

DOI:10.16356/j.1005-2615.2016.02.022

## 扭转式 SARIB 隔振系统的建模与仿真

张树桢 孙东红 刘续兴 李明强

(中航工业直升机设计研究所, 景德镇, 333001)

**摘要:**建立主减扭转式 SARIB 隔振系统的理论模型, 并进行动特性分析, 以对主减速器系统进行隔振手段的拓展和分析方法的完善。依据 Lagrange 方法, 得到平面扭转式 SARIB 系统的动力学方程并进行求解。引入多体动力学分析方法, 对空间扭转式 SARIB 系统进行仿真分析, 验证该隔振形式的有效性。以扭簧动力吸振器的形式代替常规 SARIB 系统中的悬臂式动力吸振器, 可以降低系统对空间的需求, 同时结构简单, 降低了常规 SARIB 系统的复杂性, 具有较好的易用性。

**关键词:**隔振系统; 扭转式; SARIB; 主减速器

**中图分类号:** V214.3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1005-2615(2016)02-0287-04

## Modeling and Simulation on Torsion-SARIB Vibration Isolation System

Zhang Shuzhen, Sun Donghong, Liu Xuxing, Li Mingqiang

(AVIC China Helicopter Research and Development Institute, Jingdezhen, 333001, China)

**Abstract:** The theoretical model of torsion-SARIB vibration isolation system is established, and the dynamic characteristics are analyzed by theory and simulation methods. The dynamics equations of plane torsion-SARIB are derived by the Lagrange method, and the spatial torsion-SARIB is simulated by the multi-body dynamics theory. The comparison between torsion-SARIB and cantilever beam SARIB indicates that torsion-SARIB has low space requirement and simple structure. The torsion-SARIB is more useful than the cantilever beam SARIB in the structure design.

**Key words:** vibration isolation system; torsion; SARIB; MGB

直升机的振动问题较其他飞行器突出<sup>[1]</sup>。结构过大的振动响应, 严重地影响结构强度和疲劳寿命, 且对乘员的舒适性、仪器的工作环境及武器发射的精度存在不利的影 响。目前直升机的主要隔振手段分为 3 大类: (1) 降低振源的振动载荷, 例如在旋翼和桨毂上采取桨叶动力吸振器等措施来减小振源的振动, 直接降低机身的振动水平; (2) 在传递路径中采取隔振措施, 例如采用主减速器和机身相连的隔振器和聚焦形式的隔振设计; (3) 机身结构处的隔振手段, 例如在乘员舱段采用被动式的

动力吸振器或主动振动控制装置。

在旋翼/机身的传递路径中进行隔振设计, 是较为直接的隔振技术方法。直-8、直-9、直-11 及 EC175 直升机采用上聚焦式隔振设计, 可以有效地隔离旋翼旋转平面内的激振力和力矩向量向机体结构的传递, 但是旋翼的垂向激振力直接传递至机身, 导致机体振动水平仍然较高。

将动力反共振装置引入到聚焦式主减隔振设计中, 可以进一步降低全机的振动水平<sup>[2-3]</sup>。常规 SARIB(如图 1 所示)已在“虎”式、NH90 以及“茶

收稿日期: 2015-10-01; 修订日期: 2016-01-01

通信作者: 张树桢, 男, 工程师, E-mail: szzhang\_detec@nuaa.edu.cn。

引用格式: 张树桢, 孙东红, 刘续兴, 等: 扭转式 SARIB 隔振系统的建模与仿真[J]. 南京航空航天大学学报, 2016, 48(2): 287-290. Zhang Shuzhen, Sun Donghong, Liu Xuxing, et al. Modeling and simulation on torsion-SARIB vibration isolation system[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2016, 48(2): 287-290.

