

《近代兵器力学》丛书

# 履带式装甲车辆悬挂系统动力学

## Dynamics of Tracked Armored Vehicle Suspension System

丁法乾 著

国防工业出版社

《近代兵器力学》丛书

# 履带式装甲车辆悬挂 系统动力学

Dynamics of Tracked Armored  
Vehicle Suspension System

丁法乾 著

国防工业出版社

·北京·

**图书在版编目(CIP)数据**

履带式装甲车辆悬挂系统动力学/丁法乾著. —北京:  
国防工业出版社, 2004. 1

(近代兵器力学丛书)

ISBN 7-118-03302-2

I. 履... II. 丁... III. 履带车: 装甲车—车悬挂  
装置—动力学 IV. TJ811

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 097272 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 100044)

北京奥隆印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 850×1168 1/32 印张 6½ 158 千字

2004 年 1 月第 1 版 2004 年 1 月北京第 1 次印刷

印数: 1—2500 册 定价: 20.00 元

---

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

# 致 读 者

**本书由国防科技图书出版基金资助出版。**

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

**国防科技图书出版基金资助的对象是:**

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

**国防科技图书出版基金  
评审委员会**

# 国防科技图书出版基金 第四届评审委员会组成人员

名誉主任委员	陈达植			
顾问	黄宁			
主任委员	刘成海			
副主任委员	王峰	张涵信	张又栋	
秘书长	张又栋			
副秘书长	彭华良	蔡镛		
委员	于景元	王小谟	甘茂治	冯允成
(按姓名笔画排序)	刘世参	杨星豪	李德毅	吴有生
	何新贵	佟玉民	宋家树	张立同
	张鸿元	陈火旺	侯正明	常显奇
	崔尔杰	韩祖南	舒长胜	

# 《近代兵器力学》丛书组织结构 编辑委员会

主任委员 蓝祖佑  
副主任委员 陈鹏飞 杨葆新 李魁武  
委员 马春茂 王玉林 王光华 朵英贤  
(按姓名笔画为序)  
刘 铭 杨楚泉 来渝生 吴三灵  
邱晓华 胡国强 恽寿榕 徐明友  
崔士义

## 编辑部

主 编 朵英贤 马春茂  
副主编 吴三灵 杨楚泉 恽寿榕 徐明友  
责任编辑 康新中

## 序

力学作为一门工程技术的重要基础学科,在各行各业得到了广泛应用,现已发展成为多种类别的应用力学,兵器力学就是其中之一。建国以来尤其是近二十年来,兵器工业在基础研究、预先研究以及型号研制等方面取得了突破性进展,很多科研成果达到了国内外先进水平,也积累了不少经验和教训。为了总结、升华已有的科研成果,使之形成新的、系统的兵器力学理论体系,推动今后兵器科研和设计理论的发展,跟踪国际先进水平,我们编纂出版了这套《近代兵器力学》丛书。

《近代兵器力学》丛书共 14 册,从力学角度覆盖了兵器系统的典型力学问题,总结了国内外装甲车辆、火炮与自动武器、弹道、爆炸与冲击等力学方面的成就。每一册都是由各专业领域内具有丰富实践经验和较高学术水平的专家学者进行撰著。本套丛书不仅包含了理论研究还有试验研究,重点突出了相关专业领域内的新理论、新原理和新技术的发展,基本反映了当前国内外兵器发展中应用工程力学的广度和水平,具有较高的理论水平和工程应用价值。

1998 年冬,中国工程院院士朵英贤倡议编纂本套丛书,首先得到国防科技图书出版基金委员会办公室的支持,也得到中国兵器工业第二〇二研究所的积极响应并承担组织工作。经过专家学者们两年来的辛勤劳动,《近代兵器力学》丛书正式开始出版,这是一件很有意义的事情,得到了各级领导的重视和支持,受到了广大兵器科技工作者的欢迎;这一套丛书的出版必将从力学理论基础



到工程实践应用都给现代兵器的研制提供理论的指导方向,必将对兵器研制的现代化起到积极的推动作用。

A handwritten signature in black ink, appearing to read '李锐' (Li Rui), written in a cursive style.

