

冲击环境下航天器电磁自锁阀锁闭特性研究 *

鞠震昊¹ 闫寒¹ 尤罡² 张文明^{1†}

(1. 上海交通大学 机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240) (2. 上海空间推进研究所, 上海 201112)

摘要 电磁自锁阀广泛应用于卫星、运载火箭、飞船等航天器中, 在发动机点火、火工装置爆炸、星箭分离等强冲击环境下, 可能发生锁闭失效, 影响航天器的安全运行。本文针对冲击载荷作用下电磁自锁阀的锁闭可靠性问题, 研究了自锁阀锁闭失效机理, 建立了工装-自锁阀有限元模型, 并通过模态试验验证模型的正确性。基于模态叠加理论, 研究自锁阀的冲击响应特性, 根据冲击响应结果和阀芯能量分析, 判断阀芯锁闭状态。为了验证分析结果的准确性, 使用摆锤式冲击台开展冲击试验, 得到的阀芯锁闭状态与理论分析结果吻合良好, 说明了分析方法的有效性。本文的研究可为电磁式自锁阀的抗冲击设计提供理论基础和技术支撑。

关键词 电磁自锁阀, 冲击环境, 有限元分析, 锁闭状态

DOI: 10.6052/1672-6553-2021-024

引言

运载火箭飞行过程中, 航天器要经历复杂和严酷的振动力学环境^[1,2]。冲击环境是航天器飞行时常见的力学环境, 发动机点火、星箭分离、火工品起爆等都会产生冲击载荷^[3], 过量的冲击载荷可能导致航天器中关键部件性能的下降甚至是失效。因此, 航天器关键部件的抗冲击性能研究一直是研究人员关注的重点课题^[4,5]。

电磁自锁阀是液体火箭发动机中广泛使用的一种控制阀门, 通常安装在推进剂管路中, 在电信号的控制下打开或关闭, 从而控制发动机的点火和运行^[6]。电磁自锁阀结构紧凑、响应速度快、具有两个稳态位置。然而, 当电磁自锁阀受到沿阀芯运动方向的强冲击载荷影响时, 阀芯可能会从一个稳态位置移动至另一个稳态位置, 发生误动作, 从而影响航天发动机的正常运行, 严重时可能造成重大飞行事故。比如, 2018 年某航天器飞行过程中, 发动机入口压力异常增高, 经排查发现, 该管路中的电磁自锁阀受到器箭分离过程的强冲击载荷影响, 发生了异常打开, 所幸处理及时, 未造成严重后果。

近年来, 研究人员重点关注冲击载荷下航天器结构与有效载荷的强度问题, 分析冲击敏感的元器件和脆性材料是否会在冲击载荷的作用下发生损

伤或破坏^[7,8], 对冲击载荷作用下自锁阀阀芯的动力学特性及锁闭性能研究较少。

陈其法^[9]等针对运载火箭安全阀的一定载荷下的颤振导致阀门损坏的现象, 基于流固耦合方法阐述了相关机理并提出了有效的改进措施。王春民等^[6]研究了一种气体自锁阀在振动和冲击力学环境下的工作特性, 讨论了不同力学条件对自锁阀工作过程的影响, 研究表明自锁阀受导阀控制气压力、随机振动量级和冲击方向的影响较大。然而, 该研究中将自锁阀假设为刚性结构, 没有考虑冲击载荷在自锁阀中的传递, 难以准确判断电磁自锁阀在一定冲击载荷下阀芯的开闭状态。

针对电磁自锁阀在冲击环境下的锁闭性能问题, 本文建立自锁阀阀体-阀芯动力学模型, 利用有限元方法研究冲击载荷在自锁阀阀体中的传递特性, 根据理论给定标准及上下界响应谱曲线, 进行冲击响应分析, 基于能量法判断自锁阀的锁闭特性, 提出自锁阀抗冲击裕度分析方法, 并通过冲击试验验证该分析方法的正确性, 为后续型号自锁阀的设计、试验提供理论基础和技术支撑。

1 模型建立

1.1 工作原理及锁闭失效

本文所研究的电磁自锁阀如图 1 所示, 通过设

2021-02-26 收到第 1 稿, 2021-03-11 收到修改稿。

* 国家自然科学基金资助项目(11902192)

† 通讯作者 Email: wenmingz@sjtu.edu.cn

计双磁路结构,在两个间隙处均产生吸力,且小间隙处吸力大于大间隙处,使阀芯保持在小间隙位置.当需要动作时,发出控制信号使线圈通电,抵消小间隙处的磁通,同时增加大间隙处的磁通,使大间隙处的吸力大于小间隙处,使阀芯移动至大间隙处.根据电磁自锁阀的自锁和动作原理可知,正常情况下阀芯在磁场的作用下位于小间隙处,只有当施加控制信号时才会移动至大间隙.自锁阀通过连接工装安装在航天器上,当航天器受到器箭分离、火工品爆炸等引起的冲击载荷时,载荷从工装底板传递至自锁阀,使自锁阀产生冲击响应.阀芯在小间隙处与自锁阀阀体存在接触,也受到冲击载荷的影响,当冲击载荷过大时,阀芯可能克服小间隙处的吸引力,误动作至大间隙处,从而导致管路的异常打开或关闭.

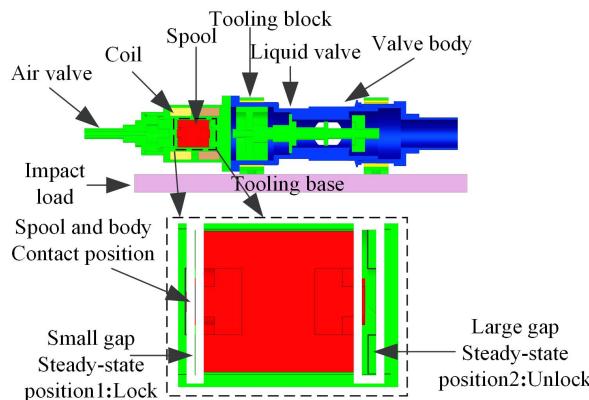


图1 自锁阀示意图

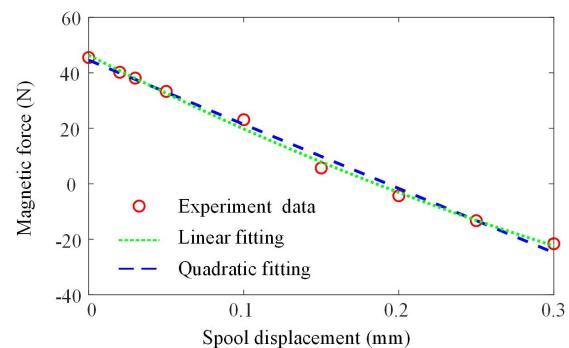
Fig.1 Schematic diagram of self-locking valve

自锁阀产品装配前,用与产品磁路结构完全相同的试验衔铁和试验阀座进行磁力测试.将试验衔铁放入自锁阀线圈组件内,行程调至规范值.在室温条件下,接通外接电源调节至额定电压.通过砝码称重法,测量对应开位、关位两种状态下的锁闭力与电磁力.以阀芯在小间隙处的稳态位置作为原点,无源状态下阀芯受到的磁场力与位移的关系如图2(a)所示,磁场力的正方向指向小间隙处,负方向指向大间隙处.可以发现,磁场力在小间隙处最大,达45.5 N,随着阀芯向大间隙处移动,指向小间隙的磁场力逐渐降低;越过磁场力为0的不稳定平衡点之后,阀芯受到指向大间隙的磁场力逐渐增大.并且,通过一次多项式拟合磁场力,确定系数 $R^2=0.992$,说明磁场力与阀芯位移近似满足线性关系,可以将磁场力等效为具有负刚度的弹簧.根据拟合得到的磁场力,以小间隙处为零势能位置,计

算阀芯具有的磁场势能,如图2(b)所示.

