



国防科工委“十五”规划教材·兵器科学与技术

火炮设计理论

张相炎 主编

张相炎 郑建国 杨军荣 编著

北京理工大学出版社

北京航空航天大学出版社 西北工业大学出版社

哈尔滨工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

内容简介

本书主要介绍火炮设计的基本概念、基本理论和基本方法,包括火炮设计理论的主要内容和
发展、火炮系统分析与总体设计、火炮主要零部件(包括炮身、反后坐装置、自动机及炮架等)
的设计理论和方法。

本书是高等院校火炮专业的专业教材,也可作为从事火炮设计、研究、生产、试验的科技人
员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

火炮设计理论/张相炎主编.—北京:北京理工大学出版社,
2005.2

普通高等教育“十五”国家级规划教材.国防科工委“十五”
规划教材.兵器科学与技术

ISBN 7-5640-0415-0

I.火… II.张… III.火炮-设计-高等学校-教材
IV.TJ302

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第135492号

火炮设计理论

张相炎 主编

责任编辑 陈 竑

责任校对 陈玉梅

北京理工大学出版社出版发行

北京市海淀区中关村南大街5号(100081)

电话:010-68914775(办公室) 68944990(发行部)

<http://www.bitpress.com.cn>

E-mail:chiefedit@bitpress.com.cn

北京圣瑞伦印刷厂印制 各地新华书店经销

开本:787×960 1/16

印张:21.75 字数:449千字

2005年2月第1版 2005年2月第1次印刷

印数:3000册

ISBN 7-5640-0415-0 定价:35.00元

国防科工委“十五”规划教材编委会

(按姓氏笔画排序)

主任：张华祝

副主任：王泽山 陈懋章 屠森林

编委：王 祁 王文生 王泽山 田 蔚 史仪凯

乔少杰 仲顺安 张华祝 张近乐 张耀春

杨志宏 肖锦清 苏秀华 辛玖林 陈光禡

陈国平 陈懋章 庞思勤 武博祎 金鸿章

贺安之 夏人伟 徐德民 聂 宏 贾宝山

郭黎利 屠森林 崔锐捷 黄文良 葛小春

目 录

第一章 绪论	1
1.1 火炮的地位与作用	1
1.2 火炮设计理论的主要内容	3
1.3 火炮设计理论的主要研究方法	5
1.4 火炮设计理论的基本学习方法	8
第二章 炮身设计	10
2.1 概述	10
2.2 身管内膛结构及其设计	23
2.3 固体力学基础	32
2.4 单筒身管设计理论与方法	39
2.5 双层身管设计理论与方法	53
2.6 自紧身管设计理论与方法	74
第三章 反后坐装置设计	86
3.1 概述	86
3.2 流体力学基础	98
3.3 火炮发射动力学	104
3.4 复进机设计理论与方法	121
3.5 制退机设计理论与方法	128
3.6 复进节制器设计与复进问题计算	141
3.7 炮口气流现象与炮口制退器设计	156
第四章 火炮自动机设计	170
4.1 概述	170
4.2 火炮自动机动力学	175
4.3 火炮自动机主要机构设计	210
4.4 导气式自动机	230
4.5 浮动自动机	239
第五章 火炮炮架设计	247
5.1 概述	247
5.2 架体设计	250
5.3 平衡机设计	272
5.4 瞄准机设计	280



5.5	运动体设计	287
5.6	自行火炮炮塔设计	297
第六章	火炮系统分析与总体设计	306
6.1	火炮战术技术指标	306
6.2	火炮系统分析	309
6.3	火炮总体设计任务与内容	317
6.4	火炮总体设计方法与技术	326
	主要参考文献	337



总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就。研制、生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其他技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占有了一席之地。十一届三中全会以来,伴随着改革开放的伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转移,大量军工技术转向民用,为发展国民经济作出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍,他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,生产和传播国防科技新知识、新思想,攻克国防基础科研和高技术研究难题当中,具有不可替代的作用。国防科工委高度重视,积极探索,锐意改革,大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当



