

《近代兵器力学》丛书

装甲车辆动力学分析与仿真

Dynamics Analysis and
Simulation for Armored Vehicle

居乃鸪 编著



国防工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

装甲车辆动力学分析与仿真/居乃鹁编著. —北京:
国防工业出版社, 2002. 4

(近代兵器力学丛书)

ISBN 7-118-02674-3

I. 装... II. 居... III. 装甲车—车辆工程—动力学分析 IV. TJ811

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 086550 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)

涿中印刷厂印刷

新华书店经营

*

开本 850×1168 1/32 印张 14 1/4 261 千字

2002 年 4 月第 1 版 2002 年 4 月北京第 1 次印刷

印数: 1—2000 册 定价: 28.00 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。

IV

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	蔡镛		
委员	于景元	王小谟	甘茂治	冯允成
(按姓名笔划为序)	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
(按姓名笔划为序)

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

VIII

对兵器研制的现代化起到积极的推动作用。



2001 年元月

序

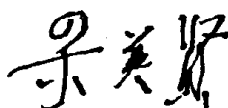
自从戈矛进化到火器,兵器(不论是枪械、火炮、坦克、战术火箭和导弹)便以发射抛射物来毁伤目标。发射动力主要来源于火药,毁伤能量主要靠抛射物的动能或是炸药含能(直接爆炸或抛出毁伤元)。能量的转换便以内弹道、外弹道、终点弹道递次进行。兵器的载体可以不同,如陆地、战车、飞机、舰船等,这种能量转换模式却不改变。发射抛射物直到对目标的毁伤是一种大功率高瞬态的能量转换。弹丸对目标的撞击、炸药爆炸、内弹道、外弹道等则是纳秒、微秒、毫秒级的过程。发射时兵器本身也受到高强度的激励。自从经典内弹道学建立的一百多年来,随着火药力和炸药能量的提高,这种特征日益明显,并以高瞬态的力学过程映射出来,也就日益有别于其它工程领域。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

序

一本论述装甲车辆系统动力学分析与仿真的著作,能在新世纪的第一年出版,是值得非常高兴的事。因与作者共事多年,而且对他的一段经历了解很深,又有幸先期阅读本书的原稿,并应邀为之作序,我表示欣然接受。

一个理论造诣很深,从事多年车辆总体研究和设计工作的人,能够断然做出转向从事 CAD 大型设计软件研究的抉择确实不容易。当时,做出这样的选择不仅需要攻读多门新的学科知识,而且还要付出很多想像不到的代价,甚至增加了个人的后顾之忧。但是,十余年的实践表明:作者所达到的车辆技术与计算机技术的深入结合是很有价值的,而且是非常成功的。然而实现这种结合是有代价的,那就是非凡的努力和付出。

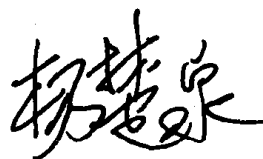
装甲车辆行业走过了从引进、仿制到自行研制的漫长过程,但为了彻底摆脱单纯依赖仿制的局面,尽量避免采用由于对车辆工作过程中发生的许多现象缺乏深入了解,不得不在缺少充分根据的情况下决定设计方案和结构尺寸的所谓“类比设计”或“经验设计”的方法。所以,必须努力做到,不仅要知其然,而且还要知其所以然,从工程技术的基础——力学抓起。随着车辆功率和速度的逐渐增大,为了不断改进车辆性能,迫使人们对车辆工作过程中的动力学问题进行深入理解。在这种情况下,经典力学和静力学的方法显然已经不能满足要求。

随着计算机技术的不断发展,依靠人力难于办到的计算和分析已经得到解决。而且还能与测试仪器对接进行计算机的实时处理和显示,从而推动了动力学的飞速发展。

本书作者就是在这种背景下,把车辆动力学与计算机仿真、优

化技术结合起来,使设计人员在设计阶段就能对自己设计的产品性能进行预测,对设计参数进行优化,这样,不仅可以减少由于反复的样车试制造成的浪费,而且还可以大大缩短研制周期,提高设计的工作效率。应该说这是车辆设计的革命性变化,对现代车辆的发展具有很大的现实意义和理论意义。

作者在书中还注意引入系统概念和人、环境对车辆的影响,运用现代控制理论、多体系统动力学和人机工程学等学科的最新成就研究车辆的动态特性,从而使车辆动力学更加准确而科学地得以深化,反映了当前国内外车辆动力学的最新发展。相信在更多立志于现代车辆技术发展的科技工作者的勤奋努力下,应用于车辆设计的动力学分析与仿真技术一定会很快走向更加完善和成熟的地步。

A handwritten signature in black ink, consisting of three characters: '杨' (Yang), '镇' (Zhen), and '源' (Yuan). The characters are written in a fluid, cursive style.

