

液压管路压力脉动抑制技术的现状与展望

叶国云¹, 张提成¹, 刘德顺², 田湘林^{2*}

¹宁波如意股份有限公司, 浙江 宁波

²湖南科技大学海洋矿产资源探采装备与安全技术国家地方联合工程实验室, 湖南 湘潭

收稿日期: 2023年4月3日; 录用日期: 2023年5月17日; 发布日期: 2023年5月25日

摘要

液压管路中存在的压力脉动会产生管路噪声, 必须在最大程度范围内予以消除。文章回顾了近几十年来学者们在压力脉动抑制方面所做的贡献, 对被动控制技术、主动控制技术、主被动联合控制技术进行了详细的阐述, 并对各种技术的发展趋势进行了展望。

关键词

压力脉动, 被动控制技术, 主动控制技术, 主被动联合控制技术

Status and Prospects of Pressure Pulsation Suppression Technology in Hydraulic Lines

Guoyun Ye¹, Ticheng Zhang¹, Deshun Liu², Xianglin Tian^{2*}

¹Ningbo Ruyi Joint Stock Co., Ltd., Ningbo Zhejiang

²National Local Joint Engineering Laboratory of Marine Mineral Resources Exploration Equipment and Safety Technology, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

Received: Apr. 3rd, 2023; accepted: May 17th, 2023; published: May 25th, 2023

Abstract

The pressure pulsation existing in the hydraulic line will generate noise, which must be eliminated. The article reviews the contributions made by scholars in pressure pulsation suppression in recent decades, elaborates on passive control technology, active control technology and combined active-passive control technology, and gives an outlook on the development trend of various technologies.

*通讯作者。

Keywords

Pressure Pulsation, Passive Control Technology, Active Control Technology, Combined Active-Passive Control Technology

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

液压系统能传递大扭矩，在传动系统中应用非常广泛。液压系统作为传动机构中重要组成部分，具有很多优点[1]：一是液压系统由于采用油管布置，能使得传动机构设计紧凑；二是由于液压系统非常适合于力的放大，在吊车等重型工程机械中使用广泛；三是液压系统作为传动机构时，经过合理的设计能使得传递的运动均匀平稳，非常适合于金属切削机床传动；四是借助于各种控制阀，容易设计合理的自动控制系系统，五是由于液压油具有一定的润滑作用，使得液压元件的使用寿命较长。

液压管路中压力脉动的危害十分严重[2]：压力脉动是液压管路压力噪声产生的主要来源，尤其是当压力脉动的频率等于或接近管路系统自身的固有频率时，管路系统会产生大振幅的振动，容易引起管路的破裂造成机器的运转不正常甚至是更为严重的安全事故。

抑制液压管路中的压力脉动最简单易行的方法就是在液压管路中安装压力脉动衰减器[3]。压力脉动以压力波的形式在液压管路中传播[4]，是液压系统运行时管路中不可避免产生的现象[5]，是管路中振动与噪声的主要来源，因此抑制液压管路中的压力脉动很早就成为学者们研究的焦点。抑制压力脉动的技术主要分为被动控制技术、主动控制技术、主被动联合控制技术。

2. 被动控制技术

被动控制技术主要是通过改变液压管路的阻抗或耗散压力脉动的能量来抑制管路中的压力脉动，依据压力脉动的衰减原理，压力脉动衰减器分为阻性压力脉动衰减器、抗性压力脉动衰减器和复合型压力脉动衰减器。

2.1. 阻性脉动衰减器

压力脉动在液压管路中以压力波的形式传播，压力波的传播方式和声波完全类似，阻性脉动衰减器在衰减器内壁布置吸波材料吸收压力波，减小管路中的压力脉动[6]。图1是阻性压力脉动衰减器结构示意图。

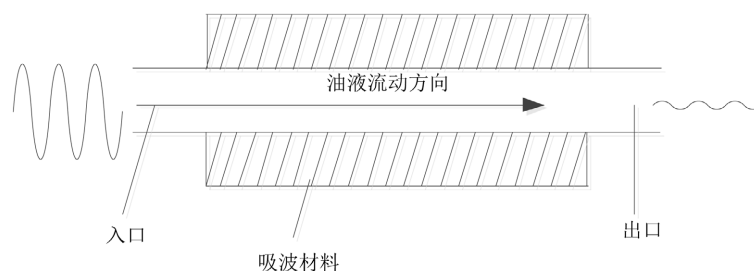


Figure 1. Schematic diagram of resistive pressure pulsation attenuator
图1. 阻性压力脉动衰减器结构示意图

