



★ ★ ★ ★ ★
“十三五”

国家重点出版物出版规划项目



国之重器出版工程


国防现代化建设

陆战装备科学与技术·坦克装甲车辆系统丛书

装甲车辆 悬挂系统设计

Armored Vehicle Suspension Design

董明明 王梦瑶 梁迎港 著

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

国家出版基金项目

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

国之重器出版工程

陆战装备科学与技术·坦克装甲车辆系统丛书

装甲车辆悬挂系统设计

董明明 王梦瑶 梁迎港 著

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

《装甲车辆悬挂系统设计》系统地介绍了装甲车辆悬挂技术理论与计算方法,包括悬挂总体及各主要部件设计所需要的基本知识。其内容有悬挂系统性能指标及总体设计,悬挂系统的建模分析,弹性元件和阻尼元件各部件设计要求、结构方案分类与分析及其主要参数,平衡肘、限制器最新设计方法,以及车体位置控制系统的设计和分析。还介绍了近年来在装甲车辆悬挂中得到应用的最新技术成果。

本书可作为装甲车辆悬挂行业工程技术人员的参考书,也可作为高等院校装甲车辆工程专业教材。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

装甲车辆悬挂系统设计 / 董明明, 王梦瑶, 梁迎港著. —北京: 北京理工大学出版社, 2019. 4

国家出版基金项目 “十三五” 国家重点出版物出版规划项目 国之重器出版工程 陆战装备科学与技术·坦克装甲车辆系统丛书

ISBN 978-7-5682-6967-4

I. ①装… II. ①董… ②王… ③梁… III. ①装甲车-车悬挂装置-系统设计
IV. ①TJ811

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 075147 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(总编室)

(010)82562903(教材售后服务热线)

(010)68948351(其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京地大彩印有限公司

开 本 / 710 毫米×1000 毫米 1/16

印 张 / 18.25

字 数 / 314 千字

版 次 / 2019 年 4 月第 1 版 2019 年 4 月第 1 次印刷

定 价 / 88.00 元

责任编辑 / 多海群

文案编辑 / 多海群

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

《国之重器出版工程》 编辑委员会

主任：苗 圩

副主任：刘利华 辛国斌

委员：冯长辉 梁志峰 高东升 姜子琨 许科敏

陈 因 郑立新 马向晖 高云虎 金 鑫

李 巍 李 东 高延敏 何 琼 刁石京

谢少锋 闻 库 韩 夏 赵志国 谢远生

赵永红 韩占武 刘 多 尹丽波 赵 波

卢 山 徐惠彬 赵长禄 周 玉 姚 郁

张 炜 聂 宏 付梦印 季仲华

《陆战装备科学与技术·坦克装甲车辆系统丛书》

编写委员会

名誉主编：王哲荣 苏哲子

主 编：项昌乐 李春明 曹贺全 丛 华

执行主编：闫清东 刘 勇

编 委：（按姓氏笔画排序）

马 越 王伟达 王英胜 王钦钊 冯辅周

兰小平 刘 城 刘树林 刘 辉 刘瑞林

孙葆森 李玉兰 李宏才 李和言 李党武

李雪原 李惠彬 宋克岭 张相炎 陈 旺

陈 炜 郑长松 赵晓凡 胡纪滨 胡建军

徐保荣 董明明 韩立金 樊新海 魏 巍



编者序

坦克装甲车辆作为联合作战中基本的要素和重要的力量，是一个最具临场感、最实时、最基本的信息节点，其技术的先进性代表了陆军现代化程度。

装甲车辆涉及的技术领域宽广，经过几十年的探索实践，我国坦克装甲车辆技术领域的专家积累了丰富的研究和开发经验，实现了我国坦克装甲车辆从引进到仿研仿制再到自主设计的一次又一次跨越。在车辆总体设计、综合电子系统设计、武器控制系统设计、新型防护技术、电子电气系统设计及嵌入式软件设计、数字化与虚拟仿真设计、环境适应性设计、故障预测与健康管理等新型工艺等方面取得了重要进展，有些理论与技术已经处于世界领先水平。随着我国陆战装备系统的理论与技术所取得的重要进展，亟需通过一套系统全面的图书，来呈现这些成果，以适应坦克装甲车辆技术积淀与创新发展的需要，同时多年来我国坦克装甲车辆领域的研究人员一直缺乏一套具有系统性、学术性、先进性的丛书来指导科研实践。为了满足上述需求，《陆战装备科学与技术·坦克装甲车辆系统丛书》应运而生。

