

坦克装甲车辆 自适应悬挂系统

Tank Armored Vehicle Adaptive Suspension System

张进秋 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

014039245

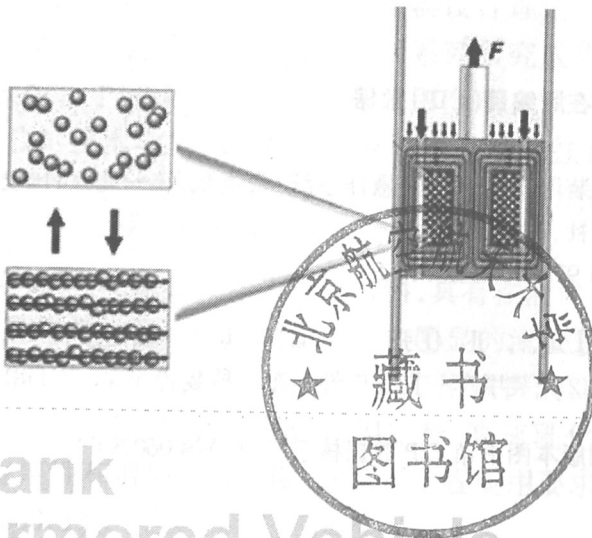
TJ811

15

内容简介

张进秋 著

坦克装甲车辆 自适应悬挂系统



Tank
Armored Vehicle
Adaptive Suspension
System

TJ811
15

国防工业出版社



北航

C1726693

内 容 简 介

本书系统地总结和阐述了坦克装甲车辆自适应悬挂系统设计的相关理论及关键技术,重点是基于磁流变阻尼减振器的变阻尼振动控制理论与控制策略。主要内容包括:坦克装甲车辆悬挂系统动力学建模及工程简化;坦克装甲车用磁流变液的制备、性能测试及试验;磁流变减振器设计及优化;非人工越野路面反应谱采集与分析;权矩阵自适应最优控制算法及模型参考自适应预估控制算法;坦克装甲车辆悬挂系统仿真分析、台架试验及实车试验等内容。

本书可作为从事坦克装甲车辆论证与研制、机械与车辆工程、智能材料与结构振动控制等相关领域的科学研究人员、工程技术人员的参考资料,也可作为高等院校教师和研究生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

坦克装甲车辆自适应悬挂系统/张进秋著. —北京:国防工业出版社,2014.4

ISBN 978-7-118-09302-5

I. ①坦... II. ①张... III. ①坦克—自适应性—车悬挂装置②—装甲车—自适应性—车悬挂装置 IV. ①TJ811

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 060791 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 13¼ 字数 258 千字

2014 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 69.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前言

振动是引起坦克装甲车辆技术状态变化、导致各类故障出现的主要因素。悬挂系统振动控制,对提高坦克装甲车辆的整体及车载部件的可靠性、行驶平顺性及战场机动性都具有重要意义,而且其相关技术在民用领域也有十分广阔的应用前景。

自 1998 年起,我们科研团队开始探索以磁流变液智能材料为基础的高速履带车辆变阻尼悬挂系统振动控制,在“十五”“十一五”期间开始承担相应的国防预研课题,在高性能磁流变液材料研制、变阻尼减振器设计理论、变阻尼振动控制策略及坦克装甲车辆自适应悬挂系统等方面取得了系列研究成果,提出了采用磁流变可调阻尼减振器实现基于磁流变阻尼的坦克装甲车辆主动/半主动悬挂系统的设计思路(2000 年“测试技术学报”论文:“履带车辆主动悬挂系统磁流变减振器研究”;2003 年“地震工程与工程振动”论文:“半主动悬挂系统磁流变减振器的阻尼力实验与分析”),相关研究工作主要表现在以下几个方面。

关于磁流变液材料:磁流变液作为智能材料,具有在液体和固体之间进行快速可逆转变的特性,即在外加磁场的作用下能产生明显的流变效应,可与计算机结合实现阻尼实时控制。基于新一代高速履带车辆专用减振液,改进磁流变液制备工艺与流程,并采用表面包覆、超声波分散、高温定型、高速乳化等系列技术,提高了磁流变液的沉降稳定性和剪切屈服强度,达到了工程应用要求,已获得国防发明专利(ZL 200710082880.1)。

关于磁流变阻尼减振器:基于 Bingham 模型,对剪切阀式磁流变减振器的阻尼力进行了综合分析,并根据试验得到了磁流变减振器黏滞阻尼与动力黏度、活塞间隙与总阻尼力以及活塞间隙与调整系数的关系,得到了活塞间隙的取值范围及依据。研制了叶片式磁流变减振器以及筒式磁流变减振器。结合叶片式减振器结构特点,先后设计了直通式矩形节流阀结构、弧形节流阀结构以及环形节流阀结构等,相关技术已获得国防发明专利(ZL 200710082881.6)。针对筒式减振器典型结构,先后研制了弹性元件控制的节流阀结构、长孔节流阀结构、渐开线矩形孔节流阀结构以及盘形节流阀结构。筒式磁流变减振器采用嵌入式(BIT)布置温度传感器,以盘形节流阀结构为核心部件的筒式磁流变减振器台架试验表明,其阻尼力可调系数达到 436%,且具有“fail - safe”特性。