今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影响。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版 200 种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相关专业领域的专家学者竞投编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的 100 多位专家、学者,对经各单位精选的近 550 种教材和专著进行了严格的评审,评选出近 200 种教材和学术专著,覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与工程、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者,他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等,具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中,国防特色专业重点教材和专著的出版,将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出,进入 21 世纪,我国进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化新的阶段。全面建设小康社会的宏伟目标,对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展,提升国防实力,需要造就宏大的人才队伍,而教育是奠基的柱石。全面振兴国防科技工业必须始终把发展作为第一要务,落实科教兴国和人才强国战略,推动国防科技工业走新型工业化道路,加快国防科技工业科技创新步伐。国防科技工业为有志青年展示才华,实现志向,提供了缤纷的舞台,希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识,树立正确的世界观、人生观、价值观,努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任,创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好,国防科技工业的明天将再创辉煌。

张华祝



前 言

根据培养通用人才的需要,我们深入进行教学改革,对专业课程进行了整合,将火炮专业方向的专业课程,由原来的四门主干专业课程“炮身设计”、“火炮反后坐装置设计”、“火炮自动机设计”、“炮架及总体设计”整合成“火炮设计理论”。

近年来,随着专业的拓宽,火炮专业方向的毕业生已经严重供不应求。充分发挥优势,多出人才,出好人才是我们的立足之本。培养合格专业人才更是我们应尽的义务。课程建设和教材建设是培养合格专业人才的主要方面。

本书作为“十五”国家规划教材,是根据火炮专业“火炮设计理论”课程的教学大纲编写的,适用于80学时教学内容的教学,对教学时数少于80学时的教学,主讲教员可以根据需求做适当裁减。

全书共分六章。第一章绪论,从现代战争的特点以及现代战争对火炮的要求出发,介绍火炮在现代战争中的地位与作用;主要介绍火炮设计理论及其主要研究内容、发展、研究方法。第二章炮身设计,介绍身管内膛结构及其设计方法;介绍身管应力应变分析理论和方法;分别介绍单筒身管、双筒身管设计理论、方法和特点,特别是自紧身管设计及其应用等。第三章反后坐装置设计,介绍火炮反后坐装置及其作用原理;介绍火炮发射动力学的基本理论和方法及其应用;主要介绍火炮反后坐装置设计,包括复进机设计、制退机设计、复进节制器设计和炮口制退器设计的设计理论和方法。第四章火炮自动机设计,介绍火炮自动机工作原理,介绍火炮自动机动力学以及计算机仿真方法;主要介绍火炮自动机主要机构设计,包括炮门设计、开门机构设计和供输弹机构设计等设计理论与方法;介绍导气式自动机和浮动自动机及其技术关键、设计特点等。第五章火炮炮架设计,系统介绍牵引火炮的炮架设计,包括架体设计、平衡机设计、瞄准机设计和运动体设计的设计方法和结构布置;自行火炮的炮塔设计的特点和结构布置。第六章火炮总体设计,介绍火炮的战术技术指标等基本概念,火炮系统分析的主要内容和方法,现代火炮的特点与总体设计要求,火炮总体设计主要方法与技术等。

本书第一章、第四章、第五章、第六章由张相炎执笔,第二章由杨军荣执笔,第三章由郑建国执笔。全书由张相炎统稿主编。



本书全面系统地介绍了火炮设计基本理论和方法,在继承传统火炮设计理论的基础上,根据现代火炮的特点和火炮发展趋势,结合近年来取得的科研成果,具有时代特色和先进性。本书将传统火炮设计理论与现代设计理论和方法相融合,介绍现代设计理论和方法在火炮设计中的应用原理和方法,具有一定的通用性和适应范围。本书以介绍应用原理和方法为主,具有较强的实用性,不仅可供高等院校教学用,还可以作为从事火炮科技人员的参考书。

编著者所在单位的许多教授专家对本书初稿提出了许多有益的修改意见。本书在编写中参考了许多专著和论文。在此对以上为本书的出版付出了心血的所有同仁以及本书的主审专家一并表示衷心感谢。

由于编著者水平所限,难免有贻误和不妥的地方,诚恳欢迎读者批评指正。

张相炎

2004年3月于南京

第一章 绪 论

1.1 火炮的地位与作用

火炮是以发射药为能源,利用火药燃气压力抛射弹丸等战斗部,口径等于和大于 20 mm 的身管射击武器,广泛装备于陆、海、空各军兵种。

我国是火炮的发源地。早在春秋时期,就出现了抛石机,也称之为“砲”,它利用杠杆原理,众人合力把大石块抛出去攻守城堡或杀伤人员。这是最古老的抛射武器,属于冷兵器,它使人体得到了延伸,可以打击人体够不到的目标,改变了之前面对面“肉搏”战斗方式。