北京理工大学出版社联合中国北方车辆研究所、内蒙古金属材料研究所、北京理工大学、中国人民解放军陆军装甲兵学院、南京理工大学、中国人民解放军陆军军事交通学院和中国兵器科学研究院等单位一线的科研和工程领域专家及其团队，策划出版了本套反映坦克装甲车辆领域具有领先水平的学术著作。本套丛书结合国际坦克装甲车辆技术发展现状，凝聚了国内坦克装甲车辆技术领域的主要研究力量，立足于装甲车辆总体设计、底盘系统、火力防护、电气系统、电磁兼容、人机工程等方面，围绕装甲车辆“多功能、轻量化、网



络化、信息化、全电化、智能化”的发展方向，剖析了装甲车辆的研究热点和技术难点，既体现了作者团队原创性科研成果，又面向未来、布局长远。为确保其科学性、准确性、权威性，丛书由我国装甲车辆领域的多位领军科学家、总设计师负责校审，最后形成了由14分册构成的《陆战装备科学与技术·坦克装甲车辆系统丛书》（第一辑），具体名称如下：《装甲车辆行驶原理》《装甲车辆构造与原理》《装甲车辆制造工艺学》《装甲车辆悬挂系统设计》《装甲车辆武器系统设计》《装甲防护技术研究》《装甲车辆人机工程》《装甲车辆试验学》《装甲车辆环境适应性研究》《装甲车辆故障诊断技术》《现代坦克装甲车辆电子综合系统》《坦克装甲车辆电气系统设计》《装甲车辆嵌入式软件开发方法》《装甲车辆电磁兼容性设计与试验技术》。

《陆战装备科学与技术·坦克装甲车辆系统丛书》内容涵盖多项装甲车辆领域关键技术工程应用成果，并入选“‘十三五’国家重点出版物出版规划”项目、“国之重器出版工程”和“国家出版基金”项目。相信这套丛书的出版必将承载广大陆战装备技术工作者孜孜探索的累累硕果，帮助读者更加系统全面地了解我国装甲车辆的发展现状和研究前沿，为推动我国陆战装备系统理论与技术的发展做出更大的贡献。

丛书编委会



前 言

装甲车辆悬挂的性能对行进间武器射击精度、乘员的舒适性、持续工作效能以及仪器设备的可靠性都有重要影响，悬挂的设计在整车设计中日益受到重视。世界各国装备的先进装甲车辆悬挂系统采用了很多新结构、新工艺、新技术。随着对悬挂性能要求的提高，传统的基于经验的类比设计方法已经不能满足要求。我国高校和研究所多年来在装甲车辆悬挂技术领域取得了许多科研成果，并已得到了应用。为了适应形势发展的需要，以及满足装甲车辆悬挂技术人员技术更新和专业人才培养的要求，作者结合装甲车辆设计和研制的特点，编写了这本《装甲车辆悬挂系统设计》。在编写过程中，试图阐明悬挂这一复杂力学系统的本质，归纳近年来我国装甲车辆悬挂领域取得的研究成果，应用现代设计方法和分析计算平台，完成悬挂及其部件的设计、分析和仿真。

本书作者常年从事装甲车辆悬挂的研究工作，在个人工作以及与国内研究所和工厂科研人员的协同工作中，得到了广大一线科研人员的悉心帮助，积累了一些经验，对于实际科研生产中的需求有所了解。

本书共 10 章，系统论述了装甲车辆悬挂系统的总体性能和设计方法、悬挂系统理论建模和仿真建模，详细介绍了典型弹性元件与阻尼元件的设计、平衡肘的设计计算和限制器的设计，并对车体位置控制进行了阐述，另在附录部分给出了一些与设计、分析及计算相关的知识。

