

## 基于电磁场原理的航天器变频吸振技术

石新宇,周徐斌,申军烽,林德贵,黄俊杰

(上海卫星工程研究所,上海 200240)

**摘要:** 为了有效抑制航天器转动部件对敏感载荷的扰动,将电磁技术应用于变频吸振器上,从经典电磁理论出发,建立了斥力悬浮型电磁变频装置的数学模型。该型电磁变频装置通过两个电磁铁对中间的永磁体产生排斥作用来产生恢复力:当中间永磁体偏离平衡位置时,由于两边电磁铁斥力的非线性变化使得二者对中间永磁体产生一个指向平衡位置的恢复力。理论分析表明,在气隙不大的情况下,该力与永磁体偏离平衡位置的位移成正比,同时其与电磁铁中通入的电流成正比关系,进一步的仿真也验证了该结论,这为有效、精确控制变频吸振器的工作频率提供了理论依据。根据理论计算和有限元仿真,采用了电磁技术的变频装置可以提供 4500 N/m 左右的刚度变化范围,应用该变频装置的吸振器可以提供近 50 Hz 的频率变化范围,同时其调节速度和精度也能满足航天器对变频吸振器相关性能的要求。

**关键词:** 变频吸振; 电磁弹簧; 振动抑制

中图分类号:TB535 文献标志码:A 文章编号:1007-2276(2014)S-0018-06

## Spacecraft adaptive vibration absorber based on electronic magnetic field

Shi Xinyu, Zhou Xubin, Shen Junfeng, Lin Degui, Huang Junjie

(Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** The rotating parts on the spacecraft can seriously disturb working payload. In order to decrease this effect, electronic magnetic technology was applied to adaptive vibration absorber. This EM frequency control system worked through the repulsions from two electromagnets: when the central magnet left the balance place, repulsions of the electromagnets on both sides of the magnet would change. Because of the nonlinearity of the repulsions, the combining force would point to the balance just like a restoring force. Theoretical analysis showed that if the distance between the two electromagnets was sufficiently small, such restoring force was proportional to the displacement of central magnet from the balance place. Furthermore, it was also proportional to the currency in the electromagnet. These conclusions are supported by simulation too. That means it can be taken as the base of an effective, high-accurate DVA control method. According to the theoretical calculation and FEM simulation results, the whole system can change its stiffness in a range of 4 500 N/m. Through choosing right mass ratio, the adaptive vibration absorber could adjust its working frequency in a range of 50 Hz. The performance of the vibration absorber can meet the need of spacecraft.

**Key words:** adaptive vibration absorber; EM spring; vibration control

收稿日期:2014-10-08; 修订日期:2014-11-13

基金项目:第二届高分辨率对地观测学术年会青年创新基金

作者简介:石新宇(1990-),男,硕士生,主要研究方向为振动控制、航天器结构机构设计。Email: gin.frozenfire@gmail.com

导师简介:周徐斌(1975-),男,研究员,硕士生导师,主要从事航天器设计方面的研究。

## 0 引言

航天器在运行的过程中存在许多振动扰动,这些扰动会干扰有效载荷的正常工作。研究表明<sup>[1-4]</sup>,在这些扰动中,转动部件对航天器运行的影响最大,且其扰动的能量主要集中在转频或者转频附近很窄的频率带内。进一步的研究显示<sup>[5]</sup>,针对这种特性的扰动,可以通过采用吸振技术来进行有效抑制。

然而,固定参数的吸振器减振频带较窄。当激励频率偏离减振频带时,吸振器的减振效果较差,甚至有可能放大主结构振动响应。为了改善吸振器的减振性能,国内外学者提出了机械变频吸振技术,并将其应用到了吸振器上,通过改变吸振器固有频率达到宽频吸振的效果<sup>[6-8]</sup>。但目前常用的机械变频手段多是通过改变一个或多个弹性元件的有效作用力来改变吸振器的频率,这导致了采用这类变频技术的吸振器往往包络尺寸和质量较大,不利于航天器上使用。