从图 1 中可以看出,当含有压力脉动的液压油液流过衰减器时,衰减器内壁上布置的吸波材料能吸收油液中大部分的压力脉动,在衰减器出口处能大大衰减脉动幅度。由于吸波材料的特性,阻性压力脉动衰减器会造成比较大的能量损失,影响液压系统的正常工作,另外吸波材料会产生大量的热量,导致吸波材料必须频繁更换。基于以上的使用弊端,阻性压力脉动衰减器单独使用比较少见,在工程中一般结合抗性脉动衰减器来使用[7]。

2.2. 抗性脉动衰减器

抗性压力脉动衰减器根据衰减器[8]的结构形式分为 H 型(T 型)脉动衰减器和扩张室型脉动衰减器。

图 2 中左图是 H 型脉动衰减器结构示意图,右图是 T 型脉动衰减器结构示意图。



Figure 2. Schematic diagram of H and T type pressure pulsation attenuator

图 2. H 型和 T 型压力脉动衰减器结构示意图

H 型(T 型)压力脉动衰减器[9] [10]主要是利用共振耗散能量的原理进行抑制,当衰减器的固有频率和压力脉动的频率相等或相近时,压力脉动在衰减器附近会形成共振从而衰减压力脉动的能量,进而衰减压力脉动。这种压力脉动衰减器的衰减频带属于窄带[11],只有当压力脉动的频率在其固有频率附近时衰减器才会起作用,所以必须对衰减器的固有频率进行仔细计算,才能对衰减器进行较为精确的设计;另外根据声波的平面波理论,在衰减低频段液压脉动时衰减器的结构体积应相对较大[12],故其应用范围受到了严格的控制。为了改进这种衰减器的结构以适应大多数工作场景,学者们做了如下研究工作:① 优化衰减器的计算模型,使之满足设计要求;② 对衰减器进行复合结构小型化设计,满足较小空间使用的要求。

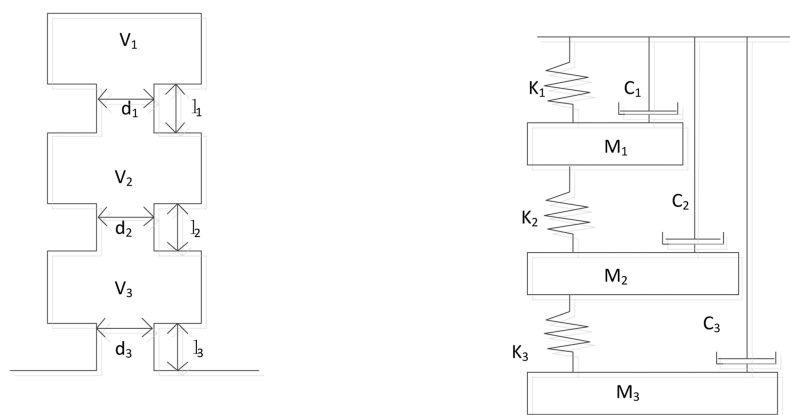


Figure 3. Schematic structure and centralized parameter model of the 3-degree-of-freedom H-type pulsation attenuator

图 3. 3 自由度 H 型脉动衰减器的结构示意图和集中参数模型

为拓宽 H 型的脉动衰减器的工作频带,学者们开始研究自适应调节频率的 H 型脉动衰减器:KELA 等[13]根据容积和衰减器固有频率的关系设计出一种可调节固有频率的脉动衰减器,这种脉动衰减器可通过固有频率的改变调整抑制的频率,但是目前只是在低压液压系统中适用,在高压液压系统中固有频率

