

DOI:10.16356/j.1005-2615.2015.02.014

聚焦式液弹隔振系统的传递特性分析

雷少保 张勇 王华明

(南京航空航天大学直升机旋翼动力学国家级重点实验室,南京,210016)

摘要:为降低机身振动水平,提出了一种能够高效隔离旋翼振动载荷的聚焦式液弹隔振系统。通过对液弹隔振器和聚焦式隔振系统进行建模,分析了聚焦式液弹隔振系统的传递特性。通过建模计算,讨论了阻尼、安装角及惯性液体质量对隔振效率的影响。

关键词:直升机;液弹隔振器;聚焦式隔振;传递特性

中图分类号:V214.3 文献标志码:A 文章编号:1005-2615(2015)02-0275-04

Transmission Characteristics of Focul Fluid Elastomer Vibration Isolation System

Lei Shaobao, Zhang Yong, Wang Huaming

(National Key Laboratory of Science and Technology on Rotorcraft Aeromechanics, Nanjing University
of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: To reduce the vibration level of the fuselage, the focul fluid elastomer vibration isolation system, which can effectively isolate the vibration load from the rotor, is put forward. By modeling the fluid elastomer vibration isolator and the focul vibration isolation system, the dynamic characteristics of the focul fluid elastomer vibration isolation system are analyzed. The influences of damping, installation angle and tuning fluid mass on transmissibility are discussed.

Key words: helicopter; fluid elastomer vibration isolator; focul vibration isolation system; transmission characteristics

旋翼是直升机的主要振源,其载荷通过主减速器传到机身,使机体产生较强的振动响应。如果在主减速器与机体之间安装高效的隔振系统,就能隔断振动传递路径,降低全机振动水平^[1-2]。但是,旋翼产生的主要是几十赫兹的低频振动载荷,按照常规方法设计的隔振系统刚度太低,在旋翼拉力作用下,主减速器与机身之间将产生较大的位移,使机械式操纵系统失效,这无疑会影响到直升机的使用安全。因此,国外针对直升机采取了节点梁隔振、聚焦隔振等特殊的设计措施^[3-4]。由于液弹隔振器具有刚度大、隔离单方向振动的效率高、使用维护方便等优点,文中提出了一种能够高效隔离旋翼振

动载荷的聚焦式液弹隔振系统,通过对液弹隔振器和聚焦式隔振系统进行建模,分析了聚焦式液弹隔振系统的传递特性。

1 聚焦式液弹隔振系统建模

1.1 液弹隔振器

液弹隔振器采用流体作为惯性元件、橡胶作为弹性元件,在隔振频率下可以达到很高的隔振效率。液弹隔振器的原理和力学模型见图 1^[5-6],图中 k_1 为隔振器橡胶元件刚度, k_2 为体积补偿刚度, m 为惯性液体质量, x_0 为惯性液体质量相对管壁位移, x_1 为上液腔位移, x_2 为下液腔位移, x_d 为活塞相对上液腔位移, A_1 , p_1 和 A_2 , p_2 分别为

收稿日期:2015-01-15;修订日期:2015-02-15

通信作者:王华明,男,教授,E-mail:hm_wang@nuaa.edu.cn。

本文已收编于2014年全国直升机年会内部交流论文集。

上下液腔内壁截面积和液体压力, f_1, f_2 分别为上下液腔所受力。上液腔连接振源, 下液腔连接被隔振物体^[7]。

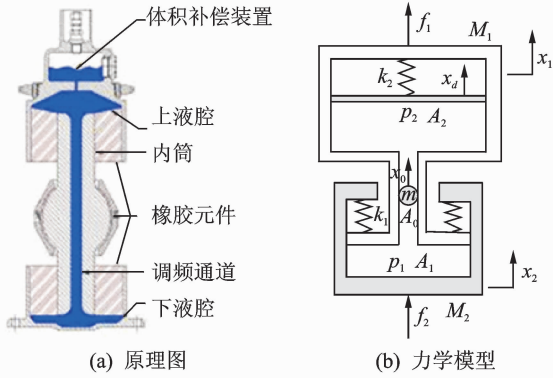


图1 液弹隔振器

Fig. 1 Fluid elastomer vibration isolator

1.2 聚焦式液弹隔振系统

聚焦式隔振系统通过4根刚性撑杆将主减速器连接到机身上, 撑杆的轴线汇聚于一点, 形成刚体运动的“瞬心”, 使主减速器能够绕瞬心进行俯仰和滚转方向的转动, 由于撑杆轴向刚度很高, 因此主减速器与机身之间的线位移很小, 再通过减速器底部的弹性基座, 使旋翼、减速器和安装系统在俯仰和滚转方向的固有频率低于旋翼通过频率, 实现了振动隔离, 如图2所示^[3]。