公元 7 世纪,唐代炼丹家孙思邈发明了黑火药,于 10 世纪初开始用于武器。抛石机除了抛射石块外,还抛射带有燃爆性质的火器,如霹雳炮、震天雷等。抛射的能源以黑火药代替人力后,“炮”取代了“砲”。1132 年(宋绍兴二年),陈规镇守德安城时发明了火枪。火枪用竹筒制成,内装火药,临阵点燃,喷火烧敌。1259 年(宋开庆元年),出现突火枪。这种竹制抛射火器具备了火药、身管、弹丸三个基本要素,可以认为它就是火炮的雏形。热兵器的出现,不仅提高了兵器的威力,更重要的是使作战模式由“点打击”变为“面打击”。

我国古代金属冶炼铸造技术成就辉煌,直接推动着金属管型火器——火铳的诞生。1332 年(元至顺三年)制造的青铜火铳是世界上现存最古老的花炮。金属管型抛射火器的出现,反映了工业和经济的进步,标志着火炮技术实现了第一次质的飞跃。金属管型抛射火器的射程更远,威力更大,使用更安全。这一时期,金属管型抛射火器已广泛用于战场,曾被尊为铜将军,还立过炮神庙来祭祀,反映出当时人们对金属管型抛射火器的崇拜。

13 世纪,我国的火药和火器沿着丝绸之路西传,在战争频繁和手工业发达的欧洲得到迅速发展。16 世纪末,伽利略创立了物体在空中飞行的抛物线理论;17 世纪,牛顿提出了飞行物体的空气阻力定律;18 世纪,罗宾斯于 1742 年出版了《枪炮术原理》专著。这些重要成果奠定了火炮设计的理论基础。欧洲率先展开产业革命以后,科学技术的进步创造了空前的生产力,同时也推动火炮在结构上发生了深刻的变革。19 世纪中叶以前的火炮一直采用前装式滑膛身管,发射球形弹丸,威力有限。1823 年硝化棉火药(即无烟药)出现,使火炮的射程有了大幅度提高的可能。1846 年出现带螺旋膛线的线膛身管,实现了发射锐头圆柱弹丸的设想,显著提高了火炮的射击精度和射程。1854 至 1877 年间先后出现的楔式炮闩和螺式炮闩,形成了从炮身后端快速装填弹药的新结构。火炮威力不断增大,自身质量随之剧增,发射时全炮的跳动和后移猛烈,严重影响操作使用。1872 年以后陆续出现几种带有弹簧和液压缓冲装置的弹性炮架,有效地缓解了威力和机动性的矛盾。火炮从初期的前装式滑膛金属身管和刚性炮架



到后装式线膛钢质炮身和弹性炮架,经历了 600 余年的时间,标志着火炮技术实现了又一次质的飞跃,确立了现代火炮的基本构架。

跨入 20 世纪,科学研究步入组织化发展的道路,科学家集中起来对武器进行广泛研究,硕果累累,推动火炮技术快速前进。第一次世界大战中,战场上出现了坦克、军用飞机和军舰,为火炮在这些战斗平台上的应用提供了条件。第二次世界大战及以后的局部战争中,战斗机、导弹相继投入使用,技术兵器的种类日益增多,战场的正面和纵深显著拓展,隐蔽目标、装甲目标、运动目标等层出不穷,火炮自身的作战任务更加繁重,要求不断提高,从而促使火炮继续发展,逐渐形成了一个品种繁多、技术密集的武器家族,如压制火炮(榴弹炮、加农炮、加榴炮、迫击炮等)、高射炮(高炮)、反坦克炮(包括无坐力炮)、坦克炮、步兵战车炮、航炮、舰炮和海岸炮等各种用途的火炮,以及牵引炮、自行炮、铁道炮等各种行走方式的火炮。

科学技术的发展和战争的需求拓宽了火炮的内涵。现代的火炮不仅发射普通的无控弹药,也发射制导弹药和灵巧弹药,正在研究中的液体发射药,电、磁等新能源发射武器,均属于它的范畴。

