

《近代兵器力学》丛书

装甲车辆传动系统动力学

**Dynamics of Armored Vehicle
Transmission System**

项昌乐 编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

《近代兵器力学》丛书

装甲车辆传动系统动力学

Dynamics of Armored Vehicle

Transmission System

项昌乐 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

装甲车辆传动系统动力学 / 项昌乐编著. —北京:国防工业出版社, 2007. 1

(近代兵器力学丛书)

ISBN 7-118-04537-3

I. 装... II. 项... III. 装甲车 - 车辆工程 - 传动系统 - 系统动力学 IV. TJ811

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 084236 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)

京南印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 6 $\frac{1}{2}$ 字数 156 千字

2007 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1500 册 定价 24.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

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	蔡镭			
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 stylized handwritten signature in black ink, likely belonging to Li Shizhong, positioned above the date.

2001 年 1 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,如运动体、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,也就日益有别于其他工程领域。有人说,兵器领域是“瞬态力学大户”,此言不虚!《近代兵器力学》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的卓有成效者。

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阶段,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

前 言

车辆传动系的性能是车辆行驶性能优劣的主要影响因素之一。近年来,我国车辆传动技术发展迅速,研制成功了综合传动装置并在新一代车辆上得到广泛应用。虽然实现了液力传动、液压无级转向、多自由度动力换挡和电液自动操纵等,但其性能指标与发达国家的同类产品相比仍有很大差距。其原因是多方面的,但设计、分析手段和方法的落后无疑是一个重要因素。例如,仍在静态领域进行传动系统的性能匹配设计和零件的强度设计等,在设计过程中大量引入了人为的主观判断,因此,无法在设计阶段就准确地预估传动系统的性能和零部件寿命及可靠性,没有实现传动系统的预测设计。在车辆行驶过程中传动系零部件承受发动机和道路激励以及传动系内部的冲击等交变载荷,其破坏形式一般是疲劳破坏。统计资料表明,零件的破坏 50% ~ 90% 为疲劳破坏。特别是近 20 年来,随着车辆传动装置向高转速、高功率密度方向发展,其工作过程和环境越来越复杂,零部件承受的应力越来越高,使用条件越来越恶劣,发生疲劳破坏的现象越来越多。在军用车辆传动系统的设计和使用中,虽然设计的安全系数足够,但仍出现了断轴、断齿和箱体产生裂纹等早期损坏故障,这些早期损坏属于典型的疲劳破坏,难以在静态领域通过增大零件的结构尺寸加大安全系数的方法来解决,必须在动态领域对系统进行动态分析、疲劳统计分析等方法考虑各种交变载荷对零部件寿命的影响,才能从根本上解决问题。因此,开展传动系统的动力学研究,对其零部件的动态性能和使用寿命及可靠性,以及减轻其重量和减小体积,具有重要意义。

装甲车辆动力学问题的研究主要包括两个方面的内容:①稳定工况下的扭振研究;②非稳定工况(过渡过程)下动态性能的研究。

车辆稳定工况是指车辆在一定路面上、以某一排挡、某一确定发动机转速行驶的工况。在稳定工况下,传动系统上承受着发动机周期性激励和路面随机激励,同时还有传动系统的内部激励(如齿轮啮合冲击等)。在诸多激励作用下,传动系统产生强迫振动。当激励频率等于系统固有频率时,将发生共振现象,动载荷急剧增大,严重影响传动系统零部件强度和寿命。车辆传动系统的非稳定工况又称为过渡工况,指车辆从一种稳定工况向另一种稳定工况的过渡,包括车辆的起步、加速、减速、换挡等。车辆在非稳定工况下,传动系统除承受有稳定工况的全部激励之外,还承受主离合器、液力变矩器、同步器、换挡离合器以及制动器等冲击激励。在这些冲击激励的作用下,传动系统的最大动载荷可以达到发动机最大扭矩工况的2倍~3倍,极易导致传动系统零部件的突然损坏。

作者近十年来,在相关部门的支持下,对装甲车辆传动系统非稳定工况下的动态性能、稳定工况下的扭转振动和疲劳设计进行了较系统的研究。通过对传动系统建模方法、参数确定方法、仿真计算方法、实验分析方法等的研究和探讨,逐步形成本书的撰写内容,经总结提炼,写成本书。书中的内容是作者多年的理论与实践的积累。由于装甲车辆传动系统动力学研究的复杂性,本书的内容需要进一步完善,一些观点和见解需要进一步讨论,恳请读者提出批评和建议。