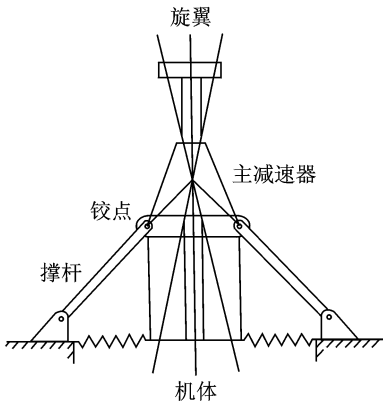


图2 聚焦式隔振系统

Fig. 2 Focal vibration isolation system

将液弹隔振器串联在聚焦式隔振系统的撑杆中, 其他结构不变, 组成聚焦式液弹隔振系统^[8] (见图3)。图中 M_1 为主减速器质量, M_2 为机身质量, α 为聚焦隔振系统撑杆与垂向夹角, 称为液弹隔振器安装角, u 为 M_1 的位移, v 为 M_2 的位移。在垂直方向上, 用牛顿法对液弹隔振器及隔振系统建模分析^[9-12]。

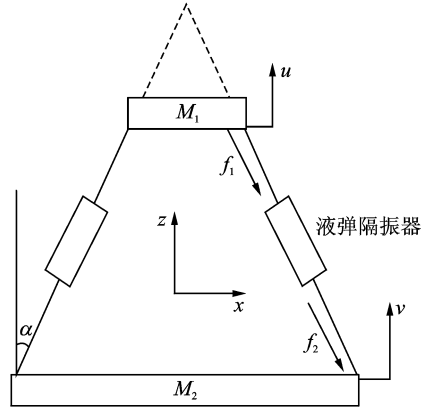


图3 聚焦式液弹隔振系统

Fig. 3 Focal fluid elastomer vibration isolation system

液弹隔振器上液室

$$f_1 + k_2 x_d + k_1 (x_1 - x_2) + p_1 (A_1 - A_0) - p_2 (A_2 - A_0) - c \dot{x}_0 = 0 \quad (1)$$

液弹隔振器下液室

$$k_1 (x_2 - x_1) - p_1 A_1 + f_2 = 0 \quad (2)$$

惯性通道内液体

$$-m(\ddot{x}_0 + \ddot{x}_2) + (p_1 - p_2)A_0 - c\dot{x}_0 = 0 \quad (3)$$

主减速器质量 M_1

$$-M_1 \ddot{u} = F + 4f_1 \cos \alpha \quad (4)$$

机身质量 M_2

$$-M_2 \ddot{v} = 4f_2 \cos \alpha \quad (5)$$

式中: A_0 为惯性通道内壁面积; F 为主减速器所受载荷; c 为液体阻尼。取激励力 $F = F_0 e^{j\omega t}$, 则隔振系统各部件均可看做周期运动。定义力的传递率

$$T_f = \left| \frac{M_2 \ddot{v}}{F} \right| = \left| \frac{A + Bi}{C + Di} \right| \quad (6)$$

解以上方程可以得到

$$A = M_2 [k_1 R_2^2 + k_2 R_1^2 - m\omega^2 R_1 R_2^2 (R_1 - 1)] \cos^2 \alpha \quad (7)$$

$$B = M_2 \omega c R_1^2 R_2^2 \cos^2 \alpha \quad (8)$$

$$C = -4 \cos^2 \alpha (k_1 R_2^2 + k_2 R_1^2) (M_1 + M_2 + 4m \cos^2 \alpha) + \omega^2 R_2^2 [4m M_2 \cos^2 \alpha (1 - 2R_1 + R_1^2) + M_1 M_2 + 4m M_1 R_1^2 \cos^2 \alpha] \quad (9)$$

$$D = -4R_1 R_2^2 \omega c \cos^2 \alpha (M_1 R_1 + M_2 R_1 + 2M_2 + 4m R_1 \cos^2 \alpha) \quad (10)$$