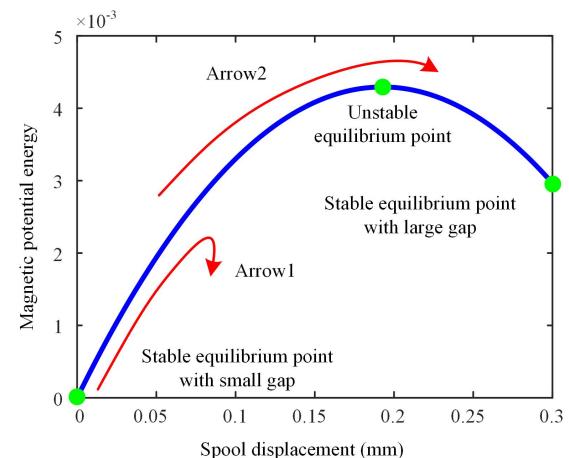
根据阀芯受到的磁场力和磁场势能,可以分析阀芯在冲击载荷作用下的锁闭失效机理:自锁阀-工装结构受到冲击载荷,阀体产生持续时间很短的冲击响应速度,考虑到阀芯在小间隙处与阀体接触,受到阀体传递而来的速度,从而具有一定的初速度.如果阀芯初速度较小,阀芯的动能不能克服磁场势能从而越过不稳定平衡点,则阀芯依然会保持自锁,如图2(b)中的箭头1所示;反之,如果阀芯初速度较大,能够越过不稳定平衡点,则阀芯移动到大间隙处,自锁阀锁闭失效,如图2(b)中的箭头2所示.因此,判断自锁阀是否发生锁闭失效的关键,在于计算阀芯与自锁阀接触位置的冲击响应速度.

自锁阀由多种零件组成,并通过螺栓连接在工装上,结构较为复杂,难以通过解析方式得到冲击载荷作用下的响应速度.因此,建立工装-自锁阀



(a) 磁场力与阀芯位置的实验及拟合曲线

(a) Experimental curve and fitting curve between magnetic force and spool position



(b) 磁力势能与阀芯位置的变化曲线

(b) Curve of magnetic potential energy with spool position

图2 磁场力、磁场势能与阀芯位置变化曲线
Fig.2 The relationship between magnetic field force, magnetic field potential energy and spool position

结构的有限元模型,针对该模型进行冲击响应分析,计算得到阀体与阀芯接触位置的响应速度,从而判断自锁阀的锁闭状态.

1.2 有限元建模

根据图1所示的工装-自锁阀结构,建立对应的有限元模型.该模型主要由自锁阀与冲击试验工

装两部分组成的,其中工装由工装底板,工装卡块和橡胶垫组成,自锁阀结构主要包括线圈、主阀体、从阀体、阀芯、线圈等部件^[10].自锁阀通过连接螺栓压紧在试验工装上,试验工装通过螺栓连接固定在冲击试验台面上.模型主要组成部分设计材料清单如表1所示.

表1 有限元模型各部件材料参数

Table 1 Material parameters of finite element model

Components	Material	Density (g/cm ³)	Elastic Modulus (GPa)	Poisson's ratio (0~1)
Liquid valve	TC4	4.5	120	0.33
Tooling block	Gray cast iron	7.7	135	0.27
Coil	Brass	8.65	106	0.324
Tooling base	Aluminum	2.78	72	0.33
Air valve	Stainless steel	7.7	196	0.29
Spool	Stainless steel	7.7	196	0.29

采用ABAQUS有限元分析软件进行工装-自锁阀的冲击响应分析.考虑到试验工装整体结构比较简单,采用C3D8R六面体网格进行划分,其中,将2对压块中的2个下压块与试验工装的底板采用共节点方式划分网格.对于自锁阀体,考虑到其结构较为复杂,针对不同部件采取不同划分方式.对于铜线圈、橡胶垫等较为规则的零部件划分六面体网格,对于阀体等不规则部件则划分四面体网格.使用六面体单元时,注意坍塌率等较为敏感的网格质量参数,使用四面体网格时,重点关注最小最大角等较为敏感的网格质量参数,并注意整体和局部加密网格.

冲击试验中,上下工装压块为螺栓连接,考虑到上下压块连接刚性较大,且该部分不是整个结构的关键区域,对结构的模态影响较小,因此采用Coupling连接方式分别耦合两对压块的内侧全部节点.对于自锁阀阀体中的零部件,根据实际装配关系,采用Tie连接进行约束.液路阀与气路阀之间通过螺栓连接,这里简化为刚性连接,使用Coupling连接方式分别耦合4对孔内侧面.

在冲击试验中,试验工装通过底板的4个通孔与工作台面螺纹连接,固定于冲击试验台上,其连接方式可以视为刚性连接.因此,约束试验工装底板的4个通孔内侧面所有节点的全部自由度,完成边界条件设置.最终得到的工装-自锁阀结构有限元模型如图3所示.

1.3 冲击响应分析

结构在冲击载荷作用下的响应是一个瞬态过程,然而,冲击载荷的时域曲线往往变化很大,并且

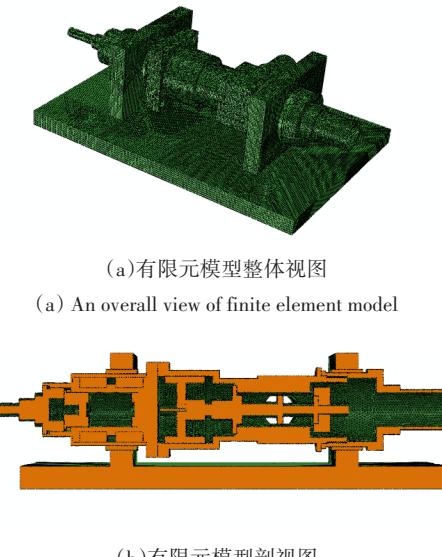


Fig.3 Schematic diagram of tooling-self-locking valve finite element model
对复杂结构进行瞬态分析需要耗费大量计算资源.因此在实际应用中,通常基于冲击响应谱计算结构在冲击载荷作用下的响应情况.

冲击响应谱是一系列不同固有频率的单自由度系统对于同一冲击激励的最大响应包络谱图^[11],其计算过程如下:将某一冲击载荷施加于一系列线性、单自由度弹簧-质量系统,以单自由度系统的固有频率作为自变量,以各系统在冲击载荷作用下的响应最大值作为因变量,绘制成曲线,该曲线即冲击载荷所对应的冲击响应谱^[12].冲击响应谱有多种数值计算方法,如龙格库塔法、数字滤波法、样条

曲线法等^[4].以冲击响应谱作为激励,可以利用模态参与系数计算结构响应的极值.第 α 阶模态在 s 方向的模态参与系数 $\eta_{\alpha s}$ 可以表示为:

$$\eta_{\alpha s} = \frac{\Phi_{\alpha}^T (\mathbf{M}_{\alpha} \Phi_s + \mathbf{M}_{is})}{m_{\alpha}} \quad (1)$$

式中 Φ_{α} 为正则模态, Φ_s 为约束模态, \mathbf{M}_{α} 、 \mathbf{M}_{is} 为分解的模态质量矩阵, m_{α} 为模态质量.设 q_{α} 为表示冲击响应谱在第 α 个固有频率处的值,则冲击载荷引起的模态最大值可以表示为:

$$R_{\alpha}^{\max} = q_{\alpha} \sum_j t_j \eta_{\alpha j} \quad (2)$$

式中, R_{α}^{\max} 为模态坐标系中第 α 阶模态在冲击载荷下的响应最大值, $j=1-6$ 表示运动方向,包括三个平动方向和三个转动方向, t_j 为 j 方向的方向余弦.