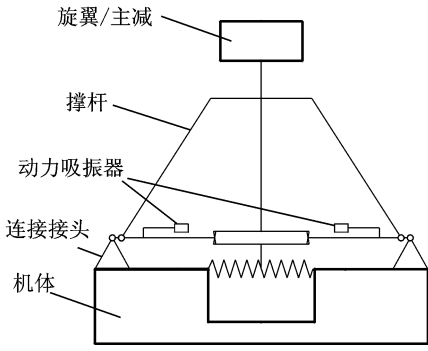


图1 “虎”式型机采用的 SARIB 隔振系统的示意图

Fig.1 Sketch of SARIB vibration isolation system of "Tiger"

隼”等型机上得到了应用,其中“茶隼”型机的振动水平在多数状态下,振动水平小于  $0.05g$ ,其 SARIB 隔振系统发挥了重要的作用。文献[4~7]中对各型 SARIB 进行了整理分析,该隔振形式利用动力反共振的原理,通过动力反共振装置将桨毂传递的激振力予以抵消。该设计既具有聚焦形式的优点,又具有隔离垂向激励的作用。由于主减速器处空间相对有限,当有隔振设计需求时,传统 SARIB 隔振形式的结构改装较大,应用较为困难<sup>[8]</sup>。文献[9]引入橡胶扭转的形式对吸振系统进行优化,研究了扭转形式的可行性。文献[10,11]直接在主减撑杆内引入液弹原件作为吸振系统。本文针对扭转式 SARIB(如图 2 所示)进行分析研究,该形式在保留主减速器底部防扭盘用以隔离主减俯仰和滚转运动的基础上,在撑杆与撑杆支座连接处加装扭簧型动力吸振器,其具有安装空间小,原始结构改动少,结构相对简单的优点,目前国外也在开展相关的研究工作。

本文首先通过理论分析方法,建立平面扭转式

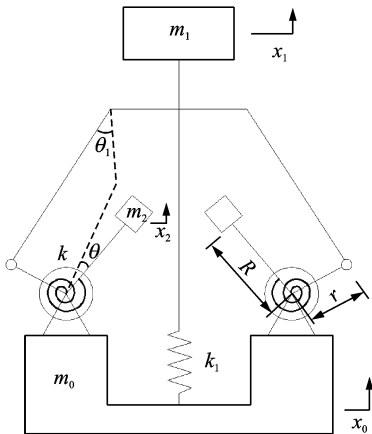


图2 平面扭转式 SARIB 示意图

Fig.2 Sketch of plane torsion-SARIB

SARIB 的模型,而后进行动特性分析,最后对分析结果进行研究,以证明该形式 SARIB 隔振设计方法的有效性。并对空间扭转式 SARIB 系统进行多体动力学仿真分析,试图探索新的仿真思路,以应用于工程设计。

## 1 扭转式 SARIB 的理论建模

### 1.1 理论建模

对扭转形式的 SARIB 在垂向进行动力学特性分析。由空间关系,得到

$$\theta = \frac{x_0 - x_1}{r} \quad (1)$$

式中: $\theta$ 为扭簧的转动角度; $x_0$ 和 $x_1$ 分别为机身和主减/旋翼系统的位移量; $r$ 为撑杆和扭簧之间的径长度。

建立系统的动能及势能表达式

$$T = \frac{1}{2} m_0 \dot{x}_0^2 + \frac{1}{2} m_1 \dot{x}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 (\dot{x}_0 + \dot{\theta} R)^2 + \frac{1}{2} J_{o2} \dot{\theta}^2 \quad (2)$$

$$U = \frac{1}{2} k \theta^2 + \frac{1}{2} k_1 (x_0 - x_1)^2 \quad (3)$$

式中: $m_0$ 为机身质量; $m_1$ 为主减速器/旋翼质量; $k_1$ 为主减速器/旋翼底部的刚度; $R$ 为扭转式 SARIB 的扭杆长; $m_2$ 为杆端质量,其对扭簧中心的转动惯量为  $J_{o2} = m_2 R^2$ ;  $k$ 为扭簧刚度。