通过以上分析可以得到聚焦式液弹隔振系统垂直方向反共振点频率

$$f_s = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_1 R_2^2 + k_2 R_1^2}{m R_1 R_2^2 (R_1 - 1)}} \quad (11)$$

其他方向上采用同样方法, 可以得到聚焦式液弹隔振系统典型传递率曲线如图4所示。

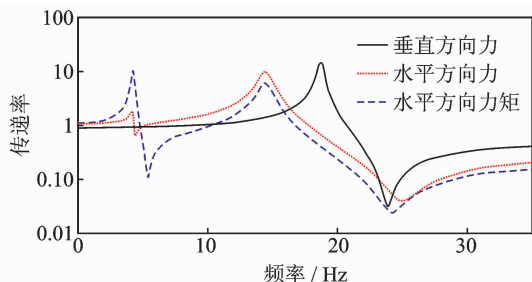


图 4 聚焦式液弹隔振系统传递率特性曲线

Fig. 4 Transmissibility curve of focul fluid elastomer vibration isolation system

2 参数影响分析

由于垂直方向振动载荷是引起机身振动的主要载荷,这里着重分析了部分参数对隔振系统垂直方向隔振效果的影响。

2.1 阻尼 c 和安装角 α 影响

在聚焦式液弹隔振系统中,液弹隔振器的参数与隔振系统的参数均对隔振系统垂向动态特性有较大影响,这里分别选取液弹隔振器阻尼 c 和液弹隔振器安装角 α 做参数影响分析。分析结果见图 5。

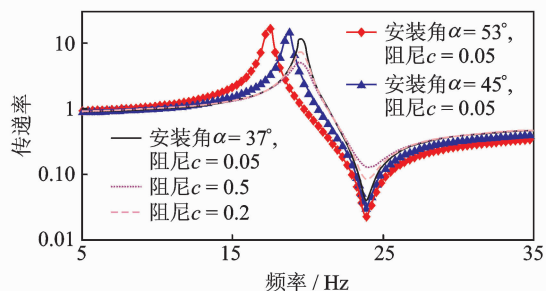


图 5 液弹隔振器阻尼和安装角对隔振系统传递率影响

Fig. 5 Influence of damping and installation angle on transmissibility

聚焦式液弹隔振系统反共振点频率与液弹隔振器反共振频率相同,仅与液弹隔振器参数有关,共振点频率与液弹隔振器参数和隔振系统参数均有关。聚焦式液弹隔振系统在垂向上与液弹隔振器有相同的动特性曲线。由图 5 可以看出,随着液弹隔振器阻尼增加,共振点传递率降低,即共振点的机身响应降低;反共振点传递率升高,即反共振频率点上机身振动响应增加,这对隔振是不利的。因而为提高隔振效率,应尽量降低液弹隔振器内部阻尼。对于聚焦式液弹隔振系统,各液弹隔振器安装角均相同,安装角对隔振系统的性能影响较大。

图 5 中,随着安装角的增加,共振点频率降低,传递率升高;反共振点频率不变,传递率降低,隔振效率增加。这是因为随着液弹隔振器安装角的增加,隔振系统的垂向等效刚度降低,引起共振点频率的降低和传递率的增加;反共振点频率仅与液弹隔振器参数有关,因而反共振点频率不变,传递率降低。从隔振的角度来讲,增大液弹隔振器的安装角能够有效地增加隔振系统的隔振效率。但这会导致隔振系统垂向刚度的降低,引起主减机身之间过大的静变形,对传动和操纵系统不利。另外,安装角度的变化会引起虚焦点位置的改变,直接影响到隔振系统对旋翼旋转平面内的力和力矩的隔振效果。因而需要根据振动影响的主次关系来选择合适的液弹隔振器安装角,并参考此来选择液弹隔振器的相关参数。

