

航天器展开机构阻尼器技术概述

徐青华, 刘立平

(北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094)

摘要: 航天器上的一些展开机构采用了弹性元件为动力源。当其展开到位时, 通常会对与之相连的部件产生冲击。加装阻尼器是抑制这种冲击的有效措施之一。文章介绍了航天器展开机构常用转动型阻尼器的类型、工作原理及特点, 并对相关技术的发展和應用作了分析和评述, 提出了开展黏滞阻尼器研究的建议, 并指出了研究中应考虑的问题。

关键词: 阻尼器; 展开机构; 航天器

中图分类号: O328

文献标识码: A

文章编号: 1673-1379(2007)04-0239-05

1 引言

目前航天器上的许多一次性展开机构均采用弹性元件作为动力源, 以转动方式展开。如果不采取抑制措施, 在这些机构展开到位时, 不可避免地会对航天器产生一定的冲击。在某些情况下, 这种冲击还可能对相邻的结构和设备造成损害, 如卫星的太阳翼采用刚性太阳电池板, 而以扭簧作为展开动力源, 就可能发生这样的问题。为了保证整个展开过程满足必要的力矩裕度值, 给扭簧施加了较大的初始扭矩。太阳翼展开运动仿真分析结果表明, 如果不采取任何抑制措施, 太阳翼在展开终了时对太阳电池阵驱动机构产生的冲击载荷将超过其所能承受的最大极限值。为此, 在卫星太阳翼的根部转轴上安装了黏滞阻尼器, 使得太阳翼在展开终了时对驱动机构的冲击载荷降低到其可承受的范围之内。

根据耗能机理的不同, 可将阻尼器分为黏滞阻尼器、涡流阻尼器、黏弹性阻尼器、机械摩擦阻尼器、磁/电流变阻尼器、形状记忆合金阻尼器、压电摩擦阻尼器等。根据抑制冲击方式的不同, 又可以将大部分阻尼器分为被动式、半主动式两类。被动式阻尼器无需外部能源驱动, 依靠阻尼器自身随机构一起运动而产生阻尼力(矩), 具有很好的经济性和可靠性。半主动式阻尼器只需要少量的能量输入, 阻尼力(矩)由阻尼器自身随

机构一起运动而被动产生; 但阻尼器本身参数能够由外加能源主动调节, 从而改变阻尼力(矩)。

目前, 被动式阻尼器技术已经比较成熟, 并广泛应用于航天器展开机构中; 而半主动式阻尼器技术目前仍处于发展阶段。

2 被动式阻尼器

2.1 黏滞阻尼器

黏滞阻尼器是利用黏性液体阻尼材料的黏滞耗能作用将机构运动过程中的剩余动能耗散掉, 从而达到减缓冲击的目的。该类阻尼器一般由机架、叶轮、黏性液体、密封件等部分组成(见图1), 在叶轮与机架内壁间留有缝隙, 机架内装满黏性液体阻尼材料。当叶轮相对机架发生转动时, 由于叶轮两侧存在压力差, 使黏性液体阻尼材料从缝隙中通过, 从而产生阻尼力(矩), 达到减缓冲击的目的^[1]。

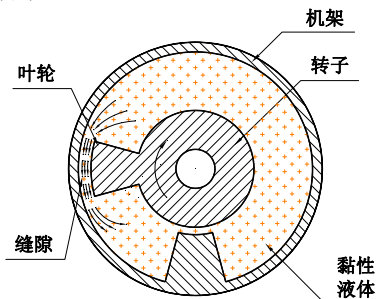


图1 黏滞阻尼器工作原理示意图
Fig.1 Sketch of a viscous damper in operation

收稿日期: 2007-03-09; 修回日期: 2007-07-09

作者简介: 徐青华(1982-), 女, 从事航天器机构设计与分析工作。联系电话: (010) 68746805。刘立平(1968-), 男, 研究员, 北京空间飞行器总体设计部机械工程技术研究室主任, 主要从事航天器结构与机构领域研究工作。联系电话(010) 68746831。