处的压力脉动抑制效果不好。对于 H 型的脉动衰减器来说,通常只设计了一个空腔,造成了这种脉动衰减器只有一个固有频率,也就是具有单一的共振频率,这种脉动衰减器只能高效吸收共振频率附近的压力脉动,而对于其余频段的压力脉动吸收的效果大为下降。然而一般的液压系统,其脉动的频率除了基频外,高次谐波脉动也不容忽视,要想高效的吸收基频和高次谐波,必须设计多共振频率的脉动衰减器。KOJIMA 等[14]设计出一种多自由度的脉动衰减器,其设计思想是将多个空腔-颈部进行串联安装。GUAN 等[15]设计了一个 3 自由度的 H 型脉动衰减器,图 3 左图是 3 自由度的 H 型脉动衰减器的结构示意图,图 3 右图是 3 自由度的 H 型脉动衰减器的集中参数模型。GUAN 将脉动衰减器等效为 3 自由度的弹簧振子系统,利用集中参数法精确计算出脉动衰减器的 3 个共振频率,使得压力脉动的基频、二次谐波、三次谐波分别等于脉动衰减器的三个共振频率,这种脉动衰减器能同时衰减压力脉动的基频、二次谐波、三次谐波,在试验中取得了良好的脉动衰减效果。

由于多空腔串联的 H 型脉动衰减器可能会在某些频段衰减效率不高[16],而且脉动衰减器的共振频率受多个参数的影响,导致设计的难度较大。在这种背景下,有学者提出将空腔进行并联配置,这样单个共振腔参数的改变不会影响到其余共振腔的正常工作。依据马大猷院士提出的微穿孔理论[17][18],一种多孔式的脉动衰减器被提出并被广泛的应用于液压系统中。多孔式脉动衰减器的结构示意图如图 4 所示。衰减器内部每个腔都是分开的,一组空腔和小孔相当于一个 H 型脉动衰减器,多孔式脉动衰减器在工作时相当于多个 H 型的脉动衰减器并联在油液管路中。

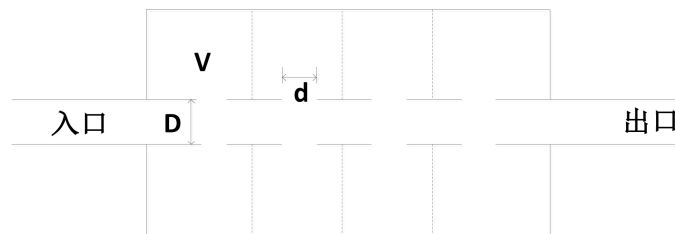


Figure 4. Schematic diagram of porous pulsation attenuator
图 4. 多孔式脉动衰减器结构示意图

曾祥荣等[19]对这种多孔式的脉动衰减器的衰减特性采用传递矩阵法进行了研究,研究发现脉动衰减器的安装位置、穿孔率等参数对脉动衰减效果影响很大,脉动衰减器安装位置不佳衰减效果不好甚至可能放大油液中的压力脉动,穿孔率在 25%~45%之间压力脉动的衰减效果最好。周星德[20]采用集中参数法研究了多孔式脉动衰减器的脉动衰减特性,随后进行了数值仿真,其研究的结果表明液压系统本身的结构参数对该衰减器衰减特性有较大影响。

扩张室型压力脉动衰减器最典型的是简单扩张室(C 型)脉动衰减器和内插管式扩张室(K 型)脉动衰减器。图 5 是这两种脉动衰减器的结构示意图。

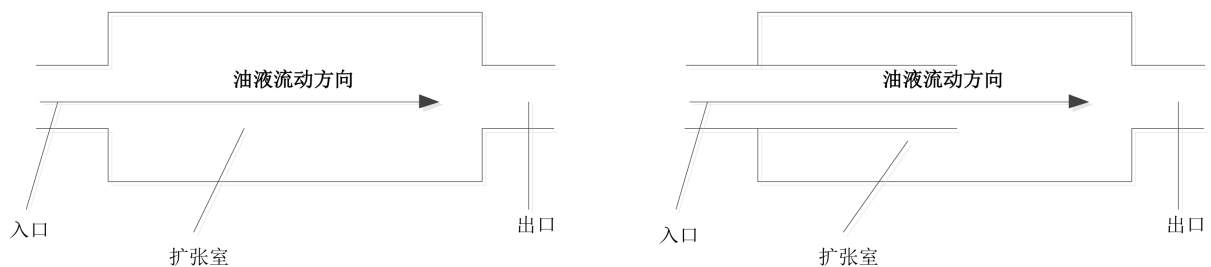


Figure 5. Schematic diagram of C and K type pressure pulsation attenuator
图 5. C 型和 K 型压力脉动衰减器结构示意图