除了机械变频技术外,电磁变频技术也是一种可行的变频手段。左晓镭<sup>[9]</sup>提出了一种基于斥力的电磁弹簧,利用磁铁的斥力为吸振器提供刚度变化。孙志卓<sup>[10]</sup>设计了一种利用磁引力的电磁弹簧,通过主动控制技术实时调节电磁弹簧的刚度。赵国迁<sup>[11]</sup>,项海筹<sup>[12]</sup>等制作了一种齿形结构的电磁弹簧,利用相对磁极错开产生的线性恢复力来提供所需刚度。考虑到电磁变频技术拥有体积小、质量小、变频速度快等特点,而这些特点均符合航天器对吸振器的需求,若能将电磁变频技术应用于吸振器上,就可以有效减少转动部件对有效载荷的扰动。

文中从经典电磁理论出发,建立了斥力悬浮型电磁变频吸振器的数学模型,并对其进行了有限元仿真,最后分析了其频率调节性能和吸振性能,为拓宽变频吸振器在航天领域的应用提供了依据。

## 1 电磁变频技术基本原理

电磁变频技术主要依赖于电磁变频机构,其核心是电磁弹簧。根据利用磁力方式的不同,电磁弹簧有多种构型,如齿形结构,引力悬浮和斥力悬浮等等。为了提高电磁能的利用效率,拓宽刚度调节范围,文中选用斥力悬浮型的电磁弹簧作为变频机构的核心部件,并对其进行分析研究。

斥力悬浮型电磁弹簧由两端的电磁铁和中间的永磁铁构成,利用两端电磁铁的斥力将中间的永磁铁磁体悬浮在平衡位置,通过调节线圈电流来根据需要改变弹簧的刚度。其结构示意图如 1 所示。

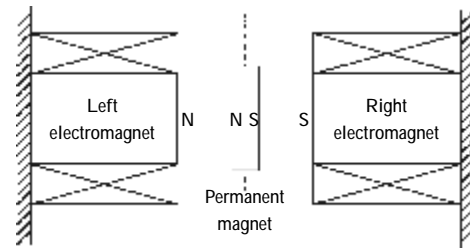


图 1 电磁弹簧结构示意图

Fig.1 Structure of EM spring

两端线圈缠绕方式使得产生的磁场方向与中间永磁铁的磁场方向相反,当线圈内有电流通过时,两端线圈会在铁芯中产生磁场,相当于两个串联相对的同名磁极,同时对中间磁体产生斥力。根据使用需求,适当控制电流的大小,可以实现电磁弹簧刚度的连续改变。

## 2 电磁变频机构的数学模型

电磁变频机构的工作原理是通过控制电流来调节电磁弹簧的刚度,进而调整结构的固有频率。为了建立其数学模型,需要对作为核心部件的永磁体在磁场中的受力进行分析。

电磁弹簧中的永磁体受力可分为两部分,一部分来自于线圈产生的磁场对其的斥力,另一部分来自于其对铁芯的吸引力。

### 2.1 线圈斥力

磁场斥力可以通过将永磁体等效为一个线圈,并计算其受到的安培力大小求得。为此,需要计算线圈的磁场和永磁体的等效磁化电流。

#### (1) 线圈磁场

记线圈内径为  $R_1$ , 外径为  $R_2$ , 长度为  $L$ , 漆包线线径为  $d$  (见图 2), 则其对离其一端距离为  $z$ , 离其轴线距离为  $r$  的场点处产生的磁感应强度为<sup>[13]</sup>:

$$\left\{ \begin{array}{l} B_x(r) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \sum_{m=0}^{\frac{L}{d}} \sum_{n=0}^{\frac{R_2-R_1}{d}} \int_0^{2\pi} \frac{(z+md)(R_1+nd)\cos\theta}{T} d\theta \\ B_y(r) = 0 \\ B_z(r) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \sum_{m=0}^{\frac{L}{d}} \sum_{n=0}^{\frac{R_2-R_1}{d}} \int_0^{2\pi} \frac{(R_1+nd)^2 - r(R_1+nd)\cos\theta}{T} d\theta \\ T = \{ [r - (R_1+nd)\cos\theta]^2 + (R_1+nd)^2 \sin^2\theta + (z+m)^2 \} \end{array} \right. \quad (1)$$