利用模态向量矩阵进行坐标变换,可以得到结构第 α 阶模态的实际最大响应值:

$$\chi_{\alpha}^{\max} = \Phi_{\alpha} \cdot R_{\alpha}^{\max} \quad (3)$$

考虑到每阶模态产生最大响应值的时间并不相同,因此需要采用合适的模态合成方法对结构各阶模态进行组合,常用的模态合成方法有绝对值求和法(ABS)、平方和的平方根法(SRSS)等.其中,绝对值求和法是将各阶模态最大响应值的绝对值直接相加:

$$\chi^{\max} = \sum_{\alpha} |\chi_{\alpha}^{\max}| \quad (4)$$

绝对值求和法假设所有模态响应的最大值发生在同一时刻,是最保守的一种模态叠加法,得到的结果通常远高于实际响应值.SRSS方法的计算过程如下:

$$\chi^{\max} = \sqrt{\sum_{\alpha} (\chi_{\alpha}^{\max})^2} \quad (5)$$

2 模态分析与试验验证

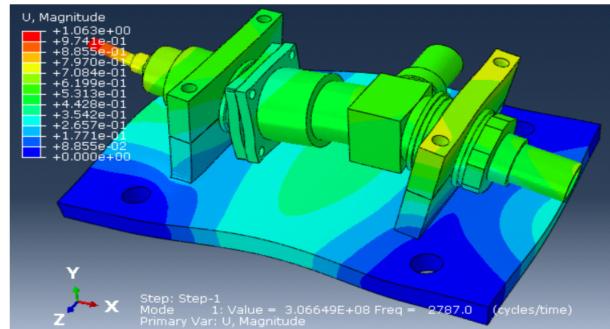
模态分析是结构动力学分析的基础,也是利用模态叠加理论进行冲击响应分析的前提.工装-自锁阀结构的自由振动方程为:

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K} \mathbf{U} = 0 \quad (6)$$

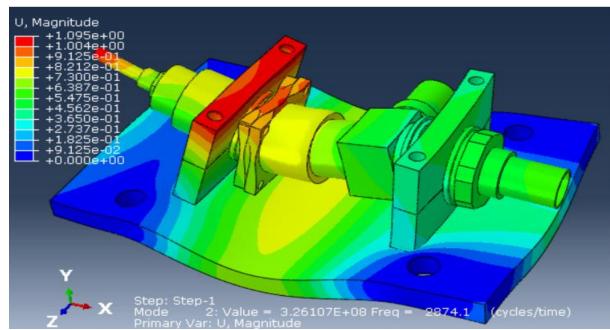
式中, \mathbf{M} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{K} 分别为结构的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵, \mathbf{U} 为位移向量.上式的特征方程可写为:

$$[\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}] \Phi = 0 \quad (7)$$

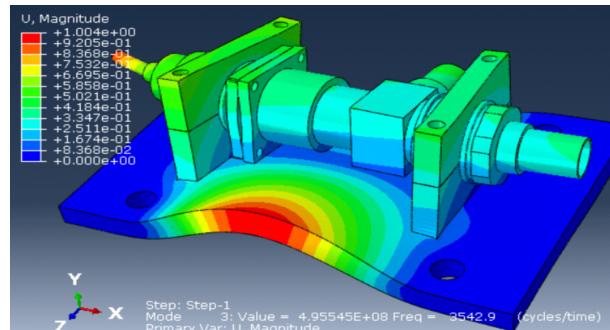
式中, ω 为系统的固有频率, Φ 为模态振型向量.计算上式,可以得到结构固有频率 f 和模态振型,如图4所示.为了验证有限元模型和模态分析的正确性,使用LMS Test.Lab振动噪声测试分析系统,对工装-



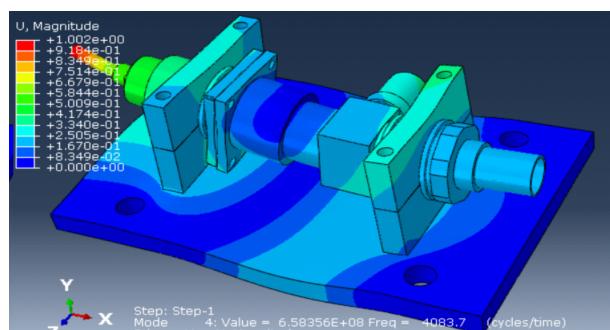
(a)一阶模态,频率 $f_1=2787.0$ Hz
(a) The first-order mode, frequency $f_1=2787.0$ Hz



(b)二阶模态,频率 $f_2=2874.1$ Hz
(b) The second-order mode, frequency $f_2=2874.1$ Hz



(c)三阶模态,频率 $f_3=3542.9$ Hz
(c) The third-order mode, frequency $f_3=3542.9$ Hz



(d)四阶模态,频率 $f_4=4083.7$ Hz
(d) The fourth-order mode, frequency $f_4=4083.7$ Hz

Fig.4 Tooling-self-locking valve natural frequency and vibration mode between the first and fourth order

图4 工装-自锁阀前四阶固有频率与振型

自锁阀结构进行锤击试验,如图5所示.通过测量结构的频响函数得到该结构的固有频率,并与有限元仿真得到的结果进行比较,如表2所示.由于实际安装与装配过程中,工装与自锁阀的连接方式以及自锁阀内部各部件间的装配关系并非完全如仿真模型中理想化考虑的tie连接固定,实验固有频率与仿真固有频率之间存在一定误差.根据表2可知,固有频率的仿真结果与试验结果的偏差基本在5%以内,说明了有限元模型和模态分析的正确性,从而保证基于模态叠加原理的冲击响应分析的正确性.

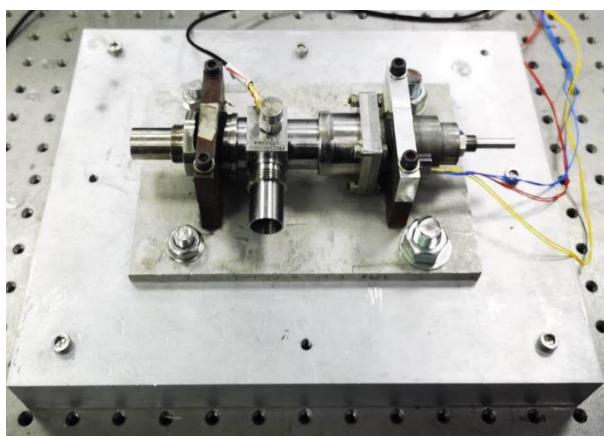


图5 模态试验示意图

Fig.5 Schematic diagram of modal test

表2 固有频率的试验结果与仿真结果

Table 2 Natural frequency test results and simulation results

Mode order	Simulation result (Hz)	Test result (Hz)	Error(%)
1	2787.0	2745.4	1.52%
2	2874.1	2869.5	0.16%
3	3542.9	3365.7	1.25%
4	4083.7	3874.2	5.26%
5	4272.9	4120.9	3.69%

3 阀芯锁闭状态分析

根据建立的工装-自锁阀有限元模型,在给定的响应谱下进行冲击响应分析,得到阀芯最大初速度,通过能量法判断阀芯的自锁状态.冲击试验条件如图6所示,在100~800Hz的频率范围,响应谱的斜率为+6dB/oct,在800~4000Hz的范围,响应谱

幅值为1000g.并且,由于冲击载荷本身的不确定性,响应谱容差为:频率 $\leq 3000\text{Hz}, \pm 6\text{dB}; > 3000\text{Hz}, +9.0\text{dB} \sim -6.0\text{dB}$.根据给定的冲击响应谱,对工装-自锁阀结构进行冲击响应分析,得到阀体与阀芯接触位置的最大响应速度.根据该响应速度计算阀芯动能,如果动能小于阀芯的磁场势能,则阀芯保持自锁;如果动能大于磁场势能,则阀芯异常开启.

