



普通高等教育创新型人才培养规划教材

新概念武器发射原理

XINGAINIAN WUQI
FASHE YUANLI

陆 欣 编著



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS



普通高等教育创新型人才培养规划教材

新概念武器发射原理

陆 欣 编著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

主要针对近几十年来武器系统发射领域中出现的新原理、新理论和新方法,论述新概念武器系统的工作过程和发射原理。主要内容包括内弹道流体动力学理论基础、轻气炮内弹道理论、液体发射药火炮内弹道理论、电磁发射原理及内弹道模型、电热化学炮发射原理、随行装药发射原理、埋头弹药发射原理和冲压加速发射原理等。

本书可作为武器发射工程专业的本科生专业课教材,也可供相关专业的研究生和从事武器发射研究工作的科技人员参考和使用。

图书在版编目(CIP)数据

新概念武器发射原理/ 陆欣编著. -- 北京: 北京
航空航天大学出版社, 2014. 10
ISBN 978-7-5124-1608-6

I. ①新… II. ①陆… III. ①高技术武器-发射系统
-理论-高等学校-教材 IV. ①E92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 241261 号

版权所有,侵权必究。

新概念武器发射原理

陆 欣 编著

责任编辑 王 实

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱: bhpess@263.net 邮购电话:(010)82316524

涿州市新华印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本: 710×1 000 1/16 印张: 12.5 字数: 266 千字

2015 年 1 月第 1 版 2015 年 1 月第 1 次印刷 印数: 2 000 册

ISBN 978-7-5124-1608-6 定价: 28.00 元

若本书有倒页、脱页、缺页等印装质量问题,请与本社发行部联系调换。联系电话:(010)82317024

前 言

随着军事科学技术的发展,特别是当高新技术应用于军事科学领域,出现了众多以新概念、新能源为关键技术的武器发射新原理,如轻气炮发射原理、液体发射药火炮内弹道理论、随行装药发射原理和埋头弹药发射原理等。

本书是为“新概念武器发射原理”课程编写的,全面介绍武器系统发射领域中的新原理、新理论和新方法,主要论述新概念武器系统的工作过程和发射原理,是武器发射工程专业的必修课教材。书中综合运用内弹道学、工程热力学及流体力学等基础理论知识,注重揭示新概念武器系统的基本发射原理,阐明数学建模的基本思想和处理方法,密切关注新概念发射领域的新进展、新趋势。本书主要针对武器发射工程专业学生,系统而全面地介绍新概念武器系统的种类特点、发射方式、工作原理和发展趋势,以及相关专业领域的主要研究内容、研究方法和研究成果。全书共分8章。

第1章主要介绍内弹道流体动力学理论基础,包括流体运动的基本概念和基本方程,作为后续章节学习的基础。

第2章主要讲述轻气炮内弹道理论,在讨论影响弹丸初速的基本因素、膛内气体压力扰动传播过程的基础上,得出轻质气体是提高弹丸初速的理想工质,并论述一级轻气炮和二级轻气炮的工作原理及内弹道模型。

第3章主要讲述液体发射药火炮内弹道理论,包括液体发射药火炮的内弹道循环、液体燃料的物理化学性能、再生式液体发射药火炮的再生喷射结构、内弹道零维模型和气液两相流动模型等内容。

第4章主要讲述电磁发射原理,着重讨论电磁炮的关键技术及分类、电磁导轨炮的内弹道模型和箍缩电磁炮的理论模型。

第5章讲述电热化学炮发射原理,包括化学工质的选择及其热化学性能、等离子体与化学工质的相互作用、电热化学炮内弹道经典模型及一维两相流模型等理论知识。

第6章是随行装药发射原理,探讨随行装药基本概念、随行装药关键技术、固体随行装药经典内弹道模型及液体随行装药内弹道一维两相流模型。

第7章主要讲述埋头弹药发射原理,包括埋头弹药的基本概念、发射原理、关键技术和内弹道模型等基本内容。

第8章讲述冲压加速发射原理,在介绍冲压加速原理及工作模式、混合气体工质种类及热力学性质的基础上,讨论亚声速燃烧热节制推进一维内流场数值模拟和亚爆轰推进一维模型的解析解,最后对冲压加速过程的测试技术做了简单介绍。

