

重复使用运载火箭机构电涡流阻尼技术应用及思考

王辰¹ 王文熙² 陈政清² 张宏剑¹ 吴会强¹

(1 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

(2 湖南大学 桥梁工程安全与韧性全国重点实验室, 长沙 410082)

文 摘 重复使用航天运载器是航天运输系统发展的重点目标之一, 机构技术是运载火箭多功能化、可复用化发展的重要支撑, 其减震缓冲功能对阻尼机构有着广泛的需求。电涡流阻尼是一种基于电磁感应原理的非接触式的阻尼产生方式, 具有无磨损、无漏液、性能稳定、可靠性高、维护性好、便于长期贮存等优势, 并且是一种电涡流阻尼原理的速度型阻尼机构, 在车辆制动、建筑减振等工程领域中应用广泛。本文对永磁体电涡流阻尼器的基础原理进行了阐述, 按直线式、轴向旋转和径向旋转进行分类, 并分析了应用的材料类型。研究了重复使用运载火箭在展开缓冲、抑振隔振、冲击缓冲、主动控制等方面对阻尼机构的需求, 详细分析了电涡流阻尼技术在运载火箭机构设计领域的应用现状和发展前景。

关键词 电涡流阻尼, 运载火箭, 机构

中图分类号: O313

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2024.02.005

Application and Thought of Eddy Current Damping Technology in Reusable Launch Vehicle Mechanism

WANG Chen¹ WANG Wenxi² CHEN Zhengqing² ZHANG Hongjian¹ WU Huiqiang¹

(1 Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100076)

(2 State Key Laboratory of Bridge Safety and Resilience, Hunan University, Changsha 410082)

Abstract Reusable launch vehicle is one of the key goals for the development of space transportation systems. Mechanism technology is an important support for the multifunctional and reusable development of launch vehicles, and its damping and buffering functions have a wide demand for damping mechanisms. Eddy current damper is a non-contact damping generation method base on the eddy current principle, which has the advantage such as no wear, no leakage, stable performance, high reliability, good maintenance, and easy long-term storage. And it is a velocity type damping mechanism based on the principle of eddy current damping, which wildly used in vehicle breaking, building damping and other engineering fields. The basic principle of permanent magnet eddy current dampers is elaborated, which are classified into linear type, axial rotational type and radial rotational type, and the types of materials used are analyzed. The requirements of damping mechanisms for reusable launch vehicles in terms of deployment buffering, vibration suppression, impact buffering, and active control are elaborated. The application status and development prospect of eddy current damping technology in the field of launch vehicle mechanism design are analyzed.

Key words Eddy current damper, Launch vehicle, Mechanism

0 引言

重复使用航天运载器是航天运输系统的重点建

设目标之一^[1], 也是航班化航天运输系统的重要组成部分^[2], 这对重复使用运载火箭气动控制机构、着陆

收稿日期: 2024-01-22

基金项目: 国家自然科学基金(11402033); 中国科协学科发展项目(2019XKFZ02); 中国科协青年人才托举工程(2016QNRC001-YESS20160107); 中国科协优秀中外青年交流计划(2019293)

第一作者简介: 王辰, 1988年出生, 高级工程师, 主要从事运载火箭结构机构设计与分析等方面的研究工作。E-mail: wang_chentj@126.com

通信作者: 吴会强, 1977年出生, 博士, 研究员, 主要从事运载火箭结构设计研究工作。

陈政清, 1947年出生, 教授, 中国工程院院士, 主要从事大型结构工程力学研究工作。E-mail: zqchen@hnu.edu.cn

缓冲机构等机构技术提出了更高的要求^[3]。

机构技术是运载火箭多功能化、可复用化发展的重要支撑^[4],其中减震缓冲是机构产品的重要功能,在结构与机构系统中增加阻尼是机构产品实现减震缓冲功能的有效手段。

航天工程领域对阻尼机构有着广泛的需求。我国 CZ-2F 载人运载火箭的逃逸飞行器使用了可展开的栅格翼以增加无控飞行时的稳定性^[5],为保证栅格翼展开过程可控并降低其展开到位时的冲击,使用了液压阻尼机构提供栅格翼展开过程中的阻尼力。哈勃太空望远镜应用了黏弹性阻尼器^[6],利用阻尼层剪切变形耗散能量。对于有效载荷隔振问题,可使用弹簧和阻尼机构并联的方式隔振^[7],也可使用在冲击源附近或冲击传递路径上增加阻尼隔振器^[8]的方法抑制冲击引起的响应。

阻尼机构常用的阻尼原理包括黏滞阻尼、电涡流阻尼、黏弹性阻尼、机械摩擦阻尼、电/磁流变阻尼等^[9]。黏滞阻尼是航天机构最常用的阻尼原理之一,以液压油等黏性液体作为工作介质,对装配密封的要求较高,存在一定的漏液风险,并且需要将温度控制在一定范围以保证阻尼性能的稳定。黏弹性阻尼是利用材料同时具备的黏性液体特性和弹性固体特性实现耗能,对温度较为敏感,需要额外的温控措施。机械摩擦阻尼通过运动部件相互之间的摩擦力耗散能量,结构较为简单,但为了保证摩擦性能稳定对材料工艺提出了很高要求,且存在磨损后性能大幅变化的问题,难以适应多次重复使用的需求。电/磁流变阻尼以电流变液/磁流变液作为工作介质,并且能够通过改变外部电场或磁场调节阻尼特性,但也存在漏液风险,且需要外部供能,结构较为复杂。

对比黏滞阻尼、黏弹性阻尼、机械摩擦阻尼等阻尼产生方式,电涡流阻尼是一种非接触式的阻尼产生方式,具有无磨损、无漏液、性能稳定、可靠性高、维护性好、便于长期贮存等优势。因此,电涡流阻尼技术也广泛应用于高层建筑^[10]、海上风电^[11]、桥梁^[12]、身管火炮后座制退^[13-14]、精密仪器^[15]、汽车及高速列车制动等工程领域。电涡流阻尼技术目前在运载火箭领域的应用尚不十分广泛,面对重复使用航天运载器对重复使用机构技术的需求^[16]及航天运载器结构与机构设计中受载高偏差、冲击缓冲、隔振工程等问题,电涡流阻尼技术以其性能稳定、速度适应性强、维护性好等优点具有广泛的应用前景。本文对永磁体电涡流阻尼器的基础原理进行阐述,并按直线式、轴向旋转和径向旋转进行分类,详细分析电涡流阻尼技术在运载火箭机构设计领域的应用现状和发展前景。

1 电涡流阻尼的原理及分类

1.1 电涡流阻尼机构基础原理

电涡流阻尼技术是基于电磁感应原理,当导体板在磁场内运动时,会在导体板内感应产生电涡流,并由导体内的电涡流产生感应磁场,如图 1 所示。根据楞次定律,感应磁场与原磁场之间存在“来拒去留”效应,导体板内电涡流在磁场内所受的洛伦兹力产生了阻碍导体板与原磁场之间的相对运动,电涡流阻尼由此产生。将导体板与运动部件相连,就可以使产生的电涡流阻尼力/力矩作用在运动部件上,起到减速、缓冲、制动效果。

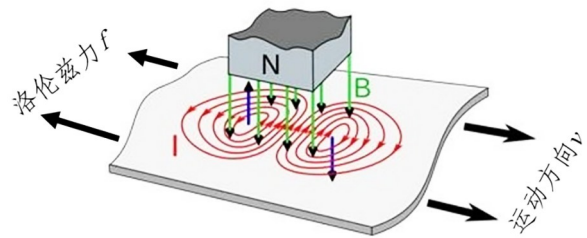


图 1 电涡流阻尼原理

Fig. 1 Theory of current eddy damper

从能量角度,电涡流阻尼是先将动能转化为电涡流的电能,由于导体板内产生了电涡流以及导体板自身的电阻,根据焦耳定律,电能会转化为热能的形式耗散。依据电磁感应原理,导体中感应电动势的大小与磁通量的变化率成正比,则电涡流阻尼力和导体与永磁体之间的相对运动速度(以下称相对速度 v)正相关,是一种速度型阻尼。当相对速度 v 小于临界速度时^[17],非常接近线性阻尼,即 $f=cv$, c 是阻尼系数。