黏滞阻尼器耗能能力很强,只要有微小的位移就开始耗能。它是速度相关型阻尼器,阻尼力(矩)与叶轮转动速度之间近似呈线性关系。此外,黏滞阻尼器结构形式简单,成本较低。

黏滞阻尼器也存在一些缺点。首先,黏性液体阻尼材料需要在真空环境下密封在机架内,这不仅使加工成本提高,而且还要耗费大量的时间;其次,黏滞阻尼器在轨工作中存在着渗漏的危险,一旦阻尼液渗漏,就会蒸发并附着在航天器表面上,这将对星上仪器尤其是光学仪器产生损害;最后,阻尼特性与温度相关,为获得特定的阻尼特性,在空间使用时通常需要对阻尼器采取热控措施。

黏滞阻尼器已在许多型号的航天任务中成功应用,其典型应用实例见表1^[2]。

表1 黏滞阻尼器典型应用实例
Table 1 Applications of viscous dampers

序号	航天器名称	发射时间	应用部位
1	“托佩克斯-海神”卫星 (TOPEX-Poseidon)	1992年8月	高增益天线展开机构
2	“火星环球勘探者” (Mars Global Surveyor)	1996年11月	高增益天线展开机构
3	“月球勘探者” (Lunar Prospector)	1998年1月	悬臂展开机构
4	“地球观测一号”卫星 (Earth Observing 1)	2000年11月	太阳翼展开机构
5	“TIMED”探测器	2001年11月	太阳翼展开机构

2.2 涡流阻尼器

涡流阻尼器是利用电磁场的楞次定律工作的。这种阻尼器主要由永久磁体和导电材料组成(见图2),导电材料处于上下磁极相对产生的磁场中间。当导电材料旋转时,切割磁力线,其内产生涡流。涡流在磁场作用下产生与相对角速度成比例的阻尼力(矩)。

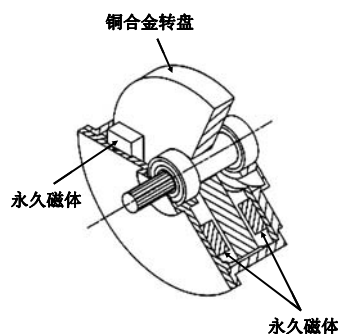


图2 某涡流阻尼器构造图
Fig.2 Structure of a certain eddy current damper

涡流阻尼器不存在液体渗漏的危险,对温度也不敏感。它提供与输入转速成线性关系的阻尼力(矩),正、反转均可连续运转360°,通过调节磁体与导体之间的间隙可以调节阻尼特性。然而涡流阻尼器存在着漏磁的可能,应用时应考虑电磁兼容问题。此外,涡流阻尼器结构重量大,成本高^[3]。

涡流阻尼器已经成功用于许多型号的航天任务中,其典型应用实例见表2。

表2 涡流阻尼器典型应用实例
Table 2 Applications of eddy current dampers

序号	航天器名称	发射日期	应用部位
1	“GEOSAT”卫星 (Geodetic Satellite)	1985年 3月	悬臂展开机构
2	“TERRA”卫星 (EOS AM-1)	1999年 12月	太阳翼展开机构
3	“DMSP-16”卫星 (The Flight 16 DMSP Satellite)	2003年 10月	悬臂展开机构
4	“詹姆斯·韦伯” 空间望远镜 (James Webb Space Telescope)	预计于 2013年	太阳遮光罩 展开机构
5	“类地行星搜寻者” (Terrestrial Planet Finder)	预计于 2014年	太阳遮光罩 展开机构

2.3 黏弹性阻尼器

黏弹性阻尼器是由黏弹性材料和约束材料粘贴在一起制成的(见图3)。黏弹性材料是一种同时具有黏性液体特性和弹性固体特性的高分子聚合物材料。当黏弹性材料受到外力作用产生变形时,部分能量像位能那样储存起来,另一部分能量则转化为热能而耗散掉。当机构展开时,黏弹性阻尼器会产生剪切滞回变形,耗散输入的能量,削弱机构展开到位时的冲击载荷。