在内容的讲解上,本书力求物理概念清晰,数学推导严谨,尽可能把严密的数学



方法与工程实际相结合,注意引导学生联系工程应用,使学生对新概念发射领域中所涉及的技术及原理有一个系统而全面的了解,掌握武器系统发射领域的新原理、新理论和新方法,拓宽所学专业的知识面,在培养创新思维、增强创新意识、提高专业素养等方面得到锻炼,提高自学能力和综合运用所学专业知 识分析问题、解决问题的能力。

在本书的编写过程中,得到南京理工大学内弹道教研室老师的热情关怀和帮助。金志明教授编著的《高速推进内弹道学》,周彦煌教授、王升晨研究员在 1990 年出版的《实用两相流内弹道学》,王金贵先生编著的《气体炮原理及技术》以及王莹教授、肖峰研究员编著的《电炮原理》都是本书在编著过程中最重要的参考书。在这里对前辈们长期以来的辛勤工作表示崇高的敬意。书中引用的一些素材直接来源于国内外学者们的研究成果,在此对原作者表示谢意。感谢北京航空航天大学出版社赵延永、蔡喆为本书的出版付出的辛勤劳动。

由于作者的水平有限,书中难免存在缺点和不足之处,敬请广大读者及专家给予批评指正。

作 者

2014 年 10 月

目 录

绪 论	1
第 1 章 内弹道流体动力学理论基础	5
1.1 流体动力学基本方程	5
1.1.1 质量体和控制体	5
1.1.2 局部导数和随体导数	5
1.1.3 雷诺输运定律	6
1.1.4 质量体上的动力学方程	7
1.1.5 控制体上的守恒方程	8
1.1.6 流体动力学微分型基本方程	9
1.2 气体超声速流动的特征线	11
1.2.1 特征线的基本概念	11
1.2.2 偏微分方程的特征线理论	12
1.2.3 一维非定常等熵流动的特征线	15
1.3 内弹道一维两相流基本方程	18
1.3.1 基本假设	18
1.3.2 一维变截面管内两相流基本方程	18
第 2 章 轻气炮内弹道理论	23
2.1 影响弹丸初速的基本因素	23
2.2 弹丸最大可能速度	24
2.2.1 定常假设下的极限速度	24
2.2.2 经典内弹道理论的弹丸极限速度	25
2.2.3 非定常等熵假设下的逃逸速度	26
2.2.4 三种极限速度的讨论	27
2.3 膛内气体压力扰动的传播	28
2.3.1 膛内气体压力扰动传播的定性分析	28
2.3.2 声惯性	29
2.4 提高弹丸初速的理想工质	30
2.4.1 增大逃逸速度	30



2.4.2 减小声惯性	31
2.5 一级轻气炮	32
2.5.1 一级轻气炮的工作原理	32
2.5.2 一级轻气炮内弹道模型	33
2.6 二级轻气炮	34
2.6.1 二级轻气炮的工作原理	34
2.6.2 二级轻气炮的数学模型	35
2.6.3 二级轻气炮参量对发射性能的影响	37
第3章 液体发射药火炮内弹道理论	52
3.1 概述	52
3.2 液体发射药火炮的内弹道循环	56
3.2.1 整装式液体发射药火炮的内弹道循环	56
3.2.2 再生式液体发射药火炮的内弹道循环	58
3.3 液体燃料的物理化学性能	60
3.3.1 液体燃料的分类及其理化性能	60
3.3.2 液体燃料性能的基本要求	61
3.4 再生式液体发射药火炮的再生喷射结构	64
3.5 再生式液体发射药火炮内弹道零维模型	66
3.5.1 内弹道模型应考虑的因素	66
3.5.2 物理模型及基本假设	67
3.5.3 基本方程	68
3.5.4 再生式液体发射药火炮内弹道封闭方程组	71
3.5.5 初始条件	71
3.6 再生式液体发射药火炮内弹道拉格朗日问题	72
3.6.1 气动力数学模型和速度分布	72
3.6.2 弹后空间压力分布	74
3.6.3 弹后空间的平均压力	76
3.7 再生式液体发射药火炮气液两相流内弹道模型	76
3.7.1 物理现象和基本假设	76
3.7.2 数学模型	77
第4章 电磁发射原理及内弹道模型	81
4.1 电磁发射概念、意义及应用前景	81
4.1.1 电磁炮的发展概况	81
4.1.2 电磁炮的优点及应用前景	82