设耗能为

$$E = \frac{1}{2} c \dot{\theta}^2 \quad (4)$$

式中  $c$  为扭簧的阻尼系数。

设  $L = T + U$ , 并将式(2~4)代入 Lagrange 方程

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} + \frac{\partial E}{\partial \dot{q}_i} = f_i \quad i = 1, 2, 3, \dots, n$$

得到动力学方程的表达式为

$$\left( m_0 + m_2 \left( 1 + \frac{R}{r} \right)^2 + \frac{J_{o2}}{r^2} \right) \ddot{x}_0 - \left[ \frac{m_2 R \left( 1 + \frac{R}{r} \right)}{r} + \frac{J_{o2}}{r^2} \right] \ddot{x}_1 + \dots \left( \frac{k}{r^2} + k_1 \right) x_0 - \left( \frac{k}{r^2} + k_1 \right) x_1 = f_1 \quad (5)$$

$$- \left[ \frac{m_2 R \left( 1 + \frac{R}{r} \right)}{r} + \frac{J_{o2}}{r^2} \right] \ddot{x}_0 + \left( m_1 + \frac{m_2 R^2}{r^2} + \frac{J_{o2}}{r^2} \right) \ddot{x}_1 - \left( \frac{k}{r^2} + k_1 \right) x_0 + \left( \frac{k}{r^2} + k_1 \right) x_1 = f_2 \quad (6)$$

将式(5,6)整理为矩阵形式得到

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_0 \\ \ddot{x}_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ f \end{bmatrix} \quad (7)$$

在正弦激励条件下,可知式(7)的稳态解呈正弦形式,从而得到其位移传递率为

$$T_d = \left| \frac{\bar{x}_0}{\bar{x}_1} \right| \quad (8)$$

## 1.2 仿真建模

针对简单构件或各构件间相对运动较不显著的结构,可方便精确地在有限元软件中建模分析。但在构件间存在较为显著的相对运动条件下,应采用多体动力学的分析思路进行建模仿真。本文在 ADAMS 软件中,建立扭转式 SARIB 系统的多体动力学模型,如图 3 所示。相较于平面理论模型,其空间运动模拟更为真实。

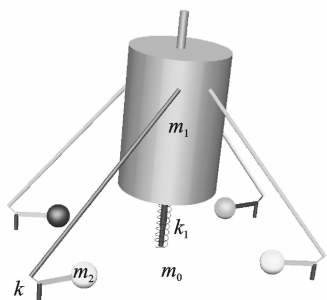


图 3 ADAMS 虚拟样机模型

Fig. 3 Virtual model of isolation system by ADAMS

## 2 计算分析

设主减速器/旋翼的质量  $m_1$  为 300 kg,机身质量  $m_0$  为 3 000 kg,杆长  $r$  为 0.07 m。分别设定杆端质量  $m_2$  为 40, 55, 60 kg;扭簧刚度  $k$  为  $0.75 \times 10^5, 1.0 \times 10^5, 1.25 \times 10^5$  N·m/rad;扭杆长  $R$  为 0.2, 0.25, 0.3 m;垂向隔振器的刚度为  $1 \times 10^3, 1 \times 10^4, 1 \times 10^5$  N/m 进行理论和仿真分析,并研究各变量的灵敏度系数。

通过 Matlab 编程计算得到理论分析的传递率曲线如图 4~7 所示,同时将 ADAMS 的计算结果输出得到图 8,9,假设系统的阻尼较低以观察反共振现象。

由图 4~7 可见,曲线存在较为明显的反共振现象,初步证明方程推导的正确性。且随杆端质量的增大,结构的固有频率点和反共振点向低频段迁移;随扭簧刚度的提高,结构的固有频率和反共振点向高频段迁移。