关于权矩阵自适应 LQG 控制算法:路面对车辆的激励是一个随机过程,对于车辆悬挂系统,控制目标是使车体垂直加速度、悬挂动行程尽可能小。LQG 最优控

制模型是一个典型的最优控制模型,能很好地解决数据采集系统受环境噪声干扰以及某些状态变量无法准确测量时最优控制力设计问题。但是,由于LQG最优控制增益反馈为固定值,一旦确定并写入控制器内后就不能更改,当路面输入和车辆载荷发生改变时,这个算法所确定的输出值控制力将不再最优或次优;相反,它还可能作为新的扰动力干扰系统,恶化减振效果。为此,提出了基于权系数自修正的LQG自适应控制算法,即根据路面激励和车体状态的变化,建立权矩阵实时修正模型,实时调整和校正权矩阵,通过LQG模型中Q/R矩阵的权矩阵自修正,改变反馈增益矩阵,使LQG模型能同时兼顾悬挂系统动行程和车体加速度,在降低对悬挂系统耗能要求的同时,增强了控制算法对不同路面的自适应性。经台架试验证明,改善了自适应悬挂系统的控制效果。

关于自适应悬挂系统:高速履带车辆自适应悬挂系统主要包括传感器系统、车辆振动状态信息监测系统、控制器、PFM控制电源、磁流变阻尼器等6部分。通过在悬挂系统半主动振动控制试验台进行的调试,以及应用不同控制算法对悬挂系统进行半主动控制振动的试验表明:自适应控制系统运行可靠、时滞小;采用权矩阵自适应LQG控制算法能有效降低车体振动加速度。控制器实时采集悬挂系统测点加速度、位移、力和温度等状态参数,完成模型实时解算,实现对系统的闭环自适应控制。其硬件模块满足CAN总线传输及电磁兼容性要求,软件部分实现了on-off控制、权矩阵自适应LQG最优控制等多种控制算法。控制电源采用双线性反馈控制、高效率的能量转换、零输出DC/DC变换和PFM开关控制等一系列技术,提高了程控电源的响应速度及控制精度。全车传感器布设采用防电磁干扰、防颤动、前端信号放大、阻抗变换等技术,实现信号测点准确、响应速度快,保证分布式连接可靠、运行安全。以××式装甲车辆为实验平台进行的实车道路试验表明,车辆乘坐舒适性得到明显提高。

上述研究成果是我们科研团队多年共同努力探索的结果,本书对上述部分研究成果进行了整理并加以出版。在我们科研团队中我要特别提到冯占宗博士、王洪涛博士、张建博士、高永强博士对本书所述研究成果作出的突出贡献,同时也要提到我的在读博士研究生贾进锋、岳杰、彭志召、张磊、黄大山以及我的同事李国强教授、刘义乐副教授、毕占东讲师、刘峻岩讲师、张咏清讲师,他们在本书的编写出版过程中都作出了很大的贡献。此外,冯占宗博士对书稿进行了整理与修改,博士研究生彭志召、张磊、黄大山、岳杰对全书进行了编辑与校对,在此一并表示感谢。

由于时间仓促,书中疏漏错误之处在所难免,敬请读者批评指正。

张进秋
2013年9月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 坦克装甲车辆先进悬挂系统军事需求	1
第二节 坦克装甲车辆悬挂系统及减振器主要类别	3
第三节 坦克装甲车辆先进悬挂系统振动控制策略	8
第二章 磁流变阻尼减振器	13
第一节 磁流变液的组分特性及流变机理	13
第二节 磁流变液特性试验装置和试验原理	19
第三节 磁流变液特性试验及结果分析	25
第四节 磁流变减振器的工作模式及设计原则	27
第五节 基于 Bingham 模型的盘形缝隙式 MRD 内特性分析	30
第三章 坦克装甲车辆变阻尼悬挂系统	40
第一节 车辆平顺性评价及阻尼对被动隔振的影响	40
第二节 悬挂子系统动力学响应分析	47
第三节 半主动悬挂系统	54
第四节 天棚阻尼控制算法	56
第四章 坦克装甲车辆悬挂系统动力学模型	61
第一节 坦克装甲车辆悬挂系统振动控制影响因素	62
第二节 坦克装甲车辆悬挂系统整车动力学模型	64
第三节 变阻尼特性的影响分析及整车动力学模型求解	71
第五章 坦克装甲车辆悬挂系统动力学简化模型	75
第一节 独立悬挂振动系统动力学模型的简化	75