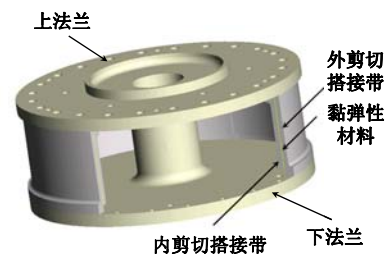


图3 HST黏弹性阻尼器
Fig.3 Viscoelastic damper in HST

黏弹性材料具有低切变模量和高损耗因子,因而黏弹性阻尼器具有较高的耗能能力。此外,其结构简单,重量轻。然而由于黏弹性材料是一

种温度敏感性材料，因此黏弹性阻尼器对温度很敏感，对其工作环境温度需要采取热控措施。

黏弹性阻尼器已经在航天任务中成功应用，其典型应用实例见表 3^[4]。

表 3 黏弹性阻尼器典型应用实例
Table 3 Applications of viscoelastic dampers

序号	航天器名称	发射日期	应用部位
1	“哈勃”太空望远镜 (HST)	2000 年 3 月	太阳翼展开机构
2	“Rosetta”彗星探测器	2004 年 3 月	高增益天线展开机构
3	“BepiColombo”水星探测器	预计于 2009 年	偶极天线展开机构

2.4 机械摩擦阻尼器

机械摩擦阻尼器工作原理比较简单，它通过物体之间的相对滑动所产生的摩擦力来耗散能量。机械摩擦阻尼器性能稳定，对周围环境温度不敏感，但会对部件造成磨损。

图 4 为德国 Astrium 公司研制的应用于天线展开机构的机械摩擦阻尼器构造图。该阻尼器包括机架及安装在机架内的转轴。机架内有两个与轴相连的黄铜质量块。轴的一端安装有一个缠绕着绳索的卷轴。绳索的两端穿过支架上的孔，固定在发射锁定支架上。当阻尼器工作时，由于机构的展开运动牵引绳索，绳索拉动卷轴，从而使轴旋转。当轴旋转时，两个质量块随之旋转并沿轴的径向加速，从而在机架和质量块之间产生沿圆周切向的摩擦力，进而产生阻尼力（矩）。

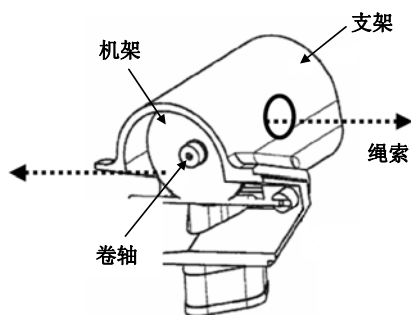


图 4 机械摩擦阻尼器构造图
Fig.4 Structure of a certain friction damper

机械摩擦阻尼器已在航天任务中获得成功应用，其典型实例见表 4^[5]。

表 4 机械摩擦阻尼器典型应用实例
Table 4 Applications of friction dampers

序号	航天器名称	发射日期	应用部位
1	“Olympus”卫星	1989 年 7 月	天线展开机构
2	“火星快车” (Mars Express spacecraft)	2003 年 6 月	轻型天线展开机构

2.5 其他类型^[6]

(1) Velcro 阻尼器

Velcro 是一种尼龙刺粘搭链，该搭链由一条表面有细小钩子的尼龙条与表面有毛圈的对应尼龙条粘合面构成。将 Velcro 尼龙搭扣附着在一个圆柱形轴的外壁上和一个更大的外壳的内壁上，并使圆柱形轴在外壳中旋转，就构成了 Velcro 阻尼器。在旋转过程中，当圆柱体外壁上的 Velcro 尼龙搭扣接触到外壳内壁上的 Velcro 尼龙搭扣时，就会产生阻尼力，使圆柱体转速逐渐慢下来。图 5 为洛克希德·马丁公司研制的 Velcro 阻尼器样机。