图 6 表明,扭杆长度的改变,也可以显著地影

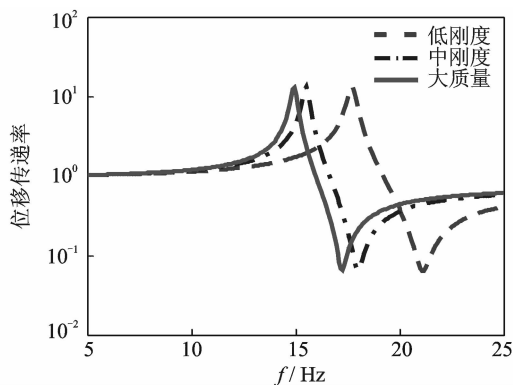


图 4 理论分析位移传递率曲线(杆端质量)

Fig. 4 Displacement transmissibility curve by theory analysis on mass

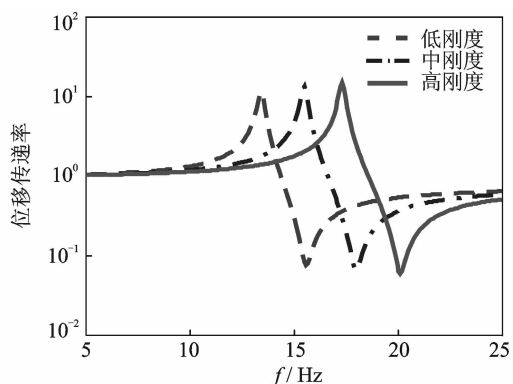


图 5 理论分析位移传递率曲线(扭簧刚度)

Fig. 5 Displacement transmissibility curve by theory analysis on stiffness

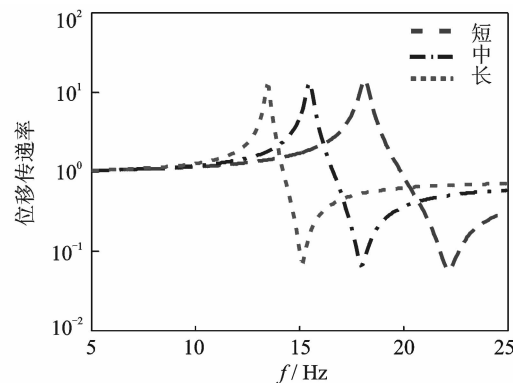


图 6 理论分析位移传递率曲线(杆长)

Fig. 6 Displacement transmissibility curve by theory analysis on length of rod

响固有频率,杆越长,其固有频率越低。图 7 表明,垂向隔振器的刚度对反共振现象基本无影响。

图 8,9 的计算结果和图 4,5 的理论分析较为一致,且灵敏度分析表明,扭簧刚度和扭杆长度对频率的影响较为显著。

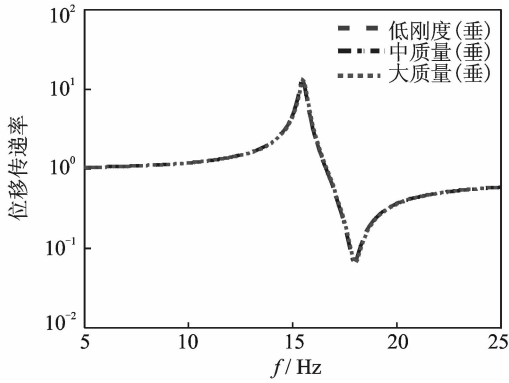


图7 理论分析位移传递率曲线(垂向隔振器)

Fig. 7 Displacement transmissibility curve by theory analysis on vertical isolator

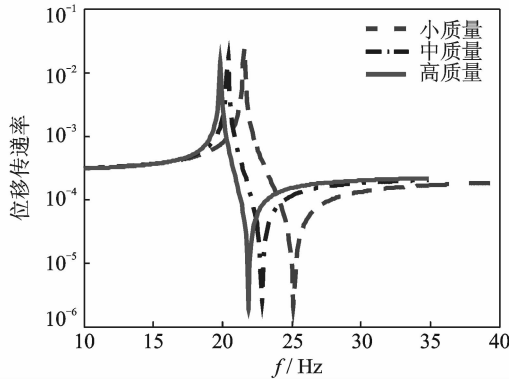


图8 多体分析位移传递率曲线(杆端质量)

