



国防科技图书出版基金



火炮后坐复进运动 仿真技术及应用

Simulation Technique and Application of Gun
Recoiling and Counter-Recoiling Movement

张培林 王成 张晓东 等著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

火炮后坐复进运动 仿真技术的应用

**Simulation Technique and Application of Gun
Recoiling and Counter-Recoiling Movement**

张培林 王成 张晓东 吴定海 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

火炮后坐复进运动仿真技术及应用 / 张培林等著.
—北京: 国防工业出版社, 2015. 1
ISBN 978 - 7 - 118 - 09929 - 4

I. ①火... II. ①张... III. ①火炮 - 反后座装置 - 仿真 - 研究 IV. ① TJ 303

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 048467 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 100048)
北京嘉恒彩色印刷有限责任公司
新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 12¼ 字数 218 千字
2015 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 68.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777 发行邮购: (010) 88540776
发行传真: (010) 88540755 发行业务: (010) 88540717

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 第七届评审委员会组成人员

主任委员 潘银喜

副主任委员 吴有生 傅兴男 杨崇新

秘书长 杨崇新

副秘书长 邢海鹰 谢晓阳

委员 才鸿年 马伟明 王小谟 王群书

(按姓氏笔画排序)

甘茂治 甘晓华 卢秉恒 巩水利

刘泽金 孙秀冬 芮筱亭 李言荣

李德仁 李德毅 杨伟 肖志力

吴宏鑫 张文栋 张信威 陆军

陈良惠 房建成 赵万生 赵凤起

郭云飞 唐志共 陶西平 韩祖南

傅惠民 魏炳波

前 言

火炮是陆军的主战装备,被誉为“战争之神”,在战争中起着举足轻重的作用。它反应快、火力猛、精度高、机动性好,在目标适应性、作战持续性、使用简便性和经济性等方面具有鲜明特色,在精确制导炸弹、巡航导弹广泛使用的今天,仍是诸军兵种必不可少的武器装备。

反后坐装置是控制火炮受力与运动规律的主要部件,在现代火炮射击过程中发挥着举足轻重的作用,被称为火炮的“心脏”,它的性能直接关系到火炮整体作战性能的优劣。反后坐装置一般由制退机和复进机两部分组成,其中:制退机为耗能部件,它以制退液作为工作介质,通过挤压液体流过节流孔,形成高雷诺数的紊流流动,消耗火炮射击过程中炮膛内气体燃烧所产生的大部分后坐动能;复进机为蓄能部件,它一般利用氮气作为主要工作介质,火炮后坐时,后坐部分带动活塞压缩气室内密闭气体,并蓄积能量,火炮复进时,利用气体膨胀做功,推动后坐部分回复到初始位置,同时完成开门、抽筒等动作,在此过程中,复进机内的液体仅起传力和密封气体的作用。可见,火炮在一个射击周期内,主要经历了两个过程——后坐过程与复进过程,火炮后坐复进动力学分析包括动力分析和阻力分析两部分,其中炮膛合力和复进机力分别在火炮后坐和复进运动过程中起主动力作用,而制退机则始终起阻力作用。因此,研究膛内火药气体、制退机内部液体和复进机内部气体在火炮射击过程中的实际动态特性至关重要,是进行火炮射击仿真和相关设计与诊断研究的基础。

火炮实际射击过程中,炮膛内流动现象是一个多维、非定常、有化学反应的两相流体力学问题,而反后坐装置内部的流动则属于可压缩黏性流体带有热传导的三维非定常流动问题。经典内弹道模型、制退机压力模型和复进机压力模型以单一流体和理想流体为研究对象,分别利用建立在热力学平衡态基础上的集总参数模型、伯努利(Bernoulli)方程和理想气体多变方程,描述火炮射击过程中炮膛和反后坐装置内部介质的流动与传热特性,同时引入液压阻力系数和气体多变指数等经验常数,来修正各种假设及其他未考虑的能量损失带来的误差。带来的不足主要有:一是无法正确反映介质动态特性,试验表明,反后坐装置工

作时阻力系数和气体多变指数等一些参数是时刻变化的,经典模型为简化计算,通常将它们处理为单一常数,使得理论值无法较好反映参量的变化;二是无法全面反映介质特性,例如,经典模型在计算炮膛合力和制退机压力时,仅能反映炮膛和制退机内某截面上物理量的平均值,但却无法全面准确地揭示其内部流场的分布特性;三是无法准确反映介质特性,例如,在计算复进机压力时,经典模型将气体多变指数取为等温过程与绝热过程之间的某个值,没有考虑火炮后坐时,高速冲击引起的黏性耗散对封闭气室气体的影响作用,故会导致低估气室内实际压力,造成明显误差。由此可见,传统模型是一种比较粗糙的简化计算模型,无法真实地反映火炮射击运动中各类介质流场的客观规律和实际特性。