图 5 Velcro 阻尼器样机
Fig.5 Prototype of a velcro damper

Velcro 阻尼器具有构造简单、重量轻、成本低等优点。然而，这种阻尼器工作过程中存在着磨损。此外，这种阻尼器以不可预知的方式运转，尤其是在低转速情况下更为如此。

(2) 粉末阻尼器

粉末阻尼器实质上是黏滞阻尼器的延伸，由一个装满粉末的容器和一个桨式机构构成。桨式机构为与它相连的轴的旋转提供阻尼。图 6 为洛克希德·马丁公司研制的粉末阻尼器样机。通过改变材料种类或材料的微粒尺寸，可以得到不同阻尼率的阻尼器。使用粉末替代黏性液体的好处之一就是阻尼材料泄漏的问题基本可以避免。

粉末阻尼器也存在一些不足之处,最主要的就是这种阻尼器在太空中的性能尚不可知。此外,在粉末中存在初始静摩擦(黏性液体中并不存在),这种静摩擦可能会在机构展开过程中引起问题。



图6 粉末阻尼器样机
Fig.6 Prototype of a powder damper

3 半主动式阻尼器

近些年,随着材料科学的发展,一些新型智能材料走向应用阶段,这大大促进了半主动式阻尼器技术的发展。这些智能材料主要包括电流变液(Electrorheological fluid, ERF)、磁流变液(Magnetorheological fluid, MRF)、形状记忆合金、压电材料和磁致伸缩材料等。半主动式阻尼器是目前研究的热点,它们在航天器展开机构领域具有广阔的应用前景。

目前具有代表性的两种智能流体是电流变液和磁流变液,两者性能非常相似。以磁流变阻尼器为例说明,其基本工作原理为:在无磁场作用时,阻尼力是由磁流变液的黏度引起的黏滞阻尼力;在有磁场作用时,磁流变液中随机分布的磁极化粒子沿磁场方向运动,最终形成链状或网状结构,流变特性发生改变,达到改变系统阻尼的目的。电流变阻尼器的工作原理与此相类似。

美国Northrop Grumman Space Technology公司的下属子公司Astro Aerospace公司已经研制出一种用于航天器展开机构的电流变阻尼器,其构造如图7。该阻尼器采用了性能更为优良的Electrorheological Magnetic (ERM) 流体。与第

一个阻尼元件3相连接的输入轴2在转动上支撑第二个阻尼元件1,与阻尼元件3相连接的圆筒5在转动上与机架6相接合,而机架6与阻尼元件1在周向上相连接。这样圆筒5相对于机架6转动运动。放置在机架6中的ERM流体4环绕在圆筒5周围,从而与机架6和圆筒5共同作用。在磁场存在的情况下,通过ERM流体4、圆筒5与机架6之间的摩擦控制阻尼元件3相对于阻尼元件1的转动运动^[7]。

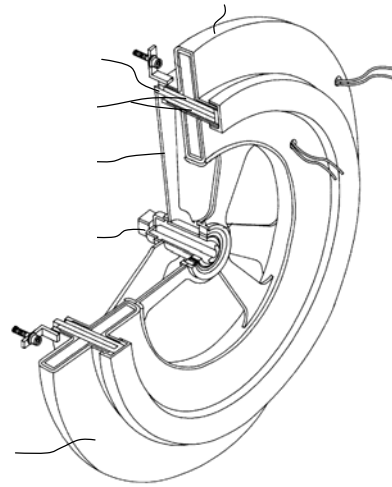


图7 Astro Aerospace公司的ERM阻尼器
Fig.7 ERM damper developed by Astro Aerospace

4 各类型阻尼器特点对比

上述各类型阻尼器工作原理各异,其优缺点的比较见表5,综合分析结论如下:

(1) 航天器展开机构上应用最广泛的是黏滞阻尼器和涡流阻尼器,其次是黏弹性阻尼器和机械摩擦阻尼器; Velcro 阻尼器和粉末阻尼器只是刚研制出样机,尚未经过飞行验证;

(2) 黏滞阻尼器、涡流阻尼器技术最成熟;黏滞阻尼器的关键技术是密封设计,涡流阻尼器的关键技术是电磁兼容设计;

(3) 涡流阻尼器、电流变阻尼器成本最高;黏弹性阻尼器次之;黏滞阻尼器、机械摩擦阻尼器、Velcro 阻尼器和粉末阻尼器成本均比较低;

(4) 半主动式阻尼器是目前国际上研究的热点,阻尼特性可调是其相对于被动式阻尼器的最大优势。

表5 各式阻尼器比较
Table 5 Comparison of several dampers

类别	黏滞阻尼器	涡流阻尼器	黏弹性阻尼器	机械摩擦阻尼器	Velcro 阻尼器	粉末阻尼器	电流变阻尼器
优点	耗能能力强; 成本低	无液体渗漏; 对温度不敏感	耗能能力强; 结构简单; 重量轻	构造简单; 对温度不敏感	构造简单; 重量轻; 成本低;	避免阻尼材 料泄漏;	阻尼特性 可控
缺点	加工要求高; 有渗漏危险	可能漏磁; 重量大; 成本高	对温度很敏感	存在部件磨损	存在摩擦磨损; 运转方式不可 预知	太空性能尚 不可知; 初始 静摩擦问题	需要能量 输入
温度敏感性	中等	低	高	低	低	低	低
热控制	需要	不需要	需要	不需要	不需要	不需要	不需要
损耗系数	高	中等	高	中等	中等	中等	高
重量	中等	大	小	大	小	中等	中等

5 结束语

航天器展开机构阻尼器技术已在国外航天器上广泛应用,我国有必要加强对该项技术的研究。

黏滞阻尼器、涡流阻尼器目前应用最广泛,技术最成熟,但由于涡流阻尼器成本(约20~30倍)高于黏滞阻尼器,故黏滞阻尼器可以作为我国开展这方面研究的重要方向。对于黏滞阻尼器的研究,应考虑以下两方面:

(1) 密封设计是黏滞阻尼器设计的技术难点:密封的好坏决定着黏滞阻尼器设计的成败,一旦密封失效,黏性液体泄露,将会造成巨大危害;

(2) 黏性液体的选择对于黏滞阻尼器的性能也有很大的影响:液体的黏度、温度稳定性、密度都是选择时应考虑的重要因素。

参考文献 (References)

- [1] Koller F, Nitschko T, Labruyere G. Viscous rotary damper [C]// Proceedings of the 5th European Space Mechanisms and Tribology Symposium, Noordwijk, Netherlands, 1992
- [2] Jones R S. TOPEX high-gain antenna system deployment actuator mechanism[C]// Proceedings of the 25th Aerospace Mechanisms Symposium, Pasadena, CA, 1991
- [3] Starins Neumeister J. Eddy current damper simulation and modeling [C]// Proceedings of the 9th European Space Mechanisms and Tribology Symposium, Liege, Belgium, 2001
- [4] Maly J R, Pendleton S C, Salmanoff J, et al. Hubble space telescope solar array damper[C]// Proceedings of the 6th SPIE International Symposium on Smart Structures and Materials, Newport Beach, CA, 1999
- [5] Schmid M, Barho R. Development summary and test results of a 3-meter unfurlable CFRP skin antenna reflector [C]// Proceedings of the 10th European Space Mechanisms and Tribology Symposium, San Sebastian, Spain, 2003
- [6] McKendry J, Mestas F, Podmore J, et al. Rotational damper for space applications[R]. Department of Mechanical Engineering, Design Division School of Engineering, Stanford University, 1996
- [7] Rosales L A, Shtarkman E M, Starkovich J A. Spacecraft deployment mechanism damper. U S, Patent: 5921357[P], 1999-07-13