在本书的撰写过程中,北京理工大学机械与车辆工程学院的刘辉博士,参与了第4章和第5章的撰写,王文平博士整理了参考文献,在此表示衷心感谢。

作 者
2006年6月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 车辆传动系统的功能	1
1.2 车辆传动的类型、组成与发展	2
1.3 车辆传动装置的载荷工况	4
第 2 章 车辆动力传动系统部件的动态特性	7
2.1 发动机的动态特性	7
2.2 离合器的动态特性	8
2.3 液力变矩器的动态特性	16
第 3 章 车辆动力传动动态计算当量系统	25
3.1 车辆动力传动动态计算系统的参数确定	25
3.2 车辆传动动态计算当量系统	42
第 4 章 车辆动力传动系统的扭转振动	49
4.1 车辆动力传动系统的自由振动	49
4.2 发动机的激励分析	65
4.3 车辆动力传动系统的强迫振动	73
4.4 车辆动力传动系统的扭转振动计算软件	80
4.5 扭转振动的试验方法	91
4.6 某型装甲车辆动力传动系统的扭转振动计算 与试验	99
第 5 章 非稳定工况时车辆动力传动系统的载荷	122
5.1 换挡过程动力传动系统的载荷	123

5.2	闭锁过程动力传动系统的载荷	126
5.3	加速性能仿真	130
第6章	车辆动力传动系统二维载荷谱	132
6.1	车辆传动系统随机载荷的统计计数处理	134
6.2	传动系各工况载荷分布规律检验	135
6.3	车辆多工况行驶疲劳载荷的二维复合概率 密度函数	139
6.4	建立传动系寿命里程二维设计谱	140
6.5	建立传动系寿命里程八级程序载荷谱	143
6.6	某型装甲输送车传动系统载荷谱	144
第7章	车辆动力传动系统疲劳设计方法	155
7.1	车辆传动系统零件材料的疲劳特性	155
7.2	疲劳寿命估算方法	171
参考文献		179

Contents

Chapter 1	Introduction	1
1.1	Function of Vehicular Drivetrain	1
1.2	Type, Constitution and Development of Vehicle Drivetrain	2
1.3	Calculation Load of Vehicular Drivetrain	4
Chapter 2	Dynamic Characteristic of Vehicle powertrain Components	7
2.1	Dynamic Characteristic of the Engine	7
2.2	Dynamic Characteristic of the Clutch	8
2.3	Dynamic Characteristic of the Hydraodynamic Torque Converter	16
Chapter 3	Equivalent System for Dynamic Characteristic Calculation of Vehicle Powertrain	25
3.1	Establishment of Dynamic Calculation System Parameter of Vehicular Powertrain	25
3.2	Dynamic Characteristic Calculation Equivalent System of Vehicle Drivetrain	42
Chapter 4	Torsional Vibration of Vehicle Powertrain	49
4.1	Free Vibration of Vehicle Powertrain	49
4.2	Excitation Analysis of the Engine	65
4.3	Forced Vibration of Vehicle Powertrain	73
4.4	Torsional Vibration Calculation Software Development	

of Vehicle Powertrain	80
4.5 Experiment Method of Torsional Vibration	91
4.6 Torsional Vibration Calculation and Experiment Validation of an Armored Vehicle Powertrain	99
Chapter 5 Load of Vehicle Powertrain in Non-steady Condition	122
5.1 Load of Powertrain in Shifting Process	123
5.2 Load of Powertrain in Lock-up Process	126
5.3 Accelerating Performance Simulation	130
Chapter 6 Two Dimension Load Spectrum of Vehicle Powertrain	132
6.1 Statistic Counting Treatment of Vehicle Drivetrain Random Load	134
6.2 Check of Drivetrain Load Distribution Regularity in Every Work Condition	135
6.3 Two Dimension Compound Probability Density Function of Vehicle Multi-condition Running Fatigue Load	139
6.4 Development of Two Dimension Design Spectrum for Drivetrain Fatigue-life Mileage	140
6.5 Development of Drivetrain Fatigue-life Eight-level Program Load Spectrum	143
6.6 Load Spectrum of an Armored Delivery Vehicle Drivetrain	144
Chapter 7 Fatigue Design Method of Vehicle Powertrain	155
7.1 Fatigue Characteristic of Material Used in Vehicle Drivetrain Parts	155
7.2 Estimation Method of Fatigue Life	171
Reference	179