杨帆[21]对 C 型和 K 型压力脉动衰减器的插入损失和传递损失进行了详细研究。用一维解析法计算了这两种压力脉动衰减器的插入损失和传递损失, 并和有限元法的计算结果进行了对比, 发现两种计算结果吻合良好, 最后用实验验证了计算结果。最后提出了几种改进型的内插管式压力脉动衰减器并计算了改进型的压力脉动衰减器的插入损失, 表明改进后的压力脉动衰减器能明显拓宽压力脉动的衰减频率。图 6 是两种改进型压力脉动衰减器的结构示意图。

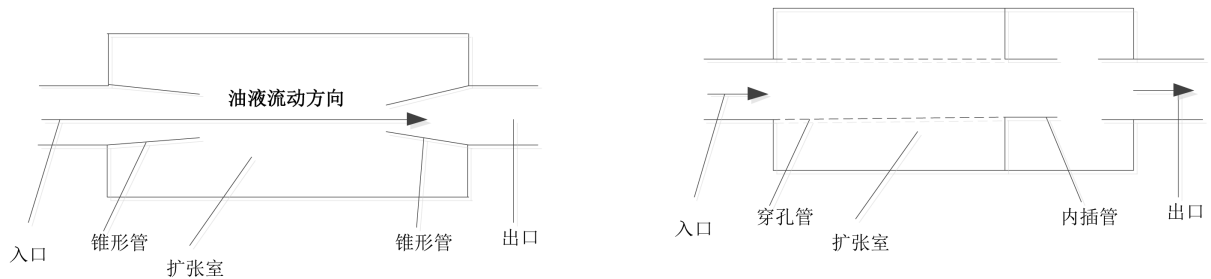


Figure 6. The improved pressure pulsation attenuator
图 6. 改进型压力脉动衰减器

2.3. 复合型压力脉动衰减器

复合型压力脉动衰减器兼具了阻性压力脉动衰减器的优点和抗性压力脉动衰减器的优点, 最简单的做法就是在抗性衰减器的壳体内壁上布置一层吸波材料, 图 7 表示在 C 型扩张室压力脉动衰减器内部布置吸波材料的结构示意图。

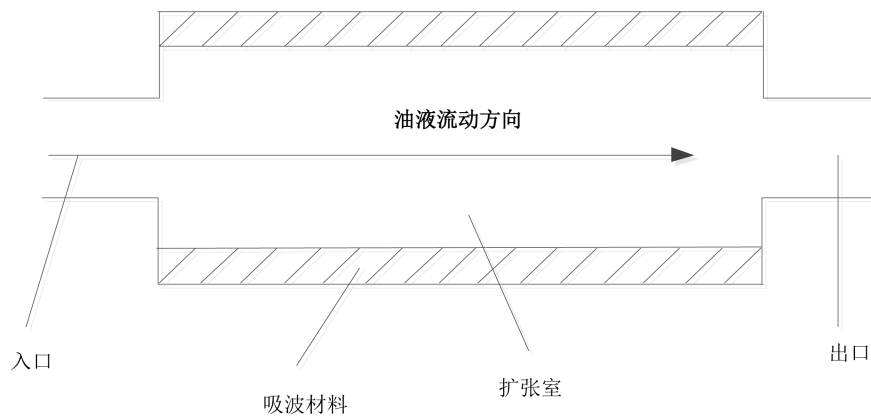


Figure 7. The improved C-type expansion chamber pressure pulsation attenuator
图 7. 改进型 C 型扩张室压力脉动衰减器

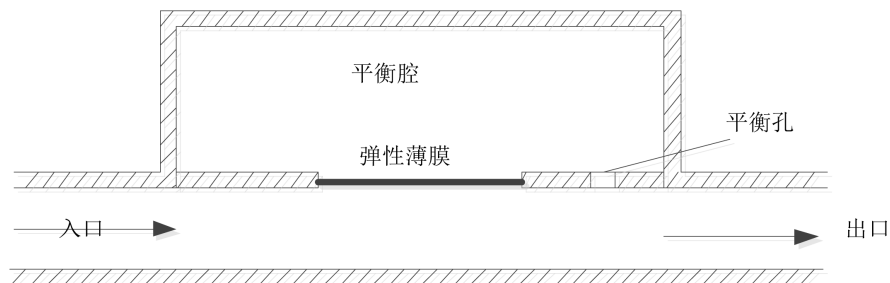


Figure 8. Schematic diagram of the thin-plate vibrating pulsation attenuator
图 8. 薄板振动式脉动衰减器结构示意图