铁芯对线圈的磁场具有的放大效应,一般采用放大系数估算该点的磁场强度:

$$\mathbf{B}=\alpha\mathbf{B}_0 \quad (2)$$

其中,放大系数  $\alpha$  可以通过测得,也可以通过经验估算。

当两线圈如图 1 所示放置时,中间的磁场强度为两线圈单独产生磁场的矢量和。

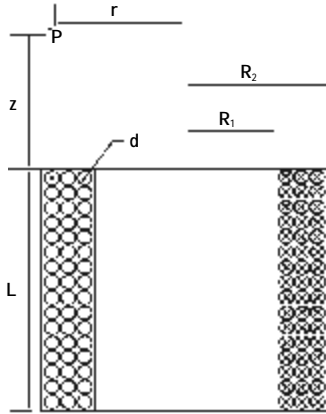


图 2 线圈结构

Fig.2 Structure of coil

### (2) 永磁体磁化电流

永磁体的磁场来源于其内部的磁畴按一定方向排列产生的叠加效应,这可以视为其内部产生了等效的磁化电流。

对于圆柱形永磁体,设其磁化强度为  $M$ ,则磁化电流为  $M \cdot e_\phi$ 。记  $M_\phi = M \cdot e_\phi$ ,即有

$$\mathbf{B}_z(r) = \frac{\mu_0 M r}{4\pi} \int_{-l/2}^{l/2} \int_0^{2\pi} \frac{r-x \cos \theta}{U} d\theta dz$$

$$U = [x_0^2 + r^2 + (z_0 - z)^2 - 2x_0 r \cos \theta]^{3/2} \quad (3)$$

于是,通过测量磁铁极面的磁感应强度,磁化电流大小即可用下式计算

$$M = \frac{4\pi \cdot \mathbf{B}_z(r)}{\mu_0 r \delta} \quad (4)$$

式中: $\delta$ 为公式(3)中的积分部分。

### (3) 线圈斥力

对于单个的圆形电流环,垂直方向的磁场将产生径向的安培力,沿环积分后合力始终为零,只有径向的磁场会产生合力沿轴向的安培力,故单个电流环受到的安培力为:

$$dF = \mathbf{B} \cdot K dS \quad (5)$$

其方向与电流,磁场的方向遵守右手定则。而

$$K dS = M dS = MR d\theta dz \quad (6)$$

将公式(6)代入公式(5),并沿永磁体厚度方向积分,可以得到永磁体在线圈磁场中的受力:

$$\mathbf{F} = 2\pi R M \int_0^t \mathbf{B}_r(z) dz \quad (7)$$

式中: $M$ 为永磁体磁化强度; $\mathbf{B}_r(z)$ 为电磁弹簧两端线圈在永磁体处产生的沿径向的磁场; $R$ 为永磁体半径; $t$ 为永磁体厚度。

## 2.2 铁芯吸引力

永磁体在空间中建立的磁场的能量密度为:

$$w'_m = \frac{1}{2} \mu H^2 = \frac{B^2}{2\mu} \quad (8)$$

在永磁体系统中, $dW=0$ 。取铁芯到永磁体间气隙长度  $l$  为广义坐标,磁场力为:

$$\mathbf{F} = - \frac{\partial W_m}{\partial l} = - \frac{\alpha^2 B^2 S}{2\mu_0} \quad (9)$$

式中: $S$ 为铁芯的面积; $\alpha$ 为气隙损耗系数; $R$ 为铁芯的半径。

## 2.3 总电磁刚度

将两部分作用力相加,并对位移求导即可得到电磁弹簧的总刚度。

$$K = \frac{\partial \left( 2\pi R M \int_0^t \mathbf{B}_r(z) dz - \frac{\alpha^2 B^2 S}{2\mu_0} \right)}{\partial z} \quad (10)$$