火炮的演变过程表明,科学技术的进步是它发展的基础,战争的需求是它发展的动力,解决威力和机动性的矛盾是它发展的主线。

火炮在战争中的地位是显而易见的。自明朝永乐年间我国创建了世界上第一支炮兵部队——神机营以来,火炮在战争的激烈对抗中发展壮大,不久就成为战场上的火力骨干,起着影响战争进程的重要作用。在第一次世界大战中,炮战是一种极其重要的作战方式,主要交战国投入的火炮总数达到 7 万门左右。第二次世界大战中,苏、美、英、德四个主要交战国共生产了近 200 万门火炮和 24 亿发炮弹。著名的柏林战役,苏军集中了各类火炮 4 万余门,在一些重要战役突破地段,每千米进攻正面上达到了 300 门的密度,充分发挥了炮火突击的威力,火炮被誉为“战争之神”。在大规模战役中如此,在第二次世界大战后的历次局部战争中,火炮的战果依然辉煌。20 世纪 50 年代的朝鲜战争中我军共击落击伤敌机 12 000 架,其中 9 800 架属于高射炮兵的功劳,约占 80%;20 世纪 60 年代的越南战争,美军损失飞机 900 多架,其中 80%也是为高射炮所毁伤;20 世纪 70 年代的第四次中东战争,双方共有 3 000 辆坦克被毁,50%是被炮火命中的。

20 世纪 90 年代的海湾战争和巴尔干地区的武装冲突,以及 21 世纪初的伊拉克战争是以高技术现代化为主要特征的战争,大量使用了各种飞机、电子装备和精确制导武器,新武器的发展和运用,使作战思想、战场上的火力组成和任务分工发生了深刻的变化。战争初期的电子战、高强度的空袭和精确打击,尽管战果显著,但耗费惊人,难以持久。在战争后期的直接对抗中,强大的火炮仍具有重要意义,它不仅是战斗行动的保障,而且仍将是最终夺取战斗全胜的骨干力量。

未来战争在空中、海上、地面共同组成的装备体制中,火炮仍然是不可替代的。首先,地面战仍将是不可避免的,火炮构成地空配套、梯次衔接、点面结合的火力网,很少出现火力盲



区,而且是未来战争中拦截中低空入侵导弹和近程反导的有效手段之一;其次,火炮是部队装备数量最大的基本武器,占总兵力 60%~70%的陆军更是以火炮为主要装备,这种格局今后仍将持续下去;第三,火炮机动性良好,进入、撤出和转移阵地快捷,火力转移灵活,生存能力和抗干扰能力强,能够伴随其他兵种作战,实施不间断的火力支援;第四,火炮的经济性良好,无论是火炮的研究、工程开发、生产装备还是后勤保障,其全寿命周期的总费用都远低于其他技术兵器。由此可见,火炮仍是今后继续大力发展的重要武器装备。

战争的多样性决定了火炮品种的多样性,它们的功能各有侧重,轻重梯次配置,和其他武器相互补充、优化组合,形成完整的装备和火力体系。

现代火炮是战场上常规武器的火力骨干,配置于地面、空中、水上、水下各种运载平台上。进攻时用于摧毁敌方的防御设施,杀伤有生力量、装甲车辆、空中飞行物等运动目标,压制敌方的火力,实施纵深火力支援,为后续部队开辟进攻通道;防御时用于构成密集的火力网,阻拦敌方从空中、地面的进攻,对敌方的火力进行反压制;在国土防御中用于驻守重要设施、进出通道及海防大门。它具有火力密集、反应迅速、抗干扰能力强、可以发射制导弹药和灵巧弹药实施精确打击等特点。

随着高技术的发展和运用,火炮在提高炮口动能、射程和精度,提高操作控制自动化程度,更新杀伤和毁伤机理等诸多方面都有较大的潜力;在进一步改善机动性能、增强自身防护、提高生存能力、实现数字化和自主作战功能等方面,也有继续发展的广阔空间;火炮以及与其他兵器集束化、集成化还有一系列新的发展领域。21 世纪,火炮将以崭新的面貌展现在战场上。

1.2 火炮设计理论的主要内容

经过 700 余年的演变,火炮的概念已从当初的简单发射平台发展成为以火力系统为主体,包括目标探测系统、火力控制系统、运载系统以及其他辅助系统组成的技术密集的综合武器系统,总称“火炮系统”。如一个连套的某自行高炮系统,包括 6 辆自行火炮、1 辆指挥车、1 辆雷达车、1 辆电源车、1 辆弹药车、1 辆抢修车。这里所谓的“火炮”是指火炮系统中火力系统的核心部分——发射装置。

