

典型缓冲器结构对比分析研究

左亚南

(中国飞行试验研究院, 陕西 西安 710089)

摘要 缓冲器是指通过选用不同的缓冲原理设计出的具有隔振效果的机械装置, 在工程机械领域中扮演着不可或缺的身份。根据缓冲原理的不同, 缓冲器可以分为弹簧、橡胶、液压、电磁、磁流变缓冲器。随着科学技术的发展, 缓冲器由被动控制逐步向半主动控制和主动控制方向发展。缓冲器的缓冲性能与不同的缓冲原理、缓冲材料和控制方式有着密切的关联。本文详细分析和总结了国内外热点研究的缓冲器类型, 并将不同类型的缓冲结构的性能优势进行了横向对比, 指出了还需进一步研究的问题和发展前景, 以为不同应用环境的缓冲方案的选取提出有益参考。

关键词 缓冲器; 隔振; 液压; 电磁; 磁流变

中图分类号: TH7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.09.001

0 引言

振动不仅会降低系统的稳定性, 同时更可能造成系统结构破坏与工作失效, 因此施行隔振或减振措施十分必要^[1]。缓冲器是一种具有隔振特性的装置, 通常安装在振动源和需要保护的系统之间, 以吸收冲击能量, 减缓运动速度^[2]。现有的缓冲器结构类型多种多样, 常见的缓冲方式有弹簧、橡胶、液压、电磁、磁流变等。国内外专家根据不同的缓冲方式设计出了不同结构的缓冲器。本文从缓冲器的工作原理出发, 分析各缓冲器的缓冲性能和优缺点。

1 缓冲器的发展现状

根据外部能源的需求, 振动控制可分为三种方式: 被动、主动和半主动或主动被动切换控制^[3-4]。最初的缓冲器主要以被动隔振为主, 其中大部分利用的是弹簧、橡胶等材料本身的力学性质进行隔振。随着技术的进一步发展, 出现了半主动隔振和主动隔振等缓冲结构, 即气压、液压、电磁、磁流变液隔振器。

被动隔振具有结构简单、功耗低、稳定性高等优点, 被广泛应用于结构隔振。

主动隔振系统可以自动跟踪外部干扰的变化频率并有效控制低振动频率。

与主动隔振系统相比, 半主动隔振系统不需要大量的能量和重量, 成本低, 运行可靠。

所以, 根据不同的应用环境选取相应的隔振器非常重要。

2 缓冲器的结构及分类

缓冲器的结构可以根据不同的缓冲方式分为弹簧、橡胶、液压、电磁、磁流变等五种类型。下文将对每种类型的典型结构进行分析。

2.1 弹簧缓冲器

弹簧缓冲器是出现在早期的一种缓冲器。主要是利用弹簧被压缩, 将动能转化为弹性势能从而达到隔振效果, 但由于弹簧结构产生的阻尼力非常小甚至可以忽略, 所以需要配合其他材料增大阻尼, 这样才能达到预期的隔振效果。弹簧缓冲器形式多样, 其中包括金属丝弹簧缓冲器、凸轮弹簧缓冲器^[5]等。

弹簧缓冲器属于第一代缓冲器, 其结构简单、成本较低, 且后期维护方便, 小部分弹簧缓冲器带有主动控制系统, 对于一般的要求较低的结构隔振, 可优先选择弹簧缓冲器。

2.2 橡胶缓冲器

橡胶缓冲器属于粘弹性缓冲器, 粘弹性缓冲器的力学性能主要取决于粘弹性材料。早期美国研究的粘弹性缓冲器采用高分子聚合物材料作为缓冲介质, 该材料具有明显的频率、温度相关性, 且对缓冲器耗能效果影响较大^[6]。以橡胶材料作为缓冲元件的缓冲器在现代隔振系统中应用广泛, 这主要得益于其良好的阻尼特性、机械强度和抗腐蚀性能(可在油、酸、辐射等环境中使用)^[7]。

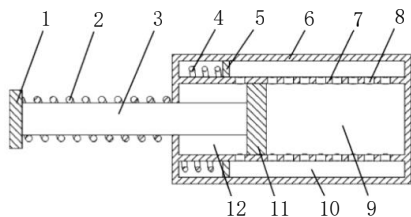
作者简介: 左亚南(1998-), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 机械结构设计。