## 3 电磁变频机构变频性能仿真

电磁变频机构的结构如图 3 所示。

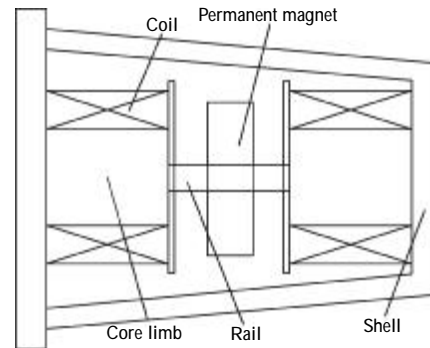


图 3 变频机构结构示意图

Fig.3 Structure of frequency control mechanism

取永磁体厚度  $t=5 \text{ mm}$ , 永磁体半径  $R=20 \text{ mm}$ , 线圈内径  $R_1=14 \text{ mm}$ , 外径  $R_2=42 \text{ mm}$ , 线圈长度  $L=$

35 mm, 线圈间距离  $D=22\text{ mm}$  按上节的方法进行计算,可以得到如下的相关曲线,如图 4~图 6 所示。

无限元,次外圈为空气单元。

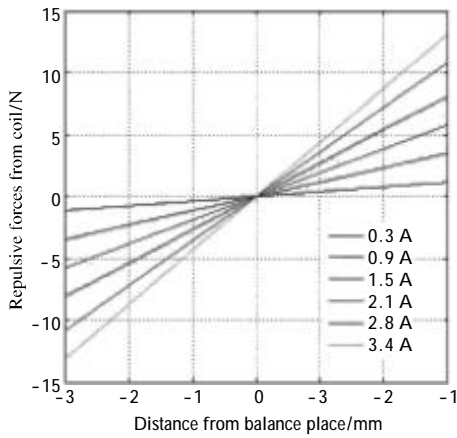


图 4 线圈斥力关于永磁体位置的曲线

Fig.4 Repulsive forces from coil vs. distance from balance place

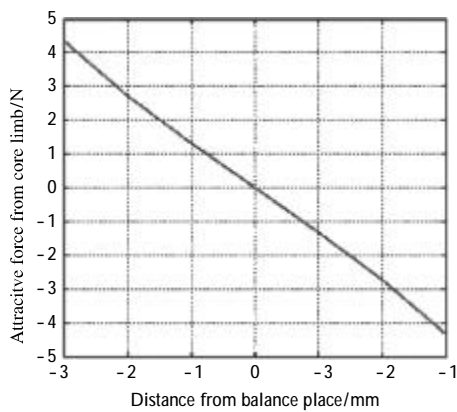


图 5 铁芯引力关于永磁体位置的曲线

Fig.5 Attractive forces from core limb vs. distance from balance place

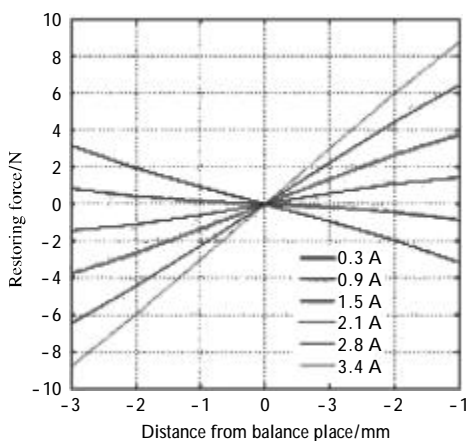


图 6 电磁弹簧恢复力曲线

Fig.6 Restoring forces of EM spring

