

《近代兵器力学》丛书

车辆地面力学

Vehicle-Terramechanics

张克健 著

国防工业出版社

《近代兵器力学》丛书

车辆地面力学

Vehicle-Terramechanics

张克健 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

车辆地面力学/张克健著. —北京:国防工业出版社, 2002. 1

(近代兵器力学丛书)

ISBN 7-118-02564-X

I. 车... II. 张... III. 军用车辆 - 地面 - 力学 - 研究 IV. TJ81

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 037493 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)

三河市腾飞胶印厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 10 $\frac{1}{2}$ 271 千字

2002 年 1 月第 1 版 2002 年 1 月北京第 1 次印刷

印数: 1—1500 册 定价: 23.00 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	殷鹤龄				
副主任委员	王峰	张涵信	张又栋		
秘书长	张又栋				
副秘书长	崔士义	蔡锺			
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	彭华良	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
(按姓名笔画排序) 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, consisting of stylized Chinese characters. The characters appear to be '王' (Wang) on the left and '世智' (Shizhi) on the right, with a large, sweeping flourish extending from the right side.

2001 年元月

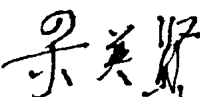
序

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 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展的模式,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。更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

车辆地面力学是研究车辆与地面间力学关系的一门边缘学科。在这一学科里,“车辆”通常指越野车辆,即可在非人工铺设道路上行驶的车辆,包括各种军用车、农用车、水利和矿山用车、地质勘探和石油开采用车以及森林防护用车等;“地面”系指为上述车辆提供支承能力和附着能力的岩土及由其构成的几何障碍。这门学科的诞生源于战争的需要,在第二次世界大战中,由于战争规模的扩大及工业水平的提高,主要参战国均有大量的机械化部队,越野机动性问题显得特别突出,导致战后以美国为首的工业发达国家相继开展了车辆地面力学的研究。我国对这一领域的研究首先是 1958 年在农机部门开始的,这与我国希望实现农业机械化以及当年水田面积占总耕地面积的 29%、水稻产量占粮食总产量的 47% 有关,而军用车辆的越野机动性则迟至 1980 年才开始比较系统的研究。

迄今,我国已培养出本学科上百名的硕士和博士,许多大学本科汽车、农机及工程机械专业已开设地面力学的课程,专业研究机构也已陆续建立,部分越野车辆和工程机械的工程师开始应用地面力学的研究成果。虽然我国自 20 世纪 60 年代初就已陆续翻译出版了国外地面力学的主要著作,高等院校的试用教材也已陆续出齐,但尚无完整、系统的学术专著问世。

本书试图在系统阐述越野车辆工程的土力学知识、土力学理论与数值计算方法的基础上,对车辆越野行驶的机动性问题进行深入探讨,着重反映 20 世纪 80 年代以来的国内外科科研成果,以减少越野车辆特别是军用越野车辆设计和使用的盲目性。

由于车辆地面力学是一门新兴学科,尚在不断发展和完善的

过程中,更由于作者研究领域和水平所限,定有许多不足及欠妥之处,恳请读者批评指正。

作 者
2000 年 3 月

目 录

第一章 绪论	1
1.1 车辆地面力学的发展历程	1
1.2 车辆地面力学与军用车辆工程	6
第二章 越野车辆工程的土力学基础	9
2.1 土壤的恒定特征	9
2.1.1 颗粒尺寸	9
2.1.2 颗粒形状	11
2.1.3 矿物组成	12
2.1.4 相对密度	14
2.1.5 稠度极限和其它指标	16
2.2 土壤的瞬态特征	21
2.2.1 综合指标	22
2.2.2 密度	23
2.2.3 湿度与密度	25
2.2.4 相对密实度	27
2.2.5 渗透度	29
2.3 土壤的性状特征	31
2.3.1 有效应力原理	31
2.3.2 土壤固结	38
2.3.3 土壤剪切强度	40
2.3.4 土壤试验	44
2.3.5 越野行驶的现场条件	48
2.3.6 剪切阻力的讨论	49
2.4 土壤的分类	50