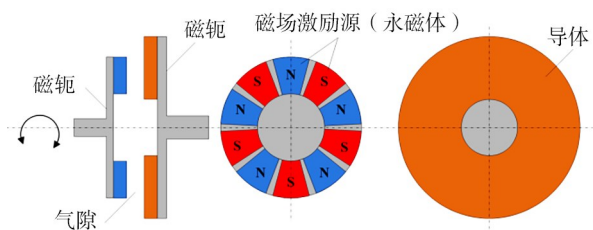


图 2 电涡流阻尼机构组成^[18]

Fig. 2 Assembly of current eddy damper^[18]

以文献[18]中的电涡流阻尼器为例(图 2),电涡流阻尼机构主要由磁场激励源(例如永磁体)、导体、气隙和磁轭等组成。磁场激励源是产生磁场的励磁结构,用以产生电涡流阻尼机构的原磁场。导体是与原磁场相对运动形成电涡流的结构,导体选用材料的电磁特性(电导率、磁导率)是电涡流阻尼机构性能的重要影响因素。气隙^[19]是磁场激励源与导体之间的间隙,其取值需使磁阻尽量小,又要保证一定的间隙用于避碰和散热。磁轭一般位于导体和磁场

激励源外部,起到减小漏磁的作用。

1.2 电涡流阻尼机构分类

根据磁场激励源的不同,电涡流阻尼机构可以分为电励磁电磁阻尼机构、永磁式电磁阻尼机构、混合励磁电磁阻尼机构。

电励磁电涡流阻尼机构^[20]使用通电的导线绕组产生原磁场,这种类型的电涡流阻尼机构需要外部能源供能,可以通过调节励磁电流的方法来改变磁场强度进而调节阻尼性能,能够进行主动控制,但结构相对复杂,外部供能会带来额外的质量、成本代价。

永磁式电涡流阻尼机构使用永磁体产生原磁场,不需要外部供能和励磁绕组,因此结构较为简单,具有相对体积小、质量轻等优点,更适宜在航天运载器领域使用。

混合励磁电涡流阻尼机构是由永磁体和电励磁共同产生原磁场^[21],可以看作是在永磁体的基础上叠加了可调节性能的电励磁部分,因此综合了永磁体和电励磁的优点,但同样需要外部功能,因此结构依然较永磁体更为复杂。

根据原磁场与导体之间相对运动形式的不同,电涡流阻尼机构可以分为直线电涡流阻尼机构、轴向电涡流阻尼机构和径向电涡流阻尼机构,其中直线式为原磁场与导体之间相对直线运动[图3(a)、(b)],轴向和径向式电涡流阻尼机构均为原磁场与导体之间相对转动。轴向和径向的区别主要为轴向形式是原磁场的磁力线沿轴向穿过导体盘[图3(c)],而径向形式为原磁场的磁力线沿径向穿过导体筒[图3(d)]。

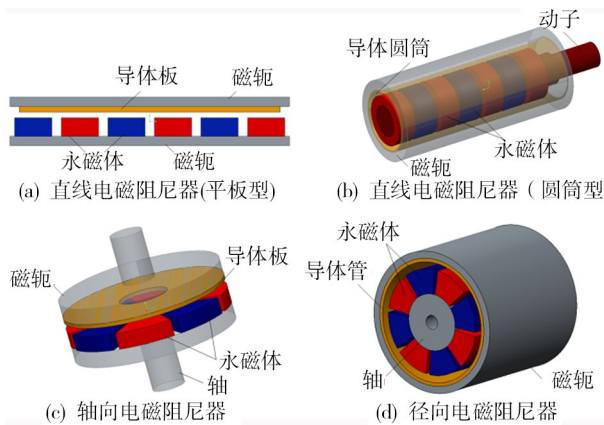


图3 电涡流阻尼机构形式

Fig. 3 Type of current eddy damper

1.3 电涡流阻尼生成的材料类型

永磁体电涡流阻尼机构的材料是影响其性能的一大主要因素,对永磁体、导体和磁轭的材料特性及其对阻尼特性的影响进行分析。

永磁体:永磁体电涡流阻尼机构的磁场完全由

永磁体提供,因此要获得较大的阻尼特性,对永磁体有着较高的要求。常用的永磁体主要分为铁氧体磁体、铝镍钴磁体、钕铁硼磁体、钐钴磁体等几大类。进入20世纪60年代后,稀土永磁体问世并得到快速发展,其中,第三代稀土永磁合金钕铁硼磁体是磁性最强的永磁体,即最大磁能积 $(BH)_{\max}$ 最高^[22]。同等体积下永磁体的磁性越强,能够产生的电涡流阻尼力越大,因此钕铁硼永磁体也是目前工业产业中应用最多的一类,在电涡流阻尼机构中应用也最多。

在实际的设计和生产过程中,电涡流阻尼装置除了关心永磁体的磁性,还需结合其工作环境影响。当温度升高并超过一定值后,材料的磁性会发生降低,温度恢复后剩磁将恢复,但可能发生不可逆的退磁,因此需要确保电涡流阻尼机构在使用的过程中不超过其永磁体的居里温度,保证使用过程中不发生退磁现象。此外永磁体在环境中如发生局部氧化也会造成退磁,因此也需采取表面涂层或其他方式降低环境对永磁体的影响,避免氧化造成永磁体性能下降。

导体:电涡流阻尼机构中的电涡流主要在导体中产生,导体的电导率直接影响了不同速度下涡流的大小,从而影响阻尼力。常用的导体材料一般是各类铜合金或铝合金。杨文斌等对比研究了两种不同厚度下,铝合金、T2紫铜、铜铁5、铜铁10、铜铁15、铜铁20、铜铁30和铜铁45八种导体材料的电涡流阻尼性能^[23]。在低速环境下紫铜能产生更大的阻尼力,但阻尼力随着速度的增大会很快下降;同等尺寸的铝合金则在低速下产生较小的阻尼力,但其阻尼力随速度下降的趋势比较缓慢,且下降点比较靠后。铜铁合金尤其是铜铁20在低速和高速下都具有相对较好的阻尼性能。

此外,实际工况中还需要考虑材料密度不同引起的结构质量问题。因此导体材料的选择往往是根据具体情况进行确定。近年来逐步推广的石墨烯、铜铁合金等新材料,其在电涡流阻尼中产生涡流的性能值得进一步研究。

磁轭:磁轭是减小磁路中磁阻的重要部件,一般由磁导率较高的钢材制成。常见的如各类低碳钢、合金钢等。在实际的使用过程中,其主要用于保证磁场强度和导磁性能,防止漏磁。

2 运载火箭阻尼机构需求

重复使用运载火箭因其重复使用、高发射频率等特点对运载火箭机构技术在可靠性、轻质化、适应性等方面的要求愈发提高。在运载火箭机构所能实现的功能之中,变形功能、减振缓冲功能等均对高性能的阻尼技术有着很强的需求。变形是指改变运载

火箭部分部件位置或形状的功能,需要在受到外部载荷作用的条件下可靠实现预定功能,并保证结构安全性。减振缓冲主要用于改善有效载荷、仪器设备的使用环境,保护其不被强外部冲击干扰、损坏。将运载火箭机构设计对阻尼机构的需求可归纳为四个方面:展开缓冲、抑振隔振、冲击缓冲、主动控制。