为了研究自锁阀阀芯冲击裕度,以图6所示的理论标准响应谱、理论响应谱最大值、理论响应谱最小值作为激励,进行冲击响应分析,得到阀芯与阀体接触位置的最大响应速度如图7所示.

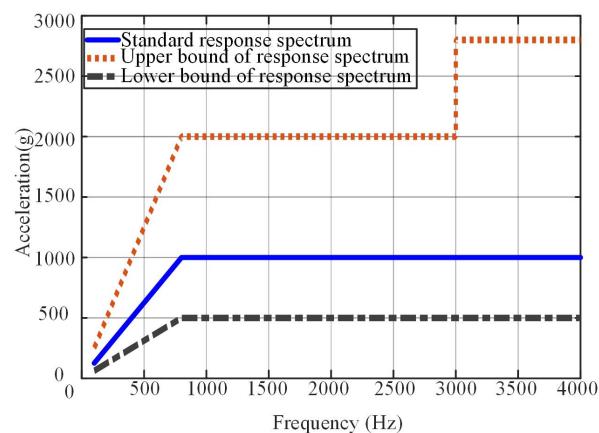


图6 冲击响应谱曲线

Fig.6 Shock response spectrum curve

根据速度响应云图可知,由于自锁阀自身的弹性,阀芯-阀体接触面的响应速度与位置有关,但变化不大,可以使用端面的平均速度作为阀芯最大速度.根据冲击响应分析结果,阀芯在以上三种理想工况下的锁闭状态如表3所示.根据结果可知,按照给定的冲击响应谱以及容差范围,自锁阀存在锁闭失效的可能.为了提高抗冲击裕度,需要满足最大理论响应谱冲击载荷下阀芯动能大于磁场势能的条件,从而保证在冲击试验给定容差下阀芯的抗冲击锁闭性.

航天器振动试验是航天器卫星环境工程的重要组成部分.为保证其飞行可靠性,航天器均要进行地面试验以考核其对力学环境的适应性^[13].冲击

表3 阀芯锁闭状态

Table 3 Spool locked state

Working condition	Spool velocity (m/s)	Spool Kinetic energy (J)	Potential energy (J)	Locked state
Standard response spectrum	0.359	1.55e-3	4.29e-3	Lock
Lower bound	0.179	3.84e-4	4.29e-3	Lock
Upper bound	0.715	6.13e-3	4.29e-3	Unlock

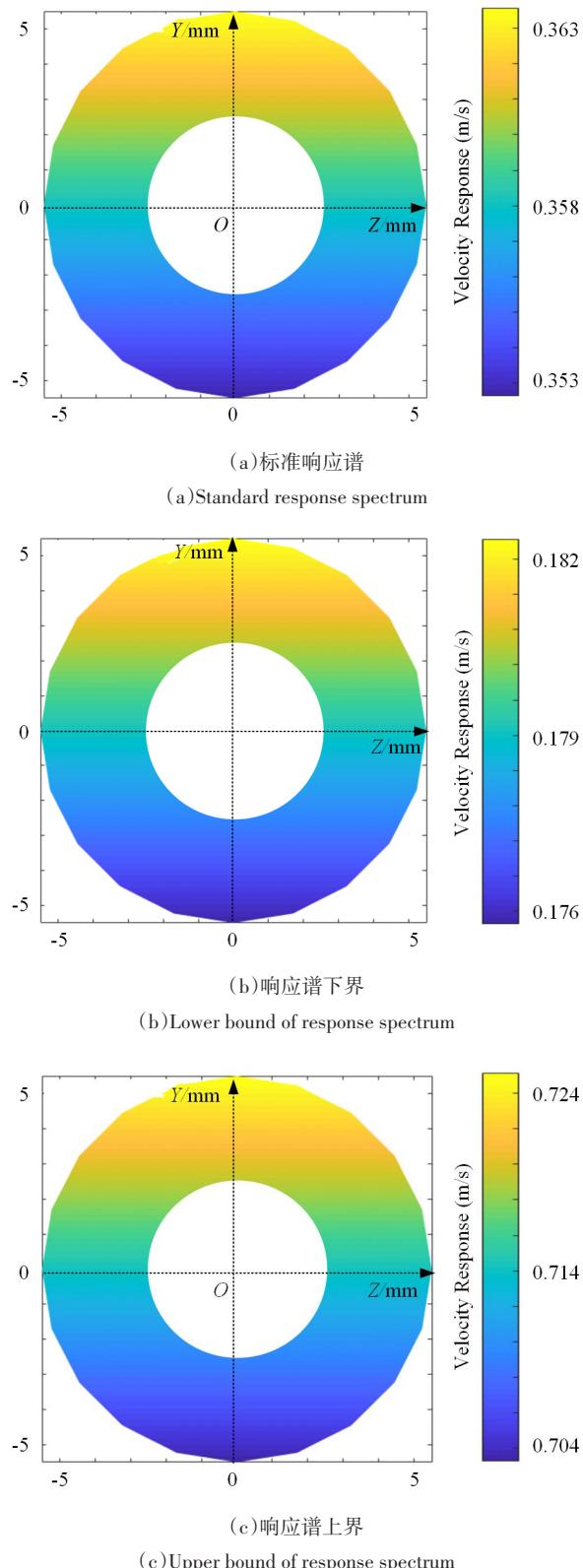
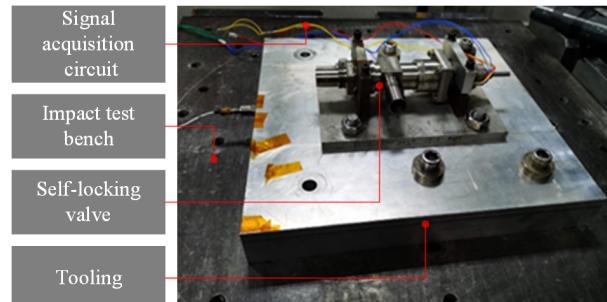


图7 冲击响应谱作用下阀芯与阀体接触位置响应速度云图

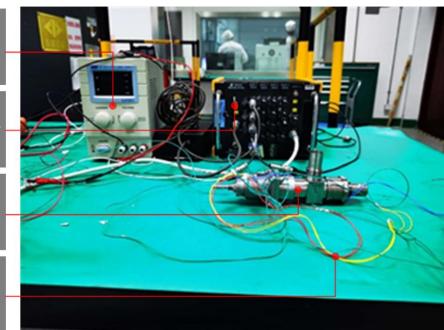
Fig.7 Self-locking valve impact test

试验作为一类重要特殊环境下振动试验,对考核自锁阀阀芯能否经受太空中强冲击恶劣力学环境起着非常重要的作用。



(a)冲击台台面连接实物图

(a)Impact table connection



(b)信号采集设备

(b)Signal acquisition equipment

图8 自锁阀冲击试验实物图

Fig.8 Self-locking valve impact test

为了验证阀芯锁闭状态分析结果的正确性,开展自锁阀的冲击试验,如图8所示.将自锁阀-工装固定在摆锤式冲击台的台面上,给定冲击响应谱,并设定容差范围.调整摆锤角度进行冲击试验,在冲击台控制系统中获得反馈生成的响应谱结果.试验结束后,查看自锁阀开闭与否,如果开启则说明锁闭失效.以试验得到的实际冲击响应谱作为输入,分析自锁阀的冲击响应并计算阀芯动能,利用能量法判断阀芯开闭情况,与试验结果进行对比.

