

文章编号:1000-8055(2017)02-0486-06

doi:10.13224/j.cnki.jasp.2017.02.029

柔性接头迟滞阻尼特性识别

郑开发¹, 王超², 郝文强¹, 任军学¹, 刘宇¹, 杨敬贤³

(1. 北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191;

2. 中国航天科工集团公司 北京机械设备研究所, 北京 100854;

3. 中国航天科技集团公司 上海新力动力设备研究所, 上海 200125)

摘 要: 为实现对柔性接头系统的建模和动力学分析,对柔性接头的迟滞阻尼特性识别方法进行了研究. 测试了一系列不同摆角和不同频率条件下柔性接头的动态特性参数,基于变刚度变阻尼法对不同频率下的刚度系数和阻尼系数进行了参数识别,获得了刚度系数和阻尼系数跟摆动频率之间的关系,建立了柔性接头动力学模型. 应用该模型分析计算了柔性接头低速频率特性,并与试验结果进行了对比分析. 结果表明:建立的模型可以很好地描述柔性接头的低频特性,随摆动频率的增加,恢复力矩略有增加;在振幅较小时,弹性力矩随摆角呈线性,随着摆动振幅的增加,弹性力矩的非线性逐渐增强.

关 键 词: 柔性接头; 迟滞阻尼; 参数识别; 动力学建模; 动态特性

中图分类号: V435⁺.23

文献标志码: A

Identification of flexible joint hysteresis damping characteristics

ZHENG Kai-fa¹, WANG Chao², HAO Wen-qiang¹,

REN Jun-xue¹, LIU Yu¹, YANG Jing-xian³

(1. School of Astronautics,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

2. Beijing Institute of Machinery and Equipment ,

China Aerospace Science and Industry Corporation, Beijing 100854, China;

3. Shanghai Xinli Power Equipment Institute,

China Aerospace Science and Technology Corporation, Shanghai 200125, China)

Abstract: In order to model and analyze the dynamics of flexible joint, the method of identifying flexible joint hysteresis damping characteristics was studied. The dynamic characteristics of flexible joint at different amplitudes and frequencies were tested. The elastic force and damping force at different frequency parameters were identified based on the method of variable stiffness and damping. Therefore the relationships between the frequency and stiffness coefficient and damping coefficient were discovered, and a nonlinear dynamic model of flexible joint was established. The calculated dynamic properties of the amplitude dependence for the joint with the proposed model were compared with experiment. Result shows that a

收稿日期: 2015-05-21

基金项目: 上海航天科技创新基金(SAST201258)

作者简介: 郑开发(1989—),男,硕士生,主要研究方向为固体火箭发动机. E-mail: zkfbelief@163.com

引用格式: 郑开发,王超,郝文强,等. 柔性接头迟滞阻尼特性识别[J]. 航空动力学报,2017,32(2):486-491. ZHENG Kaifa, WANG Chao, HAO Wenqiang, et al. Identification of flexible joint hysteresis damping characteristics[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(2): 486-491.

good agreement is obtained and the torque increase a little with the increase of the frequency. Elastic moment is linear with the pendulum angle in the small amplitude, and it gradually becomes nonlinear with the increase of the amplitude.

Key words: flexible joint; hysteretic damping; parameter identification; dynamic modeling; dynamic characteristics

柔性接头是固体火箭发动机柔性喷管推力矢量控制系统的核心部件,它由若干同心环状球壳的弹性件与增强件交替黏接而成.柔性接头最早被用在弹道导弹固体发动机及大型运载火箭固体助推器上,而随着战术和反导导弹、小型固体运载火箭机动性要求的不断提高,柔性接头以其结构简单、冲质比高、推力损失小等优点受到各国的青睐^[1-4].已有型号发动机应用,如美国 TSRM(SM-3 第 3 级)、ORBUS 1(Star bird 和 Star 靶箭上面级)、欧洲 ASTER 15/30 助推发动机等^[5-7].