第二节	半车悬挂振动系统动力学模型的简化	76
第三节	整车悬挂振动系统动力学模型的简化	84
第四节	悬挂系统减振分析及主动控制模型	90
第六章	越野路面反应谱采集与分析	100
第一节	坦克装甲车辆路面反应谱测试方法	100
第二节	路面谱的测试方案与数据处理方法	103
第三节	典型越野路面测量与谱分析	108
第七章	坦克装甲车辆悬挂系统自适应控制算法	138
第一节	经典 LQG 控制算法	139
第二节	权矩阵自适应最优控制算法	141
第三节	模型参考自适应控制算法	148
第四节	时滞对自适应悬挂系统的影响	156
第五节	模型参考自适应预估控制算法	160
第八章	不同控制算法的仿真分析、台架验证与实车道路试验	171
第一节	不同控制算法仿真分析	171
第二节	不同控制算法台架验证	176
第三节	实车道路试验	188
缩略语	193
符号对照表	194
参考文献	196

第一节 坦克装甲车辆先进悬挂系统军事需求

未来战争对坦克装甲车辆先进悬挂系统提出了更高的要求,不仅对适应战场地理地形的广域性、多用途武器系统作战平台射击工况的大跨度性提出了较高的要求,而且要求对搭载平台能提供尽可能高的越野机动性及尽可能好的乘坐舒适性。针对坦克装甲车辆等野战机动平台采用传统悬挂系统并不能满足复杂路况条件下的通过性、运动中的高稳定性以及越野行驶的高机动性等要求,开展以提高多路况适应性、行进间高平稳性及越野高机动性为目标的先进悬挂系统研究尤为必要。为了突破传统设计思想,运用新的设计理念,美军在2010年《陆军技术基础技术总体规划》所列出的14项关键新技术中,其中就有先进悬挂技术,主要包括主动、半主动悬挂技术等可控悬挂技术,目标是使车身平稳性提高30%、车辆机动性提高50%。目前,美国有近20家研究机构承担先进悬挂技术研究任务,研制了磁流变半主动悬挂、电磁悬挂等样机,并在多种车型上进行道路试验验证。

先进悬挂系统的军事需求具体主要表现在以下几个方面。

一、适应多用途越野作战平台平稳性的需求

坦克装甲车辆作为陆军最重要的地面武器平台,不仅要在进攻作战行动中为乘员提供足够的防护力,还要能够充分发挥车载武器的效能。车辆行驶平顺性、车辆乘坐舒适性、行进间有效操作武器的影响越来越显著。研制先进悬挂系统,可以最大限度地降低路面环境和平台自身的振动干扰,提高作战平台在各种使用环境中的平稳性。

二、适应复杂多变战场地形条件的需要

坦克装甲车辆的悬挂系统通常是针对典型路面设计的,一旦设计定型,悬挂系

统的特性便被固定下来,不能随行驶工况而灵活改变。而现代战争的不确定性和战场的不确定性则要求坦克装甲车辆的悬挂系统能够适应复杂多变的战场地理环境,即需要一种能够适应地形变化的可控式悬挂系统。先进悬挂系统能够在车辆行驶过程中灵活适应路况和车况的变化,保持车辆的最佳乘坐舒适性和操纵稳定性。

三、提高坦克装甲车辆越野机动能力的需求

坦克装甲车辆在现代战争中所面临的威胁有增无减,要求它们具有很高的行驶速度和很强的突击能力,能够灵活机动地摆脱各种威胁,要求能够长途奔袭和迅速占领战略要地。基于此,各国均致力于进一步提高坦克的行驶速度和越野机动能力。一方面,使用大功率发动机提高车辆的动力性,另一方面,通过研制先进悬挂系统,提高各种路况条件下的行驶平顺性,减弱车体剧烈振动对车速提高的限制,提高坦克装甲车辆的战场越野机动性。

四、改善坦克装甲车辆乘坐舒适性的需要

乘坐舒适性是战斗力的组成部分、是制约乘员战斗力发挥的重要因素。坦克装甲车辆的乘坐舒适性在很大程度上取决于悬挂系统对车外各种冲击和振动衰减效果。从人体工程学的角度,最大行驶速度不但受动力性的限制,更受乘坐舒适性的制约。采用先进的悬挂系统,坦克能够平稳行驶,乘员就能够平稳跟踪、瞄准目标;就能够充分利用车辆的动力性,高度发挥车辆的机动性和灵活性,使坦克能够在战场上发挥更大的作用。采用先进悬挂系统,按加权加速度均方根值评价车辆行驶平顺性,相对传统的被动悬挂系统,采用先进悬挂系统的车身振动加速度均方根值可减小 20% 以上,车辆平均越野时速度可提高 20% 以上。