进行四次冲击响应试验,测得的响应谱如图9所示.以这些响应谱作为冲击响应分析的输入载荷,得到阀芯初速度,计算阀芯动能并与磁场势能对比从而判断阀芯锁闭状态,并将其与试验结果进行对比,发现理论分析结果与试验结果一致,如表4所示,说明结合冲击响应与能量法能够准确判断自锁阀锁闭状态.

4 总结

电磁自锁阀具有结构紧凑、响应速度快等优点,是液体火箭发动机中广泛使用的控制阀门.在航天器受到火工品爆炸、器件分离等引起的冲击载荷时,电磁自锁阀可能发生锁闭失效,引起发动机故障.因

表4 阀芯开闭状态理论结果与试验结果对比

Table 4 Comparison of theoretical and experimental results of valve core opening and closing state

Working condition	Spool velocity (m/s)	Kinetic energy (J)	Potential energy (J)	Locking state (prediction)	Test result
Test 1	0.202	4.90e-4	4.29e-3	Lock	Lock
Test 2	0.337	1.36e-3	4.29e-3	Lock	Lock
Test 3	0.428	2.20e-3	4.29e-3	Lock	Lock
Test 4	0.741	6.59e-3	4.29e-3	Unlock	Unlock

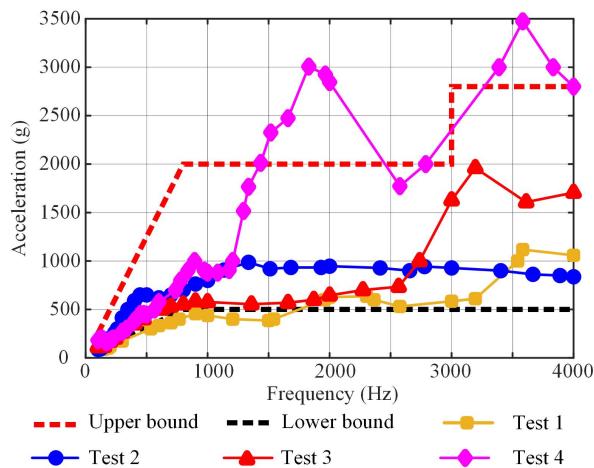


图9 冲击试验响应谱

Fig.9 Impact test response spectrum

此,需要对电磁自锁阀在冲击环境下的锁闭状态进行有效评估.针对这一问题,本文从能量角度研究了自锁阀的锁闭失效机理,建立了工装-自锁阀有限元模型,并利用模态试验验证模型的正确性.使用工装-自锁阀有限元模型,研究自锁阀的冲击响应,并结合阀芯能量分析,判断阀芯锁闭状态.为了验证理论分析的正确性,利用摆锤式冲击台开展冲击响应试验,以冲击试验的实际响应谱作为激励,分析阀芯锁闭情况,将所得理论结果与试验结果进行对比,二者完全一致,验证了阀芯锁闭分析方法的有效性.本文的研究能够为后续型号电磁自锁阀的设计、试验提供理论基础和技术支持.

参 考 文 献

- W, Qiu D L, Fu L P, et al. Progress in spacecraft vibration testing control technology. *Journal of Dynamics and Control*, 2014, 12(3): 193~200(in Chinese))
- 3 赵欣,郑世贵,韩增尧,等.点式分离火工冲击源仿真分析及载荷形成机理. *宇航学报*, 2016, 37(6): 657~663 (Zhao X, Zheng S G, Han Z Y, et al. Numerical simulation and analysis for point separating pyroshock source and load forming mechanism. *Journal of Astronautics*, 2016, 37(6): 657~663(in Chinese))
- 4 杨俊良,薛永刚,崔华阳,等.筒体结构星载天线抗冲击特性研究. *空间电子技术*, 2020, 17(5): 52~57(Yang J L, Xue Y G, Cui H Y, et al. Study on the impact characteristics of a space-tube structure antenna. *Space Electronic Technology*, 2020, 17(5): 52~57(in Chinese))
- 5 鄢青青,闫泽红,檀德猛,等.太阳翼电爆释放冲击载荷的仿真分析和试验验证. *航天器工程*, 2016, 25(4): 127~132(Yan Q Q, Yan Z H, Tan L M, et al. Simulation analysis and test verification of impact load for solar wing pyrotechnic release. *Spacecraft Engineering*, 2016, 25(4): 127~132(in Chinese))
- 6 王春民,袁洪滨,罗大亮,等.一种自锁阀在振动与冲击环境下的特性研究. *强度与环境*, 2014, 41(5): 17~23 (Wang C M, Yuan H B, Luo D L, et al. Performance research on a pneumatically latch-valve in vibration and shock environment Pyrotechnic Release. *Structure & Environment Engineering*, 2014, 41(5): 17~23(in Chinese))
- 7 朱景文,何昆,赵哲,等.基于弹性力学火箭发动机自锁电磁阀冲击响应分析. *强度与环境*, 2013, 40(3): 25~30 (Zhu J W, He K, Zhao Z, et al. Impulse response analysis of electro-magnetic valve on rocket engine based on elasticity, *Structure & Environment Engineering*, 2013, 40 (3): 25~30(in Chinese))
- 8 徐子健,南宫自军,李炳蔚,等.航天器插装型元器件冲击损伤边界研究. *振动与冲击*, 2020, 39(21): 71~81 (Xu Z J, NanGong Z J, Li B W, et al. Impact damage boundary of spacecraft plug-in components. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(21): 71~81(in Chinese))
- 9 陈其法,朱春艳,王文彬,等.基于流固耦合方法的运载火箭安全阀颤振问题研究. *动力学与控制学报*, 2019, 17(6): 528~536(Chen Q F, Zhu C Y, Wang W B, et al. Flutter analysis of rocket safety pneumatic valve based on

- fluid structure interaction. *Journal of Dynamics and Control*, 2019, 17(6): 528~536(in Chinese))
- 10 尤罡, 王莉. 磁锁式双稳态自锁阀响应特性理论研究. *火箭推进*, 2019, 45(1): 42~47(You G, Wang L. Study on dynamic performance of magnetic self-locking valve. *Journal of Rocket Propulsion*, 2019, 45(1): 42~47(in Chinese))
- 11 于博洋, 闫明, 张磊, 等. 水下非接触爆炸中谱跌效应对设备破坏的影响分析. *噪声与振动控制*, 2016, 36(5): 6~10.(Yu B Y, Yan M, Zhang L, et al. Influence of spectrum dip effect on the equipment damage under non-contact underwater explosion. *Noise and Vibration Control*, 2016, 36(5): 6~10(in Chinese))
- 12 张建华. 航天产品的爆炸冲击环境技术综述. *导弹与航天运载技术*, 2005(3): 30~36(Zhang J H. Pyroshock environment of missiles and launch vehicles. *Missiles and Space Vehicles*, 2005(3): 30~36(in Chinese))
- 13 沈林, 秦川, 胡迪科, 等. 支承舱减振性能分析. *动力学与控制学报*, 2014, 12(3): 235~238(Shen L, Qin C, Hu D K, et al. The analysis of vibration reduction characteristics of pay-load supported bay. *Journal of Dynamics and Control*, 2014, 12(3): 235~238(in Chinese))

RESEARCH ON LOCKING CHARACTERISTICS OF SPACECRAFT ELECTROMAGNETIC SELF-LOCKING VALVE IN SHOCK ENVIRONMENT *

JU Zhen-hao¹ YAN Han¹ YOU Gang² ZHANG Wen-ming^{1†}

(1. *The State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai JiaoTong University, Shanghai 200240, China*)

(2. *Shanghai Institute of Space Propulsion, Shanghai 201112, China*)

Abstract Electromagnetic self-locking valves are widely used in spacecraft, such as satellites, launch vehicles, and spaceship. In strong impact environments, such as engine ignition, explosion of pyrotechnic devices, and separation of rockets, locking failures of self-locking valves may occur, which can affect the safe operation of the spacecraft. Aiming at the locking reliability of the electromagnetic self-locking valve under impact load, the paper studied the locking failure mechanism of the self-locking valve. A finite element model for the tooling and self-locking valve was established, the correctness of which was verified through modal tests. Based on the modal superposition theory, the shock response characteristics of the self-locking valve were studied, and the locking state of valve spool was judged according to the shock response results and the energy analysis of valve spool. In order to verify the accuracy of the analysis results, a pendulum impact platform was used to carry out impact tests. The locking state of the valve spool obtained was in good agreement with the theoretical results, indicating the effectiveness of the analysis method. The research in this article can provide theoretical foundation and technical support for the anti-shock design of electromagnetic self-locking valves.