图 7 和图 1 最大的区别就是图 7 具有扩张室，油液中的压力脉动从入口进入扩张室时，遇到截面突然变大时，压力脉动会有所降低，随着压力脉动在衰减器内部的传播，大部分的压力脉动被吸波材料吸收，出口处的压力脉动会有显著降低。

流固耦合型的压力脉动衰减器也属于复合型压力脉动衰减器。贺尚红等设计了一个薄板振动式的脉动衰减器[22] [23] [24] [25]并分析了这种薄板振动式脉动衰减器的滤波特性，图 8 是薄板振动式脉动衰减器的结构示意图。

当油液中的压力脉动从入口处进入衰减器后，推动弹性薄膜往复振动消耗压力脉动的一部分能量，另外油液通过平衡孔进入平衡腔时产生的摩擦力也会消耗压力脉动的一部分能量。贺尚红等研究表明，这种薄板振动式压力脉动衰减器的衰减效果和平衡孔的深度、弹性薄膜的材料、弹性薄膜的半径有很大关系。

基于质量 - 弹簧振子系统的压力脉动衰减器[26]、基于柔性膜或薄板的压力脉动衰减器[27]、基于充气皮囊式的压力脉动衰减器[28]和基于柔性材料的压力脉动衰减器都属于流体结构振动耦合式压力脉动衰减器。从理论上分析这种压力脉动衰减器对液压管路的压力脉动具有良好的抑制作用，其缺点是设计难度大。

3. 主动控制技术

主动控制技术的原理是利用波的干涉来消除源脉动波。伺服作动筒控制、液压阀控制和非侵入式结构控制三类结构[29]是目前应用最广的主动控制结构。主动控制技术中较为常见的控制算法主要有自适应控制算法、自寻最优控制算法、神经网络算法、FxLMS 算法、模糊控制算法等。

从 1990 年开始，国外很多学者搭建了不同的主动控制试验平台并对主动控制算法进行了研究。1990 年，KOJIMA [30]通过试验装置测出了脉动前进波的速度，初步确立了主动控制脉动衰减器安装的一般原则。1996 年，YAMAOKA 等人[31]研究了系统的阻尼对主动控制的影响，他们采用不同频率的脉动波进行了试验，采用自适应的控制算法，试验的结果表明中低频脉动波采用自适应算法是非常有效的。YOKOTA [32]等人测试了 FxLMS 算法在主动控制算法中的有效性，试验系统由一个无源液压蓄能器和活塞组成，活塞上部安装有叠层压电传感器，在液压泵的出口安装有压电传感器，利用 FxLMS 算法控制活塞运动速度从而产生二次脉冲来消减源压力脉动，试验中采用的源脉动波的频率为 100 Hz~2000 Hz，试验结果表明，500 Hz~1000 Hz 的压力波动的抑制效果非常好，一般能控制在 20 dB 以上。2002 年，KIM [33]对模糊控制算法进行了研究，并率先在液压脉动衰减系统中采用了插装阀的设计，搭建了一种大流量的液压试验平台，试验结果表明采用了插装阀的主动控制系统在大流量的液压系统中消减中低频的液压脉动效果比较理想。2008 年，英国巴斯大学的 VAND 等[34]对液压回路中阻尼对压力脉动衰减的影响进行了研究，采用 FxLMS 算法作为主动控制算法，提出在不事先了解系统特性的情况下采用一种辅助的方法来主动识别液压系统的阻尼并自适应调节衰减频率，随后团队对这样一种压力脉动衰减系统进行了建模和仿真，并在试验中获得了 20 dB 的衰减效果。

国内对压力脉动主动控制技术的研究起步较晚，2001 年，西安交通大学的邢科礼等[35]采用主动分布式流量控制方法研究了低频脉冲的抑制。二次脉冲波由一个电液伺服阀产生，电液伺服阀的运动由神经网络算法或者 FxLMS 算法进行控制，团队研究并比较了两种控制算法的优缺点。试验结果表明，在数据采集过程中，神经网络算法比 FxLMS 算法有更好的性能和实时收敛性。2003 年，北京航空航天大学焦宗霞等[36]提出采用通过流量分配的主动控制方法来衰减系统中的压力脉动。测试结果表明，在 7 个活塞泵转速为 3000 转/分的情况下，流量控制系统在 350 Hz 的压力脉动频率下可以减小 68% 的脉冲压力。团队研究了具有未知振幅和相位的单一频率点的消除问题，并提出了消除分布式振动的理论基础。