五、提高车载武器系统作战效能的需求

不仅是坦克装甲车辆,自行火炮或遥控武器站等武器平台也朝着精确打击的方向发展,不但要求在车辆静止时有较高的射击精度,还要求有较好的行进间射击精度。对于传统的被动悬挂而言,若车辆悬挂偏软,后坐力激起的车体振动无法被尽快地衰减,对射击精度和射速影响很大;若车辆悬挂偏硬,虽有利于提高射击精度和射速,却对乘坐舒适性不利,会恶化人机环境,对保持乘员的作战效能产生负面影响。对于行进间射击而言,如果无法有效隔离路面对车体的激励,那么武器系统的稳定性就难以单纯靠火控系统来维持,行进间射击精度就更难以保证。研究先进悬挂系统,实现各种路况和射击条件下对路面激励的最佳隔离,乘员就能够平

稳跟踪目标、瞄准目标,确保武器系统的射击效果。采用先进悬挂系统可使炮口中心振动位移减少 20% 以上,振动速度减少 30% 以上。

六、减少装备能耗降低保障难度的需求

现代战争动用大批大功率车辆,战时油料保障问题日益突出。节能必将成为坦克装甲车辆设计中需要重点考虑的问题之一。先进悬挂系统可以有效衰减车体振动,但随之带来了能量消耗大的问题,尤其是主动悬挂系统需要大量的外部能量输入作为代价,能耗问题成为限制主动/半主动悬挂技术应用的重要瓶颈之一。能量回馈是降低能耗的一个重要手段,馈能型悬挂可以在自供能式主动控制、馈能式半主动控制、馈能式减振等模式工作,特别是坦克装甲车辆,行驶路况恶劣,悬挂系统振动剧烈,加之车辆吨位重,能量回收潜力也相应增大。据相关文献报道,按振动能量消耗平均可回收率 3% 计算,坦克装甲车辆每百千米可节省约 9L 柴油。所以,馈能悬挂系统可以降低车辆的整体燃油消耗,有利于提高燃油的经济性,减少战场消耗,降低保障难度。

第二节 坦克装甲车辆悬挂系统及减振器主要类别

坦克装甲车辆悬挂系统是将车体与负重轮相连接的所有机件的总称,主要包括弹性元件、阻尼元件、限制器以及平衡肘等附件。坦克装甲车辆的行驶路面 80% 属于越野路面。当车辆高速行驶时,负重轮被迫沿路面随机起伏,所受冲击高达 20 ~ 50g。为了隔离冲击,车体与负重轮之间采用弹性元件吸收冲击能量,以免造成车内机件损坏和人员损伤。

弹性元件并非耗能元件,在吸收冲击能量后需要释放能量,引起车体不间断振动。车体振动不但影响乘员对车载武器、仪器操作的快速准确性,如搜索目标、装填弹药,而且还使乘员易于疲劳而降低战斗力。

为了尽快耗散车体的振动能量,必须增加阻尼元件,即减振器。

为了防止弹性元件变形过大而损坏,悬挂系统还装有限制器。

此外,坦克装甲车辆悬挂系统还包括平衡肘、连杆等导向元件,将车体、弹性元件、减振器、负重轮连接为一个系统。

现代坦克装甲车辆为适应越野性能的要求,悬挂技术取得了长足进展,液气悬挂系统、变阻尼半主动悬挂系统、主动悬挂系统等多种先进悬挂系统应运而生。

一、坦克装甲车辆悬挂系统主要类别

1. 被动悬挂

被动悬挂是相对后期出现的主动悬挂而言的,具有结构简单、可靠性高、不需

要能源等特点,应用最广泛。被动悬挂主要代表有:一是扭杆弹簧与筒式减振器结合的被动悬挂系统,如美国的 M-46、M-48 坦克, M113 装甲运兵车和苏联 T-80 坦克、BMII-3 步兵战车等;二是扭杆弹簧与叶片式减振器结合的被动悬挂系统,如美国的 M1 坦克、苏联的 T-54、T-72、T-90 坦克等;三是螺旋弹簧与叶片式减振器结合的被动悬挂系统,如梅卡瓦坦克等;四是扭杆弹簧与摩擦片式减振器结合的被动悬挂系统,如德国“豹”-2 坦克等。

油气悬挂是被动悬挂发展的高级阶段,其弹性元件采用氮气,油液作传力或阻尼介质,可实现变刚度及车底距地高度可调,力学特性也更符合悬挂系统对平顺性的需要,因此得到广泛应用。瑞典 Strv103 系列坦克是最早采用液气悬挂的坦克之一。意大利“半人马座”轮式装甲车也采用液气悬挂,最大时速 108km/h;瑞士“锯脂鲤(Piranha)”装甲车有 4×4、6×6 和 10×10 等多种轮式液气悬挂,日本 74 式坦克和苏联 BMII 空降车也采用液气悬挂。英国的“挑战者”采用单元式液气悬挂装置,日本 90 式坦克采用液气悬挂与摩擦减振器相结合的混合模式。法国对勒克莱尔主战坦克进行改进,采用“肘内”式液气悬挂装置。

