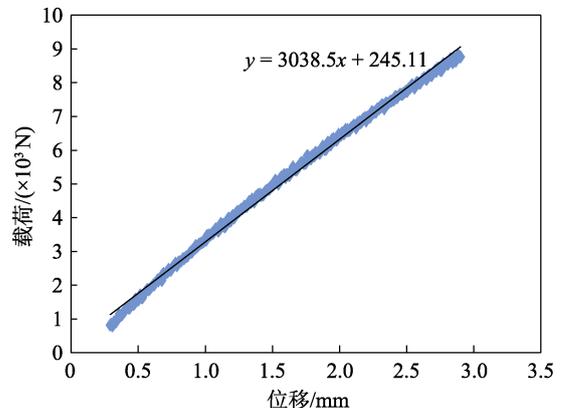


图 6 液-弹隔振器静刚度  
Fig.6 Static stiffness of fluidlastic isolator

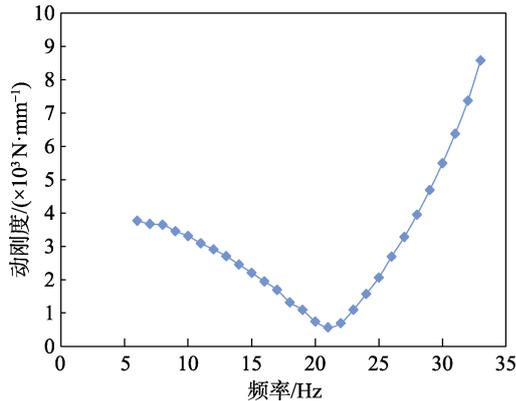


图 7 液-弹隔振器动刚度

Fig.7 Dynamic stiffness of fluidlastic isolator

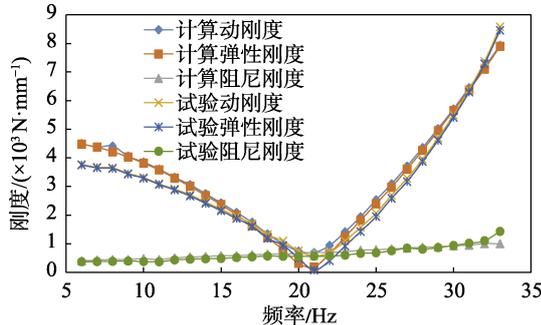


图 8 液-弹隔振器刚度

Fig.8 Stiffness of fluidlastic isolator



图 9 液-弹隔振器振动特性试验

Fig.9 Vibration test of fluidlastic isolator

对比测得的相关载荷与无液-弹隔振器时的载荷，得到液-弹隔振系统的隔振效率，结果如图 10 所示。

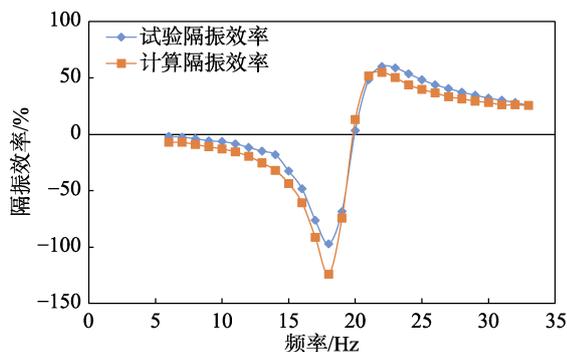


图 10 液-弹隔振系统的隔振效率

Fig.10 Vibration isolation efficiency of fluidlastic isolation system

从图 10 中可以看出，液-弹隔振系统在隔振频率点附近起到了很好的隔振效果，隔振效率超过 60%。

## 4 结语

液-弹隔振器作为一种有效的振动隔离装置，能大幅降低旋翼振动载荷向机体的传递，可以有效地降低全机振动水平。通过理论建模结合实际性能试验，不仅建立起同试验结果一致的动力学分析模型，同时通过动刚度测试法和传递率测试法验证了液-弹隔振器性能，实现了设计的液-弹隔振器在隔振频率点下能够实现 60%隔振效率的减振效果。