柔性接头动态性能是决定系统结构设计、运动精度和功能发挥的关键问题之一.在柔性喷管研究领域中,通常在研究柔性接头的动态特性时都将其看作质量弹簧系统^[8-9],但是由于橡胶黏弹性的影响,柔性接头在做正弦摆动时,其迟滞阻尼特性和弹性比力矩等都是随摆动振幅和频率变化而变化的,因此在研究柔性接头的动态特性时必须考虑黏弹性对其造成的影响.柔性接头的刚度和阻尼不仅是变化的而且是摆动频率、振幅的函数,关于把柔性接头看作变刚度和变阻尼的研究很少,故可以借鉴橡胶隔振器领域的分析方法,有关黏弹性隔振系统动力学建模是非线性系统辨识领域中的重要课题.在对非线性迟滞系统的分析时,陈乃立等^[8]将恢复力分解为无记忆恢复力和有记忆恢复力,其中无记忆恢复力又分解为仅与速度有关的部分和仅与位移有关的部分,这样可以减少参数识别.龚宪生等^[9]将非线性迟滞系统的恢复力分解成迟滞非线性阻尼力和非线性弹性恢复力,并把高阶刚度和可能出现的多种阻尼成分融入数学模型中^[10].上述研究都很有借鉴意义.由于柔性接头输入与输出之间存在很强的非线性关系,所以柔性接头的系统建模、参数识别和动力学特性分析等成为学者研究的重点.

本文采用的刚度系数可变的弹簧模型和阻尼系数可变的阻尼模型来描述柔性接头摆角和恢复力矩之间的关系,应用椭圆函数、幂函数曲线进行

识别和拟合^[10-12],根据柔性接头动态试验数据结果进行变刚度系数和变阻尼系数的识别.在此基础上,根据 3 组振幅、每组 4 个频率的识别参数来预测这 3 个振幅下的迟滞环.

1 柔性接头动态试验

1.1 柔性接头及其试验系统

柔性接头的结构由前法兰、后法兰、增强件和弹性件组成.结构的几何尺寸,材料参数,试验系统组成、参数和工作原理与文献[13]中所提一致.按照文献[14-15]所述的方法测出柔性接头的摆心、线位移和作动力,并计算摆角和恢复力矩.

1.2 动态摆动试验结果

试验的频率和振幅是根据实际工况选取的,柔性接头工作的频率(f)为 0.1~1.0 Hz,摆角从 0°~6°.故选取 0.1~1.0 Hz 作为试验频率,取 1°,2°,3°,4°,5°,6°作为试验正弦摆动的振幅(A),得到了 60 组不同频率,不同振幅下恢复力矩(M)随摆角(θ)变化的曲线.部分恢复力矩和摆角的典型关系曲线如图 1 和图 2 所示,其特点为迟滞回线.

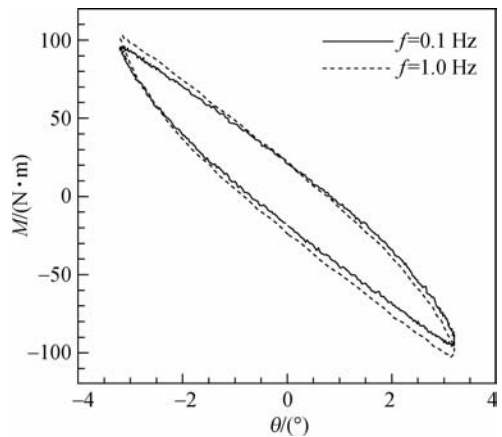


图 1 振幅为 3°对应的恢复力矩-摆角曲线
Fig. 1 Relationship of restoring moment-angular displacement under amplitude of 3°

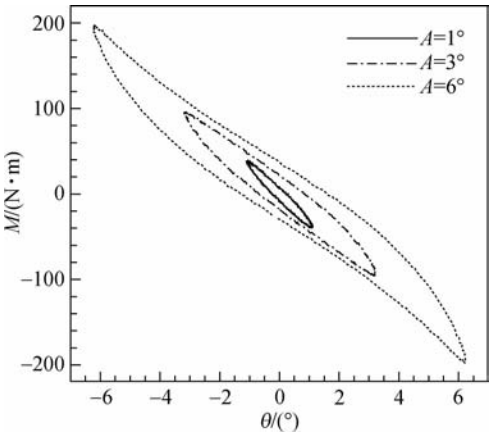


图 2 频率为 0.1 Hz 对应的恢复力矩-摆角曲线
Fig. 2 Relationship of restoring moment-angular displacement under frequency of 0.1 Hz