4.1.3 电磁炮的关键技术	83
4.2 电磁炮的分类	84
4.2.1 导轨炮	84
4.2.2 线圈炮	85
4.2.3 重接炮	85
4.3 电磁导轨炮的内弹道模型	87
4.3.1 固体电枢内弹道方程组	87
4.3.2 等离子体电枢内弹道方程组	88
4.4 箍缩电磁炮	91
4.4.1 箍缩电磁炮的概念	91
4.4.2 箍缩电磁炮的理论模型	92
第5章 电热化学炮发射原理	96
5.1 电热炮的基本概念	96
5.2 受约束高压放电等离子体的基本特性	97
5.2.1 等离子体存在的基本条件	97
5.2.2 等离子体状态方程	98
5.2.3 等离子体的宏观方程	98
5.3 化学工质的选择及其热化学性能	99
5.3.1 化学工质的分类	100
5.3.2 工质的热化学特性	101
5.4 等离子体与化学工质的相互作用	104
5.4.1 化学工质的反应速率	104
5.4.2 影响化学工质反应速率的因素	105
5.4.3 化学工质反应速率对内弹道性能的影响	107
5.5 电热化学炮内弹道经典模型	110
5.5.1 放电管等离子体数学模型	110
5.5.2 燃烧室内弹道数学模型	111
5.6 电热化学炮内弹道一维两相流模型	112
5.6.1 物理模型	112
5.6.2 放电管内等离子体一维流动数学模型	113
5.6.3 燃烧室一维两相流数学模型	113
第6章 随行装药发射原理	115
6.1 随行装药基本概念	115
6.1.1 随行装药效应	115



6.1.2 随行装药的类型	116
6.1.3 随行装药研究发展现状	116
6.2 随行装药关键技术	118
6.2.1 随行技术	118
6.2.2 点火延迟时间控制技术	119
6.2.3 高燃速火药技术	119
6.3 固体随行装药经典内弹道模型	119
6.3.1 内弹道过程的物理描述	119
6.3.2 建立固体随行装药经典内弹道模型	120
6.4 液体随行装药内弹道一维两相流模型	121
6.4.1 物理模型	121
6.4.2 数学模型	122
6.4.3 计算结果及分析	124
第7章 埋头弹药发射原理	126
7.1 埋头弹药基本概念	126
7.1.1 埋头弹药特点	126
7.1.2 埋头弹药研究发展状况	127
7.2 埋头弹药发射原理	130
7.3 埋头弹药关键技术	131
7.3.1 二次点火技术	131
7.3.2 旋转药室技术	132
7.3.3 高压动态密封技术	132
7.4 埋头弹药经典内弹道模型	132
7.4.1 埋头弹药内弹道过程的主要特点	132
7.4.2 基本假设	133
7.4.3 数学模型	133
7.5 埋头弹药内弹道两相流模型	134
7.5.1 物理模型及基本假设	134
7.5.2 数学模型	135
7.6 埋头弹药内弹道优化设计	136
7.6.1 内弹道优化设计过程	136
7.6.2 模式搜索法	138
7.6.3 模拟退火算法	141
7.6.4 遗传算法	149
7.7 埋头弹药结构设计	156



7.7.1 装药结构设计	156
7.7.2 旋转药室结构设计	157
7.7.3 高压动态密封结构设计	158
第8章 冲压加速发射原理	161
8.1 概 述	161
8.2 冲压加速原理及工作模式	162
8.2.1 冲压加速原理概述	163
8.2.2 冲压加速工作模式	164
8.3 混合气体工质	166
8.3.1 混合气体种类及热力学性质	166
8.3.2 混合气体的燃烧实验	166
8.3.3 混合气体的高压不稳定燃烧分析	167
8.3.4 频谱分析	168
8.3.5 混合气体工质的 C-J 爆轰速度	169
8.4 亚声速燃烧热节制推进一维内流场数值模拟	172
8.4.1 基本假设	172
8.4.2 平衡化学一维数学方程	172
8.4.3 计算结果分析	175
8.5 亚爆轰推进一维模型的解析解	177
8.5.1 无量纲推力表达式	177
8.5.2 弹道效率与推力压力比	179
8.6 冲压加速过程的测试技术	181
8.6.1 测试方法	181
8.6.2 三种工作模式实验结果分析	181
8.6.3 冲压加速气动力分析	184
参考文献	187