火炮发射过程是一个极其复杂的动态过程。一般发射过程极短(几毫秒至十几毫秒),经历高温(发射药燃烧温度高达 2 500~3 600 K)、高压(最大膛内压力高达 250~700 MPa)、高速(弹丸初速高达 200~2 000 m/s)、高加速度(弹丸直线加速度是重力加速度的 1 000~3 000 倍,火炮的零件加速度也可高达重力加速度的 200~500 倍,零件撞击时的加速度可高达重力加速度的 15 000 倍)过程,并且发射过程以高频率重复进行(每分钟可高达 6 000 次循环)。从工程的角度,可以把火炮视为采用特殊能源的超强功率的特种动力机械。一门小口径 37 mm 口径的火炮,炮口动能约为 0.3 MJ,火炮的瞬时功率约为 69 MW,相当于一个中型发



电厂的功率；一门中口径 85 mm 口径的火炮，炮口动能约为 3 MJ，火炮的瞬时功率约为 326 MW，相当于一个小城市发电厂的功率；一门大口径 152 mm 口径的火炮，炮口动能约为 13 MJ，火炮的瞬时功率约为 940 MW，相当于一个中等城市发电厂的功率。火炮发射过程还伴随发生许多特殊的物理化学现象，如内膛表面的烧蚀和磨损、膛口冲击波、膛口噪声、膛口焰、机械运动、冲击、振动等。火炮在使用中，还要能适应严寒酷暑、风沙淋雨环境，满足长期储存的要求，在高瞬态、强载荷、极端环境中保证武器可靠地工作，达到必要的工作寿命，并满足规定的质量指标。这种工作状况构成了火炮的特色，也是火炮研究的难点所在。

火炮的设计过程是一个多方案、多参数、多目标的评价和决策过程。运用设计方法可以使这一过程科学化和规范化，减少不必要的反复，保证优质高效地完成设计任务。火炮设计理论的发展，为火炮设计提供了一系列行之有效的方法和技术。

火炮设计理论是火炮设计的理论基础，是火炮设计中基本概念、理论、方法及过程的高度概括，它主要研究火炮系统的组成与性能评价，研究各种火炮发射原理、伴随现象及其规律性，研究火炮构成原理与方法，研究火炮主要零部件的设计理论和设计方法等。火炮设计理论主要包括火炮系统分析、火炮总体设计和火炮主要零部件设计等。

火炮系统分析，是指用系统方法，寻求火炮系统的最优方案（系统目标最优化，如费用最低、效能最大、效费比最高等），即用周密的可再现的技术，确定系统各种方案的可比性能、效能、费用等，并对这些指标进行量化，给出火炮系统的最优方案。在火炮的发展研究、方案选择、技术修改、使用等过程中，火炮系统分析可直接用来提出改进意见。

火炮总体设计，广义上是指用系统的观点、优化的方法，综合相关学科的成果，进行与火炮总体有关因素的综合考虑，其中包括立项论证、战术技术要求论证、总体方案论证、功能分解、技术设计、生产、试验、管理等；狭义上是指用系统的观点、优化的方法，综合相关学科的成果，进行火炮质的方面设计，主要包括火炮组成方案、总体布置、结构模式、人机工程、可靠性、安全性、检测、通用化、标准化、系列化等涉及火炮总体性能方面的设计。这里所讲的火炮总体设计，如果不加说明的话，主要是狭义上的。

火炮主要零部件设计，是指研究给定结构在发射的冲击载荷作用下力的传递、部件运动规律以及强度、刚度等问题，并根据总体设计要求及零部件本身作用及特点，研究火炮主要零部件的构造原理和方法，设计火炮主要零部件具体结构等。火炮主要零部件设计主要包括炮身设计、反后坐装置设计、（半）自动机设计、供弹机设计、炮架设计、运动体设计等。

经典火炮设计理论以质点力学和材料力学理论对问题进行近似的描述，从而导出机构和零部件的设计方法；在分析全炮受力状态时，将炮架视为一个刚体，用动静法考虑后坐部分的运动，将问题转化为静力学问题求解，得出了一些简单实用的结果，并以此指导火炮总体布局。身管是火炮发射时主要受力部件，它的强度问题、应力疲劳问题、烧蚀和磨损问题均十分突出，经典理论将它简化为静压作用下的轴对称厚壁圆筒，用材料力学的方法求解。反后坐装置作为控制全炮受力和运动的关键性液压机构，是借助一维不可压稳态流求解的。自动机是由一