2 迟滞阻尼特性识别

2.1 迟滞回线的分解

典型柔性接头系统的恢复力矩与摆角曲线如图 1 和图 2 所示,柔性接头系统恢复力矩具有非线性迟滞特性,恢复力矩与摆角构成迟滞回线.迟滞回线由上下两条曲线组成,上下恢复力矩关于摆角反对称,从图 1 可看出其与频率有关,从图 2 可以看出其与振幅有关.

广义力和广义位移形成迟滞回线是黏弹性材料特有的一种现象,柔性接头的弹性件是黏弹性材料,有黏性和弹性两种特性.如图 3 所示,可以将柔性接头的恢复力矩和摆角形成的迟滞回线分解为以原点为中心的椭圆函数曲线和关于原点中心对称的幂函数曲线^[10].这种分解方法直观明了,更重要的是具有实际的物理意义,幂函数曲线表征其弹性特性,椭圆函数曲线表征其黏性特性,

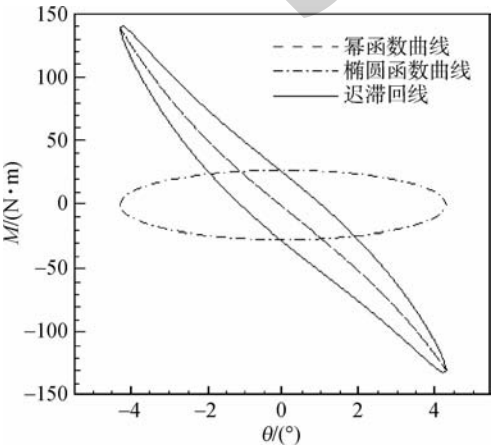


图 3 迟滞回线的分解

Fig. 3 Decomposition of hysteresis loop

也即把柔性接头恢复力矩 M 分解为弹性力矩 M_k 和黏性阻尼力矩 M_c . 据此建立如下的动力学模型.

2.2 动力学模型

图 4 为柔性接头动力学模型示意图,认为柔性接头的动力学模型是摆动阻尼器和弹簧的并联结构,模型中弹簧的刚度系数和阻尼器的阻尼系数随振幅和频率变化而变化,称其为变刚度和变阻尼.本文引入变刚度、变阻尼的概念进行恢复力矩的识别和建模.用普通的弹簧和阻尼器模型模拟恢复力矩.其运动微分方程为

$$I \cdot \theta'' + c(f) \cdot \theta' + k(f) \cdot \theta = M \quad (1)$$

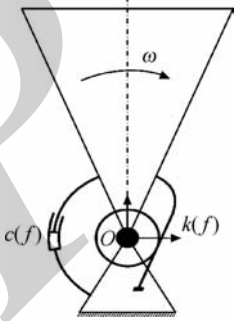


图 4 柔性接头动力学模型示意图

Fig. 4 Model of the flexible joint dynamics

式中 I 为柔性喷管转动惯量, θ 为摆动的摆角, $c(f)$ 为变阻尼系数, $k(f)$ 为变刚度系数,柔性接头的弹性件是黏弹性材料,其包含黏性和弹性两种特性,其中变阻尼系数 $c(f)$ 表征其黏性,变刚度系数 $k(f)$ 表征其弹性.通常惯性力矩 I 只占总力矩的 1%~2%^[13].因此,在柔性喷管总力矩计算时,常常可以忽略不计.则式(1)可简化为

$$c(f) \cdot \theta' + k(f) \cdot \theta = M \quad (2)$$

式中 $c(f)$ 和 $k(f)$ 均与喷管的摆动频率相关,因此可以通过试验得到 $c(f)$ 和 $k(f)$ 随频率的变化关系.