Fig. 8 Displacement transmissibility curve by ADAMS analysis on mass

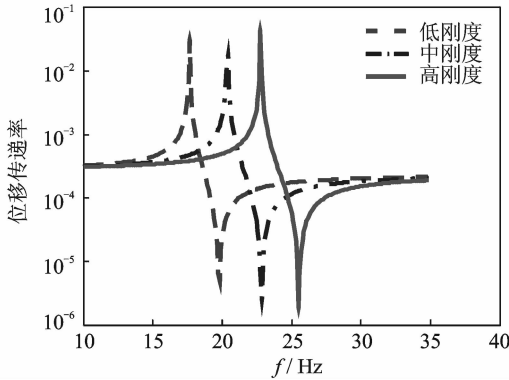


图9 多体分析位移传递率曲线(扭簧刚度)

Fig. 9 Displacement transmissibility curve by ADAMS analysis on stiffness

### 3 结 论

经过探索性的理论建模和仿真分析,验证了扭转式 SARIB 方法的有效性,达到了预期的结果。

(1) 扭转式 SARIB 系统存在反共振现象。理论分析表明:系统存在和常规 SARIB 较为一致的反共振现象,可以应用于实际的主减隔振系统中。

(2) 多体仿真分析可用于 SARIB 系统的建模分析。经过计算初步证明该仿真方法的有效性,对后续实际模型以及全机模型的分析理清了思路。

(3) 扭转式 SARIB 系统的调频方式多样。经过分析,通过调整杆端质量的大小、扭簧刚度的高低和扭杆的长短,均可以有效地改变反共振频率点,其中扭杆长度改变的影响最为显著,但受限于空间要求,改变扭簧刚度的可行性更高。

#### 参考文献:

- [1] 张阿舟. 直升机动力学手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 1991.
- [2] 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 characteristic analysis[J]. Journal of Vibration Engineering, 1999, 12(3): 403-409.
- [3] 张晓谷. 直升机动力学设计[M]. 北京: 航空工业出版社, 1995.
- [4] Szefi J T. Helicopter gearbox isolation using periodically layered fluidic isolation[D]. Pennsylvania State: The Pennsylvania State University, 2003.
- [5] 顾仲权. 动力反共振隔振[J]. 噪声与振动控制, 1989, 1(6): 36-40.
- [6] Flannely W G. The dynamic anti-resonant vibration isolator[P]. USA: US3445080 A, 1969-05-20.
- [7] Harris A, Bark L. Performance of CH-46 pilot seats in NASA full-scale crash test[C]// 70th AHS Annual Forum. Quebec, Canada: [s. n.], 2014: 20-22.
- [8] Hege P, Genoux G. The SARIB vibration absorber [R]. SNIAS-832-210-104, 1983.
- [9] 邓旭东, 刘勇. 橡胶弹性扭矩管式动力反共振隔振器性能分析[C]// 第26届全国直升机年会. 西安: [s. n.], 2010.  
Deng Xudong, Liu Yong. The vibration isolation performance analysis of the layered elastomeric torque tube[C]// 26th CHS Annual Forum. Xi'an, China: [s. n.], 2010.
- [10] Halwes D R. LIVE-liquid inertia vibration eliminator [C]// 36th AHS Annual Forum. Washington D C: [s. n.], 1980: 36.0.022.
- [11] 雷少保, 张勇, 王华明. 聚焦式液弹隔振系统的传递特性分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2015, 47(2): 275-278.  
Lei Shaobao, Zhang Yong, Wang Huaming. Transmission characteristics of focal fluid elastomer vibration isolation system[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2015, 47(2): 275-278.