系列凸轮、杠杆组成的复杂平面运动机构,借助由传速比、传动效率构成的质量替换法,可以将它转化为单自由度问题求解。在利用膛内燃气剩余能量时,燃气的流动和流出问题都是按一维准定常流处理的。经典理论的近似性是显然的,它必须借助试验求取修正系数才能使计算结果在一定条件下比较接近实际。20世纪60年代以前的火炮大体上都是在经典武器设计理论指导下设计出来的,它简便易用,适合手工进行计算。其中有的部分经过软件化改造,至今仍在继续使用;有的部分则在设计初期作估算分析之用。

20世纪六七十年代,火炮进入了第二次世界大战后的更新时期。战场对火炮的威力和综合性能要求越来越高,促使火炮设计理论的发展趋向于更系统、更深入、更精细地描述发射过程。例如,基于动力学方法的气炮发射动力学理论迅速发展,它考虑了零部件的质量分布、动态耦合,建立了火炮多刚体动力学模型、刚弹元件组合的多体动力学模型和相应的算法,通过振动特性预测其强度和射击密集度等综合性能。用机构动力学理论分析自动机的多自由度问题,对各种新型自动机的原理和工程应用做了大量研究。用有限元理论对复杂形状的零件进行应力应变场的研究,为改进结构提供依据。对身管的液压和机械挤扩等预应力强化过程进行弹塑性分析,扩充了身管的设计理论。用断裂力学理论研究身管材料强度和裂纹形成、扩展规律,预测它的低周疲劳寿命。在反后坐装置研究中,提出了轴对称二维定常和非定常湍流模型,用有限差分法详细分析了液孔附近的流场并对各种情况下的阻力系数进行了理论探讨。对前冲机、可压缩流体制退机、二维后坐原理等均做了广泛深入的研究。火炮总体设计理论日益受到重视,也有了相应的发展。

上述一系列研究活动和成果表明,我国火炮工作者对火炮的规律性认识正在逐步加深,新的适合国情的现代火炮设计理论体系已初步确立。同时,在这一过程中,自行设计的气炮性能不断改善,火炮的发展潜力不断被挖掘和利用,进一步大幅提高威力、减小质量的难度越来越大。因而,新发射原理、新能源、新结构、新材料已成为继续研究的热点。火炮设计理论一方面需要继续深化和完善,另一方面还要向新的领域拓展。

作为火炮专业的基础教学,本教材仍以牵引火炮为主要对象,经典火炮设计理论为主,适当介绍现代火炮设计理论的新发展和动向。

1.3 火炮设计理论的主要研究方法

我国火炮的发展大体经历了仿制改进、研究提高与自主开发三个主要阶段,总体上体现加速发展的特征,这与研究条件和方法的不断改进提高和研究经验的积累有着密切的联系。在不同的研究阶段,根据对问题的认识程度,灵活运用一种或综合运用多种方法,可以取得事半功倍的效果。

火炮设计理论的发展,为火炮设计提供了一系列行之有效的方法和技术。评审技术已在设计管理中广泛应用;系统分析、效能分析和综合性能评价等项技术日益受到重视,成为火炮



性能比较、方案遴选的辅助决策手段；特别是基于火炮发射动力学模型的数值模拟技术，在方案设计和试验过程中适时地预测武器的综合性能并提出改进的途径，已成为火炮设计的支撑技术之一；建立在最优控制理论、数学规划基础上的火炮优化设计技术，在反后坐装置、自动机、平衡机等部件上应用，取得了显著的效果；以炮架新原理、新结构、新材料为依托的火炮减重技术，正在迅速发展；从分析火炮故障率出发的可靠性分析和设计技术已逐步推广应用，为新火炮的可靠性预测积累了有益的经验；由设计理论和设计经验总结出来的设计准则和设计规范陆续形成；标准化、通用化、系列化的水平不断提高；武器的人机工程设计问题也越来越受到重视。随着计算机的普及，上述各项技术大部分已软件化，形成了如火炮动态设计和分析、发射动力学分析和计算、三维实体建模等多种专用软件包、专家系统和应用程序，配套的数据库图形库也相继建立，成为火炮研究和工程设计的强大工具，同时，也为建立以计算机为支撑的无图纸化设计方法准备了条件。要强调的是，上述有关设计方法和技术通常在结构方案大体确定之后才能发挥作用，而结构方案的确定，往往离不开设计者的经验和创造性思维，所以火炮工作者需要有广泛的结构知识、丰富的实践经验和强烈的创新意识。