本书在编写过程中得到了北京理工大学振动与噪声控制研究所老师和研究生的大力支持与帮助，在此表示衷心感谢。本书部分叙述仅代表作者个人在悬挂领域的学术见解，不当或不全面之处望读者提出批评和建议。

作 者



目 录

第 1 章 概述	001
1.1 功用	002
1.2 分类	003
1.2.1 按弹性元件分类	003
1.2.2 按参数可调与否分类	004
1.3 装甲悬挂系统须满足的要求	004
1.4 悬挂系统的发展	005
1.4.1 被动悬挂	005
1.4.2 主动悬挂	006
1.4.3 半主动悬挂	010
第 2 章 悬挂系统的性能指标	015
2.1 悬挂系统对装甲车辆火力性能的影响	016
2.1.1 悬挂对射击精度的影响	017
2.1.2 火炮稳定系统	018
2.2 悬挂系统对装甲车辆机动性能的影响	019
2.2.1 舒适性指标	020
2.2.2 约束性指标	025
2.2.3 可靠性指标	030
第 3 章 悬挂系统的总体设计	033
3.1 轮式车辆悬挂的总体设计	034



3.1.1	轮式车辆悬挂形式的选择	034
3.1.2	轮式车辆悬挂部件的选择	037
3.1.3	轮式车辆悬挂总体参数的设计	037
3.2	履带式车辆悬挂的总体设计	038
3.2.1	履带式车辆悬挂形式的选择	039
3.2.2	履带式车辆悬挂部件的选择	039
3.2.3	履带式车辆悬挂总体参数的设计	041
3.3	多轴轮式车辆与履带式车辆共同的问题	043
3.3.1	车轮(负重轮)载荷计算及位置调整	043
3.3.2	重心与弹性中心的匹配	049
3.4	车高及车身姿态调节	052
3.4.1	车高调节的必要性	052
3.4.2	车身姿态调节的必要性	052
3.4.3	车高调节的实现途径	053
3.4.4	车高可调油气悬架	053
3.4.5	车高可调的空气悬架	055
3.4.6	车高调节悬架的技术难点	056
第4章	悬挂系统的建模分析	059
4.1	路面不平度输入	060
4.1.1	路面不平度	061
4.1.2	等级划分	063
4.1.3	时域构造方法	064
4.2	悬挂系统模型的建立	069
4.2.1	解析求解	070
4.2.2	数值仿真	078
4.3	悬挂导向机构的建模分析	085
4.3.1	导向机构的类型、作用	085
4.3.2	导向杆系的传动比	086
4.3.3	导向杆系的设计计算	089
第5章	弹性元件	109
5.1	扭杆弹簧	110
5.1.1	扭杆弹簧概述	110



5.1.2	扭杆悬挂装置的分类	111
5.1.3	扭杆悬挂装置的特性	113
5.1.4	扭杆悬挂装置的设计	115
5.1.5	扭杆弹簧的强扭预应力处理	120
5.2	油气弹簧	127
5.2.1	油气弹簧概述	127
5.2.2	油气弹簧的分类	129
5.2.3	油气弹簧的特性	136
5.2.4	油气悬挂装置的设计计算	146
5.2.5	油气弹簧的试验装置	160
5.3	空气弹簧	161
5.3.1	空气弹簧的特点	161
5.3.2	空气弹簧的结构和类型	161
5.3.3	空气弹簧的刚度计算	164
第 6 章 阻尼元件		173
6.1	减震器的分类	174
6.2	装甲车辆减震器的基本要求	175
6.3	减震器的设计	176
6.3.1	减震器的选型	177
6.3.2	减震器布置位置的确定	177
6.3.3	减震器结构参数的确定	179
6.4	减震器试验方法	187
6.4.1	减震器特性试验内容	187
6.4.2	试验装置	188
6.5	液压减震器的示功图	189
6.5.1	示功图的定义	189
6.5.2	示功图的绘制	189
6.5.3	示功图的特点	190
6.5.4	示功图缺陷产生原因及消除方法	191
6.6	阻尼可调减震器	193
6.6.1	阻尼孔过流面积的调节方式的双筒式减震器	194
6.6.2	阻尼孔过流面积的调节方式的叶片式减震器	196
6.6.3	磁流变液减震器	197