2.2 惯性液体质量影响

液弹隔振器惯性通道内惯性液体质量对隔振系统传递率特性影响如图 6 所示。

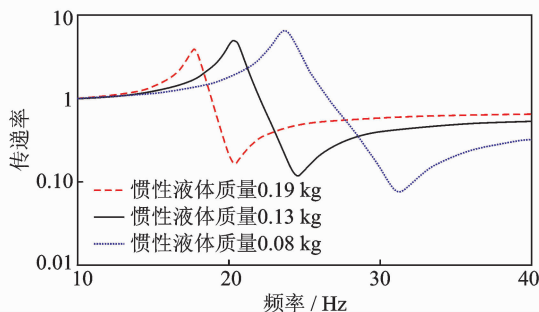


图 6 惯性液体质量对隔振系统传递率影响

Fig. 6 Influence of tuning fluid mass on transmissibility

由图 6 可以看出,随着惯性液体质量的增加,隔振系统共振点频率降低,共振点处响应降低;反共振点频率降低,传递率增加,隔振效率有所降低。这是因为随着惯性液体质量的增加,产生相同的惯性力所需的频率降低,导致反共振点频率降低,同时惯性液体振动幅值降低,引起传递率的增加。实际上,对于液弹隔振器,其设计的隔振点频率是固定的,惯性液体的质量也是固定的,采用高密度的液体将大大降低隔振器的尺寸,减小隔振器内部阻尼,在一定程度上会提高隔振系统的隔振效率。

3 结 论

(1) 将液弹隔振器串联入聚焦式隔振系统撑杆中,形成聚焦式液弹隔振系统。聚焦式液弹隔振

系统在聚焦式隔振系统的基础上增加了对旋翼轴向载荷的隔振效果,同时也保证了旋翼轴向的刚度需求。隔振系统垂向动态特性与液弹隔振器动特性相似。

(2) 聚焦式液弹隔振系统中液弹隔振器安装角对系统的隔振效果有很大的影响。增大液弹隔振器安装角能够有效地增加隔振系统的隔振效率,但会导致隔振系统沿旋翼轴向刚度的降低,同时也会导致虚焦点位置的改变,引起隔振系统对旋翼旋转平面内力和力矩隔振性能的改变。

(3) 随着惯性液体质量的增加,隔振系统共振点频率降低,共振点处响应降低;反共振点频率降低,传递率增加,隔振效率有所降低。对于液弹隔振器,其设计的隔振点频率是固定的,惯性液体的质量也是固定的,采用高密度的液体将大大降低隔振器的尺寸,减小隔振器内部阻尼,在一定程度上会提高隔振系统的隔振效率。

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 Xiaogu. The design of helicopter dynamics [M]. Beijing: Aviation Industry Press,1995.
- [2] 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 Chenlin, Zhang Xiaogu, Guo Shilong, et al. Helicopter component design[M]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2008.
- [3] 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.
Aerospace Industry Science and Technology Research Institute. Handbook of helicopter dynamics[M]. Beijing: Aviation Industry Press,1991.
- [4] 顾仲权. 动力反共振隔振[J]. 噪声与振动控制, 1989,21(6):36-40.
Gu Zhongquan. Dynamic anti-resonant vibration isolation[J]. Noise and Vibration Control,1989,21(6):

36-40.

- [5] Halwes D R. LIVE—liquid inertia vibration eliminator[C] // American Helicopter Society 36th Annual Forum. Washington, D. C:[s. n.],1980.
- [6] Smith M R ,Redinger W S. The model 427 pylon isolation system[C] // American Helicopter Society 55th Annual Forum. Montreal, Quebec, Canada:[s. n.],1999.
- [7] 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 and testing of the fluid elastomer isolator[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.
- [8] 邓旭东. 直升机主减隔振系统的设计与仿[D]. 南京:南京航空航天大学, 2010.
Deng Xudong. Research on simulation for the advanced helicopter gearbox isolation system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2010.
- [9] Sankewitsch V. Total main rotor isolation system analysis[R]. NASA Contract NAS1-16176,1981.
- [10] McGuire D P. Fluidlastic dampers and isolators for vibration control in helicopters[C] // American Helicopter Society 50th Annual Forum. Washington, D C:[s. n.],1994.
- [11] 黄传跃,郭光海,李祖钊. 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 Chuanyue, Guo Guanghai, Li Zuzhao. A new rotor fuselage vibration isolator and its characteristics analysis[J]. Journal of Vibration Engineering,1999,12(3):403-409.
- [12] 袁胜涛. 旋翼/机身耦合系统的固有特性及旋翼隔振研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2000.
Yuan Shengtao. Research on the inherent characteristics of coupled rotor/fuselage system and rotor isolation[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2000.