一般说来，火炮设计理论的研究方法主要有经验研究法、实验研究法和理论研究法。

用经验的方法研究问题，就是利用已有的经验和相关的知识，对问题做出定性的推测，提出一种解决问题的设想，通过试探过程达到预期目标。

任何一种新的火炮系统，其初始方案的构思和技术途径的确定都要依靠设计者的经验和创造性思维。在革新与改进阶段，尽管对火炮的某些内在规律认识尚不很深入，但已积累了相当的经验时，依托成熟技术，采用设计——试制——试验和分析——修改的方法，不仅推出了一批新的火炮型号，还涌现出许多有价值的技术革新成果。在实践中，常常根据大量试验数据归纳为简单实用的经验公式，用于分析处理问题。这些在一定条件下行之有效的方法都是基于经验研究方法形成的。至于火炮总体框架的构思和布局、部件的结构设计，更离不开设计者的经验和对战术技术的理解，都是依靠自身的经验起步，再通过理论和试验方法做出分析或加以优化并不断完善的。

经验方法有时会带有一定的局限性或主观成分，但一些新思想、新技术途径往往是以此为生长点发展起来的。它与理论和实验研究方法紧密结合，在火炮研究中可以发挥重要的作用。

科学实验是探索未知世界的手段，是知识的源泉。实验研究方法可以在严格控制的环境中重复展现研究对象的动态过程，运用现代测试技术将短暂瞬变的现象记录下来，进行详细的研究分析，寻求规律。

火炮研制过程中，经常使用实验方法，主要包括靶场试验（泛指射击试验）、综合实验、模拟和仿真实验等。靶场试验又有不同层次和目的。既可以是对全炮，也可以是对重要零部件；既可以是对全炮综合性能试验，也可以是对单项性能试验。按目的还可以分为鉴定试验、摸底试验、攻关试验等。靶场鉴定试验一般是以火炮整体为对象，以任务书给定的各项战技指标为依据，在接近实战的各种条件下测试火炮的综合性能，创造一些极端环境来检验火炮的工作可靠性。



新研制的火炮都必须经过多次靶场试验的严格考验,分阶段地定型,最后才能投入正式生产。综合实验、模拟和仿真实验则主要用于探索规律,对理论进行检验或修正,对新原理、新结构进行系统研究,是新理论创立的基础。对一些偶发现象也可以通过实验方法模拟复现,分析它的形成机理,往往可以直接解决问题。

近年来,利用理论模型和计算机进行系统的数值模拟,也称为数值仿真,部分代替物理实验,已成为实验研究新的有效方法,受到普遍关注。在新火炮研制过程中,许多环节都开始应用计算机数值仿真的方法在多种参量变化的情况下做出全面的分析、方案优化,收到了显著效果。计算机仿真实验的重要性,不只在简单地替代部分物理的实验,而主要在于通过它使所研究的问题得到更为深入的理解和启发,揭示问题的内在规律和特征。值得注意的是,计算机仿真实验并不能完全代替物理的实验,它的可信度与理论模型的优劣及有关基础参数的选取关系极大,需要结合物理的实验,不断总结经验并逐步完善才能取得更好的效果。

理论的价值在于它的预测性和对实践的指导。新设计的方案初步确定后,可以用设计理论预测它未来的运行情况和主要性能,指导调整设计参量和结构方案;实验使用中发生问题,可以用设计理论分析原因,寻找解决问题的办法。理论研究方法通常是通过对研究对象的认识程度,提出必要的基本假设,继而建立逼近实际情况的物理模型,导出相应的数学模型,最终求出数值解或分析解,从而建立或进一步发展火炮设计理论,达到更深刻地阐明基本规律、更合理地解释复杂现象、更有效地解决疑难问题的目的。火炮设计理论反映了发射过程中各参量之间的相互关系和相互作用,阐明它的运行机理和基本规律。