第三章 近地表土壤的力学分析	53
3.1 土壤的弹性理论	53
3.2 土壤的塑性理论	55
3.2.1 摩尔-库仑屈服(破坏)准则	57
3.2.2 非线性屈服准则	61
3.2.3 在特定条件下的塑性平衡微分方程	63
3.2.4 塑性理论的局限性	73
3.3 土壤的应力-应变关系	74
3.3.1 $E-\mu$ 弹性模型	74
3.3.2 修正的 $E-\mu$ 模型	78
3.3.3 雷耶斯模型	80
3.3.4 剑桥模型	83
3.4 有限元法与边界元法	88
3.4.1 有限元法及其应用	88
3.4.2 边界元法及其程序实现	95
第四章 车轮-土壤的相互作用	104
4.1 轮胎的变形特性	104
4.1.1 轮胎在硬路面上的变形特性	104
4.1.2 轮胎在松软土壤上的变形特性	108
4.1.3 轮胎的动力学性质	112
4.2 车轮的行驶阻力	114
4.2.1 刚性轮的土壤压实阻力	114
4.2.2 轮胎的压实阻力	118
4.2.3 滑转沉陷与推土阻力	121
4.2.4 粘着阻力	124
4.3 驱动轮的行驶推力	125
4.3.1 形成车辆推力的两种理论	125
4.3.2 驱动轮的牵引力	126
4.3.3 驱动效率	128
4.4 车轮-水下土壤的相互作用	130

4.4.1 浸没影响	131
4.4.2 孔隙水压影响	132
4.5 轮胎 - 土壤模型	134
4.5.1 轮胎挠曲对界面应力的影响	134
4.5.2 轮胎 - 土壤相互作用的简化	135
4.5.3 原型轮胎 - 土壤模型	139
第五章 履带 - 土壤的相互作用	143
5.1 履带 - 土壤相互作用的特点	144
5.1.1 履带和车轮对土壤相互作用的异同点	144
5.1.2 履带的接地压力	145
5.2 履带的行驶阻力	149
5.2.1 土壤的承载能力	149
5.2.2 压实阻力	154
5.2.3 推土阻力	157
5.3 履带车辆牵引力的计算	159
5.3.1 土壤的最大推力	159
5.3.2 履带滑转率和法向压力分布对牵引力的 影响	160
5.3.3 最佳滑转率和最大牵引力	164
5.4 履刺效应	167
5.4.1 履刺对牵引性能的影响	167
5.4.2 履刺效应的有限元分析	169
5.4.3 间隔式履带	177
5.5 履带 - 土壤模型	179
5.5.1 履带 - 土壤相互作用的实验研究	179
5.5.2 刚性履带模型	185
5.5.3 刚性履带 - 土壤相互作用的讨论	188
5.5.4 柔性履带 - 土壤相互作用的讨论	193
第六章 越野车辆的行驶通过性	197
6.1 车辆的软土通过性	197

6.1.1 车辆在松软土壤上运动的能力	198
6.1.2 土壤的可行驶性	199
6.1.3 圆锥指数法	201
6.2 地面的可行驶性	206
6.2.1 地表障碍的形态学	206
6.2.2 坡度的评定	211
6.2.3 植被障碍	214
6.2.4 地面可行驶性地图	218
6.3 车辆的几何通过性	225
6.3.1 车辆失去几何通过性的类型	225
6.3.2 车辆越障通过的条件	227
6.3.3 不能穿过的障碍和绕路	239
6.4 车辆越障性能模型	242
6.4.1 车辆越障的静力学	242
6.4.2 车辆越障的几何学	246
6.4.3 车辆越障的概率	253
第七章 越野机动性的计算机模拟	256
7.1 越野车辆性能的评定	256
7.1.1 车辆动力性与燃油经济性的评定	256
7.1.2 计算机程序的研制	260
7.2 越野机动性模型	264
7.2.1 模型的方法与总体结构	265
7.2.2 模型的输入和预处理程序	267
7.2.3 独立模拟模块	271
7.2.4 主计算模块	274
7.2.5 输出数据的处理和模型的应用	284
7.3 越野机动最佳路线选择模型	290
7.3.1 问题的提出	290
7.3.2 基本解法	291
7.3.3 程序说明与模型验证	293