2001年元月

## 序

自从戈矛进化到火器,兵器(不论是枪械、火炮、坦克、战术火箭和导弹)便以发射抛射物来毁伤目标。发射动力主要来源于火药,毁伤能量主要靠抛射物的动能或是炸药含能(直接爆炸或抛出毁伤元)。能量的转换便以内弹道、外弹道、终点弹道递次进行。兵器的载体可以不同,如陆地、战车、飞机、舰船等,这种能量转换模式却不改变。发射抛射物直到对目标的毁伤是一种大功率高瞬态的能量转换。弹丸对目标的撞击、炸药爆炸、内弹道、外弹道等则是纳秒、微秒、毫秒级的过程。发射时兵器本身也受到高强度的激励。自从经典内弹道学建立的 100 多年来,随着火药力和炸药能量的提高,这种特征日益明显,并以高瞬态的力学过程映射出来,也就日益有别于其它工程领域。有人说,兵器领域是“瞬态力学大户”,此言不虚!本套《丛书》归纳了 20 世纪后叶兵器力学的主要成果,其中不乏我国学者的贡献。每个分册的作者都是该领域中卓有成效者。

工程实践和理论基础是兵器发展的两个巨轮,而理论基础则依赖于对工程实践的认识和提高,并用以指导后期的工程实践。20 世纪 60 年代,我国兵器已进入自行研制,那是鄙薄技术最严重的时期,漫长的岁月,理论工作被荒芜,很多在工程中已成功的经验不能总结升华,这给兵器力学的发展带来严重后果,也给兵器发展带来不利影响。所幸的是改革开放以来,已有很大的弥补,《丛书》中相当的篇幅是这一时期的结晶。毕竟,研究瞬态力学有很大的难度,过程短暂、幅值很高、频域很宽、非线性问题多、信号采集困难、费用消耗大等因素制约着发展。即使这样,经过 20 多年的知识积淀及相邻学科的带动,给设计观念带来很大的变化,并运用

于产品研制。但是,也要看到这套《丛书》只是反映了兵器力学中的一部分。譬如,动态强度篇幅较少,在高速碰撞下材料的特性如何变化尚处于假设。工程中存在的“应力腐蚀”、“氢脆”、镀层强度等力学问题,须在更微观层次中进行研究。兵器中已大量应用非金属复合材料,但本构关系不甚清楚。至于用力学来描述高速破片对目标的创伤过程,目前远不成熟,等等。现在,纳米技术已进入社会,也逐步贴近兵器,那么兵器这种通过高爆能量转换和高动力发射的模式,会不会成为应用纳米技术使武器小型化的障碍?兵器力学中真有没完没了的事情,任重道远!

如此说来,这套《丛书》只是一个开头,希望这项工作能够获得延续。我希望兵器力学研究的现状能够得到改进,使它发挥应有的推动作用。

中国工程院院士



2000年12月

## 前 言

从事履带式装甲车辆悬挂系统方面研究和教学的工作者,在解决具体问题的同时,始终离不开一些中心问题,例如:按照车辆使用要求,用振动理论计算车辆悬挂系统的性能;从力学上阐明悬挂部件设计原理,评价其发展趋势,计算弹性元件和阻尼元件的性能或构造参数;以及根据悬挂部件试验需要,设计部件台架试验设备和确定它的性能,等等。如果在处理问题时,仍沿用国内尚在应用的经验设计或简化理论,将难以得到准确的结果,往往需要经过试验修改,增加研究过程的反复和周期。因此,建立合理抽象、能反映车辆悬挂系统基本特性、并能方便使用的工程实用理论,就成为本研究领域义不容辞的任务。虽然可以从相关的资料和信息中得到一些启发,但是要做到能正确应用,还少不了自己的实践。

所幸的是,计算技术、振动理论(特别是随机振动)和液压流体力学等已为此建立了理论基础。国内履带式装甲车辆的发展又为之提供了实践场所。作者在此期间取得了不可多得的学习、研究、试验、运用和反复实践、认识、提高的机遇,逐步积累了本书的基本内容,现在通过整理、提炼写成本书。书中的内容以工程实践为依据,当然包含了合作单位和朋友们的共同劳动,现借此机会对他们的长期友好合作表示感谢。