根据试验数据可以用参数识别的方法来确定模型刚度系数和阻尼系数与频率之间的函数关系.如此建立的柔性接头动力学模型的优点在于动力学分析和计算时,非线性迟滞系统建模时不需要用复杂的公式来表示,只需按照普通的弹簧模型和阻尼器模型来处理,将其转化为一般力学问题进行处理即可.

2.3 参数识别方法

将恢复力矩 M 分解为弹性力矩 M_k 和黏性阻尼力矩 M_c ,即

$$M = M_k + M_c \quad (3)$$

式中 $M_k=k(f) \cdot \theta, M_c=c(f) \cdot \theta'$.

由于分解前后系统一个摆动周期所消耗的能量不变,而弹性力矩 M_k 在摆动中不消耗能量,因此所有的耗能全部都由分解后阻尼力矩 M_c 产生. 阻尼力矩曲线可以表示为以原点为中心的椭圆函数,其曲线方程为

$$\frac{\theta^2}{A^2}+\frac{M_c^2}{B^2}=1 \tag{4}$$

式中 A 为椭圆的长半轴,也是摆动的幅值; B 为椭圆的短半轴.

椭圆函数可写为如下参数方程的形式:

$$\theta(A,\omega)=A\sin(\omega t) \tag{5}$$

$$M_c(B,\omega)=B\cos(\omega t) \tag{6}$$

其中 ω 为摆动圆频率, $\omega=2\pi f$, S 为椭圆曲线围成的几何面积, t 是时间,即

$$S=\pi AB \tag{7}$$

式中 S_{loss} 为系统一个摆动周期内消耗能量,并且每一个摆动周期内消耗的能量都相等,可得

$$S_{\text{loss}}=S=\pi AB \tag{8}$$

$$B=\frac{S_{\text{loss}}}{\pi A} \tag{9}$$

根据阻尼力矩 M_c 和角速度 $\dot{\theta}$ 成正比,可得

$$M_c(A,\omega)=c(\omega) \cdot \dot{\theta}=c(\omega) \cdot A\omega\cos(\omega t) \tag{10}$$

式中 $\dot{\theta}$ 为摆动的角速度, $c(\omega)$ 为黏性阻尼系数.

由式(6)和式(10)中 M_c 相等,可得

$$c(\omega) \cdot A\omega=B \tag{11}$$

把式(8)代入式(11),可得

$$c(\omega)=\frac{B}{A\omega}=\frac{S_{\text{loss}}}{\pi A^2\omega} \tag{12}$$

根据摆动试验数据计算

$$S_{\text{loss}}=\oint M d\theta$$

黏性阻尼力矩 M_c 得出后,弹性力矩 M_k 可由下面的式子得到

$$\begin{cases} M_k=M-M_c \\ M_k=K_0(\omega)+K_1(\omega)\theta+K_2(\omega)\theta^2+K_3(\omega)\theta^3 \end{cases} \tag{13}$$

式中 K_0, K_1, K_2, K_3 为刚度系数,由试验数据拟合得到.

2.4 参数识别结果

获得试验数据后,根据第 2.3 节所述方法进行不同频率下变刚度系数变阻尼系数的识别. 运用 Matlab 编写恢复力矩的分解和变刚度系数、变阻尼系数的求解程序,得到不同频率、不同振幅对

应的刚度系数和阻尼系数,结果列于表 1 中,篇幅所限只给出了振幅为 6° 时的结果.

表 1 振幅 6° 时刚度系数和阻尼系数识别的结果
Table 1 Identify result of stiffness coefficient and damping coefficient under amplitude of 6°

f/Hz	阻尼 系数 c	刚度系数			
		K_3	K_2	K_1	K_0
0.1	9.145 8	0.250 4	0.099 9	21.110 4	-6.862 7
0.4	2.443 1	0.262 7	0.023 4	21.454 9	-5.415 2
0.7	1.423 8	0.271 4	-0.003 9	21.581	-2.808 7
1.0	1.006 5	0.282 9	-0.071 6	21.457 5	1.020 4

根据表 1 中数据的特点,用式(14)对不同振幅下的刚度系数进行拟合.

$$K_n(f)=k_{n0}+k_{n1}f+k_{n2}f^2+k_{n3}f^3 \tag{14}$$

式中 $n=0,1,2,3$.