2.1 展开缓冲需求

航天展开机构如栅格翼/舵展开机构、太阳能帆板展开机构等一般以转动方式展开,可以使用扭簧、蜗卷弹簧、扭片弹簧等弹性元件作为动力源,也可以使用火工推冲器作为动力源。在展开机构的可展部件展开到位时,需对其进行到位锁定或限位,也会产生一定的到位冲击,如果冲击过大会对结构造成破坏或对电器设备等造成不利影响。为保证展开机构能够完成预定的展开功能,展开过程的驱动力矩一般留有一定裕度,这更提高了可展部件的到位角速度,加剧了到位冲击。因此,展开机构中需考虑包含展开阻尼机构设计,使得可展部件展开到位时对机构自身以及相邻的结构和设备的冲击降低到一定范围之内,使系统所产生的冲击扰动得到抑制或缓解,提高稳定性^[24]。

CZ-2F火箭的栅格翼展开由碟簧推冲机构提供展开的初始动能,驱动栅格翼展开的主动动力矩主要来自迎风来流产生的气动力矩,为保证栅格翼展开过程可控其使用了杆式液压阻尼机构提供阻尼力^[25]来降低展开速度和冲击,如图4所示。栅格翼的两侧各安装一个杆式液压阻尼机构,栅格翼展开过程中,阻尼机构随栅格翼展开而伸长,并为栅格翼提供阻尼力。

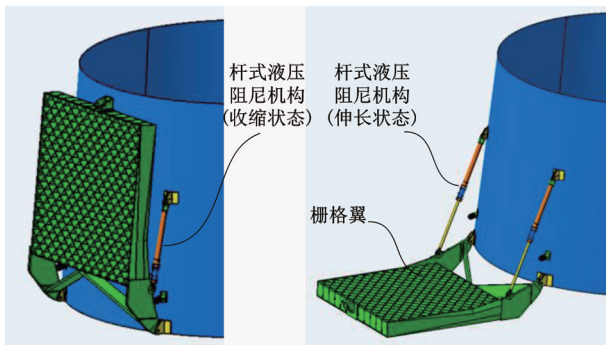


图4 CZ-2F火箭栅格翼展开机构

Fig. 4 Grid fin deployable mechanism of CZ-2F rocket

液压阻尼是一种黏滞液体阻尼,是一种速度型阻尼,其阻尼力随活塞的运动速度增加而增大,因此具有速度和载荷适应性,如图5所示。当载荷增大时,其阻尼力也相应增加,因此当火箭的四片栅格翼所受气动载荷不均的情况下,速度型阻尼机构能保证其展开同步性在可接受范围内。当火箭的栅格翼在宽幅变化的气动载荷下展开时,也能够通过速度

型阻尼的适应性将到位角速度和冲击控制在一定的范围内,保证栅格翼的可靠展开及结构安全性。

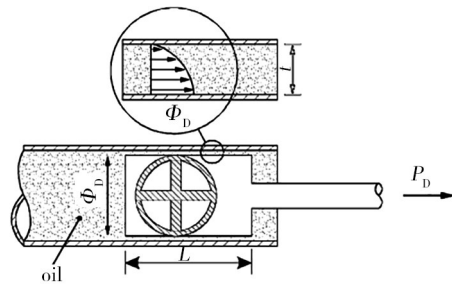


图5 液压阻尼机构^[26]

Fig. 5 Hydrodynamic damping mechanism^[26]

杆式液压阻尼机构能有效降低栅格翼的到位角速度及冲击,但其对栅格翼前方的来流容易造成一定的遮挡,并且由于其两端分别连接栅格翼与火箭壳体,栅格翼展开后无法再进行另一自由度方向的转动,因此难以应用于展开后可转动的栅格舵机构。文献[27]分析了一种带有摩擦片式旋转阻尼机构的栅格翼展开动力学过程,见图6,摩擦阻尼机构与栅格翼展开轴同轴安装,气动力形成的主动力矩随栅格翼展开角度增大而增大,因此阻尼力矩也需要随展开角度增大而增大。

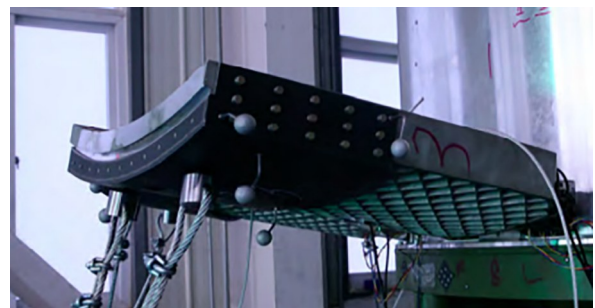


图6 栅格翼展开试验^[28]

Fig. 6 Test of grid fin deployment^[28]

摩擦阻尼机构具有结构简单、可维护性好等优点,但其阻尼特性属于位移型阻尼,阻尼的速度相关性较弱,因此需要令阻尼力在栅格翼展开过程中全程小于气动力下偏差值,以保证栅格翼能够可靠展开。当气动力较大,取上偏差值的条件下,不具备速度适应性的阻尼易造成栅格翼展开角速度过高,到位冲击较大。

2.2 抑振隔振需求

运载火箭最主要的功能就是将有效载荷发射至预定轨道,一般包括卫星、飞船、探测器、空间站等,这些高精度、高价值有效载荷越来越需要运载火箭为其提供良好的环境,因此对抑振隔振有较高需求。

文献[29]提出了一种在原主承力结构中并联阻尼元件的整星隔振方案,见图7。在支撑卫星的圆锥

台形蒙皮桁条结构过渡支架主结构中挖去部分蒙皮用于安装阻尼机构,阻尼机构两端通过铰链连接在上下中间框之间,多个阻尼机构对称安装。其采用的黏滞液体阻尼机构的阻尼力可表达为 $f=cv^\alpha$ 。 v 是阻尼机构活塞运动速度, c 是阻尼系数, α 为速度指数。仿真与试验结果表明,该设计可有效减小共振峰值,并在其他频率范围内保持传递率基本不变。

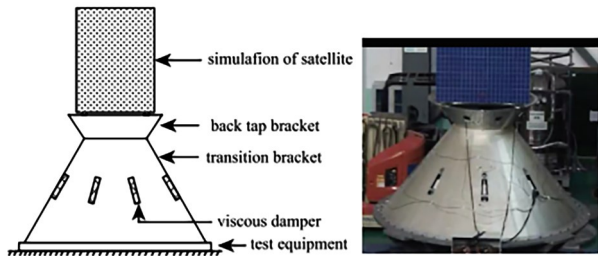


图7 并联阻尼元件的整星隔振方案^[29]

Fig. 7 The whole-spacecraft vibration isolation based on parallel load bearing and damping elements^[29]

2.3 冲击缓冲需求

重复使用航天运载器垂直着陆或水平着陆均需使用着陆缓冲机构降低着陆冲击,缓冲和吸收着陆能量。除部分着陆机构开展了摩擦制动缓冲设计^[30],现有的重复使用火箭和外星体着陆器一般采用蜂窝金属、泡沫金属以及材料的塑性变形等方式进行缓冲吸能。这类方法具有结构简单、质量轻、可靠性高等优点,但其性能不具备速度适应性,适应的着陆冲击速度及着陆质量范围较小,且均为一次性使用,如需重复使用需对吸能材料进行更换,耗时较长。采用其他类型的阻尼机构与蜂窝金属联合是提高着陆缓冲能力的有效方式。文献[31]采用了铝蜂窝+油液的联合阻尼机构设计,文献[32]采用了油气+蜂窝两级缓冲。

此外,如空间对接机构也需进行冲击缓冲。作为空间交会对接的关键技术之一^[33],空间交会对接机构是实现两个航天器捕获和刚性密封连接的主要技术途径,需具有捕获、锁紧、密封、分离功能。两个航天器的对接过程中,相对靠近的两个航天器存在相对运动速度,需要阻尼机构对捕获后的冲击进行缓冲。