2000年12月

前 言

作者在多年从事坦克装甲车辆总体设计和计算机应用技术研究工作中认识到:由于现代装甲车辆工程研究与设计对系统动力学分析提出日益复杂化、精确化的要求,建立装甲车辆人一机一环境系统数学模型和完成相应的计算机软件开发,实施在战斗情况下的射击与行驶过程动力学分析与仿真,已成为国内外装甲车辆系统动力学研究的重要课题。这类研究可定量地揭示车辆总体和部件系统参数、设计参数、子结构特性与车辆总体动态特性间的内在规律性,可指导总体设计和部件方案设计与优化,可给出性能分析与预测,方案评价与决策,可减少或代替大量耗时、耗力、耗资金的实车试验,特别是那些有危险性的破坏试验,对于有效地提高现代装甲车辆设计水平、缩短研制周期、减少研制经费有很大的社会、技术、经济效益。若抽去其具体的物理与工程含义,这类研究中关于一般人一机一环境系统动力学的数学模型和计算机程序设计,也适用于其它复杂工程系统的研究,因而对车辆工程以外其它广泛的科学技术领域也有科学和实用价值。

本书是作者从事上述坦克总体设计与计算机工程应用在车辆系统动力学分析与仿真实理论研究、工程实践成果的汇集,以近十几年来发表的有关车辆系统动力学分析与仿真的学术论文;为研究生讲授“车辆振动理论”、“系统工程方法论”、“仿真技术”等课程讲义;以及大量未发表过的研究工作手稿为基础,并选用了曾参与我国坦克战术、技术论证和总体设计工作中积累的有关技术资料;主持“车辆动力学分析与仿真(VDAS)软件”、“坦克总体方案特征建模与参数化设计软件系统(TFPS)”等开发的有关技术资料;以及“大型武器 CAD 可行性研究”技术考察与学术交流的有关技术资

料。全书将系统动力学理论与计算机技术结合应用于装甲车辆动力学分析与仿真研究,建立车辆人一机一环境系统动力学数学模型和广义状态方程求解框架体系,开发相应的车辆动力学分析与仿真计算机软件系统,实施装甲车辆包括火力、机动、防护性能在内的动力学分析与仿真,这些就构成了本书的主要研究内容。

全书分为八章。第一章,车辆人一机一环境系统,是本书的绪论,介绍装甲车辆动力学分析与仿真的研究对象和研究方法。第二章,车辆随机参量统计模拟,说明车辆环境随机变量的统计模拟模型;车辆环境随机过程的统计模拟模型;以及车辆随机事件的统计模拟模型。第三章,车辆系统动力学数学模型,着重阐述系统建模方法、典型的车辆系统动力学数学模型和扩展的车辆系统动力学数学模型,包括车辆振动与冲击;火炮跟踪、瞄准、射击;车辆直线与转向行驶;车辆装甲防护等动态系统数学模型,以及含可变形体;含随机元素;含可控制元素;含摩擦元素等的车辆系统数学模型。第四章,车辆人体工程学和人的控制与决策模型,专门研究车辆的人体模型和人体动态特性及其评价指标,驾驶员操纵、炮长操纵、以及坦克火控人一机一环境系统的控制与决策模型。第五章,系统广义状态方程及其数值解法,着重阐述车辆动态系统广义状态方程数值求解框架体系,将车辆振动与冲击;火炮跟踪、瞄准、射击;车辆直线与转向行驶;弹丸命中装甲检靶;火炮身管可变形体;车辆直线与转向行驶可变自由度系统;车辆操纵控制准线性模型等动态系统数学模型,化为系统广义状态方程与输出方程,并按实际需要拼装综合成车辆动力学分析与仿真系统的广义状态空间表达式,在系统广义状态方程数值求解框架体系中,采用列表函数的插值、数值微商与曲线拟合;线性、非线性代数方程组的数值解法;以及常微分方程初值问题的数值解法。第六章,车辆动力学分析与仿真(VDAS)软件,介绍该软件结构和软件功能与测试,着重说明软件前处理、分析计算和后处理的组成与程序设计。第七章,坦克动力学分析与仿真应用实例,介绍坦克虚拟样机总体性能仿真研究;坦克总体方案与总体性能相关性的动力学分析与仿真研