## 参考文献：

- [1] 张晓谷. 直升机动力学设计[M]. 北京: 航空工业出版社, 1995.  
ZHANG Xiao-gu. Design of Helicopter Dynamics[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1995.
- [2] 航空航天工业部科学技术研究院. 直升机动力学手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 1991.  
Institute of Science and Technology of the Ministry of Aerospace Industry. Helicopter Dynamics Manual[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1991.
- [3] 张呈林, 张晓谷, 郭士龙, 等. 直升机部件设计[M]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.  
ZHANG Cheng-lin, ZHANG Xiao-gu, GUO Shi-long, et al. Design of Helicopter Component[M]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008.
- [4] 张阿舟, 姚起航. 振动控制工程[M]. 北京: 航空工业出版社, 1989.  
ZHANG A-zhou, YAO Qi-hang. Vibration Control Engineering[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1989.
- [5] 胡海岩, 孙久厚, 陈怀海. 振动与冲击[M]. 北京: 航空工业出版社, 1998.  
HU Hai-yan, SUN Jiu-hou, CHEN Huai-hai. Vibration and Shock[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1998.
- [6] 顾仲权. 动力反共振隔振[J]. 噪声与振动控制, 1989, 6: 36-40.  
GU Zhong-quan. Dynamic Anti-resonance Vibration Isolation[J]. Noise and Vibration Control, 1989, 6: 36-40.
- [7] MICHAEL RS. Dynamically Tailored Airframe Structures Program[C]//[s. l.]: American Helicopter Society 58th Annual Forum, 2001.
- [8] 周为民, 顾仲权. 主动反共振隔振装置的研究(二)实验研究[J]. 南京航空学院学报, 1989, 21(4): 1-5.  
ZHOU Wei-min, GU Zhong-quan. Research on Active Anti-resonance Vibration Isolation Device (two) Experimental Research [J]. Journal of Nanjing Institute of Aeronautics, 1989, 21(4): 1-5.
- [9] 黄传跃, 郭光海, 祖钊. 一种新型旋翼/机身隔振装置

- 及其性能分析[J].振动工程学报, 1999, 12(3): 403-409.
- HUANG Chuan-yue, GUO Guang-hai, ZU Zhao. A New Type of Rotor/Fuselage Vibration Isolation Device and Its Performance Analysis[J]. Chinese Journal of Vibration Engineering, 1999, 12(3): 403-409.
- [10] 邓旭东. 直升机主减隔振系统的设计与仿真[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- DENG Xu-dong. Design and Simulation of Helicopter Main Vibration Reduction and Isolation System[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.
- [11] HALWES D R. LIVE-Liquid Inertia Vibration Eliminator[C]// Washington: American Helicopter Society 36th Annual Forum, 1980.
- [12] KYLE R. Vibration Analysis and Testing of Bell 429 Helicopter[C]// Arizona: American Helicopter Society 66th Annual Forum, 2010.
- [13] DENNIS P, MCGUIRE. Fluidlatic Dampers and Isolators for Vibration Control in Helicopter[C]// Washington: American Helicopter Society 50th Annual Forum, 1994.
- [14] DENNIS P, MCGUIRE. Active Vibration Control Using Fluidlastic Pylon Struts[C]// Arizona: American Helicopter Society 62nd Annual Forum, 2006.
- [15] MCGUIRE, DENNIS P. High Stiffness "Rigid" Helicopter Pylon Vibration Isolation Systems[C]// Arizona: American Helicopter Society 59th Annual Forum, 2003.
- [16] PETER KONSTANZER. Recent Advances in Eurocopter's Passive and Active Vibration Control[C]// [s. l.]: American Helicopter Society 64th Annual Forum, 2008.
- [17] 龚亮. 液弹隔振器设计分析与试验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- GONG Liang. Design Analysis and Experimental Research of Liquid Bomb Vibration Isolator[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.
- [18] 王光译. 硫化橡胶动态性能试验方法[J]. 噪声与振动控制, 1987, 3: 52-57.
- WANG Guang-yi. Test Method for Dynamic Properties of Vulcanized Rubber[J]. Noise and Vibration Control, 1987, 3: 52-57.
- [19] FLICKLY P K. 橡胶加工和生产组织[M]. 周国楹, 李元石, 周彦豪, 等, 译. 北京: 化学工业出版社, 1992: 16-37.
- FLICKLY P K. Rubber Processing and Production Organization[M]. ZHOU Guo-ying, LI Yuan-shi, ZHOU Yan-hao, et al, Translated. Beijing: Chemical Industry Press, 1992: 16-37.
- [20] 龚积球, 龚震震, 赵熙雍. 橡胶件的工程设计及应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2003.
- GONG Ji-qiu, GONG Zhen-zhen, ZHAO Xi-yong. Engineering Design and Application of Rubber Parts[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2003.