2014年,北京航空航天大学的官长兵等[37]开发了一种具有主动流量分配控制方案的直驱压电隔膜阀(PDDSV),其中PDDSV的两个油口在泵出口附近的管道中旁通,另外两个油口与油箱相连。利用自适应的最佳控制算法,通过双向释放PDDSV阀杆,由一个周期的线圈运动引起的二次放电波可以抵消两个周期的初始脉冲波,使PDDSV以压力脉冲的一半频率振荡。这使得PDDSV适用于高速液压系统。系统脉冲通常包含一个基谐波和几个谐波,因此很难过滤掉所有的谐波。脉动能量主要集中在基谐波和二次谐波中,因此抑制脉动的主要成分可以大大降低液压系统的脉动水平[38]。

主动抑制技术主要集中在单一脉动频率抑制上,即在对管路系统中单一脉动频率的衰减效果非常好。然而,要找到整个管道的最佳安装点是很困难的,特别是对于大型液压系统,安装点的位置选择不好将直接影响到压力脉动的效果。对于泵源脉动频率在数百Hz范围内的主动液压系统,相关的主动控制系统需要高频、高分辨率的阀门,并具有可调的振荡阻尼。

4. 主被动联合控制技术

组合式主动和被动压力脉动衰减是一种新的方法,它结合了主动控制和被动控制的优点,使液压系统的流体脉动能在较宽的频率范围内予以消除。

2002年,KIM等[33][39]开发了一种主动/被动组合式压力脉动衰减系统。被动衰减器采用空腔结构消减压力脉动波,采用模糊算法控制伺服阀的动作,系统中部分频率的压力脉动由被动衰减器进行抑制,其余频率的压力脉动首先由遗传算法进行筛选,挑选出压力脉动较大的频率,采用主动控制技术进行抑制。2016年,英国巴斯大学的PAN等[40]提出了一种将主动阻尼器和被动控制阀相结合的流体泄漏控制混合方法,以解决液压管道中的流体泄漏问题,并进行了初步研究。2018年,PAN等[41]提出了一种将主动和被动相结合的抑制压力脉动的方法,并对其进行了详细研究。首先,在泵源下方安装无源软管以抑制高频噪声,然后采用自适应算法来生成参考和误差信号,并将信号输入数字信号高速处理器,并驱动压电陶瓷产生次级脉动波。试验结果表明,采用主被动结合的技术抑制管路中的压力脉动是一种很好的解决方案。

5. 压力脉动抑制技术的发展趋势

被动控制技术通常用于抑制中高频范围内的压力脉动,但在低频范围内效果较差。实践中主要是在管路中安装液压脉动衰减器,以安装阻抗复合型压力脉动衰减器为主。开发新型阻抗复合型压力脉动衰减器结构是被动控制的一个重要方面,随着更多新型材料的研发,新型阻抗复合型压力脉动衰减器将会往衰减频带更宽、结构更紧凑、可靠性更强的方向发展。

主动控制技术可以在0 Hz~1000 Hz的频率范围内对压力脉动进行有效衰减,但不同的衰减系统在频率范围和衰减效率上不同,衰减效果受到很多因素比如控制系统稳定性、控制精度、抗干扰能力等影响。主动控制具有可定制的参数,适用于波动条件苛刻和高功率要求,主动控制加入了电子控制技术以后使得控制系统具有自适应调节能力,这一特点使主动控制技术特别适用于多变工况的液压系统。但是主动控制的缺点也是非常明显的,由于需要从外界输入二次脉动波以抵消源脉动波,所以要求衰减系统对源脉动波的频率、幅度、相位等信息感知十分灵敏,使得主动控制系统的成本较高且能耗大;另一方面算法、控制电路的设计也非常重要,使得主动控制系统的设计难度比较大;而且目前并没有通用的主动控制系统适用于所有液压系统,主动控制系统目前属于一种非标设计,增加了设计的成本。随着算法的更新和各种控制元器件的精度提高以及成本的下降,主动控制系统标准化设计将成为主流,同时其成本也会大大降低。

主被动联合控制技术是一种新型的压力脉动衰减技术,目前研究较少,它结合了被动控制技术和主

动控制技术的优点, 具有通用和适应性强的特点, 尤其对长距离传输的液压系统的适应性更强。采用主动控制系统精准的消除低频的压力脉动, 采用压力脉动衰减器控制中高频处的压力脉动从而实现宽频段内压力脉动的消除, 主被动联合控制技术将是未来压力脉动抑制技术的一个新的发展方向。