除了对弹性元件或阻尼元件的性能进行改进外,由于提高负重轮最大动行程可降低悬挂击穿概率,提高车辆平顺性,因而可增加越野速度。典型的有美国 M1A1 坦克和 M2 布兰德利步兵战车。但是,随着动行程的增加,车辆质心和高度同时增加,对车辆的操纵性和战场生存能力产生负面影响。

2. 主动/半主动悬挂

新型坦克装甲车辆的悬挂系统多采用不同形式的主动/半主动悬挂,在提高车辆越野时速、平顺性和操纵稳定性方面效果显著。尽管这些新型悬挂存在一些问题,但是研究结果证明主动/半主动悬挂已经成为未来坦克装甲车辆悬挂系统的重要发展方向。

按振动控制方式分类,悬挂系统可分为图 1-1 所示的被动悬挂系统、主动悬挂系统和半主动悬挂系统三种典型结构。其特性见表 1-1。

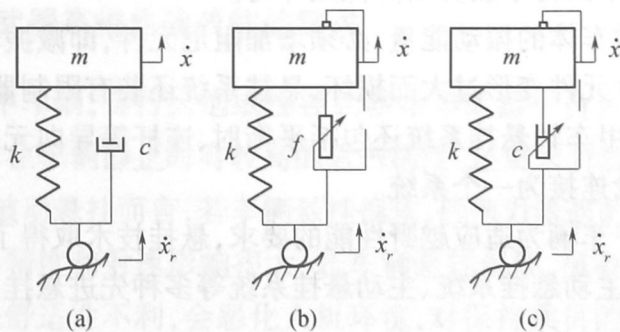


图 1-1 坦克装甲车辆典型悬挂系统类别

(a) 被动悬挂系统; (b) 主动悬挂系统; (c) 半主动悬挂系统。

表 1-1 悬挂系统分类及指标特性对比

	被动	主动		半主动	
调节元件	被动减振器	液压系统和串联软弹簧	液压系统和串联硬弹簧	可调阻尼减振器	可调阻尼减振器
作用原理	阻尼力不可调	调节车体与负重轮间作用力	调节车体与负重轮间作用力	阻尼力有级可调	阻尼力连续可调
控制	无	电液或自动	电液或自动	手动自动	电液自动
频响宽度	很窄	3 ~ 6Hz	> 15Hz	> 10Hz	> 20Hz
能量消耗	最小	大	很大	很小	很小
横向特性 (改善)	最小	大	大	小	中
垂直特性 (改善)	最小	中	大	小	中
成本	最小	大	大	小	中

根据控制力执行元件的不同,悬挂系统还可分为刚度可调悬挂和阻尼可调悬挂。刚度可调悬挂主要以油气悬挂为基础,可实现车高可调、变刚度、变阻尼,具有非线性变刚度、非线性变阻尼和单位储能比大等特点。其局限性也较为明显,包括结构复杂、成本高、防护性差,若将油气悬挂的高压蓄能器安装在车体内,还具有对乘员二次伤害的潜在危险。阻尼可调悬挂主要有节流面积可调变阻尼、电磁流变液智能材料可调变阻尼、馈能复合可调变阻尼等几种形式。

俄军车辆设计局将 T-72B 悬挂系统改装成可控液气悬挂。试验结果表明,与原型车相比,其越野速度和稳定性都得到大幅提高。其中,可控液气悬挂装置将车辆振动、纵向摇动及横向摆动减小至 1/8,从而有效地消除乘员的紧张和疲劳,提高战斗力。另外,这套系统能在不平的地形上实时调整车姿和车高,不仅扩大了武器平台发射阵地的可选范围,而且还可以缩短武器平台的暴露时间。俄第四代坦克 T-95 也采用一种可控液气悬挂装置,在每个负重轮处都装有一个位移传感器和一个加速度传感器,在车辆重心附近还装有纵向加速度和横向加速度传感器。这些传感器可随时监测车辆运动状况,并根据需要下达指令,以保持车身最佳姿态,行驶平顺性很好。