令 $\mathbf{K}(f)=[K_0 \ K_1 \ K_2 \ K_3]$, 则

$$\mathbf{K}^T(f)=\begin{bmatrix} K_0(f) \\ K_1(f) \\ K_2(f) \\ K_3(f) \end{bmatrix}=\mathbf{K} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ f \\ f^2 \\ f^3 \end{bmatrix} \tag{15}$$

式中 $\mathbf{K}=\begin{bmatrix} k_{00} & k_{01} & k_{02} & k_{03} \\ k_{10} & k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{20} & k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{30} & k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix}$.

将非线性弹性力矩中的幂函数多项式系数用关于频率的 3 次函数表示,通过拟合得到系数矩阵 $\mathbf{K}$,结果如表 2 所示.

综上弹性力矩可表示为

$$\mathbf{M}_k=\begin{bmatrix} k_{00} & k_{01} & k_{02} & k_{03} \\ k_{10} & k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{20} & k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{30} & k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ f \\ f^2 \\ f^3 \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ \theta \\ \theta^2 \\ \theta^3 \end{bmatrix} \tag{16}$$

根据表 1 中数据的特点,用式(17)对不同振幅下的阻尼系数进行拟合.

$$c(f)=c_0f^{-c_1} \tag{17}$$

综上,阻尼力矩可表示为

$$M_c=c_0f^{-c_1} \cdot \theta' \tag{18}$$

阻尼系数拟合结果见表 3,表中 c_0, c_1 为阻尼系数.

本模型特点在于知道 3 组振幅、每组振幅 4 个频率实验数据时,可以预测这 3 个振幅下任何

频率时的力矩和摆角的关系,减少了试验成本.

表 2 刚度系数拟合结果

Table 2 Fitting results of stiffness coefficient

振幅/ (°)	K			
1	-5.5415	4.0850	5.9596	-2.1842
	11.7327	-25.5056	20.6962	31.2771
	1.8736	0.3865	-4.495	0.1853
	-1.7583	3.4353	-1.0268	1.5362
3	24.7165	-45.1604	28.1518	-6.6279
	0.5765	-2.4224	4.7152	24.5696
	-1.4875	2.7588	-1.6879	0.1738
	0.4156	-0.8734	0.5610	0.3593
6	6.5934	-0.0208	1.1749	-6.8957
	-0.9751	-0.1432	1.5963	20.9361
	-0.3858	0.6332	-0.4598	0.1384
	0.0852	-0.1322	0.0866	0.2442