Key words electromagnetic self-locking valves, shock environment, finite element analysis, locking state

Received 26 February 2021, revised 11 March 2021.

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China(11902192).

† Corresponding author Email: wenmingz@sjtu.edu.cn

《动力学与控制学报》

2021年总目次

- 多体系统动力学的常用积分器算法 任辉 周平(2021,19(1):1)
基于最大Lyapunov指数的行星齿轮传动系统混沌特性分析 王靖岳 刘宁 王浩天(2021,19(1):29)
时滞反馈与多频激励联合作用下Duffing振子的快慢动力学 王东梅 余跃 张正娣(2021,19(1):37)
雾化器转轴振动特性研究 尹自超 李明 陈波 李映辉(2021,19(1):47)
车辆系统的非线性行驶动力学响应 韩彦伟 张子建(2021,19(1):55)
隔振对象重量变化对准零刚度隔振器隔振性能的影响 刘兴天 孔祥森 孙杰 许银生(2021,19(1):63)
基于ORB-SLAM的低照度空间非合作目标的姿态估计 周朋博 刘晓峰 蔡国平(2021,19(1):68)
二维三角陀螺声子晶体的波调控研究 王伟能 杨晓东 张伟(2021,19(1):75)
二阶多智能体系统的线性广义一致性 柴洁 过榴晓 陈晶 陈良康(2021,19(1):80)
相交轴转子系统当量化建模与扭振响应分析 陈立满 杨大炼 蒋玲莉 李学军(2021,19(1):87)
微结构固体中孤立波的动力稳定性 韩元春 那仁满都拉(2021,19(1):96)
考虑星历的火卫一邻近区域限制性多体问题建模与分析 吴晓杰 王悦 徐世杰(2021,19(2):1)
基于刚体卫星绳系编队系统的动力学建模及姿态控制 赵俊淇 陈卫东 余本嵩(2021,19(2):8)
地月L2点中继星捕获域研究 梁伟光 马传令 刘勇 刘磊(2021,19(2):15)
旋转目标的多星协同近距离姿轨耦合控制 徐影 张进(2021,19(2):22)
编队航天器构型重构过程中的期望轨迹跟踪控制 刘建彪 冯刚 陈记争(2021,19(2):32)
外部扰动下空间机器人基于扰动观测器的鲁棒控制 尤鑫烨 陈力(2021,19(2):37)
电动汽车湿式双离合变速器换挡动力学仿真 楼振雄 段宇鹏 张云清(2021,19(2):43)
弹架间隙对导弹发射扰动的影响特性研究 何泽鹏 张雁 赵良玉 傅德彬 李云峰(2021,19(2):54)
含变质量负载的双连杆机械臂振动控制 马驰骋 胡帅钊 高坤明 张春林 郭宗和(2021,19(2):61)
基于Lagrange插值多项式拟合的力学系统的变分积分分子 孔新雷 杨雪(2021,19(2):69)
漂浮基空间机械臂的反演滑模容错控制 宋齐 王远彬 于潇雁(2021,19(2):78)
萤火虫算法求解多体系统动力学微分-代数方程 张笑笑 丁洁玉(2021,19(2):85)
《结构动力学》中多频激励多自由度系统稳态解的新方法 康厚军 丛云跃 郭铁丁(2021,19(2):91)
车辆动力学与控制研究进展 李韶华 王伟达(2021,19(3):1)
轮毂驱动电动汽车动力学稳定性滑模控制策略研究 王伟达 张宇航 黄国强 孙晓霞 杨超 马正(2021,19(3):5)
重型车线控液压制动系统动力学分析与控制 李宇柔 金智林 王晓露 张鑫彬(2021,19(3):15)
智能客车转向助力系统控制器设计与实现 李爱娟 韩文尧 王知学 张云 刘刚 袁文长(2021,19(3):22)
分布式多轴车机电复合制动系统的拓扑结构方案及制动性能分析 申焱华 朱美霞 刘相新 黎兰(2021,19(3):31)
基于模糊PID算法的整车避撞控制多工况仿真 何柳青 杨春林 潘勇军(2021,19(3):38)
基于模糊PID算法的车身稳定控制策略与多工况联合仿真 聂小博 熊玥 潘勇军(2021,19(3):46)
无离合器机械式自动变速器换挡过程的扭矩控制 祁炳楠 杨刘权 郭晓斌 张利鹏(2021,19(3):53)
基于轮胎与三维路面接触分析的车辆半主动控制研究 路永婕 李成 怀文青 李韶华 李振宇(2021,19(3):60)
基于洛伦兹力的汽车转向节缺陷检测方法研究 黄欣 李爱娟(2021,19(3):69)
刚柔耦合特种车辆越障行驶动力学分析及悬架优化 刘欢 李韶华 张培强(2021,19(3):74)
汽车质量与道路坡度串行估计方法 张华达 林棻 赵又群 蔡亦璋(2021,19(3):83)

轮毂式电机驱动电动汽车主动悬架滑模控制研究

张云 孙劭泽 金贤建 李韶华 杨俊朋 王佳栋(2021,19(3):89)

单自由度齿轮系统的混沌控制 张文 谢建华 李高磊 乐源(2021,19(4):1)

一个周期性强迫的四维超混沌系统的复杂动力学性质 陈熙统 鲍江宏(2021,19(4):7)

新光滑多翅膀混沌系统研究 李文静 贾美美(2021,19(4):15)

非线性边界条件下弯扭耦合梁方程组的吸引子 张婷 张建文(2021,19(4):24)

梁式结构动力模型降阶方法及其应用 赵阳 许博谦 李晓波 李玉韦(2021,19(4):32)

参数化列车碰撞平台的动力学建模与仿真

吴启凡 肖守讷 杨超 朱涛 阳光武 杨冰(2021,19(4):39)

分形接触干摩擦模型及在围带叶片受迫响应分析中的应用 邱恒斌 徐自力(2021,19(4):48)

下肢康复外骨骼人机耦合动力学建模与控制 张佳俊 张舒 徐鉴(2021,19(4):55)

三重周期极小曲面夹芯结构的隔声性能研究 刘杰 林春贵 文桂林(2021,19(4):64)

基于包络切换的四旋翼吊挂无人机避障轨迹优化研究 康晶杰 黄政 文浩(2021,19(4):73)

航天飞行器在共面多轨道间的机动规划方法研究

刘冰雁 于鸿源 马心意 房莹 张颂(2021,19(4):81)

双向气动软体执行器的设计与分析 宋晓娟 刘帅 吕书锋(2021,19(4):89)

双边碰撞Duffing振子的对称性、尖点分岔与混沌 李冠强 谢建华(2021,19(5):1)

分数阶混沌系统的自适应预测同步 司辉 郑永爱(2021,19(5):8)

具有不等集群结构的离散时空网络间同步 柳爽 李宽 张润泽(2021,19(5):13)