基金项目

科技创新 2025 重大专项(宁波市重大科技任务公关项目) 2022Z065。

参考文献

- [1] 田舒. 一种矿用履带式升降车的液压系统设计[J]. 液压气动与密封, 2023, 43(4): 70-72.
- [2] 于灵杰, 杨建忠, 徐兆可, 陈世康. 民机液压管路压接参数研究及高压振动特性分析[J/OL]. 航空动力学报: 1-13. <https://doi.org/10.13224/j.cnki.jasp.20220786>, 2023-4-18.
- [3] 习毅, 李宝仁, 万步炎, 许靖伟. 串联囊式压力脉动衰减器的脉动抑制性能[J]. 中国机械工程, 2023, 34(8): 948-954.
- [4] 李永涛, 杨波, 木合塔尔·克力木. 液压系统流体脉动抑制方法综述[J]. 机械工程学报, 2022, 58(16): 344-359.
- [5] Wang, Y., Shen, T., Tan, C., Fu, J. and Guo, S. (2021) Research Status, Critical Technologies, and Development Trends of Hydraulic Pressure Pulsation Attenuator. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, **34**, Article No. 14. <https://doi.org/10.1186/s10033-021-00532-z>
- [6] 杨帆, 邓斌, 王宇强, 李志伟. 具有柔性衬里的压力脉动衰减器滤波特性[J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(1): 154-159.
- [7] 赵海霞, 张强, 史伟杰, 张永涛. 多个分支盲管衬里式压力脉动衰减器特性研究[J]. 噪声与振动控制, 2020, 40(3): 229-232.
- [8] 杨帆, 邓斌. 扩张室压力脉动衰减器声传播的有效性[J]. 西南交通大学学报, 2020, 55(5): 1117-1123.
- [9] Kela, L. (2009) Resonant Frequency of an Adjustable Helmholtz Resonator in a Hydraulic System. *Archive of Applied Mechanics*, **79**, 1115-1125. <https://doi.org/10.1007/s00419-008-0279-5>
- [10] Selamat, A. and Ji, Z.L. (2000) Circular Asymmetric Helmholtz Resonators. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **107**, 2360-2369. <https://doi.org/10.1121/1.428622>
- [11] 章寅. 液压系统压力脉动衰减器特性研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [12] Earnhart, N.E. and Cunefare, K.A. (2012) Compact Helmholtz Resonators for Hydraulic Systems. *International Journal of Fluid Power*, **13**, 41-50. <https://doi.org/10.1080/14399776.2012.10781045>
- [13] Kela, L. and Vähöja, P. (2009) Control of an Adjustable Helmholtz Resonator in a Low-Pressure Hydraulic System. *International Journal of Fluid Power*, **10**, 29-39. <https://doi.org/10.1080/14399776.2009.10780986>
- [14] Kojima, E. and Ichianagi, T. (1998) Development Research of New Types of Multiple Volume Resonators. In: Burrows, C.R. and Edge, K.A., Eds., *Bath Workshop on Power Transmission and Motion Control (PTMC 98)*, University of Bath, Bath, 193-206.
- [15] Guan, C. and Jiao, Z. (2012) Modeling and Optimal Design of 3 Degrees of Freedom Helmholtz Resonator in Hydraulic System. *Chinese Journal of Aeronautics*, **25**, 776-783. [https://doi.org/10.1016/S1000-9361\(11\)60444-5](https://doi.org/10.1016/S1000-9361(11)60444-5)
- [16] 杜润. 液压系统脉动衰减器的特性分析[D]: [博士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2010.
- [17] 田静. 微穿孔板和小孔喷注——马大猷教授对声学的特殊贡献[J]. 声学学报, 2015, 40(2): 129-133.
- [18] 王震. 基于微穿孔板吸声结构理论的复合微穿孔管消声器的设计及优化[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
- [19] 曾祥荣, 张建成. 多孔同心式液压消声器的研究[J]. 机床与液压, 1990(3): 41-43.
- [20] 周星德, 姜冬菊. 结构振动主动控制[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [21] 杨帆. 扩张室液压脉动衰减器的插入损失和传递损失研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2020.
- [22] 贺尚红, 王雪芝, 何志勇, 等. 薄板振动式液压脉动衰减器滤波特性[J]. 机械工程学报, 2013, 49(4): 148-153.
- [23] 贺尚红, 桑青青, 贺华波, 何志勇. 基于机械吸振原理的多自由度薄板振动式脉动衰减器滤波特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(5): 1457-1462.
- [24] 贺尚红, 贺华波, 何志勇, 等. 薄板振动式广谱流体脉动衰减器实验研究[J]. 液压与气动, 2013(6): 24-27.