表 3 阻尼系数拟合结果

Table 3 Fitting results of damping coefficient

振幅/(°)	阻尼系数	
	c_0	c_1
1	1.388	0.92
3	1.195	0.93
6	1.019	0.95

3 拟合结果分析

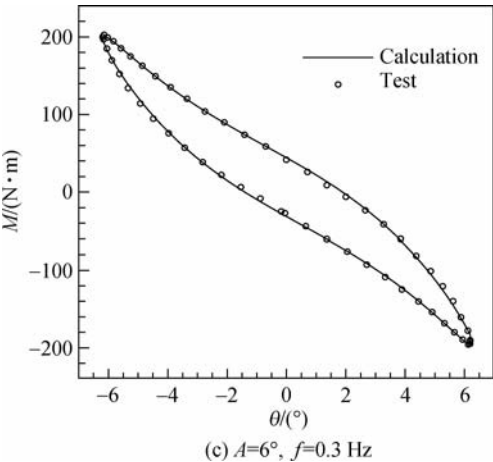
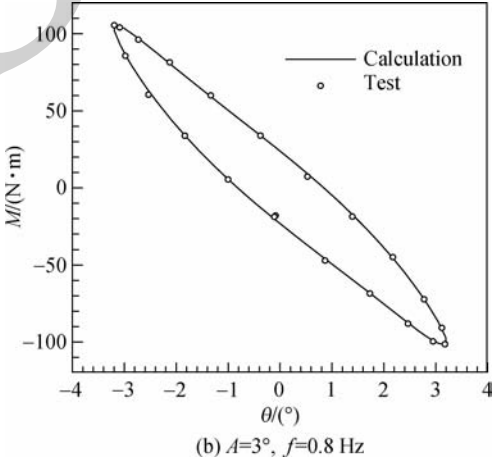
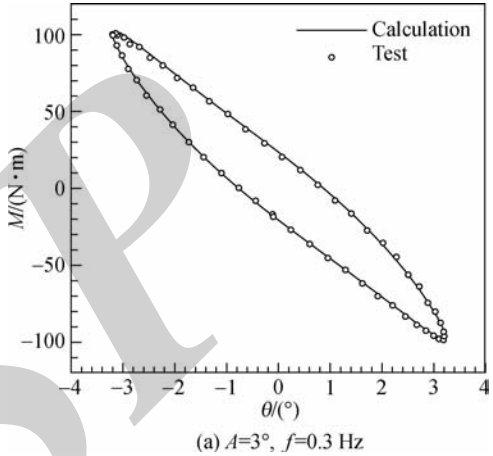
为了验证上述识别方法的正确性,用摆动频率为 0.3,0.8 Hz 时的恢复力矩和摆角试验结果与通过动力学模型计算出的结果进行对比分析.由试验测得摆角,求解柔性接头的摆动角速度.将摆角和摆动角速度分别带入式(16)和式(18)计算出柔性接头摆动时的弹性力矩和黏性阻尼力矩,两者相加则可得到恢复力矩.将恢复力矩计算值与试验值进行比较,验证动力学模型的正确性.

图 5 中给出了频率为 0.3,0.8 Hz 时,振幅为 3°,6°的计算结果与试验结果的对比.从结果来看,计算值和试验值吻合很好.

对比图 5(a)和图 5(b)中振幅为 3°,频率为 0.3,0.8 Hz 时的结果,频率为 0.8 Hz 时柔性接头最大恢复力矩比频率为 0.3 Hz 时增加 3.1 N·m,增幅为 3%.图 5(c)和图 5(d)中振幅为 6°,频率为 0.3,0.8 Hz 也有同样的趋势.这表明低频

时,随着柔性接头摆动频率的增加,柔性接头恢复力矩略有增加.

对比图 5(a)和图 5(c)频率为 0.3 Hz,振幅为 3°,6°的结果,以及图 5(b)和图 5(d)频率为 0.8 Hz,振幅为 3°,6°的结果,柔性接头摆动过程中,在振幅较小时,柔性接头恢复力矩中的弹性力矩与摆角关系表现较强的线性特征,随着摆动振幅的增加,恢复力矩中的弹性力矩与摆角关系表现出的非线性逐渐增强.



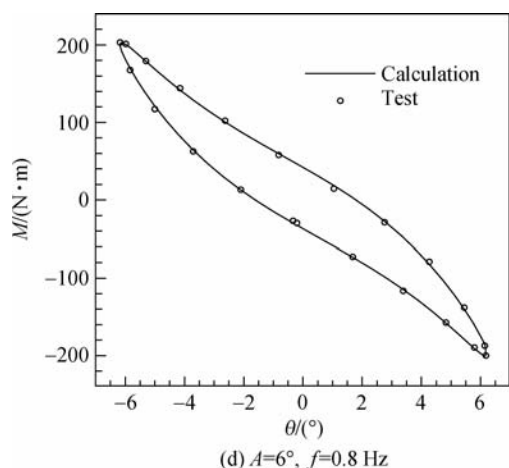


图5 恢复力矩-摆角曲线计算结果与试验结果

Fig. 5 Calculation and test relationship of restoring moment-angular displacement

4 结 论

本文对小型柔性接头在低频下的动态特性进行了试验测试,建立了基于变刚度变阻尼的柔性接头迟滞阻尼特性预测模型,模型可用于柔性接头的低频动态分析,得到以下结论:

1) 高阶非线性多项式表示的非线性弹性力力矩与黏性阻尼力矩相叠加的方法构造的柔性接头动态模型,可以比较准确地描述柔性接头摆动过程中的迟滞恢复力矩,以及滞后曲线的形状与振幅和频率的相关性。

2) 随着柔性接头摆动频率的增加,柔性接头恢复力矩略有增加。

3) 柔性接头摆动过程中,在振幅较小时,柔性接头弹性恢复力矩表现较强的线性特征,随着摆动振幅的增加,恢复力矩中的弹性力矩表现出的非线性逐渐增强。

参考文献:

[1] Shimon S, Shlomo P, Arie P, et al. Development of a high-performance flexible joint for thrust vector control[R]. AIAA 95-3017, 1995.