不同阶外激励下压电纤维复合材料悬臂板的内共振特性分析 郭翔鹰 段梦烨(2021,19(5):23)

负泊松比蜂窝夹层板的多周期运动研究 朱绍涛 李静 张伟(2021,19(5):33)

周向约束对泡沫铝陶瓷复合结构抗弹性能的影响 郑伟 喻琳峰 顾靖伟(2021,19(5):39)

X型准零刚度隔振器动力学设计及分析 尹蒙蒙 丁虎 陈立群(2021,19(5):46)

自供能智能减震器自耦合控制研究 朱云 邹鸿翔 魏克湘(2021,19(5):53)

下肢外骨骼膝关节模糊滑模位置控制器设计

李鹏杰 王新蕊 李小奇 许国强 司访 张煜 叶冬雨(2021,19(5):59)

基于网络核心体的复杂网络控制分析 王媛媛 袁正中 赵琛(2021,19(5):65)

液体晃动对飞行器控制系统影响分析 邓林啸 吕竹勇 王天舒 吕敬(2021,19(5):70)

电磁场效应下HR神经元的全局分岔与参数辨识 肖冉 安新磊 祁慧敏(2021,19(5):81)

基于有限质点法的牵引走板与双滑车多体动力计算方法

秦剑 江明 景文川 贾宁 乔良(2021,19(5):89)

四维超Jerk系统的分岔特性及同步控制研究 姜丽爽 李静 张伟(2021,19(6):1)

MMU月面起飞燃耗最省轨迹和推力设计研究 韩艳铧 洪军停 张勇(2021,19(6):8)

一种柔性隔振结构的动力学分析及设计方法 尹佑旺 郑佩(2021,19(6):16)

哑铃型航天器刚-柔耦合动力学建模与仿真分析 王博洋 刘铸永 郑鹏飞(2021,19(6):25)

磁气悬吊微重力模拟系统动力学研究 周梅 张欢 宋晓东(2021,19(6):33)

不同作动器布局和时滞下柔性悬臂梁振动控制研究 张博 胥奇 李映辉(2021,19(6):41)

简谐激励下双弹簧非线性能量阱的优化 王国旭 丁虎 陈立群(2021,19(6):46)

有界噪声激励下系统随机共振的改善 张强 王剑龙 李扬 刘先斌(2021,19(6):52)

时滞下忆阻突触耦合Hopfield神经网络的动力学行为分析

马杰 高洁 独盟盟 杨丽新(2021,19(6):59)

忆阻器的温度效应改进模型及其仿生神经突触传递

张蒙 成宇 张艺 朱庆花 韩芳(2021,19(6):67)

一种用于转子裂纹故障检测的区间控制策略

任双兴 侯磊 李凌峰 靳宇宏 昌泽元 姚迟森(2021,19(6):76)

民机概念设计阶段的气动弹性优化设计 吕继航 杨何发(2021,19(6):83)

冲击环境下航天器电磁自锁阀锁闭特性研究 鞠震昊 闫寒 尤罡 张文明(2021,19(6):89)

JOURNAL OF DYNAMICS AND CONTROL

2021. CONTENTS

Implementation details of DAE integrators for multibody system dynamics	Ren Hui, Zhou Ping(2021, 19(1):1)
Chaos analysis of planetary gear transmission system based on largest Lyapunov exponent	Wang Jingyue, Liu Ning, Wang Haotian(2021, 19(1):29)
Fast-slow dynamics of Duffing oscillator with time-delay feedback under multi-frequency excitations	Wang Dongmei, Yu Yue, Zhang Zhengdi(2021, 19(1):37)
Study on vibration characteristics of atomizer shaft	Yin Zichao, Li Ming, Chen Bo, Li Yinghui(2021, 19(1):47)
Research on nonlinear driving dynamics of a vehicle system	Han Yanwei, Zhang Zijian(2021, 19(1):55)
Effect of load imperfection on vibration isolation performance of a quasi-zero-stiffness isolator	Liu Xingtian, Kong Xiangsen, Sun Jie, Xu Yinseng(2021, 19(1):63)
Attitude estimation of a non-cooperative spacecraft in low-light condition based on ORB-SLAM algorithm	Zhou Pengbo, Liu Xiaofeng, Cai Guoping(2021, 19(1):68)
Study on wave manipulation in 2-D triangular gyroscope phononic crystals	Wang Weineng, Yang Xiaodong, Zhang Wei(2021, 19(1):75)
Linear generalized consensus of second-order multi-agent systems	Chai Jie, Guo Liuxiao, Chen Jing, Chen Liangkang(2021, 19(1):80)
Idealized modeling and torsional vibration analysis of intersecting shaft rotor system	Chen Liman, Yang Dalian, Jiang Lingli, Li Xuejun(2021, 19(1):87)
Dynamical stability of solitary wave in microstructured solids	Han Yuanchun, Narenmandula(2021, 19(1):96)
Modeling and analysis of restricted N-body problem with ephemeris in vicinity of phobos	Wu Xiaojie, Wang Yue, Xu Shijie(2021, 19(2):1)
Dynamic modeling and attitude control of tether satellite formation system with a rigid body	Zhao Junqi, Chen Weidong, Yu Bensong(2021, 19(2):8)
Analysis of capture area of Earth-Moon L2 libration point relay satellite	Liang Weiguang, Ma Chuanling, Liu Yong, Liu Lei(2021, 19(2):15)
Attitude-orbit coupling method for multi-satellite collaborative proximity control of rotating target	Xu Ying, Zhang Jin(22)
Desired trajectory tracking control during formation reconstruction of formation spacecraft	Liu Jianbiao, Feng Gang, Chen Jizheng(2021, 19(2):32)
Robust control of space robot based on disturbance observer under external disturbance	You Xinye, Chen Li(2021, 19(2):37)
Dynamics of gear-shifting in wet-type dual clutch transmission for bevs	Lou Zhenxiong, Duan Yupeng, Zhang Yunqing(2021, 19(2):43)
Study on the influences of the clearance on missile launching disturbance	He Zepeng, Zhang Yan, Zhao Liangyu, Fu Debing, Li Yufeng(2021, 19(2):54)
A study on vibration control of double-link manipulators with variable mass loads	Ma Chicheng, Hu Shuaizhao, Gao Kunming, Zhang Chunlin, Guo Zonghe(2021, 19(2):61)
Variational integrators for mechanical systems based on the Lagrange interpolating polynomial	Kong Xinlei, Yang Xue(2021, 19(2):69)
A backstepping sliding mode fault-tolerant control for free floating space manipulators	Song Qi, Wang Yuanbin, Yu Xiaoyan(2021, 19(2):78)
Firefly algorithm for multi-body system dynamics differential-algebraic equations	Zhang Xiaoxiao, Ding Jieyu(2021, 19(2):85)
A new method for steady-state response of multi-DOF system with multi-frequency harmonic excitations in structural dynamics	Kang Houjun, Cong Yunyue, Guo Tieding(2021, 19(2):91)
Research advance in vehicle dynamics and control	Li Shaohua, Wang Weida(2021, 19(3):1)
Research on sliding mode control strategy for dynamic stability of in-wheel drive electric vehicle	Wang Weida, Zhang Yuhang, Huang Guoqiang, Sun Xiaoxia, Yang Chao, Ma Zheng(2021, 19(3):5)
Dynamic analysis and control of hydraulic brake-by-wire system for heavy-duty vehicle	Li Yurou, Jin Zhilin, Wang Xiaolu, Zhang Xinbin(2021, 19(3):15)
Design and implementation of intelligent bus steering system	Li Aijuan, Han Wenyao, Wang Zhixue, Zhang Yun, Liu Gang, Yuan Wenchang(2021, 19(3):22)
Study on topological configuration and performance of composite braking system of distributed driving multi-axis vehicle	Shen Yanhua, Zhu Meixia, Liu Xiangxin, Li Lan(2021, 19(3):31)
Multi-condition simulations of vehicle collision avoidance control via fuzzy PID algorithm	He Liqing, Yang Chunlin, Pan Yongjun(2021, 19(3):38)
Multi-condition co-simulations of vehicle stability control via fuzzy PID algorithm	Nie Xiaobo, Xiong Yue, Pan Yongjun(2021, 19(3):46)
Torque control of clutchless AMT during gear shifting	Qi Bingnan, Yang Liuquan, Guo Xiaobin, Zhang Lipeng(2021, 19(3):53)
Research on vehicle semi-active control based on contact analysis of tire and 3D pavement	Lu Yongjie, Li Cheng, Huai Wenqing, Li Shaohua, Li Zhenyu(2021, 19(3):60)
Research on defect detection method of automobile steering knuckle based on Lorentz force	Huang Xin, Li Aijuan(2021, 19(3):69)
Rigid flexible coupling special vehicle dynamic analysis and suspension optimization of obstacle crossing	Liu Huan, Li Shaohua, Zhang Peiqiang(2021, 19(3):74)