- [25] 贺尚红, 叶阿敏, 王文. 复合式压力脉动衰减器衰减特性[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2015, 12(3): 91-97+109.
- [26] 陈杰. 基于质量-弹簧振子系统的液压脉动衰减器特性研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [27] 王守兵. 柔性膜片式流体滤波器的研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 长沙理工大学, 2012.
- [28] 邢科礼, 葛思华, 丁崇生, 何钺. 新型串联囊式蓄能器对油源压力脉动影响的试验研究[J]. 机床与液压, 1998(1): 39-40.
- [29] 季晓伟. 流体脉动的入流式主动控制[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [30] Kojima, E., Shinada, M. and Shinbo, M. (1990) Development of an Active Attenuator for Pressure Pulsation in Liquid Piping Systems; 1st Report, a Real Time Measuring Method of Progressive Wave in a Pipe. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series B*, **56**, 2937-2944. <https://doi.org/10.1299/kikaib.56.2937>
- [31] Yamaoka, T. and Kojima, E. (1996) Development of an Active-Adaptive Attenuator for Pressure Pulsation in Liquid Piping Systems. *Proceedings of the JFPS International Symposium on Fluid Power*, **1996**, 449-454. <https://doi.org/10.5739/isfp.1996.449>
- [32] Yokata, S., Somada, H. and Yamaguchi, H. (1996) Study on an Active Accumulator: Active Control of High-Frequency Pulsation of Flow Rate in Hydraulic Systems. *JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering*, **39**, 119-124. <https://doi.org/10.1299/jsmeb.39.119>
- [33] Kim, D.H., Park, J.W., Lee, G.S. and Lee, K.I. (2002) Active Impact Control System Design with a Hydraulic Damper. *Journal of Sound and Vibration*, **250**, 485-501. <https://doi.org/10.1006/jsvi.2001.3924>
- [34] Wang, L. and Johnston, D.N. (2008) Adaptive Attenuation of Narrow Band Fluid Borne Noise in A simple Hydraulic System. *Bath/ASME Symposium on Fluid Power and Motion Control 2008*, Bath, 10-12 September 2008, 357-368.
- [35] 邢科礼, 葛思华, 丁崇生. 基于神经网络的有源压力脉动衰减的试验研究[J]. 液压气动与密封, 2001(2): 2-4.
- [36] Jiao, Z., Chen, P., Hua, Q. and Wang, S. (2003) Adaptive Vibration Active Control of Fluid Pressure Pulsations. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, **217**, 311-318. <https://doi.org/10.1177/095965180321700407>
- [37] Guan, C., Jiao, Z., Wu, S., Shang, Y. and Zheng, F. (2014) Active Control of Fluid Pressure Pulsation in Hydraulic Pipe System by Bilateral-Overflow of Piezoelectric Direct-Drive Slide Valve. *Journal of Dynamic Systems Measurement & Control*, **136**, Article ID: 031025. <https://doi.org/10.1115/1.4026343>
- [38] 陈季萍. 降低液压系统压力脉动方法的研究[J]. 煤矿机械, 2006, 27(6): 955-957.
- [39] Pan, M. (2017) Adaptive Control of a Piezoelectric Valve for Fluid-Borne Noise Reduction in a Hydraulic Buck Converter. *Journal of Dynamic Systems Measurement & Control*, **139**, Article ID: 081007. <https://doi.org/10.1115/1.4035613>
- [40] Pan, M., Johnston, N. and Plummer, A. (2016) Hybrid Fluid-Borne Noise Control in Fluid-Filled Pipelines. *Journal of Physics: Conference Series*, **744**, Article ID: 12016. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/744/1/012016>
- [41] Pan, M., Ding, B., Yuan, C., Zou, J. and Yang, H. (2018) Novel Integrated Control of Fluid-Borne Noise in Hydraulic Systems. *BATH/ASME 2018 Symposium on Fluid Power and Motion Control*, Bath, 12-14 September 2018. <https://doi.org/10.1115/FPMC2018-8828>