绪 论

火炮发射技术的发展已有悠久的历史,从机械发射(如弓箭、弩、抛石机)发展到化学能发射是火炮技术发展史上的一次重大革命。这次革命使火炮武器的威力、射程、射击精度以及在野战条件下的可操作性都得到了很大的提升。具有火力突击性的火箭和火炮武器成为地面火力的骨干,极大地提高了军队的战斗力。军队的作战方式也从冷兵器时代短兵相接的白刃格斗逐渐过渡到远距离的火力杀伤。在第二次世界大战以后的一个漫长时期,火炮发射技术虽有某些进步,但总的来说处于停滞状态。然而,近二三十年来,由于防空、反导、特别是坦克和反坦克兵器发展的需要,世界各国都相继发展了一种高膛压火炮发射技术。它主要是通过增加装填密度将膛压由原来通常在 $200\sim 300\text{ MPa}$ 增加到 $400\sim 700\text{ MPa}$,以达到增加弹丸初速、提高武器威力的目的。很显然,这是在原有火炮发射技术条件下,火炮发射药无突破性进展时所采取的一种技术途径。这种高装填密度、高膛压、高初速的火炮发射系统,虽然使弹丸初速有明显的提高,可以达到 1.8 km/s 的水平。然而,新的严重问题也随之而来,极危险的膛炸现象时有发生,对炮手的安全造成很大的威胁。发射安全性成为高膛压火炮发展的一种障碍。因此,研究新的发射理论和发射技术已成为当前火炮武器发展中的一项重要任务。

随着军事科学技术的发展,特别是在高科技作战条件下,未来战场上的兵器,其作战性能将有显著的变化。今后,无论是提高防空兵器的有效作战能力,研制对付未来新型装甲目标的反坦克兵器,还是在大纵深、宽正面上对步兵提供火力支援的压制兵器,都要求弹丸的初速有较大的提高。近代的作战理论也将“远程精确打击”的作战方针放在极其重要的地位。对火炮武器来说,要达到远射程,必须要增加炮口动能,提高弹丸初速。因此,如何提高初速是火炮技术领域一项极重要的长期的研究课题。根据国内外军事专家的预测,未来火炮的弹道性能应使弹丸初速达到 $2\sim 2.5\text{ km/s}$ 的水平,才能对付野战条件下战场上可能出现的目标。为此,研究新的发射技术,显著提高火炮的弹道性能,较大幅度地增加火炮初速、射速和威力,是火炮武器面临着的又一次新的技术革命。

以化学能为能源的火炮,其弹丸初速将受到燃气声速的限制。根据经典的内弹道理论,弹丸初速取决于极限速度和火炮效率。一般情况下,火炮有效热效率为 $0.16\sim 0.30$ 。因此,影响初速最敏感的是火炮的极限速度。而极限速度与燃气滞止声速成正比,声速越大,则极限速度也越大,因而弹丸初速也相应增加。滞止声速与滞止温度开平方成正比,与燃气分子量开平方成反比。燃气温度受到火炮身管烧蚀寿命的限制,不能无限制地提高燃气温度来增加滞止声速,而是通过减小燃气的分子量。分子量越小,则滞止声速越大,以此来达到提高初速的目的。一般的发射药由



C、H、O、N 元素组成。燃烧后生成的燃气主要由 CO_2 、 CO 、 NO_2 、 NO 和 H_2O 组成。混合燃气的平均分子量在 20~30 之间变化。因此,要减小分子量,可采用一些轻质气体,如 H_2 和 He 。 H_2 的分子量为 2.016, He 的分子量为 4.003。对于氢气来说,它的分子量只有常用发射药燃气的分子量的 7% 左右,因此,可以大幅度增加滞止声速。于是,利用轻质气体为工质的发射技术受到人们的关注。1968 年美国海军实验研究所利用二级轻气炮将 0.2 g 弹丸加速到 11.6 km/s 的惊人速度,这说明了用火炮推进技术能达到宇宙速度的发射能力。最近几年来发射较大质量弹丸的二级轻气炮也有所进展,如加拿大的 DREV 250/105 mm 二级轻气炮,将 1.01 kg 的弹丸加速到 2.3 km/s 的初速。