第 7 章 限制器	201
7.1 阻尼限制器	203
7.1.1 阻尼限制器的特点	203
7.1.2 液压限制器的工作原理和结构特点	204
7.2 弹性胶泥限制器	207
第 8 章 平衡肘	209
8.1 作用于平衡肘的外力	210
8.1.1 地面作用于负重轮上的法向反力	210
8.1.2 作用于平衡肘上的外力和外力矩	212
8.2 限制器和平衡肘轴轴承的作用力	213
8.3 平衡肘危险截面内的应力	214
8.3.1 负重轮轴	214
8.3.2 平衡肘体	216
8.3.3 平衡肘轴	218
8.4 许用应力	219
8.5 平衡肘支座的结构	220
8.6 平衡肘支座轴承的计算	223
第 9 章 车体位置控制	225
9.1 行驶平稳性与缓冲可靠性	226
9.1.1 行驶平稳性	226
9.1.2 缓冲可靠性	230
9.1.3 行驶平稳性与缓冲可靠性的矛盾	233
9.2 车体位置控制系统	235
9.2.1 概述和要求	235
9.2.2 车体位置控制系统的液压传动简图	237
9.2.3 车体位置控制系统的计算原理	239
第 10 章 附录	243
10.1 随机振动	244
10.1.1 随机过程及其数字特征	244
10.1.2 平稳过程、遍历过程和高斯过程	247



10.2 时域与频域	248
10.3 时频变换	249
10.3.1 傅立叶级数	249
10.3.2 傅立叶积分	253
10.3.3 拉普拉斯变换	257
10.3.4 傅立叶变换在线性振动系统中的应用	258
10.4 谱分析	260
10.4.1 Parseval 公式	260
10.4.2 功率谱密度函数	261
参考文献	265
索引	266





第 1 章

概 述



悬挂系统是车辆的车架与车桥或车轮之间的一切传力连接装置的总称，是车辆行驶系统的重要组成部分。悬挂系统包括弹性元件、阻尼元件、导向机构、限制器以及控制系统。



| 1.1 功 用 |

本节主要介绍悬挂系统的功用。

1. 传递力和力矩

悬挂系统将车身“悬挂”于车桥或车轮之上，导向机构规定了车轮相对于车身的运动，以传递纵向力、横向力及各种力矩。导向机构包括用于连接车身与悬挂系统、车桥或车轮与悬挂系统的连杆，履带式装甲车辆常采用平衡肘作为导向机构。

2. 缓和冲击

悬挂系统的弹性元件在车辆行驶过程中起到缓和冲击的作用，由于弹性元件具有弹性，在车轮相对于车身上下运动时，弹性元件发生压缩或伸张（扭转）变形，从而隔离并减轻了车轮通过地面障碍对车身的冲击。

3. 衰减振动

弹性元件压缩时所吸收的能量自身并不能消除，这部分能量会转化为车体的振动，从而影响车辆的各种性能。为了消耗弹性元件所吸收的能量，悬挂系统必须有阻尼元件。阻尼元件可以将振动能量转化为热量而散发掉，从而达到