肘内油气弹簧悬挂,由装于平衡肘内的液气弹性元件、阻尼阀、车姿调节阀、油缸闭锁阀等车体与平衡肘之间的连接件组成,具有尺寸小、不占车内空间、不易被弹片损坏等优点。

美军坦克机动车研发及工程中心(TARDEC)先后在 M1A1、M551 及 M2 等车

型进行肘内比例阀—气体变阻尼半主动悬挂道路试验。20世纪90年代初,美军应用电流变半主动悬挂系统试验,但因电流变减振器工作电压过高等问题,2000年后逐步转向磁流变半主动悬挂系统研究,并先后在10多种车上进行试验,包括HMMWV、FMTV、Stryker、FTTS、M915和其他实车演示平台。其中,2005年Stryker装甲运兵车样车道路实验表明,由于乘坐舒适性改善,6W平均吸功标准下样车越野时速由38km/h提高到50km/h,增幅达72%。

馈能悬挂是主动/半主动悬挂技术发展的一个分支,其最大特点是在实现悬挂半主动控制的过程中将车体振动机械能回收再利用。馈能型悬挂是在悬挂系统中增加能量回收装置,将车体的振动能量转化为可以再利用的电能或液(气)压能,馈能型悬挂系统对坦克装甲车辆而言,控制振动提高车辆平顺性仍是馈能悬挂的主要目标。由于兼有振动控制与节能两个优点,馈能悬挂将会替代目前技术较为成熟的半主动悬挂,因此研究馈能悬挂具有跨越发展的意义。

目前的主动悬挂系统可以有效衰减车体振动,大幅提高车辆的平顺性、乘坐舒适性,但要以消耗大量外部能量为代价。同时,装甲车辆行驶过程中不平路面传递给车体的冲击载荷和振动能量,是造成车辆结构损坏、影响乘坐舒适性和机动性能的主要因素。因此,如果能够有效回收利用振动能量并加以管理和控制,不仅可以实现悬挂特性可调,而且可以为车辆提供一定的能源补充。尤其是坦克装甲车辆,行驶路况恶劣,悬挂系统振动剧烈,能量回收潜力更大。

二、坦克装甲车辆减振器主要类别

1. 按结构形式划分

坦克装甲车用减振器按阻尼力形成的机理分为机械摩擦式和机械液压式两种类型。液压减振器按结构又可分为筒式和叶片式等类型。

机械摩擦式减振器是利用摩擦力将机械能转化为热能的阻尼元件,典型用例为20世纪70年代德国“豹”-2坦克,结构简单、工作可靠,但在负重轮相对车体运动方向换向时有冲击问题。

筒式减振器的优点是结构简单,制造工艺性好,密封性好,工作性能稳定,在适当的外形尺寸和结构条件下具有较高的耗功能力,缺点是外形不够规整,通过泥泞、沼泽地带容易积泥,防护性差。

叶片式减振器的优点是镶嵌在侧甲板内部,不占用车内空间,同时有利于传导散热,减振器还能受到负重轮的保护。缺点是减振器的叶片与壳体之间、叶片轴与隔板之间有较长的缝隙,内部渗漏较多,阻尼力散布大,黏温特性差。

与筒式减振器相比,叶片式减振器的减振效果较差,是在安装空间不足的情况

下不得已的选择。

2. 按阻尼调节形式划分

减振器按耗能形式划分,主要有被动减振器和阻尼可调减振器,阻尼可调减振器又分为阻尼力分级可调减振器和阻尼力连续可调减振器。阻尼可调减振器主要有调节节流口面积的减振器、干摩擦阻尼可调减振器和磁流变液减振器。调节节流口面积的减振器又分为机械阻尼可调减振器、气体控制阻尼可调减振器、电机控制节流口阻尼可调减振器以及电液阀控制节流口阻尼可调减振器等类型。

磁流变液减振器(MRD)由于阻尼力连续可调,近年来成为研究热点。相对于电流变减振器,磁流变液减振器具有体积小、出力大、能耗低等优点,相对于调节节流面积的比例阀液压减振器,具有响应快、易实现无级调节等优点,应用前景看好。1995年,美国 Lord 公司推出筒式 MRD,如图 1-2 所示,它使车辆在道路上行驶速度由 56km/h 提高到 96km/h。

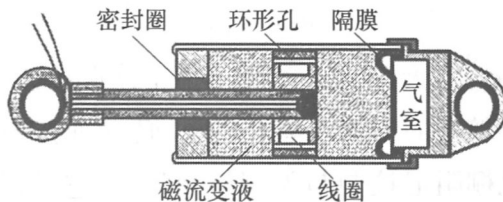


图 1-2 磁流变液筒式减振器

2004年,内华达大学研制出应用于军用“悍马”车的第二代 MRD,电磁线圈耗能仅 31.5W,具有自动防失效功能。台架试验结果表明,在压缩阶段,当活塞运动速度为 0.0314m/s 时,阻尼力可调倍数达到 10 以上,工作温度可达 $-40 \sim 150^{\circ}\text{C}$ 。