众所周知,低分子量气体的声惯性比较小,因此在膛内气体膨胀做功的过程中,气体能迅速跟上弹丸运动,不致于引起弹底压力的显著下降。直接推动弹丸运动的是弹底压力,弹底压力越高,弹丸获得的加速度越大。在通常的火炮装药系统中,弹后空间的压力分布近似于遵循拉格朗日假设下的一种抛物线型的压力分布。膛底压力最大,而弹底压力最小。随着弹丸初速的增加,这种压降趋势更为严重,影响到对弹丸的做功能力。为了提高弹底压力,减小压力降,可以通过改变原来常规的装药结构,让一部分装药随着弹丸一起运动。这就是随行装药发射技术。火药在跟随弹丸运动中不断地燃烧,产生的燃气可以填补由弹丸运动形成的弹底空间的低压区,使弹底保持一个较高的弹底压力,从而显著地提高弹丸的初速。美国国防部将随行装药发射技术列入“超高速射弹”中的关键技术之一,认为要使火炮的弹丸初速达到 2~3 km/s 的内弹道性能指标,采用随行装药发射技术是一种可供选择的发射技术。根据实验和理论分析表明,随行原理的潜在能力十分明显。贝尔(Baer P G)在 40 mm 弹道炮上采用助推装药,占总装药量的 25%,随行装药占 75%,弹丸质量为 150 g,获得炮口速度为 2.93 km/s。然而到目前为止,随行原理的工程化问题还尚未解决,仍停留在原理性试验阶段。

液体发射药火炮与固体发射药火炮同属于化学能发射技术的范畴,但其内弹道循环有很大的差别。火炮的结构通常有整装式(BLPG)和再生式(RLPG)两种类型。整装式的装药结构由于内弹道性能难以控制,所以曾在一个时期内对它的兴趣有所衰退。很多国家都集中力量开展再生式液体发射药推进技术的研究。RLPG 的突出优点是可以通过再生喷射的控制,不仅有效地增大装药质量比,而且能使膛内的压力曲线产生“平台”效应,增大炮膛工作容积利用系数,从而在相同的最大压力条件下,获得更高的弹丸速度,有望将常规火炮的弹丸速度增加 20%~25%。美国通用电气公司研究的 155 mm 再生式液体发射药火炮(VIC RLPG),其射程可达 44 km。新一代的 AFAS 液体发射药火炮的射程要求达到 50 km,这远远领先于一些先进的固体发射药火炮的水平。液体推进剂是采用一种由羟基硝胺(HAN)为基的单元燃料,它具有良好的点火和燃烧性能以及比较高的能量指标。再生喷射结构的设计、液体发射药的喷射和雾化质量的控制是液体发射药推进技术中的关键技术。它直接影响到



发射过程中内弹道循环的稳定性。燃烧过程中的压力振荡是液体发射药推进技术中的一种有害现象,在严重情况下可诱发回火而引起灾难性的膛炸现象发生。

冲压加速也属于一种化学推进技术。美国在 20 世纪 80 年代中期已开始这项工作的研究。它通过对弹丸逐级加速的程序,使弹丸达到超常规的速度。弹丸质量可以在几克到几吨之间任意选取。这种加速弹丸的推进装置类似于冲压原理的热力学循环。在冲压加速器中,由燃料和氧化剂混合的燃气流场产生一个恒定的推力。弹丸类似于超声速冲压器中的中心体。常用的燃料和氧化剂有 CH_4 、 O_2 和 N_2 的混合物。可以通过化学能量密度和超声速燃气的调整来控制加速管的马赫数和弹丸速度。冲压加速过程不产生像火炮那样的后坐现象,而且整个循环过程中的最大压力总是处于弹底,因而提高了内弹道效率。冲压加速推进循环有三种工作模式,即亚爆轰速度、跨爆轰速度和超爆轰速度。亚爆轰速度工作模式的弹丸速度可达到 90% C-J(Chapman-Jouguet)速度。实验测得,在 38 mm 加速管中可将弹丸速度加速到 1.15~2.6 km/s。对于超爆轰工作模式,实验表明,在乙烯为基的混合燃气中,马赫数超过 8.5,相应的弹丸速度为 C-J 速度的 150%,弹丸可以加速到 6 km/s 以上。利用冲压加速概念的超高速发射,在原理上可以按比例放大尺寸,进行很多有意义的实验,例如高能冲击研究、远程防卫、软发射和超声速空气弹道研究等。单级冲压加速可获得显著高于常规火炮的弹丸速度。