2.3 液压缓冲器

液压缓冲器的主要部件包括：撞击头、活塞杆、活塞、缸套、缸体及复位弹簧等，其工作原理是通过活塞运动使流体流经缓冲器结构缝隙或阻尼小孔，进而产生液阻效应，将冲击动能转化为热能，并耗散于空气中，以实现缓冲和减速作用^[8]。现有的液压缓冲器主要包括以下类型：多孔式缓冲器^[9]、阀式缓冲器^[10]、胶泥缓冲器^[11]等。液压缓冲器作为第二代缓冲器，其结构相对简单，同时部分液压缓冲器还具有主动控制的功能，但也存在缓冲力难以提高、密封性能差、回位性差、成本高等缺点^[12]。

2.3.1 多孔式液压缓冲器

多孔式液压缓冲器的阻尼孔直径、阻尼孔间距和阻尼孔数量决定了其工作特性。图1^[13]为一种典型的多孔式液压缓冲器的结构简图。



1—撞头；2—复位弹簧；3—活塞杆；4—浮动活塞弹簧；
5—浮动活塞；6—外缸；7—内缸；8—阻尼孔；
9—无杆腔；10—补偿腔；11—活塞；12—有杆腔

图1 多孔式液压缓冲器结构简图

多孔式液压缓冲器属于被动式隔振装置，对于节流孔面积和数量的选择和设计有较高的要求^[14]，同时对于不同的工况和隔振环境，需要设计不同的多孔式液压缓冲器的结构，其适应性较差，但结构简单制造成本低是该缓冲器的主要优点。

2.3.2 阀式液压缓冲器

在阀式液压缓冲器的应用过程中，主要关注点在于其缓冲行程和节流阀开口面积的设计，设计者需根据缓冲装置的具体需求，合理设计该缓冲器的具体参数，由于该缓冲器结构简单且易实现主动控制，目前应用较为广泛。图2为一种典型的阀式液压缓冲器。

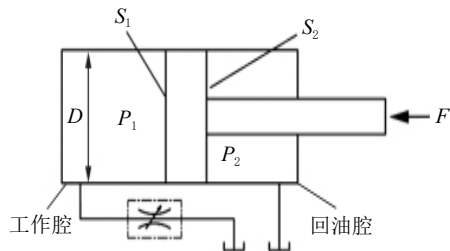


图2 阀式液压缓冲器

2.3.3 胶泥缓冲器

胶泥缓冲器的主要部件包括：缸体、缸盖组件、活塞、活塞杆、注泥部件及密封装置等^[15]。胶泥缓冲器兼具粘滞耗能和弹性储能的双重特性，既可耗散冲击能量，又可实现自动复位^[16]。胶泥缓冲器的工作原理主要基于胶泥在缓冲器缸体内的受压与流动过程。缓冲器在开始受力前，先将胶泥注入缸体内并施加一定预压力，当活塞所受外力超过预压力，活塞杆便向缸体内移动，压缩胶泥使其体积减小，同时胶泥对活塞杆产生反作用力。在此过程中，部分外部输入的冲击动能转换为胶泥的弹性势能，另一部分动能则通过胶泥与缓冲器各构件之间的摩擦转化为热能而耗散，从而实现缓冲减振作用^[17]。

当外力减小或撤销后，胶泥因自身弹性而体积膨胀，推动活塞及活塞杆回弹。在回弹阶段，活塞上的单向节流阀打开，上腔的胶泥经过此孔流回下腔，从而降低回弹阻力、提高回弹速率，使活塞迅速恢复原位，为下一次冲击做好准备。

胶泥缓冲器回位所需要的相对缓冲阶段的阻尼力小很多，所以其回位迅速，同时提供的阻尼力较大，能够满足正常情况的需求，并且克服了传统液压缓冲器的密封性能差、回位性差等缺点，具备了成本低的优点，目前在承受密集冲击的坦克装甲车上应用广泛。