- Serial estimation of vehicle mass and road grade Zhang Huada, Lin Fen, Zhao Youqun, Cai Yizhang(2021,19(3):83)
- Sliding mode control for active suspension of in-wheel-drive electric vehicles Zhang Yun, Sun Shaoze, Jin Xianjian, Li Shaohua, Yang Junpeng, Wang Jiadong(2021,19(3):89)
- Chaos control of a single degree of freedom gear system Zhang Wen, Xie Jianhua, Li Gaolei, Le Yuan(2021,19(4):1)
- Complex dynamical properties of a four-dimension periodically-forced hyperchaotic system Chen Xitong, Bao Jianghong(2021,19(4):7)
- Research of a novel smooth multi-wing chaotic system Li Wenjing, Jia Meimei(2021,19(4):15)
- Attractor for equations of a bending and torsional coupled beam under nonlinear boundary conditions Zhang Ting, Zhang Jianwen(2021,19(4):24)
- A dynamic model reduction method of beam-type structures and its application Zhao Yang, Xu Boqian, Li Xiaobo, Li Yuwei(2021,19(4):32)
- Dynamic modeling and simulation of a parametric vehicle collision platform Wu Qifan, Xiao Shoune, Yang Chao, Zhu Tao, Yang Guangwu, Yang Bing(2021,19(4):39)
- A fractal friction contact model and its application to forced response analysis of a shrouded blade Qiu Hengbin, Xu Zili(2021,19(4):48)
- Human-machine coupled dynamic modelling and control of lower limb exoskeleton for rehabilitation Zhang Jiajun, Zhang Shu, Xu Jian(2021,19(4):55)
- Study on sound insulation performance of sandwich structures with triply periodic minimal surface cores Liu Jie, Lin Chunguan, Wen Guilin(2021,19(4):64)
- Trajectory optimization with switchable encapsulating circle for quadrotor carrying slung payload Kang Jingjie, Huang Zheng, Wen Hao(2021,19(4):73)
- Research on maneuver planning methods of space vehicle in coplanar multi-orbit Liu Bingyan, Yu Hongyuan, Ma Xinyi, Fang Ying, Zhang Song(2021,19(4):81)
- Design and analysis of a bidirectional pneumatic soft actuator Song Xiaojuan, Liu Shuai, Lu Shufeng(2021,19(4):89)
- Symmetry, cusp bifurcation and chaos of the double-impact Duffing oscillator Li Guanqiang, Xie Jianhua(2021,19(5):1)
- Adaptive predictive synchronization of fractional order chaotic systems Si Hui, Zheng Yong'ai(2021,19(5):8)
- Outer synchronization between community spatiotemporal networks with nonidentical nodes Liu Shuang, Li Kuan, Zhang Runze(2021,19(5):13)
- The influence of different order excitations on responses of piezoelectric fibre composite plates with multi inner resonance Guo Xiangying, Duan Mengye(2021,19(5):23)
- Multiple periodic motions of a honeycomb sandwich plate with negative Poisson's ratio Zhu Shaotao, Li Jing, Zhang Wei(2021,19(5):33)
- Analysis of anti-penetration performance of ceramic composite structure containing aluminum foam influenced by circumferential restriction Zheng Wei, Yu Linfeng, Gu Jingwei(2021,19(5):39)
- Dynamic design and analysis of X-shaped quasi-zero stiffness isolator Yin Mengmeng, Ding Hu, Chen Liqun(2021,19(5):46)
- Self-coupling control of self-powered intelligent shock absorber Zhu Yun, Zou Hongxiang, Wei Kexiang(2021,19(5):53)
- Design of fuzzy sliding mode position controller for exoskeleton knee joint with lower limbs Li Pengjie, Wang Xinrui, Li Xiaoqi, Xu Guoqiang, Si Fang, Zhang Yu, Ye Dongyu(2021,19(5):59)
- Analysis of complex networks control based on core Wang Yuanyuan, Yuan Zhengzhong, Zhao Chen(2021,19(5):65)
- Influence of liquid sloshing on aircraft control system Deng Linxiao, Lv Zhuyong, Wang Tianshu, Lv Jing(2021,19(5):70)
- Global bifurcation and parameter identification of HR neurons under electromagnetic field effects Xiao Ran, An Xinlei, Qi Huimin(2021,19(5):81)
- Dynamic calculation method of multi-body system of traction plate and double-pulley based on finite particle method Qin Jian, Jiang Ming, Jing Wenchuan, Jia Ning, Qiao Liang(2021,19(5):89)
- Bifurcation and synchronization control of a four-dimension hyperjerk system Jiang Lishuang, Li Jing, Zhang Wei(2021,19(6):1)
- Study on trajectory and thrust design with lowest fuel consumption of MMU taking off from lunar surface Han Yanhua, Hong Junting, Zhang Yong(2021,19(6):8)
- Design and dynamic analysis of a flexible vibration isolation structure Yin Youwang, Zheng Pei(2021,19(6):16)
- Rigid-flexible dynamic modeling and simulation of dumbbell spacecraft Wang Boyang, Liu Zhuyong, Zheng Pengfei(2021,19(6):25)
- A dynamic study of magnetic air suspension microgravity simulation system Zhou Mei, Zhang Huan, Song Xiaodong(2021,19(6):33)
- Study on vibration control of a flexible cantilever beam with different actuator layouts and time delays Zhang Bo, Xu Qi, Li Yinghui(2021,19(6):41)
- Optimization of a nonlinear energy sink with double springs and harmonic excitation Wang Guoxu, Ding Hu, Chen Liqun(2021,19(6):46)
- Improvement of stochastic resonance under bounded noise excitation Zhang Qiang, Wang Jianlong, Li Yang, Liu Xianbin(2021,19(6):52)
- Dynamic behavior analysis of memristive synaptic coupling Hopfield neural network under time delay Ma Jie, Gao Jie, Du Mengmeng, Yang Lixin(2021,19(6):59)
- An improved temperature-based memristor model and its bionic synaptic transmission Zhang Meng, Cheng Yu, Zhang Yi, Zhu Qinghua, Han Fang(2021,19(6):67)
- Switching control strategy for detecting crack area of rotors Ren Shuangxing, Hou Lei, Li Lingfeng, Jin Yuhong, Chang Zeyuan, Yao Chisen(2021,19(6):76)
- Aeroelastic optimization design of civil aircraft at conceptual design stage Lv Jihang, Yang Hefa(2021,19(6):83)
- Research on locking characteristics of spacecraft electromagnetic self-locking valve in shock environment Ju Zhenhao, Yan Han, You Gang, Zhang Wenming(2021,19(6):89)