2.4 主动控制

大部分的阻尼机构采用了被动式阻尼方案,能够减少对外部供能的需求,而主动式的阻尼机构能够对阻尼特性进行调节,或进行主动控制。文献[34]使用了压电元件粘贴在可展天线表面,并应用半主动振动控制方法控制压电元件对展开天线实现振动控制。文献[35]采用磁流变阻尼机构作为半主动控制元件设计了整星隔振平台,建立了阻尼机构

的非参数化力学模型用于识别阻尼机构阻尼特性和设计控制系统。文献[36]采用磁致伸缩材料与被动隔振装置并联,设计了主被动联合隔振装置。通过仿真分析验证了该方法在低于、接近和高于谐振频率这三类扰动下的隔振效果。

3 运载火箭电涡流阻尼机构应用分析

基于电涡流阻尼技术所具有的非接触、无摩擦、无工作介质、高可靠、维护性好等优点,其在航天领域具有广泛的应用前景^[37]。

3.1 展开缓冲应用分析

电涡流阻尼机构具备速度适应性、转动范围大、无漏液的优势使其适合在航天展开机构中应用,目前已应用于多型号的航天任务中。例如太阳翼展开到位的到位冲击会对飞行器姿态及结构安全造成不利影响,在太阳翼关节转轴处安装阻尼机构能够有效降低冲击载荷^[38]。对于文献[27]中的栅格翼展开阻尼机构设计要求,可以在栅格翼展开转轴部位设计电涡流阻尼机构,如图8所示。电涡流阻尼机构的速度适应性可以产生随角速度增大而增加的阻尼力矩,随着栅格翼展开角度的增加,气动力形成的主动力矩随栅格翼展开角度增大而增大,会使栅格翼展开角速度增大,而电涡流阻尼机构产生的阻尼力矩也相应增大,保证了栅格翼展开过程的平稳可控,也能够保证多个栅格翼同时展开过程的同步性。

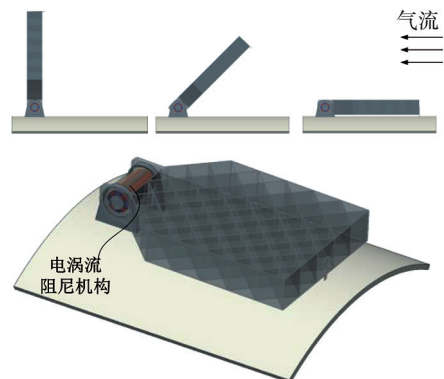


图8 电涡流阻尼机构应用于栅格翼展开

Fig. 8 Application of eddy current damping mechanism in grid wing deployment

面向垂直起降的重复使用火箭着陆缓冲机构,需具备飞行前收拢、着陆前展开以及着陆时缓冲吸能与有效支撑的多项功能,见图9。着陆机构需面临展开到位冲击和箭体着陆冲击的多向高冲击载荷环境。展开到位时面临的高冲击,可以通过增设展开阻尼机构降低展开角速度的方式降低其冲击。

如图10所示,文献[39]提出了一种拉索式旋转电涡流阻尼机构,该阻尼机构由阻尼单元、惯容单元以及弹簧单元组成,其中阻尼单元为电涡流阻尼。

拉索缠绕在转轴上,拉索的拉伸能够带动转轴转动,从而将拉索的线位移转化为转轴的转动。

拉索式旋转电涡流阻尼机构可应用于重复使用火箭腿式着陆机构的展开缓冲,如图11所示。在着陆机构与火箭箭体之间设计拉索,拉索的一端与着陆机构主腿端部固连,另一端绕轴缠绕于旋转电涡流阻尼机构的转轴上,当着陆机构展开,着陆腿会带动拉索运动,进而带动转轴转动,使得旋转电涡流阻尼机构产生阻尼力矩,降低着陆机构展开角速度。因着陆机构梢部在展开过程中的线位移行程较长,能够通过拉索充分转化为旋转式电涡流阻尼机构转轴的多圈转动,充分发挥电涡流阻尼机构的转动行程优势。



图9 着陆缓冲机构样机^[4]

Fig. 9 The prototype of landing buffer mechanism^[4]

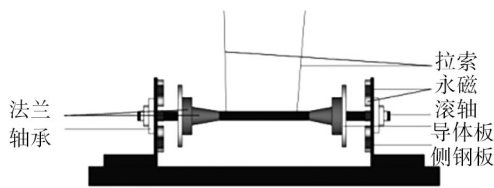


图10 拉索式旋转电涡流阻尼机构^[39]

Fig. 10 Rotational eddy current damper mechanism with cable bracing^[39]

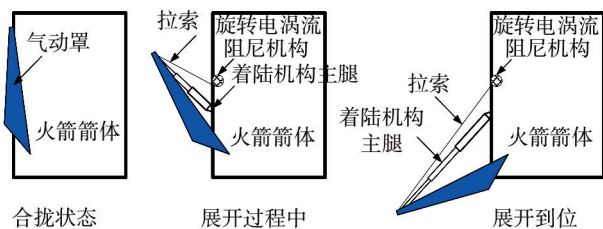


图11 应用拉索式旋转电涡流阻尼机构的着陆机构示意图

Fig. 11 Schematic diagram of landing mechanism using rotational eddy current dampign mechanism with cable bracing

重复使用运载火箭的回收除了采用箭上的着陆缓冲机构,还可采用箭上挂索机构配合地面回收系统的方式。地面回收系统的设计类似于航空母舰舰载机拦阻系统,利用钢索系统实现对火箭的捕获,再通过缓冲装置吸收火箭的动能。与地面回收系统相配合,火箭

的级间段结构外部也需要设计相应的挂索机构用于在火箭回收末段挂住钢索实现火箭的捕获,见图12。挂索机构可以认为是安装在火箭级间段外壁的可绕轴转动的拦阻杆,为降低拦阻杆挂索后向箭体内侧转动的角速度和冲击,需要设计阻尼机构提供刚度和阻尼,可使用电涡流阻尼机构提供该阻尼力。

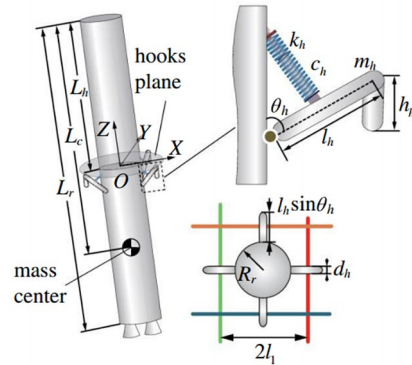


图12 火箭级间段和挂索机构^[40]

Fig. 12 The interstage segment and hooks mechanism of rocket^[40]

3.2 抑振隔振应用分析

并联式整星隔振方案中也可采用永磁体电涡流阻尼机构作为阻尼元件,可使用电涡流轴向阻尼机构(滚珠丝杠式电涡流阻尼机构,BS-ECD)^[41-42],见图13,其两端同样通过铰链连接。该种类型的电涡流轴向阻尼机构是将电涡流阻尼单元与滚珠丝杠副相结合,阻尼机构两端连接的结构发生相对运动时,丝杠的轴向运动会驱动螺母旋转,螺母带动旋转外杯和导体圆筒旋转,导体圆筒在转动过程中切割永磁体产生的原磁场磁力线从而产生电涡流阻尼力矩。将轴向运动通过丝杠螺母转化为导体圆筒的转动,其电涡流阻尼力矩产生形式是一种径向电涡流阻尼发生形式。滚珠丝杠副对结构输入的轴向速度具有显著的放大作用,使其耗能密度能够达到黏滞液体阻尼机构水平。