就发射技术中新能源的应用而言,由化学能发展到电能,标志着发射技术到达一个新的里程碑。从理论上来说,电能推进不像化学能推进那样弹丸速度受到燃气声速的限制,是一种很理想的发射技术。利用电磁力发射物体的设想迄今已有近百年的历史。自从发现运动带电粒子或载流导体在磁场中受到洛伦兹力作用的物理现象以来,人们一直在追求将洛伦兹力用于军事目的,发展一种利用电磁力代替火药发射弹丸的电磁炮(EMG)。早在第一次世界大战期间,法国和德国相继开展电磁炮的研究工作。然而,电磁发射技术的实质性进展是 20 世纪 70 年代初期,澳大利亚堪培拉国立大学的研究工作,他们使用一台储能为 550 MJ 的当时世界上最大的单极发电机,将 3 g 塑料弹丸加速到 5.9 km/s。这一研究成果激发了许多国家政府及研究人员的热情。在 1986 年,我国研制的 303EMG 电磁发射装置将 30 g 弹丸加速到 3 km/s。随着电磁发射技术的日趋发展,电磁炮极有可能成为新一代作战兵器。电源及其小型化是电磁发射中的一项关键技术。目前采用的电源有电容器、单极发电机(HPG)、补偿电机和蓄电池四种类型。以电容器为例,美国在 20 世纪末已达到电容器质量储能 10 J/g。若要获得 10 MJ 的炮口动能,效率为 10%,则电容器储能需达到 100 MJ。以美国目前的水平,其电容器质量应为 10 t。这样庞大的电源是野战兵器不能接受的,因此,电源小型化是发展电磁发射技术中的一个主要难题。

由于电源小型化的技术问题还不能在短时间内解决,因此人们又开始研究一种电能和化学能混合应用的发射技术——电热化学(ETC)发射技术。电磁发射是通过电磁场的洛伦兹力形式推动等离子电枢,弹丸在等离子电枢作用下加速运动。而



电热化学发射技术是以高温等离子体加热含能工质,如 LiBH_4 、 TiH_2/Al 、 $\text{C}_8\text{H}_{18}/\text{H}_2\text{O}_2$ 和 LP1846 等含能物质。因此,除电能加入以外,这些含能物质在等离子体作用下发生化学反应而释放出化学能。在获得相同初速条件下,电热化学发射技术的电源蓄能容量比电磁发射技术的要小得多,电能一般只占总能量的 10%~20%,其余由化学能来提供。这类发射技术可将弹丸加速到 2~3 km/s 的初速。如美国食品机械公司(FMC)研制的一种燃烧增强等离子体电热炮,初速达到 3 km/s。德国、以色列和俄罗斯等国家也在开展这方面的研究工作。电热发射技术适用于需要高炮口动能的坦克和反坦克兵器。国内外有关专家认为,这是一种比较现实的技术,有可能在近期内发展成一种新型的发射兵器。等离子体发生器、等离子体与含能工质的相互作用机理等是电热化学发射技术中需要重点研究的内容。

埋头弹药技术是一种能有效提高步兵战车、装甲武器威力的装药技术。它与常规装药技术最大的不同就是弹丸完全缩在药筒内,在弹丸的后方和周围都装填发射药,整个弹药外形呈规则的圆柱状。与常规弹药相比,埋头弹药的长度大大缩短,外形简单规则。埋头弹药的这种特点使其在使用中具有许多明显的优势。弹药长度缩短,与常规弹药相比节省了弹药储存空间,可使装甲武器系统携带更多的弹药;形状规则,有利于设计出结构更加紧凑的供弹机构,同时可以利用旋转药室和“推抛式”工作原理提高火炮的射速。这些新机构、新技术和新原理的应用,使得可以在原有武器系统炮塔尺寸不变的条件下换装较大口径的火炮,从而提升原有武器系统的威力。同时,由于埋头弹药技术的使用仅更换发射系统,原有装甲武器的车体、底盘、履带等无须改变,因此也节约了武器系统更新换代的成本。美国在埋头弹药技术方面的研究最早,已有 40 多年历史,投入了大量的人力物力,到 20 世纪 90 年代,总投入已超过 21 300 多万美元。其陆军、空军、海军和海军陆战队都对此进行了研究,涉及的口径系列繁多,包括 12.7 mm、20 mm、25 mm、30 mm、45 mm 和 76 mm,但一直没有开发出成熟的产品。在这方面研究比较成功的是法国和英国,已经开发出了可用于武器装备的成熟产品。1996 年法国地面武器公司(GIAT)研制出了 45M911 型快速发射 45 mm 埋头弹火炮,1997 年英法埋头弹联合国际公司(CTAI)开发的低重心轻型武器发射平台——40 mm CTWS(Cased Telescoped Weapon System)可以安装在美国的布雷德利(Bradley)步兵战车上,代替其上装备的 25 mm Bushmaster 火炮,射速可达 200 发/分。