2.4 电磁缓冲器

相比于传统的粘滞式或粘弹性缓冲器，电磁缓冲器通过非接触式的电磁相互作用产生阻尼力，其初级与次级导体板之间无物理接触，因而不会影响系统的动态响应及材料属性。此外，电磁缓冲器还具有噪声低、维护简便、寿命长、原理简单、控制灵活、可靠性高以及环境友好等优点。基于上述优越性能，电磁缓冲器在振动抑制、交通运输、工业自动化等工程领域中得到广泛应用^[18]。根据初级励磁源的不同，将电磁缓冲器分成电励磁、永磁式和混合励磁电磁缓冲器^[19]。

2.4.1 电励磁电磁缓冲器

电励磁电磁缓冲器的工作原理为：励磁绕组通电后产生主磁场，当导体板与初级铁心产生相对运动时，其内部会感应出涡流。图3为电励磁电磁缓冲器结构示意图。

该涡流进而与初级励磁磁场相互作用，从而产生阻尼力。为探究电磁参数对阻尼力特性的影响，很多学者采用有限元法进行了系统分析，并基于分析结果对电磁参数进行了优化设计，以实现电磁缓冲器缓冲性能的最优调控。

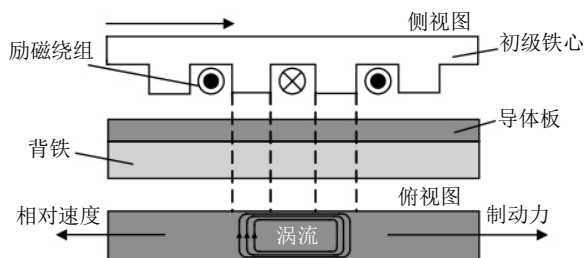
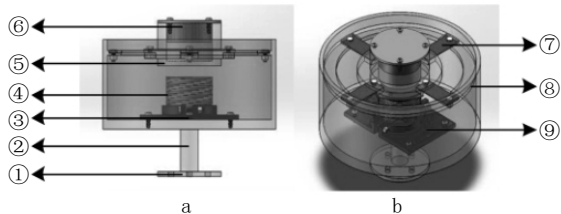


图 3 电励磁电磁缓冲器结构示意图

2.4.2 永磁式电磁缓冲器

永磁式电磁缓冲器主要是利用永磁铁与通电线圈之间的相互作用，通过对外界的冲击分析控制线圈中的电流控制作用力的大小，从而达到抑制振动的效果^[20]。图 4 为一典型永磁式电磁缓冲器的结构简图。



①底座、②支柱、③铁芯、④线圈、⑤台、⑥永磁体、⑦板簧、⑧外壳、⑨夹具

图 4 永磁式电磁缓冲器结构简图

2.4.3 混合励磁电磁缓冲器

混合励磁电磁缓冲器将永磁体和电磁线圈结合，形成“永磁定基，电磁调节”的工作原理。永磁体提供恒定、高效的基础磁场；电磁线圈通过改变电流实时、精准地调节总磁场强度，从而控制阻尼力大小^[21]。这种设计兼具了永磁式电磁缓冲器的高能效和电励磁电磁缓冲器的宽范围、可调节的优势。它主要应用于智能阻尼的领域，如车辆的馈能悬架与涡流缓冲器，以及精密平台的主动隔振系统，代表了先进缓冲技术的发展方向。

电磁缓冲器为第三代缓冲器，主要利用的电生磁与动生磁原理相互配合达到缓冲效果，作为一种主动控制的缓冲器，电磁缓冲器的阻尼可调范围大，控制精准，相对其他的被动控制缓冲器具有较好的控制性能以及更好的适应性，其缺点在于控制系统较复杂，导致成本较高。

2.5 磁流变缓冲器

磁流变液体（MRF）是一种流变特性可受外界磁场调控的功能材料，主体构成是以硅油为载液，以油酸为稳定剂，同时加入了微米量级的可磁化颗粒悬浮液^[22]，其典型特征表现为：在磁场作用下，其剪切应力随外加磁场强度的变化而连续可调，且这一变化过程具有快速可逆性，通过变化磁场强度，可在毫秒级时间内