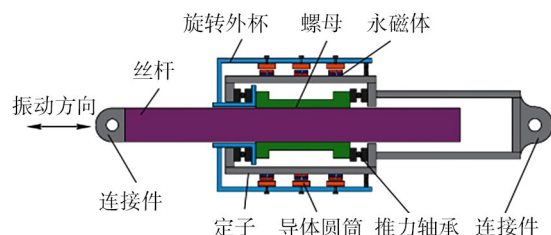


图13 滚珠丝杠式电涡流阻尼机构结构示意图^[44]

Fig. 13 Schematic of the BS-ECD^[44]

文献[43]提出了另一种基于滚珠丝杠传动的非线性阻尼机构(图14),滚珠螺母套装于丝杠,惯性飞轮套装于丝杠并和滚珠螺母固定为一体并随滚珠螺母同步旋转。轴向旋转式电涡流阻尼元件包括固定于滚珠螺母两端的上下导磁钢板、固定在导磁钢板

表面的矩形永磁体组和置于导磁钢板之间的导体铜板。与黏滞液体阻尼机构相比,电涡流阻尼机构对结构施加的控制力较小,为放大其耗能密度,可以把轴向电涡流阻尼机构与滚珠丝杠元件结合制成滚珠丝杠式轴向电涡流阻尼机构,也可采用齿轮齿条和电涡流阻尼技术结合成为齿轮齿条式电涡流阻尼机构^[45],通过齿条-齿轮的传动和齿轮组的传动配合将运动行程放大,提高耗能密度,如图15所示。

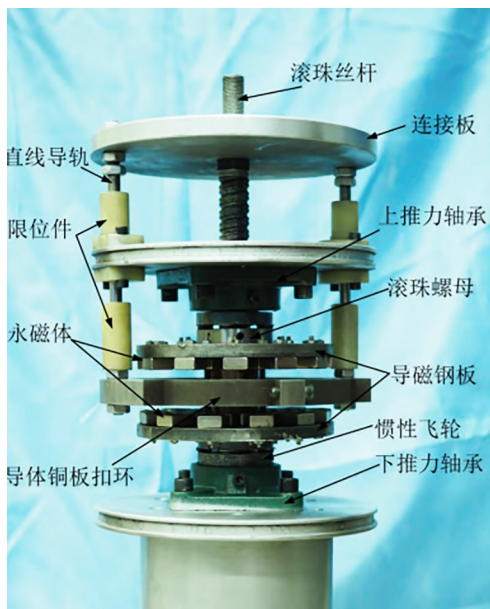


图14 滚珠丝杠式电涡流阻尼机构结构示意图
Fig. 14 Schematic of the BS-ECD

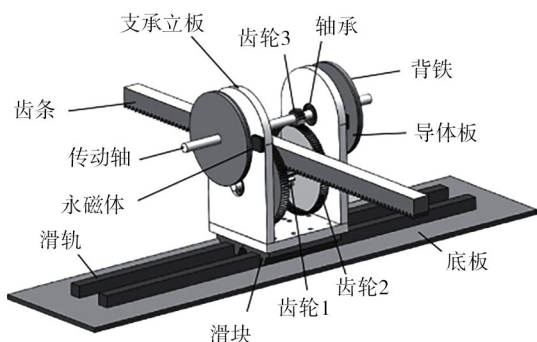


图15 齿轮齿条式电涡流阻尼机构结构示意图
Fig. 15 Schematic diagram of gear-rack type eddy current damping mechanism structure

文献[46]设计了一种轴向电涡流阻尼机构也可应用于火箭和卫星结构振动的抑制,见图16。当电涡流板(导体板)沿轴向运动时,其内部磁通发生变化,在导体板内形成电涡流,从而产生阻尼力。该种电涡流阻尼机构结构简单,但行程较小。原理实验表明,其阻尼系数受外载激励幅值、频率影响较大,高频激励过程中阻尼系数存在急剧减小现象。

增加阻尼也是减小转子系统振动的有效方法之一,可使用接触式弹性阻尼支承和非接触式电磁阻尼来实现。文献[47]介绍了为航天飞机主发动机宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2024年 第2期

(SSME)低温涡轮泵的转子系统研制的分块盘型永磁电涡流阻尼机构,取得了良好的减振效果。

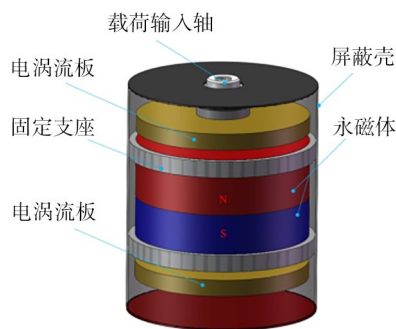


图16 双涡流板阻尼机构结构示意图
Fig. 16 Schematic diagram of dual conductive plate damping mechanism structure

文献[48]对比了用于隔振的四种不同构型电涡流阻尼机构的最大磁场强度、阻尼系数和质量代价,表明采用双排永磁体排列的构型方案能够使得阻尼系数质量比最优,并分析了永磁体高度、永磁体宽度、气隙宽度等关键参数与阻尼系数之间的变化规律。

对于轻质、薄壁、大长细比的运载火箭关键零部件,也可以使用电涡流阻尼机构进行减振设计。该类设计可参考电涡流阻尼技术在航空航天大型结构件的精密装配中的应用。薄壁零件^[49]、大长径比刀具^[50]等刚度较低的零件在数控加工中的变形、让刀等现象对加工质量影响严重,电涡流阻尼技术可用于弱刚性结构件数控加工过程的振动抑制^[51]。例如大飞机垂尾装配过程中,由于钛合金大型结构件的结构刚度低,加工时产生的振动等现象会影响其加工质量。文献[52]使用电涡流阻尼机构用于抑制加工中的多模态振动(图17),研究了不同磁极厚度、导体厚度和磁极数等对阻尼机构阻尼特性的影响,建立了装配界面的动力学模型,并对阻尼机构的抑振性能进行了验证。测试结果表明电涡流阻尼机构的应用明显提高了装配界面抑振系统的阻尼比和等效刚度,能够大幅衰减装配界面在冲击激励下产生的自由振动,提升装配界面精加工过程的稳定性。

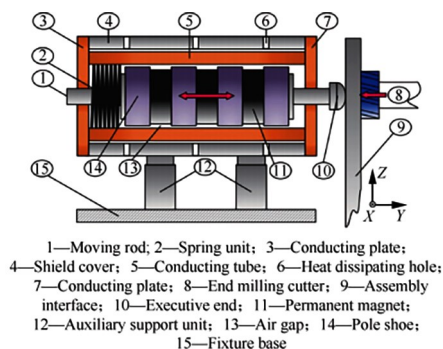


图17 用于飞机大型结构件装配的直线式电涡流阻尼机构
Fig. 17 A linear eddy current damping mechanism used for assembly of large aircraft structures

对于水平起降的重复使用运载器,前起落架在起飞和着陆滑行阶段,可能会出现一种偏离其中心位置的剧烈振动,称为摆振,一般采用安装油液式减摆器的方法解决起落架摆振问题。文献[53]对电涡流阻尼机构在全电起落架减摆方面的应用开展研究,设计了含电涡流阻尼机构的全电起落架前轮转弯机构,仿真结果表明在电涡流阻尼力矩作用下摆振是稳定的,达到预期的减摆效果。

3.3 冲击缓冲应用分析

针对重复使用火箭着陆缓冲需求,将可承受冲击载荷的电涡流阻尼机构应用于重复使用火箭着陆缓冲机构,能够提供一种可重复使用、免维护的高效缓冲单元。如文献[14]中提出的永磁电涡流机构,用于火炮反后坐装置的制退机设计,见图18,该原理的电涡流机构也可应用于重复使用火箭的着陆缓冲机构,替代铝蜂窝等一次性缓冲方案,可以不用每次回收后更换铝蜂窝单元,提高了重复使用性,增加了再次发射的便利性,在冲击制动领域具有重要应用价值^[54]。