衰减车身振动的作用。

4. 限制车轮的跳动范围

限制器的功用是限制车轮的行程，以避免弹性元件因过度变形而损坏，装有弹性元件的限制器还可在车轮行程末端吸收部分冲击能量，采用液压限制器还能耗散冲击能量。

以上为悬挂系统的主要功能，对于如何判断悬挂系统的好与坏，将在下一章作出介绍。

| 1.2 分 类 |

车辆悬挂系统形式多样，按照不同的分类标准可以分为不同的类型。

1.2.1 按弹性元件分类

悬挂系统按弹性元件分类可分为金属弹簧悬挂系统和液气悬挂系统，金属弹簧悬挂系统的弹性元件为螺旋弹簧或扭杆弹簧；液气悬挂系统的弹性元件为油气弹簧。

金属弹簧悬挂系统中的螺旋弹簧主要用于轮式车辆，其减振元件为液压筒式减震器，扭杆弹簧悬挂系统按照其阻尼元件的不同又可以分为扭杆弹簧+筒式减震器、扭杆弹簧+叶片式减震器和扭杆弹簧+摩擦式减震器。其中，扭杆弹簧+叶片式减震器形式悬挂系统用于我国的主战坦克，而其他履带式装甲车主要采用扭杆弹簧+筒式减震器的形式。

油气悬挂系统按布置形式进行区分：固定缸筒式、摆动缸筒式和肘内式。固定缸筒式的动力缸对于车体固定，缸筒内活塞通过连杆和平衡肘相连；摆动缸筒式动力缸的轴线随车轮跳动而摆动，通常油气弹簧的下连接点直接和平衡肘相连；肘内式油气悬挂的动力缸和平衡肘做成一个整体，可以有效地节省空间，便于总体布置。油气弹簧可以加装阻尼系统，兼作减震器，按照阻尼阀的布置形式可以分为阻尼阀内置式和阻尼阀外置式。阻尼阀内置式结构严整，便于布置，但阻尼阀的发热会导致空气弹簧气体温度显著提高，影响车辆的静平衡位置；外置式便于散热，但管路复杂，不便于总体布置。为了布置方便，可充分利用民用车的零件，也可采用油气弹簧和筒式减震器并联使用的方式。



1.2.2 按参数可调与否分类

悬挂系统按照参数（弹性特性、阻尼特性）可调与否分为不可调的悬挂系统和可调的悬挂系统。

参数不可调的悬挂系统即我们通常所说的被动式悬挂系统。事实上，传统的被动式悬挂并非全是参数不可调的，一些采用空气弹簧悬挂系统的车辆安装有感载阀，能根据悬挂质量的变化，改变空气弹簧的充气压力，以保证车辆的距地高度。上述车辆的悬挂虽然也属于参数可调的悬挂系统，但其参数调整的目的只是改变车高或车姿，并非车辆的振动特性。习惯上，仍然将上述悬挂系统归为被动式悬挂系统。

可调的悬挂系统通常指的是电控悬挂系统，其按照参数控制方式的不同分为主动悬挂系统和半主动悬挂系统。主动悬挂系统和半主动悬挂系统对悬挂系统参数的调节在本质上是不同的。主动悬挂系统在悬挂质量和非悬挂质量之间有一个液压制动器，可以在二者之间施加一个可控的力，来控制悬挂系统的响应特性；半主动悬挂系统只控制悬挂系统的弹性元件和阻尼元件的参数，使悬挂系统的参数始终处于最优状态。因此可以看出，主动悬挂系统和半主动悬挂系统的本质区别在于悬挂质量和非悬挂质量之间是否有外力输入，而并非一些文献中所说的：主动悬挂系统能同时调节悬挂的弹性系数和阻尼系数，半主动悬挂系统只能调节悬挂的阻尼系数。目前绝大多数装甲车辆的半主动悬挂系统都只能对悬挂系统的阻尼系数进行调节，而在使用（能够发生弹性变形的）固体材料作为弹性元件的悬挂系统中，无法在不输入外力的情况下实时按需改变悬挂系统的等效弹性系数。而对于空气弹簧和油气弹簧，刚度的调节往往是在主气室之外又串联一个副气室，通过调节主、副气室连通阀的开度来实现：当连通阀关闭时，只有主气室工作，刚度最大，随着连通阀开度增大，悬挂刚度逐渐减小。当连通阀的阻力可以忽略时，相当于主、副气室组成了一个大气室，在此环境中工作时刚度最小。

| 1.3 装甲悬挂系统须满足的要求 |

装甲车辆在行驶过程中，车体振动的剧烈程度随路面不平度、车速和悬挂装置性能的好坏而变化。装甲车辆高速行驶时常因悬挂装置性能较差、振动幅