为了进一步验证计算结果,采用有限元方法对该组尺寸进行仿真,建立模型如图 7 所示,最外圈为

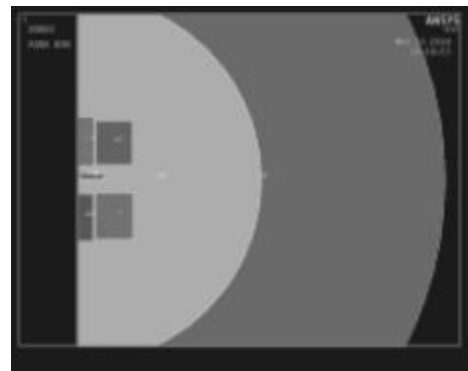


图 7 电磁弹簧有限元模型

Fig.7 FEM model of EM spring

对线圈施加不同的电流载荷并改变模型中永磁体的位置,即可以得到以电流为参量的一组永磁体位移-恢复力大小的曲线,如图 8 所示。

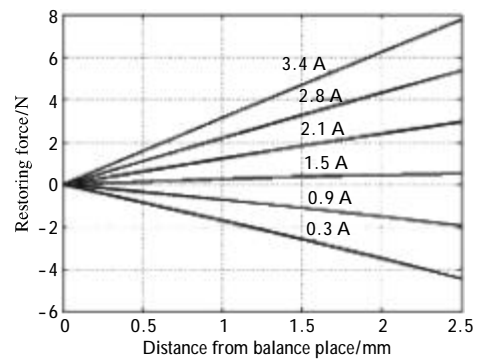


图 8 仿真结果(恢复力)

Fig.8 Simulation of restoring forces

理论计算和仿真结果均表明,该电磁弹簧可以提供近  $4\ 500\text{ N/m}$  左右的刚度变化范围(见图 9),且刚度与电流呈线性关系。为了消除图示中的负刚度现象,可以在电磁弹簧旁并联一个线性弹簧来抵消

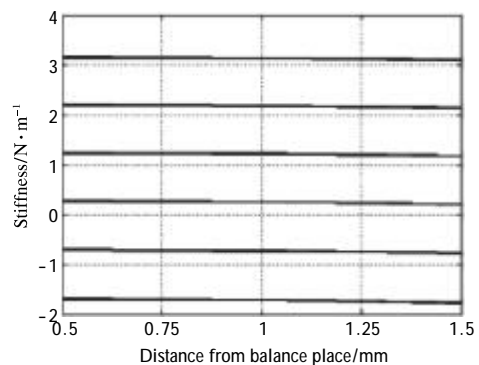


图 9 仿真结果(刚度)

Fig.9 Simulation of stiffness

这部分负刚度,其数值可以视需求而定。

## 4 电磁变频吸振器减振分析

### 4.1 减振性能

以上述变频机构为基础建立变频吸振器模型,设主结构共振频率为 30 Hz,取吸振质量为 50 g,并附加一个线性弹簧抵消负刚度,则采用上述变频机构的吸振器的最大吸振频率为:

$$f_{\max} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = 47.7 \text{ Hz} \quad (11)$$