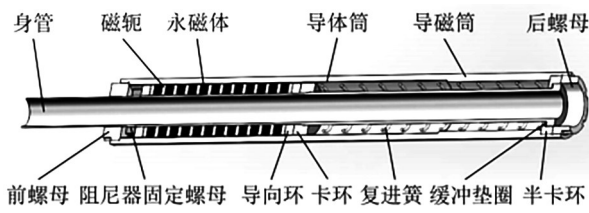


图18 承受冲击载荷的直线式电涡流阻尼机构
Fig. 18 Linear eddy current damping mechanism of withstanding impact loads

在目前各国在轨应用的硬碰撞式对接机构(图19)中,两航天器在空间进行碰撞接触时撞击能量较大。碰撞能量通过差动式传动系统分解到不同的缓冲部件,电涡流阻尼机构是其中关键的阻尼缓冲单元^[55],见图20。未来航天器推进剂在轨加注、上面级组合式应用等均需进行空间对接,对阻尼机构的需求也进一步提高。

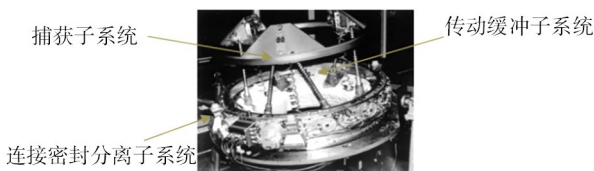


图19 对接机构组成^[56]
Fig. 19 Composition of docking institutions^[56]

3.4 主动控制应用分析

电励磁电涡流阻尼机构能够通过调节励磁电流来调节阻尼性能,从而进行主动控制。文献[57]提出了一种用于着陆器缓冲的电磁缓冲器,具有阻尼特性可调可控的优点,见图21。该电磁缓冲器由内、外双层筒体及位于双层筒体之中的电磁组件等构

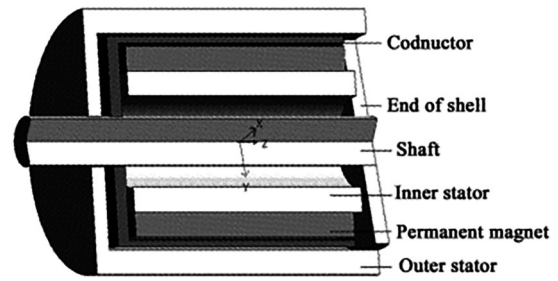


图20 用于对接机构的电涡流阻尼机构

Fig. 20 Eddy current damping mechanism for docking mechanism

成。内筒内部有一线圈载体,在其上下两部分均设有励磁线圈,在外筒内部的空腔内设置感应线圈。缓冲过程中,使用电容组件给励磁线圈供电,通过改变接入能耗电路中的电阻大小,可实现柔顺落震所需缓冲力的被动可控。

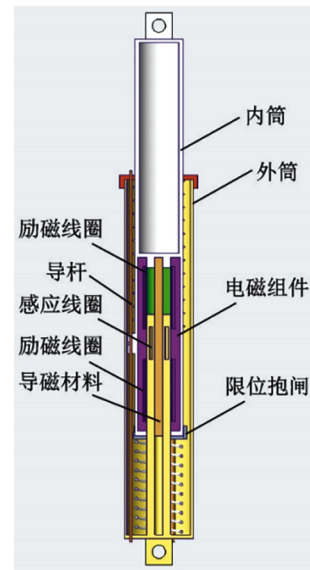


图21 具备主动控制能力的电涡流阻尼机构

Fig. 21 Eddy current damping mechanism with active control capability

4 结语

运载火箭在展开缓冲、抑振隔振、冲击缓冲、主动控制等方面,对阻尼机构都有着广泛的需求。电涡流阻尼机构技术以其性能稳定、速度适应性强、维护性好等优点具有广泛的应用前景。

(1)对展开过程主动力宽幅变化,且对展开同步性有要求的展开缓冲需求,阻尼机构需具有速度适应性,其阻尼力可随着运动速度的增大相应增加,适应变化的外部载荷,电涡流阻尼机构的速度适应性适合作为展开缓冲的阻尼机构。为提高电涡流阻尼机构的耗能密度,可以将电涡流阻尼机构与齿轮组等其他传动机构相结合,通过其他传动机构将运动行程以及运动速度放大,进而提高耗能密度。

(2)对于需要长期贮存或长期在轨、长期工作的

阻尼机构,电涡流阻尼机构具有非接触、无磨损、无漏液、性能稳定的优势,能够避免漏液等风险。对此类特点的机构需求可优先考虑使用电涡流阻尼机构。

(3)对于重复使用火箭着陆缓冲机构需求,铝蜂窝等不具备速度适应性,一次性使用后需对吸能材料进行更换,耗时较长。为适应未来航班化航天运输系统建设,宜发展具有可重复使用能力强、可靠性高、维护性好的阻尼机构。

(4)具备主动控制能力的阻尼机构是未来发展的重要方向之一,包括采取阻尼特性可调方式的半主动阻尼机构,但目前的发展尚不成熟,应用较被动式阻尼机构要少,可继续开展电励磁电涡流阻尼机构等主动控制阻尼机构的工程化研究。

(5)电涡流阻尼机构的永磁体材料不断发展,磁能积不断提高,能够提高电涡流阻尼机构的性能。但在航天工程应用中,应更加注意其使用温度和稳定性。需设计有效散热方式,通过更精确的仿真分析和试验研究,确定外部热环境和自身工作发热对电涡流阻尼机构性能的影响,避免温度升高造成的磁性降低,甚至不可逆的退磁。开展长期贮存条件下永磁体性能变化研究,确保在服役周期内电涡流阻尼机构性能的稳定。

参考文献

[1] 李东,李平岐.中国航天运输系统发展及未来趋势展望[J].前瞻科技,2022,1(1):51-61.

LI D,LI P Q. Development and future trend of china's space transportation system[J]. Science and Technology Foresight,2022,1(1):51-61.

[2] 包为民,汪小卫.航班化航天运输系统发展展望[J].宇航总体技术,2021,5(3):1-6.

BAO W M,WANG X W. Prospect of airline-flight-mode aerospace transportation system [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2021,5(3):1-6.

[3] 王国辉,曾杜娟,刘观日,等.中国下一代运载火箭结构技术发展方向与关键技术分析[J].宇航总体技术,2021,5(5):1-11.

WANG G H,ZENG D J,LIU G R, et al. Development direction and key technology analysis for china's next generation launch vehicle structure [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2021,5(5):1-11.

[4] 张宏剑,于兵,吴会强,等.运载火箭机构技术发展研究[J].导弹与航天运载技术(中英文),2023(6):1-9.

ZHANG H J,YU B,WU H Q, et al. Research on technology development of launch vehicle mechanism[J]. Missiles and Space Vehicles, 2023(6): 1-9.

[5] 张智.CZ-2F火箭逃逸系统[J].导弹与航天运载技术,2004(1):20-27.

ZHANG Z. Launch escape system of LM-2F launch vehicle [J]. Missiles and Space Vehicles,2004(1):20-27.

[6] MALY J R, PENDLETON S C, SALMANOFF J, et al.

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2024年 第2期

Hubble space telescope solar damper[C]//Proceedings of the 6th SPIE International Symposium on Smart Structures and Materials, Newport Beach, CA, 1999.

[7] 蒲华燕,何文元,孙翊,等.基于频变阻尼特性的四参数隔振系统建模与参数分析[J].振动与冲击,2021,40(24):8.

PU H Y,HE W Y,SUN Y, et al. Modeling and parameter analysis of a four-paramater isolation system based on frequency dependent damping characteristics[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(24):8.