基本假设是针对具体研究对象的研究范围经过提炼而提出来的,通过假设把实际的复杂情况作必要的简化,避开那些暂时难以考虑的次要因素,形成一个可行的合理提法。当认识深化了,还可重新修订假设,使之更加逼近实际。好的假设既简化了问题,又不会导致主要特征的严重失真,所以,基本假设是理论研究的重要环节。例如,经典火炮设计理论假设炮架整体为刚体,导出了火炮的射击稳定条件,直观简明。当时火炮的威力不很大,且以手工计算为主,它曾有一定的指导意义。当今火炮的威力大幅提高,计算机已普遍应用,刚体假设不再适用。于是提出了假设炮架由多刚体组成的火炮发射动力学理论,它可以通过大量的计算,更好地揭示火炮发射时的动态特性,进一步阐明部件质量分布、动态耦合对火炮构件及射击密集度的影响。假设改进了,理论也发展了,但并不能说已完善无缺了,因而又需要新的基本假设。

建立物理模型和导出数学模型时需要把基本假设具体化、公式化,并继续对细节做好处理,将研究对象抽象为按一定方式连接的模块,通过基本定律、制约关系、初始和边界条件,使方程组构成定解形式。但是,通常只有少数情况可以获得分析解,多数情况需要采用适当的算法求取数值解。

由于基本假设、物理模型对研究对象做了一定程度的简化,数学模型的解和实际情况必然存在差异,这时可以参照实验数据,在一定范围内求出符合系数,或重新修正模型、假设,反复改进。



经验研究法、理论研究方法和实验研究方法的相互配合,推动着火炮设计理论不断发展和完善。

力学对认识和解决火炮及其发射问题起着关键作用,是构成火炮设计理论最重要的基础。解决工程问题离不开计算,计算机的广泛应用促进了计算方法的迅速发展。把研究对象提炼为力学问题,建立模型,构造计算方法,把这些方法软件化,进行系统的数值模拟,已成为火炮设计和研究不可缺少的重要手段。机械学内涵深广,它的设计理论、设计方法对火炮普遍适用,常被视为设计的依据和准则。新型材料的发展和得到高技术支撑和改造的各种制造设备为火炮采用新结构和减重创造了条件。高技术在火炮中也大量存在并将有广泛应用,当然,这些高技术用于火炮,必须充分考虑高过载、极端环境和连续工作等特殊条件。火炮设计理论与相关学科的新理论、新技术、新方法有机融合,将进一步推动着火炮设计理论不断发展和完善,使设计出来的火炮达到先进的性能。

1.4 火炮设计理论的基本学习方法

火炮设计理论是火炮设计中基本概念、理论、方法及过程的高度概括,它贯穿于火炮工程实践的全过程,在火炮工程实践中有意或无意、自觉与不自觉随时都要用。

火炮设计理论与其他理论一样,来源于实践,经总结、提炼、抽象,再服务于实践,指导实践,并不断修改、完善理论。

火炮设计理论是火炮工程实践的理论依据。它来源于火炮工程实践,是经验的总结,服务于工程实践,指导工程实践。理论是实践经验的高层次,是工程实践理论的提炼和抽象,具有通用性和先进性。火炮设计理论是通用理论和技术与专业工程实践相结合的产物,火炮设计理论的自身发展,是通过不断采用、借鉴、融合先进的通用技术和理论,不断修改、提高、完善自身。火炮设计理论及技术向民用方向拓宽与转移,具有比较广阔的前景。

火炮设计理论是火炮工程技术人员必须掌握的基础。它包含火炮设计中的基本概念、基本知识、基本思路、基本方法。只有在充分认识、理解、掌握基本概念、基本知识、基本思路、基本方法的基础上,才能充分发挥个人主观能动性和创造性。

火炮设计理论是火炮专业的必修专业课。对火炮专业的学生而言,火炮设计理论教给你的是火炮设计中的基本概念、基本知识、基本思路、基本方法,至少将你由“外行”培养成为不说外行话的“内行”,并指导今后工作。实际上,从本质上来说,火炮是一种特殊机械,火炮设计理论以火炮为对象,处理高温、高压、高速状态下的机、电、液、气等相关问题,学习火炮设计理论,就是学习解决问题的思路和方法,学会了处理特殊状态下特殊环境里的特殊问题的方法,对常规状态下常规环境里的常规问题的处理就简单和容易得多。

学习火炮设计理论,从内容上,要求掌握火炮工作原理以及计算方法,火炮及其零部件的基本分析方法(包括强度分析、运动学分析、动力学分析),即建模、求解、分析、模拟(仿真),以