其对应的最大频率比为 1.59,可以计算出采用上述电磁变频机构的吸振器(见图 10)的吸振效率曲线,如图 11 所示。

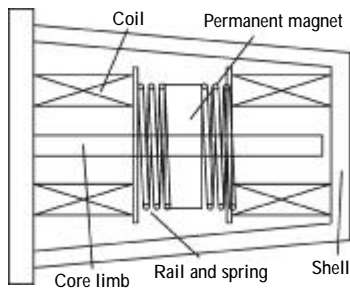


图 10 吸振器结构

Fig.10 Structure of EM vibration absorber

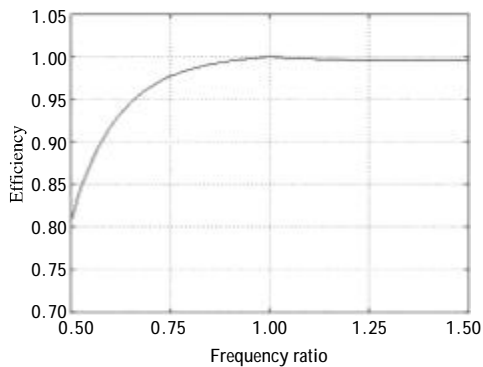


图 11 变频吸振器吸振效率曲线

Fig.11 Efficiency of adaptive vibration absorber

由上图可见,采用了电磁变频技术的吸振器可以在很大的带宽内吸收主结构的振动。

### 4.2 调节性能

由第 4 节的计算可知,采用电磁技术的变频机构的调节精度取决于电源的控制精度,通常可以达到 1 mA 级别,对比输出电流可知,变频机构的控制误差在千分之一以内。

类似地,变频机构的刚度响应速度也只取决于

电源的响应速度,而目前的电源普遍拥有毫秒量级的响应速度,故文中提出的吸振器其响应时间也在毫秒量级,可认为其具有频率跳变的能力。

## 5 结论

文中建立了斥力悬浮型电磁变频吸振器的数学模型。理论计算和仿真表明,采用电磁技术的变频机构能提供 4 500 N/m 的刚度变化范围,其刚度和控制电流符合线性关系,控制方法简单可靠迅速,可以在较大的带宽内有效抑制主结构的振动响应。

### 参考文献:

- [1] Bialke B. A compilation of reaction wheel induced spacecraft disturbances[C]//Proceedings of the 20th Annual AAS Guidance and Control Conference, 1997.
- [2] Eyerman C E, Shea J F. A systems engineering approach to disturbance minimization for spacecraft utilizing controlled structures technology[R]. MIT SERC Report#2-90, 1990.
- [3] Masterson R. Development and validation of empirical and analytical reaction wheel disturbance models[D]. MIT, 1999.
- [4] Melody J W. Discrete -frequency and broadband reaction wheel disturbance models[J]. Interoffice Memorandum, 1995, 95(3411): 200.
- [5] Yu Zifei, Zhou Xubin, Du Dong. Research of vibration absorber for satellite sensitive payload [C]//2012 Conference Proceedings of Professional Committee of Space Electromechanical and Space Optics, Chinese Society of Space Research, 2012. (in Chinese)  
虞自飞, 周徐斌, 杜冬. 卫星敏感载荷振动的吸振方法研究 [C]//中国空间科学学会空间机电与空间光学专业委员会 2012 年学术交流会议论文集, 2012.
- [6] Franchek M A, Ryan M W, Bernhard R J. Adaptive passive vibration control[J]. Journal of Sound and Vibration, 1995, 189(5): 565-585.
- [7] Bonello P, Brennan M J, Elliott S J. Vibration control using an adaptive tuned vibration absorber with a variable curvature stiffness element[J]. Smart Materials and Structures, 2005, 14 (5): 1055-1065.
- [8] Nagaya K, Kurusu A, Ikai S, et al. Vibration control of a structure by using a tunable absorber and an optimal vibration absorber under auto-tuning control [J]. Journal of Sound and Vibration, 1999, 228(4): 773-792.
- [9] Zuo Xiaolei. Research on electromagnetic semi-active vibration

- absorber [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2011. (in Chinese)
- 左晓镭. 电磁式半主动吸振器研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.
- [10] Sun Zhizhuo. Study and design of the electromagnetism dynamic vibration absorber[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2003. (in Chinese)
- 孙志卓. 电磁式动力吸振器的研究与设计[D]. 青岛: 山东科技大学, 2003.
- [11] Zhao Guoqian. Development of electromagnetic semi-active vibration absorber and its application in automotive vibration control[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2007. (in Chinese)
- 赵国迁. 电磁式半主动吸振器研制及其在汽车振动控制中的应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007.
- [12] Xiang Haichou, Wang Yuying, Tang Xikuan. Electromagnetic continuous adjustable damping spring stiffness: CN, 1016983B [P]. 1992-06-10. (in Chinese)
- 项海筹, 王玉英, 唐锡宽. 电磁式弹簧刚度连续可调消振器: 中国, 1016983B[P]. 1992-06-10.
- [13] Ni Guangzhen. Principle of engineering electromagnetic[M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2009. (in Chinese)
- 倪光正. 工程电磁场原理 [M]. 第2版. 北京: 高等教育出版社, 2009.