[8] 余慕春,赵鹏,牛智玲,等.胶质阻尼隔振器的力学模型及隔振性能研究[J].工程力学,2020,37(12):8.

YU M C,ZHAO P,NIU Z L, et al. The mechanical model and vibration isolation properties of colloidal dampers[J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(12):8.

[9] 徐青华,刘立平.航天器展开机构阻尼机构技术概述[J].航天器环境工程,2007,24(4):239-243.

XU Q H,LIU L P. Techniques of dampers for spacecraft deployment mechanism[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2007,24(4):239-243.

[10] 宋伟宁,徐斌.上海中心大厦新型阻尼机构效能与安全研究[J].建筑结构,2016,46(1):8.

SONG W N, XU B. Research on performance and safety of innovated damper for Shanghai Tower[J]. Building Structure, 2016, 46(1):8.

[11] 练继建,赵悦,练冲,等.基于电涡流-调谐质量阻尼机构的上海风电筒型基础结构减振研究[J].振动与冲击,2019,38(19):20-25.

LIAN J J,ZHAO Y,LIAN C, et al. Vibration reduction of offshore wind turbine tube infrastructure based on EC-TMD[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(19):20-25.

[12] 梁龙腾,封周权,陈政清,等.大跨度悬索桥加劲梁纵向运动特性及其电涡流阻尼控制研究[J].地震工程与工程振动,2020,40(4):118-127.

LIANG L T,FENG Z Q,CHEN Z Q, et al. Longitudinal movement characteristics of long span suspension bridge girder and its control based on eddy current dampers [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2020,40(4):118-127.

[13] 李子轩,杨国来,孙全兆,等.强冲击载荷下永磁式电涡流阻尼机构阻力特性及优化研究[J].兵工学报,2018,39(4):8.

LI Z X,YANG G L,SHUN Q Z, et al. Optimization and resistance characteristics of permanent magnet eddy current damper under intensive impact load[J]. Acta Armamentarii, 2018,39(4):8.

[14] 沈艳萍,刘宁,谢子豪.永磁式电涡流制退机磁路仿真及优化研究[J].振动与冲击,2022,41(6):8-14.

SHEN Y P,LIU N,XIE Z H. Magnetic circuit simulation and optimization of a permanent magnet eddy current recoil brake[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(6):8-14.

[15] 王大伟,许金鑫,刘永猛,等.能量天平精密无固有力低漏磁电磁阻尼机构的设计与应用[J].机械工程学报,2020,58(4):269-276.

WANG D W,XU J X,LIU Y M, et al. Design and application of no inherent force and low magnetic leakage precision damper for joule balance[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 58(4): 269-276.

[16] 宋征宇,黄兵,汪小卫,等.重复使用航天运载器的发展及其关键技术[J].前瞻科技,2022,1(1):62-74.

SONG Z Y, HUANG B, WANG X W, et al. Development and key technologies of reusable launch vehicle [J]. Science and Technology Foresight, 2022, 1(1): 62-74.

[17] HUANG Z W, HUA X G, CHEN Z Q, et al. Modeling, testing and validation of an eddy current damper for structural vibration control[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2018, 31(5): 04018063.

[18] LUBIN T, REZZOUG A. Steady-state and transient performance of axial-field eddy-current coupling [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(4): 2287-2296.

[19] 侯光泽, 刘景林, 付朝阳. 电磁阻尼器的气隙磁场及阻尼力矩的高精度分析[J]. 西北工业大学学报, 2012, 30(6): 946-951.

HOU G Z, LIU J L, FU Z Y. High precision analysis of magnetic field distribution and damping torque for electromagnetic damper[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2012, 30(6): 946-951.

[20] SHARIF S, FAIZ J, SHARIF K. Performance analysis of a cylindrical eddy current brake [J]. IET Electric Power Applications, 2012, 6(9): 661-668

[21] 寇宝泉, 金银锡, 张赫, 等. 混合励磁直线电磁阻尼机构的特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(24): 143-151.

KOU B Q, JIN Y X, ZHANG H, et al. Characteristic analysis of hybrid excitation linear electromagnetic dampers[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(24): 143-151.

[22] 李卫, 朱明刚. 高性能金属永磁材料的探索和研究进展[J]. 中国材料进展, 2009, 28(9/10): 62-73.

LI W, ZHU M G. Research process of high performance metallic permanent magnetic materials[J]. Materials China, 2009, 28(9/10): 62-73.

[23] YANG W B, ZHANG H Y, CHEN Z Q, et al. Study on enhanced performance of CuFe alloy's eddy current damping and its advantages in multi-mode vibration control of stay-cable [J]. Engineering Structures, 2024, 299: 1-17.

[24] 马兴瑞, 于登云, 孙京, 等. 空间飞行器展开与驱动机构研究进展[J]. 宇航学报, 2006, 27(6): 1123-1131.

MA X R, YU D Y, SUN J, et al. The researching evolvement of spacecraft deployment and driving mechanism [J]. Journal of Astronautics, 2006, 27(6): 1123-1131.

[25] 石玉红, 肖耘, 徐卫秀. CZ-2F 逃逸飞行器最大速度头模拟飞行试验技术[J]. 宇航学报, 2004, 25(5): 484-487.

SHI Y H, XIAO Y, XU W X. The technology of CZ-2F escape vehicle maximum velocity head simulated flight test [J]. Journal of Astronautics, 2004, 25(5): 484-487.

[26] RITTWEGGER A, ALBUS J, HORNING E, et al. Passive damping devices for aerospace structures[J]. Acta Astronautica, 50(10): 597-608

[27] 林三春, 阎军, 潘旭, 等. 无阻尼杆式栅格翼展开动力学特性分析方法[J]. 导弹与航天运载技术, 2018(5): 16-20

LIN S C, YAN J, PAN X, et al. Analysis method of unfolding dynamic characteristics of non-damping rod type grid fins [J]. Missile and Space Vehicle, 2018(5): 16-20.

[28] 林三春, 付继伟, 阎君, 等. 无阻尼杆式栅格翼展开冲击影响因素研究[J]. 强度与环境, 2017, 44(5): 52-57.

LIN S C, FU J W, YAN J, et al. Study on influence factors of unfolding impact of non-damping rod grid fins[J]. Structure and Environment Engineering, 2017, 44(5): 52-57.

[29] 潘忠文, 邢建伟, 王樞, 等. 并联式承载减振一体的整星隔振研究[J]. 力学学报, 2019, 51(2): 364-370.

PAN Z W, XING J W, WANG L, et al. Research on whole-spacecraft vibration isolation based on parallel loadbearing and damping system [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2019, 51(2): 364-370.

[30] 贾山, 赵建华, 胡汝洁, 等. 可复用小型月表着陆器设计优化及仿真分析[J]. 宇航学报, 2022, 43(3): 356-365.

JIA S, ZHAO J H, HU R J, et al. Design optimization and simulation of reusable small lunar lander [J]. Journal of Astronautics, 2022, 43(3): 356-365.

[31] 岳帅, 聂宏, 张明, 等. 一种用于垂直降落重复使用运载器的缓冲器性能分析[J]. 宇航学报, 2016, 37(6): 646-656.

YUE S, NIE H, ZHANG M, et al. Analysis on performance of a damper used for vertical landing reusable launch vehicle [J]. Journal of Astronautics, 2016, 37(6): 646-656.

[32] 雷波, 张明, 岳帅. 可重复使用运载器的耐坠毁缓冲装置的设计优化[J]. 宇航学报, 2019, 40(9): 996-1005.

LEI B, ZHANG M, YUE S. Design and optimization of a crashworthy damper used for reused launch vehicle [J]. Journal of Astronautics, 2019, 40(9): 996-1005.