究;以及装有双侧变速箱的履带装甲车辆直线和转向行驶稳定性研究的结果。第八章,车辆动力学分析与仿真的发展前景,讨论多体系统动力学和刚体与可变形体混合模型;现代工程控制论和人的模型;随机微分方程和统计模拟求解模型;系统动力学和系统综合有向图等车辆系统动力学研究领域的发展前景,以及车辆动力学和车辆计算机辅助工程系统;车辆试验技术和车辆仿真试验系统;车辆仿真技术和武器系统作战效能仿真模型等车辆动力学分析与仿真软件研究领域的发展前景。书后附录给出车辆振动与冲击动态系统的系统参数矩阵、输入参数矩阵、输出参数矩阵、交联参数矩阵的拼装。书中第二、三、四章,是本书对车辆系统数学模型的阐述;第五章是对仿真系统求解框架体系的阐述,这两部分为本书的重点。

本书是为从事装甲车辆动力学分析与仿真研究的大学高年级学生、研究生、教师及有关研究人员而写的,也希望能对一般车辆研究、设计、制造和使用的工程技术人员有参考价值。与国内外出版的大多数车辆动力学分析与仿真有关的同类书籍比较,本书不仅详尽论述车辆系统动力学的建模理论:数学模型和求解技术;而且全面介绍车辆动力学分析与仿真软件系统:程序设计和工程应用。将车辆系统动力学建模理论与计算机仿真软件紧密结合,并注重在装甲车辆工程技术领域的应用成果,是本书的主要特点。我国装甲车辆动力学分析与仿真研究工作正处在蓬勃发展阶段,目前国内外该领域的研究专著还很少见,作者衷心期望通过本书的出版,能对装甲车辆动力学分析与仿真研究工作起到积极的推动作用。

本书的撰写和出版过程中曾得到国防科技出版基金评审委员会和国防工业出版社的关心与帮助,承蒙郑慕侨、王良曦两位教授对本书初稿进行评阅并提出宝贵意见。在本书所涉及的研究内容中,曾对作者提供有关数学模型、计算机程序设计、以及车辆工程设计与试验等方面的技术资料、技术支援与建议的有郭裕成、芮振伟、李连洲、张兆华、李蕴学、汪树璋、刘宝铎、于增谋、别杰民等同

志,参加本书所涉及的车辆动力学分析与仿真(VDAS)软件开发和工程应用研究的有中国兵器工业计算机应用技术研究所的刘同龙、陈政、李炜、程曙光、王立山、和柏超、鲍秀生、魏小炯、秦玉明等同志,最后全书的文稿处理和绘图工作则由刘培志、瞿蓉同志完成,这里对上述同志的大力支持和辛勤劳动一并表示衷心感谢。

由于成书仓促,作者的若干研究工作目前仍在继续进行中,故本书的缺点和错误在所难免,作者也衷心期望得到读者的批评指正。

目 录

第一章 车辆人—机—环境系统·····	1
第一节 研究对象·····	3
一、环境·····	3
二、车辆、武器和火控·····	5
三、驾驶和操炮·····	7
第二节 研究方法·····	7
一、数学模型·····	9
二、计算方法·····	11
三、软件系统·····	13
第二章 车辆随机参量统计模拟·····	16
第一节 车辆环境随机变量的统计模拟模型·····	17
一、车辆环境随机变量的统计特性·····	17
二、随机变量的统计模拟·····	20
三、车辆环境随机变量的统计模拟实例·····	27
第二节 车辆环境随机过程的统计模拟模型·····	29
一、车辆环境随机过程的统计特性·····	29
二、随机过程的统计模拟·····	36
三、地面不平度随机过程的统计模拟·····	44
四、装甲车辆典型地面不平度的统计模拟实例·····	52
第三节 车辆随机事件的统计模拟模型·····	55
一、车辆随机事件的统计特性·····	55
二、系统激励随机事件的统计模拟·····	56
三、系统状态和响应随机事件的统计模拟·····	57