被动耗能减振器、阻尼分级可调减振器和阻尼连续可调减振器的阻尼力变化范围如图 1-3 所示。

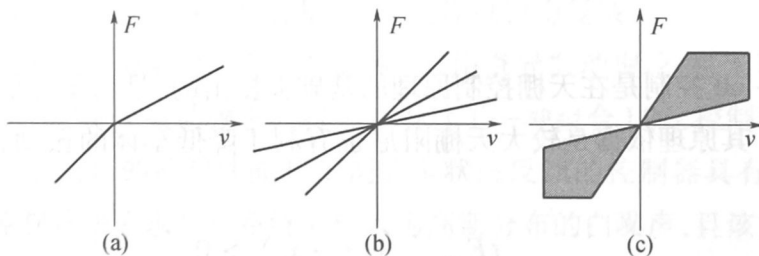


图 1-3 三类减振器阻尼力变化范围

(a) 被动耗能减振器; (b) 阻尼分级可调减振器; (c) 阻尼连续可调减振器。

第三节 坦克装甲车辆先进悬挂系统振动控制策略

控制策略用于确定控制力的大小和出力时机。控制策略与执行元件共同决定了可控悬挂的控制效果、经济性和可靠性。按照可控悬挂的结构形式,通常将控制策略划分为主动控制与半主动控制,但多数主动/半主动控制策略并无原理区别,对主动控制策略加以限定,即可实现半主动控制。

一、天棚控制、地棚控制及混合控制

天棚(Sky - Hook)控制是 Kano PPD. 等人于 1974 年提出的经典控制方法,是工程化应用最为普遍的一种控制算法,具有运算简便、所需状态量少、易量测等优点。其原理是令悬挂系统中执行元件的出力时机和大小追踪假想中的天棚减振器的出力时机和大小。

$$u = c_{\text{sky}} \dot{x} \quad (1-1)$$

式中: u 为主动控制力, c_{sky} 为天棚阻尼系数, \dot{x} 为车体振动速度。

理想的天棚可获得较好的车辆乘坐舒适性,但不利于车辆的操纵稳定性,因此提出地棚阻尼控制。地棚阻尼控制与天棚控制相反,它较好地解决悬挂的稳定性问题,但不利于车辆的平顺性。为了综合运用“天棚”和“地棚”阻尼控制的优点,出现了“天棚”和“地棚”相结合的混合阻尼控制算法,混合控制的阻尼力表示为

$$F_{\text{integration}} = \alpha_{\text{integration}} F_{\text{sky}} + (1 - \alpha_{\text{integration}}) F_{\text{gnd}} \quad (1-2)$$

式中: $\alpha_{\text{integration}}$ 为调节因子,适当选取调节因子,可以兼顾悬挂系统的平顺性和操纵稳定性; F_{sky} 为天棚阻尼力; F_{gnd} 为地棚阻尼力。

研究表明,混合阻尼控制效果受悬置质量、行驶路面等因素变化的影响很大,适应外界的能力不强,必须通过对调节因子的选择兼顾行驶的平顺性和操纵稳定性。

天棚 on - off 控制是在天棚控制原理的基础上提出的,是为了降低系统对执行元件的要求。其原理依据是较大天棚阻尼也有利于降低车体的振动,其数学表达如下

$$u_s = \begin{cases} F_{\text{max}}, & \dot{x}(\dot{x} - \dot{x}_0) > 0 \\ 0, & \dot{x}(\dot{x} - \dot{x}_0) \leq 0 \end{cases} \quad (1-3)$$

式中: \dot{x} 是车体振动速度, $\dot{x} - \dot{x}_0$ 是车体与车轮之间的相对速度, F_{max} 为变阻尼减振器可实现的最大阻尼力。

二、相对控制

相对控制是由 Rakheja S. 和 Sankar S. 在 1985 年提出的一种控制律,表达式如下

$$u_s = \begin{cases} 0, & (x - x_0)(\dot{x} - \dot{x}_0) > 0 \\ -k(x - x_0), & (x - x_0)(\dot{x} - \dot{x}_0) \leq 0 \end{cases} \quad (1-4)$$

式中:参数含义与式(1-3)相同。其意义为:弹性力与阻尼力方向相同时,阻尼力有增加车体振动加速度的趋势,所以令半主动动力最小;反之,令阻尼力与弹性力大小相等,方向相反,力求抵消弹性力。相对控制在高于共振频率时,能够提供很好的隔离性能;但在共振频率上,则具有高的加速度均方根值。一些学者对式(1-4)控制律进行了修改,增加了一个并联的被动式减振器,其控制律变为

$$u_s = \begin{cases} 0, & (x - x_0)(\dot{x} - \dot{x}_0) > 0 \\ -k(x - x_0) + c_0(\dot{x} - \dot{x}_0), & (x - x_0)(\dot{x} - \dot{x}_0) \leq 0 \end{cases} \quad (1-5)$$