[33] 周建平. 载人航天交会对接技术[J]. 载人航天, 2011(2): 1-8.

ZHOU J P. Rendezvous and docking technology of manned space flight [J]. Manned Spaceflight, 2011(2): 1-8.

[34] 王晓宇, 王浩威, 闫雪梅, 等. 空间柔性天线展开臂的半主动振动控制研究[J]. 机械工程学报, 2020, 56(5): 116-122.

WANG X Y, WANG H W, YAN X M E, et al. Semi-active vibration suppression of space flexible antenna arm [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(5): 116-122.

[35] 王樞, 潘忠文, 王旭, 等. 整星隔振用磁流变阻尼机构神经网络模型[J]. 力学与实践, 2017, 39(6): 579-584.

WANG L, PAN Z W, WANG X, et al. Neural network model of magnetorheological damper for vibration isolation platform of whole-spacecraft [J]. Mechanics in Engineering, 2017, 39(6): 579-584

[36] 牛牧青, 杨斌堂, 杨诣坤, 等. 磁致伸缩主被动隔振装置中的磁耦合效应研[J]. 力学学报, 2019, 51(2): 324-332.

NIU M Q, YANG B T, YANG Y K, et al. Research on the magneto-mechanical effect in active and passive magnetostrictive vibration isolator [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2019, 51(2): 324-332

[37] SODANO H, BAE J Eddy current damping in structures [J]. Shock and Vibration Digest, 2004, 36(6): 469.

[38] 梁小光, 丁竹生, 焦映厚, 等. 卫星太阳翼阻尼机构参数选定方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(7): 71-75.

LIANG X G, DING Z S, JIAO Y H, et al. Selecting method of damper parameters for solar array of satellite [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, 43(7): 71-75.

[39] 班鑫磊, 谢丽宇, 薛松涛, 等. 拉索式旋转电涡流阻尼器的理论模型及频域响应分析[J]. 地震工程学报, 2018, 40(5): 941-945.

BAN X L, XIE L Y, XUE S T, et al. Theoretical model and analysis of the frequency response of a rotational eddy current damper with cable bracing [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(5): 941-945.

- [40] ZHANG H, ZHAO Z H, REN G X, et al. Arresting-cable system for robust terminal landing of reusable rockets[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2021, 58(2):425-443.
- [41] 陈政清, 华旭刚, 牛华伟, 等. 永磁电涡流阻尼新技术及其在土木工程中的应用[J]. *中国公路学报*, 2020, 33(11):18.
- CHEN Z Q, HUA X G, NIU H W, et al. Technology innovations in eddy current damping and its application in civil engineering[J]. *China J. Highw. Transp.*, 2020, 33(11):18
- [42] ZHANG H Y, CHEN Z Q, HUA X G, et al. Design and dynamic characterization of a large-scale eddy current damper with enhanced performance for vibration control[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 145:106879.
- [43] 汪志昊, 田文文, 王浩, 等. 非线性电涡流惯质阻尼器力学性能仿真与试验[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2019, 51(6):171-184.
- WANG Z H, TIAN W W, WANG H, et al. Numerical simulation and experimental study on mechanical properties of a nonlinear eddy-current inertial mass damper[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2019, 51(6):171-184.
- [44] 肖潇, 黄智文, 陈政清, 等. 新型电涡流轴向阻尼机构的阻尼特性及减振性能分析[J]. *土木工程学报*, 2021, 54(12):10.
- XIAO X, HUANG Z W, CHEN Z Q, et al. Damping characteristics and control performance of a novel axial eddy current damper[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2021, 54(12):10.
- [45] 李亚峰, 李寿英, 王健钟, 等. 齿轮齿条式电涡流阻尼器的力学性能研究[J]. *土木工程学报*, 2020, 53(3):44-50.
- LI Y F, LI S Y, WANG J Z, et al. Study on mechanical properties of eddy current damping-rack and gear damper[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2020, 53(3):44-50.
- [46] 肖登红, 潘强, 何田. 一种新型电涡流阻尼机构及阻尼性能研究[J]. *噪声与振动控制*, 2014, 34(6):5.
- XIAO D H, PAN Q, HE T. Design and analysis of a novel eddy current damper[J]. *Noise and Vibration Control*, 2014, 34(6):5.
- [47] GUNTER E J, HUMPHRIS R R, SEVERSON S J. Design study of magnetic eddy-current vibration suppression dampers for application to cryogenic turbomachinery[R]. NASA, 1983, CR-173273:1-6.
- [48] 王昊, 游进, 张志成. 电涡流阻尼器构型比较与阻尼特性研究[J]. *载人航天*, 2017, 23(2):197-201.
- WANG H, YOU J, ZHANG Z C. Damper Characteristic analysis and different configurations comparisons of eddy current damper[J]. *Manned Spaceflight*, 2017, 23(2):197-201.
- [49] 程明迪, 郭家杰, 李卓, 等. 基于电涡流阻尼的薄壁盘加工振动抑制[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(17):76-84.
- CHENG M D, GUO J J, LI Z, et al. Vibration suppression for thin-wall plate machining using eddy current damping[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(17):76-84.
- [50] 王民, 刘保钟, 秦鹏, 等. 多层堆叠式永磁动力减振刀杆设计与仿真分析[J]. *振动与冲击*, 2022, 41(3):8-17.
- WANG M, LIU B Z, QIN P, et al. Design and simulation analysis for multilayer stacked permanent magnet dynamic vibration absorber cutter bar[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2022, 41(3):8-17.
- [51] 杨毅青, 徐东东. 基于电涡流阻尼器的数控加工振动抑制[J]. *振动与冲击*, 2016, 35(4):177-181.
- YANG Y Q, XU D D. Vibration suppression of NC machining based on eddy current dampers[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(4):177-181.
- [52] 樊伟, 郑联语, 赵雄, 等. 基于新型电涡流阻尼器的大飞机垂尾装配界面精加工振动抑制[J]. *航空学报*, 2019, 40(9):422859.
- FAN W, ZHENG L Y, ZHAO X, et al. Vibration attenuation for finishing assembly interfaces of vertical tail section of large aircraft based on novel eddy current damper [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica*, 2019, 40(9):422859.
- [53] 夏昊天, 张明, 肖杰, 等. 基于电磁阻尼器的全电起落架减摆性能研究[J]. *机械设计与制造工程*, 2017, 46(2):22-26.
- XIA H T, ZHANG M, XIAO J, et al. Analysis of shimmy performance of all-electric landing gear based on electromagnetic damper[J]. *Machine Design and Manufacturing Engineering*, 2017, 46(2):22-26.
- [54] 王楠楠, 刘宁, 沈艳萍, 等. 冲击载荷下圆筒型电涡流阻尼机构动力特性研究[J]. *振动与冲击*, 2021, 40(11):65-69.
- WANG N N, LIU N, SHEN Y P, et al. Dynamic characteristic of cylindrical eddy current damper under impact load[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(11):65-69.
- [55] LUO L, YANG F F, WANG Y, et al. Finite element analysis and test of damping torque of eddy current damper for docking mechanism[J]. *Journal of Astronautics*, 2011, 32(5):1026-1034.
- [56] 张崇峰, 柏合民. 飞船空间对接机构技术[J]. *中国科学:技术科学*, 2014, 44(1):20-26.
- ZHANG C F, BAI H M. Space docking mechanism technology of spacecraft[J]. *Sci. Sin. Tech.*, 2014, 44(1):20-26.
- [57] 贾山, 高翔宇, 陈金宝, 等. 面向星表柔顺着陆的阻尼力可控电磁缓冲器设计[J]. *南京航空航天大学学报*, 2021, 53(1):44-52.
- JIA S, GAO X Y, CHEN J B, et al. Design of electromagnetic buffer with controllable damping force for star-catalog compliant landing [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2021, 53(1):44-52.