实现流变力学特性的控制，这一响应特性使其在动力学主动控制领域具有重要的应用价值。作为一种非牛顿液体，磁流变液体的剪切应力主要包括屈服应力和黏性应力。

磁流变缓冲器是一种基于磁流变液特性，实现阻尼可控的器件，其基本工作模式主要包括：流动模式、剪切模式和挤压模式。磁流变缓冲器所能产生的最大阻尼力主要取决于磁流变液的材料性能、所采用的工作模式以及具体的结构尺寸参数。这些采用磁流变液体的半主动缓冲器具有连续阻尼可控、运行安静、配置简单、功耗低和高控制稳定性^[23]。

单筒结构是磁流变缓冲器中应用最广泛的结构形式，其筒体主要用于容纳磁流变液。如图 5 所示，单筒单出杆结构仅包含一个筒体，活塞杆只从一端伸出。在活塞杆往复运动过程中，由于杆体体积占位变化，会导致磁流变液体积差，因此需在没有活塞杆的一端设置补偿气装置，以平衡筒内容积变化，避免因压力异常引起活塞运动卡滞。该补偿装置内部通常充有氮气，有助于维持系统压力稳定，防止磁流变液中产生气穴现象。

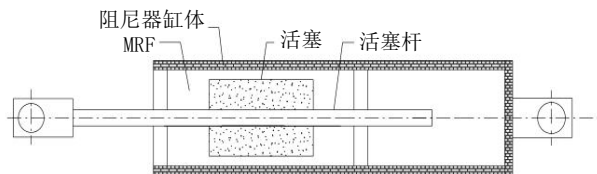


图 5 单筒单出杆 MRF 缓冲器

磁流变缓冲器的性能主要由结构参数、磁路参数以及磁流变液的性能参数决定。在磁流变液性能参数给定的条件下，实现高性能磁流变缓冲器设计的关键在于对其结构与磁路进行优化^[24-25]。

3 不同类型缓冲器的横向比较

前文介绍了五大类不同缓冲原理的缓冲器，其中有的阻尼系统简单，成本较低且后期维护方便，但在控制方面又相对较弱，针对不同的工程问题，相对应的工况千差万别，在保证达到缓冲效果的前提下，选择成本最低、最合适的缓冲器对于使用者非常重要。表 1 针对不同类型的缓冲器的性能特点进行了比较。

通过上述的缓冲性能的比较可知，在不同的应用领域需要通过具体的需求选取合适的缓冲器，五大类缓冲器各有优缺点，选用时要按需选配。

4 缓冲器的发展方向

1. 目前缓冲器在高频隔振方向的研究已经相对成熟，相较于主动控制，被动控制系统更加适用于高频隔振。而对于低频隔振，被动控制缓冲器还不具有良

表1 五大类缓冲器的性能比较

| 缓冲器类型 | 隔振类型 | 控制方法 | 阻尼材料 | 结构特点 | 影响因素 |
|-------|--------|-------|-------|------|-------------|
| 橡胶类 | 非线性 | 被动 | 高阻尼橡胶 | 结构简单 | 材料性质、缓冲结构 |
| 弹簧类 | 线性/非线性 | 被动 | 辅助材料 | 结构简单 | 材料性质、缓冲结构 |
| 液压类 | 非线性 | 被动/主动 | 液压油 | 结构简单 | 阻尼孔结构 |
| 电磁类 | 非线性 | 主动 | 磁场 | 较复杂 | 电流 |
| 磁流变液类 | 非线性 | 主动 | 磁流变液 | 较复杂 | 材料性质、MR 阀结构 |

好的效果,而主动控制缓冲器也由于其结构复杂、控制系统庞大、造价高等问题,一直处于研发改进阶段。

2. 相较于目前的缓冲器类型,大多数缓冲器为通用型结构,并未向专用性结构发展,以至于缓冲效果不能在某一特殊领域达到最优的缓冲效果,所以未来缓冲器在专用领域存在更大的改进发展的空间。

5 结束语

本文综合阐述了目前国内外所研究的不同类型的缓冲器的基本缓冲原理和缓冲结构。对典型的缓冲结构进行缓冲性能的论述和对比。随着力学、振动、材料等学科的进一步发展,缓冲器的种类会不断增加,可靠性会逐步提高,将有力推动缓冲、阻尼技术的发展,因此对缓冲器的研究具有重要的工程价值。