第 1 章 内弹道流体动力学理论基础

1.1 流体动力学基本方程

类似于固体质点动力学的两种描述方法,建立流体运动的动力学方程也有两种方法:一种是追随流体的质量体建立动力学方程;另一种是在固定的控制体内建立动力学方程。这两种分析方法的主要区别在于描述研究对象所采用的基本思想和观点不同,在流体运动的过程中,质量体是不变的质点系统,相当于热力学中的闭口系统,是与拉格朗日(Lagrange)方法对应的;而控制体是可变的质点系统,相当于热力学中的开口系统,是与欧拉(Euler)方法对应的。下面先介绍这两种有限体积系统的概念。

1.1.1 质量体和控制体

流场中封闭流体面所包含的流体称为质量体。质量体随流体质点一起运动,它的边界形状和体积都随时间变化,在边界上可有力的作用和能量交换,但没有质量的输入或输出。因此质量体所包含的流体质量是不变的,相当于热力学中的闭口系统。

相对于某参照坐标系不随时间变化的封闭曲面中所包含的流体称为控制体。控制体的几何外形和体积都不随时间变化。控制体的边界上可有力的作用和能量交换,也可有流体的流入或流出,因此它相当于热力学中的开口系统。

众所周知,经典的力学和热力学定律都是建立在闭口系统上的,因此很容易在质量体上建立有限体积的流体动力学方程,但是质量体是变形系统,建立在质量体上的流体动力学方程在实际使用时很不方便。为此需要一种方法将建立在质量体上的动力学方程变换到控制体上,下面介绍这种方法。为了明确区分这两种系统,质量体的体积和边界用 $V^*(t)$ 、 $\Sigma^*(t)$ 表示,它们是时间的函数;控制体的体积和边界用 V 、 Σ 表示,它们不随时间变化。

1.1.2 局部导数和随体导数

控制体内某物理量随时间的变化率称为局部导数,用 $\partial/\partial t$ 表示。例如,控制体内的总质量 $m = \int_V \rho dV$, 它的局部导数为

$$\frac{\partial m}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV = \int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV \quad (1.1)$$

因为 V 是控制体包围的区域,与时间无关,因而局部导数和控制体上的积分运算可



以交换。

质量体内某物理量随时间的变化率称为随体导数,用 d/dt 表示。例如,质量体内的总质量 $m = \int_{V^*(t)} \rho dV$, 其随体导数为

$$\frac{dm}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{V^*(t)} \rho dV \quad (1.2)$$

因为质量体的积分域 $V^*(t)$ 是随时间变化的,所以随体导数不能与质量体上的积分运算交换。雷诺(Reynolds)输运定律可以将随体导数与局部导数联系起来,从而能够把建立在质量体上的动力学方程变换到控制体上。

1.1.3 雷诺输运定律

假设 Φ 为质量体 $V^*(t)$ 内的任一物理量,它可以代表质量、动量、能量等流体物理参量的场密度,其随体导数为 $\frac{d}{dt} \int_{V^*(t)} \Phi dV$ 。根据导数的定义,可表示为

$$\frac{d}{dt} \int_{V^*(t)} \Phi dV = \lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{\int_{V^*(t+\delta t)} \Phi(t+\delta t) dV - \int_{V^*(t)} \Phi(t) dV}{\delta t} \quad (1.3)$$

其中, $V^*(t+\delta t)$ 为 $t+\delta t$ 时刻质量体的体积,可以分解为(见图 1.1)

$$V^*(t+\delta t) = V^*(t) + \delta V^* \quad (1.4)$$

$V^*(t)$ 是 t 时刻质量体的体积,它等于 t 时刻取定的与质量体重合的控制体的体积 V ; δV^* 是质量体 $V^*(t+\delta t)$ 与 $V^*(t)$ 之差,根据质量体边界的运动情况,这部分质量体的体积可以为正值,也可以为负值。