[2] 林培基, 高峰. 推力矢量对防空导弹作战效能的影响[J]. 飞航导弹, 2009(1): 56-57, 64.

LIN Peiji, GAO Feng, Effect of thrust vector on operational efficiency of air defense missile[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2009(1): 56-57, 64. (in Chinese)

[3] 吉礼超, 宋贵宝. 防空导弹控制方法的研究现状及展望[J]. 战术导弹技术, 2009(3): 54-59.

JI Lichao, SONG Guibao. Current study status and future prospect of control mode of a ir-defense missile[J]. Tactical Missile Technology, 2009(3): 54-59. (in Chinese)

[4] Wassom S R, Faupell L C, Perley T, et al. Integrated aero-fin/thrust vector control for tactical missiles[J]. Journal of Propulsion and Power, 1991, 7(3): 374-381.

[5] Caveny L H, Geisler R L, Ellis R A, et al. Solid rocket enabling technologies and milestones in the United States[J]. Journal of Propulsion and Power, 2003, 19(6): 1038-1066.

[6] Olsen K E, Walsh J J, Thomas E L. Navy terrier LEAP third-stage propulsion[R]. Monterey, CA: AIAA Missile Sciences Conference, 1994.

[7] Uhrig G, Roussille C. Design drivers and technologies for solid propulsion of interceptors[R]. Arcachon, France: The 1st Association Aeronautique et Astronautique de France International Conference on Missile Defense, 2003.

[8] 陈乃立, 童忠枋. 非线性迟滞系统的参数分离识别[J]. 振动与冲击, 1994, 52(4): 7-14.

CHEN Naili, TONG Zhongfang. Separably indentifying the parameters of nonlinear hysteretic system[J]. Journal of Vibration and Shock, 1994, 52(4): 7-14. (in Chinese)

[9] 龚宪生, 唐一科. 一类迟滞非线性振动系统建模新方法[J]. 机械工程学报, 1999, 35(4): 11-14.

GONG Xiansheng, TANG Yike. New method for modeling of a nonlinear vibration system with hysteresis characteristics[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1999, 35(4): 11-14. (in Chinese)

[10] 赵荣国, 徐有钺, 陈忠富, 等. 一个新的非线性迟滞隔振系统动力学模型[J]. 机械工程学报, 2004, 40(2): 185-188.

ZHAO Rongguo, XU Youju, CHEN Zhongfu, et al. New dynamic model for nonlinear hysteresis vibration isolation system[J]. China Academy of Engineering, 2004, 40(2): 185-188. (in Chinese)

[11] Gi-Negrete N, Vinolas J, Kari L, et al. A simplified methodology to predict the dynamic stiffness of carbon-black filled rubber isolators using a finite element code[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 296: 757-776.

[12] Mordini A, Strauss A. An innovative earthquake isolation system using fiber reinforced rubber bearings[J]. Engineering Structures, 2008, 30(2): 2739-2751.

[13] 张晓光, 刘宇, 任军学, 等. 小型柔性接头推力矢量性能试验研究[J]. 航空动力学报, 2012, 27(12): 2836-2841.

ZHANG Xiaoguang, LIU Yu, REN Junxue, et al. Experimental investigation of miniature flexible joint thrust vector characteristics[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(12): 2836-2841. (in Chinese)

[14] 王超, 任军学, 郝文强, 等. 柔性接头有效摆心漂移特性[J]. 航空动力学报, 2014, 29(12): 2993-2999.

WANG Chao, REN Junxue, HAO Wenqiang, et al. Characteristics of effective pivot point excursion for flexible joint[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(12): 2993-2999. (in Chinese)

[15] 陈汝训. 固体火箭发动机设计[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2005.

(编辑: 王碧琨)