作者曾将相关的原理与方法,用于改进多种类型民用车辆悬挂(悬架)产品的性能,在应用过程中,虽然要根据它们各自的特色做出必要的调整,但都是可用的。

本书偏重叙述作者对车辆悬挂问题的见解,从全面和发展的观点,一定会有值得讨论的问题,希望读者提出批评和建议。

王珉研究员仔细阅读了书稿,提出了宝贵的意见。王国丽博

士和小女丁岚工程师认真整理和校改了打印稿,并绘制了全部插图。谨对他们为本书付出的辛勤劳动表示衷心地感谢。

作者

2003年5月

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 弹性元件的发展 .....	1
1.2 减振器的发展 .....	5
1.3 悬挂系统的发展 .....	8
1.4 悬挂理论的发展 .....	10
<b>第 2 章 车辆振动理论中应用的谱分析基础</b> .....	13
2.1 傅里叶变换 .....	13
2.2 谱分析 .....	19
<b>第 3 章 悬挂系统的要求及性能指标</b> .....	26
3.1 人体对振动的反应和车辆行驶平稳性 .....	26
3.2 “悬挂击穿”的概率 .....	35
3.3 悬挂装置可靠性 .....	42
3.4 车辆行驶过程中车体振动的其他影响 .....	52
<b>第 4 章 路面的统计特性</b> .....	54
4.1 路面不平度的空间频率谱 .....	54
4.2 路面不平度的时间频率谱 .....	58
4.3 车辆振动的路面输入 .....	59
4.4 由路面谱构造路面不平度 .....	59
<b>第 5 章 车辆行驶过程中车体线振动的模型</b> .....	66
5.1 车辆行驶过程中履带与车体的相互作用 .....	66
5.2 建立车辆悬挂系统动力学的基本假设和坐标选取 .....	68
5.3 车辆线性悬挂系统的动力学方程 .....	69
5.4 车辆悬挂系统的状态方程 .....	76
5.5 车辆悬挂系统的评价指标——输出向量 .....	76

<b>第 6 章 非线性悬挂系统的数值方法</b> .....	82
6.1 非线性悬挂系统的运动方程 .....	82
6.2 等效线性化方法 .....	83
6.3 逐步积分法 .....	94
<b>第 7 章 悬挂的弹性特性</b> .....	104
7.1 扭杆悬挂 .....	104
7.2 固定缸筒式液-气悬挂 .....	119
7.3 肘内式液-气悬挂 .....	127
<b>第 8 章 悬挂的阻尼特性</b> .....	135
8.1 筒式液压减振器的构造原理和阻尼特性 .....	135
8.2 液压减振器限压阀的作用 .....	138
8.3 筒式液压减振器的布置及其传动比 .....	143
8.4 带摆臂的回转叶片式液压减振器的构造原理和 阻尼特性 .....	148
8.5 机械摩擦式减振器的构造原理和阻尼特性 .....	149
8.6 带摆臂的回转式减振器在车上的布置及其传动比 .....	152
<b>第 9 章 悬挂部件台架试验的力学原理</b> .....	156
9.1 悬挂部件试验台的性能参数 .....	158
9.2 液压激振器 .....	161
9.3 直线往复机械式激振器 .....	172
9.4 摇摆式机械式激振器 .....	179
<b>主要参考文献</b> .....	186

# Content

<b>Chapter 1 Introduction</b> .....	1
1.1 Development of Spring Components .....	1
1.2 Development of Shock Absorbers .....	5
1.3 Development of Suspension Systems .....	8
1.4 Development of Suspension Theories .....	10
<b>Chapter 2 Spectrum analysis foundation applied to vehicle         vibration theory</b> .....	13
2.1 Fourier Transform .....	13
2.2 Spectrum analysis .....	19
<b>Chapter 3 Requirement and performance targets         of suspension</b> .....	26
3.1 Response of human-body to vibration and ride performance .....	26
3.2 Probability of road-wheel arms bottoming out on the bump stops .....	35
3.3 Reliability of suspension equipment .....	42
3.4 Influence of hull vibration on other performance .....	52
<b>Chapter 4 Statistical characteristics of terrain</b> .....	54
4.1 Space frequency spectrum of terrain roughness .....	54
4.2 Time frequency spectrum of terrain roughness .....	58
4.3 Terrain input of vehicle vibration .....	59
4.4 Construction of terrain roughness according to terrain spectrum .....	59



<b>Chapter 5 Linear vibration model of vehicle under traveling</b> .....	66
5.1 Interactions of track and hull under traveling .....	66
5.2 Basic hypotheses and coordinates choice in establishing dynamics model of vehicle suspension system .....	68
5.3 Dynamic equations of vehicle linear suspension system .....	69
5.4 State equations of vehicle linear suspension system .....	76
5.5 Performance targets of vehicle suspension system – output vectors .....	76
<b>Chapter 6 Numerical solution of non-linear suspension system</b> .....	82
6.1 Kinetic equations of non-linear suspension system .....	82
6.2 Equivalent linearization method .....	83
6.3 Stepwise integral method .....	94
<b>Chapter 7 Spring characteristics of suspension</b> .....	104
7.1 Torsion bar suspension .....	104
7.2 Cylinder-fixed hydropneumatic suspension .....	119
7.3 In-arm hydropneumatic suspension .....	127
<b>Chapter 8 Damping characteristics of suspension</b> .....	135
8.1 Configuration principle and damping characteristic of telescopic hydraulic damper .....	135
8.2 Function of pressure relief valve of hydraulic damper .....	138
8.3 Lay out and transmissivity of telescopic hydraulic damper .....	143
8.4 Configuration principle and damping characteristic of vane hydraulic damper .....	148
8.5 Configuration principle and damping characteristic	