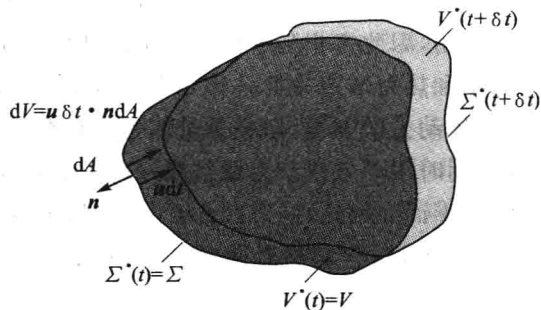


图 1.1 推导随体导数示意图

利用式(1.4), $t+\delta t$ 时刻物理量的体积分公式可表示为两部分之和,即

$$\int_{V^*(t+\delta t)} \Phi(t+\delta t) dV = \int_{V^*(t)} \Phi(t+\delta t) dV + \int_{\delta V^*} \Phi(t+\delta t) dV$$

于是式(1.3)可进一步写为

$$\frac{d}{dt} \int_{V^*(t)} \Phi dV = \lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{\int_{V^*(t)} \Phi(t+\delta t) dV - \int_{V^*(t)} \Phi(t) dV}{\delta t} + \lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{\int_{\delta V^*} \Phi(t+\delta t) dV}{\delta t} \quad (1.5)$$



式(1.5)等号右边第一项是在积分域 $V^*(t) = V$ 上的局部导数,故该项可以写为

$$\lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{\int_{V^*(t)} \Phi(t + \delta t) dV - \int_{V^*(t)} \Phi(t) dV}{\delta t} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{V^*(t)} \Phi dV = \int_V \frac{\partial \Phi}{\partial t} dV \quad (1.6)$$

式(1.6)的结果化为一个曲面积分。具体方法如下:将 δV^* 无限分割为以边界 $\Sigma^*(t)$ 包围的微元面积 dA 为底,以 $\Sigma^*(t)$ 上任意流体质点到 $\Sigma^*(t + \delta t)$ 上的位移为边的无穷多微元斜柱体。由 $\Sigma^*(t)$ 上任意流体质点到 $\Sigma^*(t + \delta t)$ 上的位移等于 $\mathbf{u}\delta t$,因而斜柱体得体积应为

$$dV = \mathbf{u}\delta t \cdot \mathbf{n}dA$$

$\mathbf{n}$ 为微元面积的外法线向量。可以看出,如果 $\mathbf{u} \cdot \mathbf{n} > 0$,则 $dV > 0$,表示 δV^* 为 δt 时间内质量体体积的增加部分;反之,若 $\mathbf{u} \cdot \mathbf{n} < 0$,则 $dV < 0$,表示 δV^* 为 δt 时间内质量体体积的减小部分。利用上式,则式(1.5)中等号右边第二项可写为

$$\lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{\int_{\delta V^*} \Phi(t + \delta t) dV}{\delta t} = \lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{\oint_{\Sigma^*(t)} \Phi(t + \delta t) \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} \delta t dA}{\delta t} = \oint_{\Sigma^*(t)} \Phi \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} dA = \oint_{\Sigma} \Phi \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} dA \quad (1.7)$$

式(1.7)的结果表示物理量 Φ 在控制体边界 Σ 上的输运量,即由流体运动携带出去的量,又称物理量的通量。如果 $\mathbf{u} \cdot \mathbf{n} > 0$,则输运量为正值,表示物理量从边界流出控制体;如果 $\mathbf{u} \cdot \mathbf{n} < 0$,则输运量为负值,表示物理量从边界流入控制体。

将式(1.6)和式(1.7)代入式(1.5),得到

$$\frac{d}{dt} \int_{V^*(t)} \Phi dV = \int_V \frac{\partial \Phi}{\partial t} dV + \oint_{\Sigma} \Phi \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} dA \quad (1.8)$$

式(1.8)即为雷诺输运定律,可表述为任一时刻质量体内物理量的随体导数等于该时刻体积、形状相同的控制体内物理量的局部导数与通过该控制体表面的输运量之和,即

随体导数 = 局部导数 + 控制体输出的输运量

下面先建立质量体上的动力学守恒方程,然后应用雷诺输运定律建立控制体上的动力学守恒方程。

1.1.4 质量体上的动力学方程

应用力学和热力学守恒定律,质量体上有以下基本方程。

1. 质量守恒方程

质量体是闭口系统,因而它的总质量不变,即

$$\frac{d}{dt} \int_{V^*(t)} \rho dV = 0 \quad (1.9)$$

2. 动量守恒方程

根据牛顿定律,质量体内动量的变化率等于作用在质量体上的外力之和。将牛