参考文献:

- [1] 李明华,曹广群,薛彦云,等.基于遗传算法的电磁炮缓冲器设计方法[J].兵器装备工程学报,2023,44(12):197-203,262.
- [2] 魏国,赵益,王率军,等.隔振缓冲结构设计与仿真分析[J].兵工自动化,2025,44(04):77-82.
- [3] 杜永峰,屠旭松,韩博.MRE耗能阻尼器力学性能及半主动控制分析[J].振动.测试与诊断,2024,44(04):703-709,826.
- [4] 杨仙娥,刘学广.基于Stewart隔振平台的振动主动控制方法研究进展[J].振动与冲击,2025,44(10):323-338.
- [5] 鲁正,赵若宇,柳祥千,等.基于SMA弹簧的调频TMD减振性能试验研究[J].地震工程与工程振动,2025,45(05):77-87.
- [6] 夏立荣,张萌,赵博.低温环境下聚氨酯缓冲器安全性能研究[J].中国特种设备安全,2025,41(12):13-17.
- [7] 王乙辰,周旋,周旭升,等.高速/超高速电梯新型缓冲器研究[J].湘潭大学学报(自然科学版),2025,47(06):160-174.
- [8] 尤小梅,侯晓冬.基于不同算法渐变式液压缓冲器的优化研究[J].组合机床与自动化加工技术,2025(06):176-181.
- [9] 杨堃,宋顺利,王乐,等.多孔式缓冲液压缸设计、仿

真与试验研究[J].液压气动与密封,2023,43(11):62-66.

[10] 马佰周,黄惠,纵怀志,等.外部冲击下的液压阻尼作动器位置控制策略研究[J].液压与气动,2024,48(12):126-137.

[11] 徐忠四,肖有才,符振荣.胶泥缓冲器与高射机枪动力学性能优化匹配[J].湖南大学学报(自然科学版),2024,51(10):89-97.

[12] 陈浩,董必辉.大型液压阻尼器结构优化设计[J].机械设计与制造,2024(12):303-307,313.

[13] 王成龙,魏学谦,王雪亭,等.一种多孔式液压缓冲器的设计与优化[J].机床与液压,2021,49(16):82-86,97.

[14] 王成龙,王雪亭,魏学谦,等.基于不同算法的多孔式液压缓冲器设计优化与比较[J].液压与气动,2021(02):71-76.

[15] 赵旭宝,魏伟,董靓瑜,等.弹性胶泥缓冲器关键参数对快捷列车纵向冲动的冲击影响[J].振动与冲击,2022,41(05):99-104,113.

[16] 周元辉,戴谋军,于海航,等.弹性胶泥缓冲器刚度特性分析[J].机械工程与自动化,2022(03):32-34.

[17] 宿方宗,毛从强,孟繁彬.内增压弹性胶泥缓冲器设计[J].电力机车与城轨车辆,2022,45(03):34-38,122.

[18] 范圣平,李竞,李林勇,等.电磁阻尼器工作特性的理论模型与试验研究[J].西北工业大学学报,2023,41(04):688-696.

[19] 梁仕民,杨国来,王义金,等.强冲击载荷下电磁阻尼器磁阻尼力影响分析[J].振动与冲击,2024,43(18):21-27.

[20] 何少东,唐长亮,徐静雯,等.柔性支承的立式转子主动电磁阻尼减振研究[J].电子测量技术,2025,48(05):22-29.

[21] 马学超,田俊梅,张建宏,等.串联磁路混合励磁电磁阻尼器分析与设计[J].微特电机,2023,51(05):24-27.

[22] 杨广鑫,王飞,周龙,等.基于正交试验法的磁流变液制动器设计和分析[J].机械传动,2026,50(01):32-39.

[23] 李祝强,付本元,古毅,等.径向楔形挤压磁流变缓冲器冲击动力学行为[J].振动与冲击,2025,44(02):30-39.

[24] 张广,张晋宁.磁流变减振器基本结构设计研究综述[J].机电工程技术,2023,52(10):34-40.

[25] 唐娟,毕力格图,董明明.磁流变减振器阻尼特性半主动控制研究[J].液压与气动,2025,49(12):26-36.