增加的被动式减振器的作用是:减小共振频率附近的加速度均方根值,但使高于此频率的加速度均方根值有所增加。

三、最优控制

线性二次型最优控制(Linear Quadratic Optimal Control, LQR)/线性二次型高斯最优控制(Linear Quadratic Gaussian Optimal Control, LQG)算法因反馈控制律能用解析形式表示,而且有较成熟的计算程序可供参考,因此 LQR、LQG 最优控制在车辆工程领域研究较多。事实上,对于车辆悬挂系统,控制目标是使车体垂直加速度、悬挂动行程尽可能小。路面对车辆的激励是一个随机过程,可处理成高斯白噪声输入。因此,该数学模型恰是一个典型的最优控制模型。但这种控制方法需要精确的数学模型,量测较多的状态量,计算过程也较为复杂。

Beheshti 等人考虑到外界扰动的影响,采用奇异振动理论,基于车辆快慢两种模式(车轮频率和车体振动频率),提出并设计了一种组合 LQG 控制器。数字仿真结果表明,组合 LQG 的控制性能和车辆的全状态反馈的控制器具有相当的性能。另外,LQG 控制算法要求受控系统的输入为高斯分布的白噪声,且该方法设计出的反馈值是在一定路面条件下求得的,路面输入改变后,该反馈值就不是最优解。由于路面不平度输入难于测量,利用状态观测器还无法准确估计路面输入,目前将其应用于实车需要进行更深入的理论研究。

如前所述,最优控制可实现在动行程约束下,使车辆悬挂系统平顺性、操纵稳

定性及能耗等综合性能达到最优。为跟踪主动控制力,同时考虑到基于变阻尼原理的执行元件无法实现主动力,Hrovat 建立了如下限界最优半主动控制律

$$u_s = \begin{cases} c_0(\dot{x} - \dot{x}_0) + f_{y\max} \operatorname{sgn}(\dot{x} - \dot{x}_0), & u(\dot{x} - \dot{x}_0) < 0 \text{ 且 } |u| > u_{\max} \\ |u| \operatorname{sgn}(\dot{x} - \dot{x}_0), & u(\dot{x} - \dot{x}_0) < 0 \text{ 且 } |u| < u_{\max} \\ c_0(\dot{x} - \dot{x}_0) + f_{y\min} \operatorname{sgn}(\dot{x} - \dot{x}_0), & u(\dot{x} - \dot{x}_0) \geq 0 \end{cases} \quad (1-6)$$

进一步,为了降低对执行元件的要求,提出最优开关控制。其意义为:当最优控制力与减振器所在位置振动方向相反时,施加减振器能实现最大阻尼力;否则,施加最小阻尼力。数学表达式为

$$u_s = \begin{cases} c_0(\dot{x} - \dot{x}_0) + f_{y\max} \operatorname{sgn}(\dot{x} - \dot{x}_0), & u(\dot{x} - \dot{x}_0) < 0 \\ c_0(\dot{x} - \dot{x}_0) + f_{y\min} \operatorname{sgn}(\dot{x} - \dot{x}_0), & u(\dot{x} - \dot{x}_0) \geq 0 \end{cases} \quad (1-7)$$

式中: $f_{y\min}$ 、 $f_{y\max}$ 分别是在负重轮处安装 MRD 的最小可控阻尼力、最大可控阻尼力, u 为最优主动控制力,其他参数含义同式(1-4)。

四、自适应控制

自适应控制考虑悬挂系统参数的时变性,通过自动监测系统的参数变化来调节控制策略,从而使系统逼近最优性能。自适应控制在可控悬挂中的应用可以具有多种形式。北京理工大学的管继富等人提出不依赖于控制对象的模型及参数的统计优化的自适应算法,仅依靠振动加速度的统计值,在悬挂动行程空间约束下,以一定的电流步长动态地寻找最优阻尼比。

Chantranuwathana 等人在 Sunwoo 等人提出的自适应控制策略基础上进行适当修改,主要有三种形式:对作动器动力学进行建模的自适应鲁棒控制;取消作动器动力学的自适应鲁棒控制;参数在线调节的自适应鲁棒控制。实验结果表明,后两种方案比较实用。这两种自适应控制算法的回归量并不直接依靠所测量的状态,减少测量噪声对控制系统性能的影响,比较适合工程应用。另外,由于模型参考自适应控制和自校正调节器的理想模型难以确定,自适应控制算法在实际应用中受到限制。

五、鲁棒控制

鲁棒控制是在保证闭环系统各回路稳定的条件下,考虑参数时变性及动态非线性的控制方法。在系统设计阶段综合考虑系统的建模误差、非线性、抗干扰等因素,使设计的控制器受这些因素的影响降到最小。 H_∞ 控制是一种典型的鲁棒控制