为克服经典模型的不足,本书尝试采用计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)和热力学分析方法,研究火炮射击中弹丸膛内运动时期火药气体参数的膛内分布特性和反后坐装置内部介质的流动和传热规律,以更完整和准确地认识和模拟火炮后坐复进运动规律。

本书共分为9章。第1章回顾了近年来火炮反后坐装置和流体与热力学相关研究领域研究现状,总结了当前火炮后坐复进动力学计算研究的进展情况;第2章简要介绍了火炮制退机与复进机典型结构和工作原理,对后坐、复进过程中火炮后坐部分的受力情况进行了分析,建立了后坐复进运动的概要计算模型,分析了经典炮膛合力、制退机力和复进机力计算模型的不足;第3章分析了火炮反后坐装置的结构与工作原理,阐述了经典反后坐装置内部介质流动与传热理论,指出了该理论的不足之处,在此基础上,提出了一种制退机压力和复进机压力简单修正模型;第4章提出了基于两相流内弹道的炮膛合力计算方法,以某型大口径火炮为例,进行了数值模拟计算;第5章研究了用于火炮制退机流场数值模拟的模型和求解方法,对标准 $k-\varepsilon$ 模型、RNG $k-\varepsilon$ 模型和Reynolds 应力模型三种紊流模型进行了综合比较;第6章提出了基于区域整体运动的制退机流场数值模拟方法,运用该方法分析了后坐速度和节制环类型对制退机流场的影响作用;第7章提出了复进机内部气体特性的分段多变热力学分析方法,该方法能够较好地反映复进机实际工作特性,使复进机压力分析和计算结果更加接近实际;第8章融合Matlab与Fluent求解器在不同计算领域的优势,提出一种协同仿真计算方案,实现了火炮后坐复进运动协同仿真;第9章利用火炮后坐复进运动协同仿真方法,分析了制退机在各种典型故障条件下对火炮性能造成的影响及单一故障因素下火炮各种外在性能的变化规律。

本书是作者长期从事火炮仿真和故障诊断研究的结晶,书中所引用的实例

都是近年来作者科研成果的体现。本书在撰写过程中,广泛吸取了国内外有关文献的精华部分,尽量反映出国内外在火炮射击仿真、反后坐装置设计诊断与计算流体力学相关领域的最新研究成果和进展,在此,作者向书中参考文献的作者表示诚挚的谢意。

由于作者水平所限,书中难免存在疏漏之处,衷心希望广大读者不吝赐教,我们将不胜感激!

作者

目 录

第 1 章 火炮后坐复进运动仿真技术概述	1
1.1 火炮反后坐装置概述	1
1.2 流体与热力学相关领域研究概况	3
1.2.1 气固两相流计算的研究现状	3
1.2.2 复杂流道流场计算的研究现状	5
1.2.3 多变热力学理论在气动领域的研究现状	14
1.3 火炮后坐复进动力学计算的研究现状	16
1.3.1 火炮制退机复杂流场的研究现状	16
1.3.2 复进机内部气体动力学的研究现状	18
第 2 章 后坐复进运动仿真计算模型	19
2.1 火炮反后坐装置结构与工作原理	19
2.1.1 制退机结构与工作原理	19
2.1.2 复进机结构与工作原理	20
2.2 火炮后坐复进运动分析与建模	20
2.2.1 后坐运动火炮受力分析	20
2.2.2 复进运动火炮受力分析	21
2.2.3 后坐复进运动计算模型	22
2.3 本章小结	23
第 3 章 传统反后坐装置压力计算模型的改进	24
3.1 制退机内部液体压力模型的改进	24
3.1.1 制退机内部液体流动控制方程	25
3.1.2 建立物理模型	28
3.1.3 制退机压力模型的改进	29

3.2	复进机内部气体压力模型的改进	37
3.2.1	复进机内气体的多变热力学模型	37
3.2.2	气体多变指数的修正	39
3.3	本章小结	41
第4章	基于两相流内弹道的炮膛合力数值计算	43
4.1	炮膛合力计算模型	43
4.2	两相流内弹道模型	45
4.2.1	弹丸膛内运动过程	45
4.2.2	两相流内弹道模型	45
4.3	两相流内弹道模型数值求解	49
4.3.1	Godunov 方法基本原理	49
4.3.2	Godunov 差分格式	50
4.3.3	Godunov 格式间断分解	51
4.3.4	初始条件	54
4.3.5	边界条件	55
4.3.6	稳定性条件	56
4.3.7	问题的处理	56
4.4	两相流内弹道计算结果与分析	57
4.4.1	计算参数	57
4.4.2	计算结果与分析	58
4.5	传统内弹道与两相流内弹道炮膛合力对比	59
4.6	本章小结	60
第5章	制退机内部紊流流场数值模拟方法	61
5.1	紊流控制方程和紊流模型	61
5.1.1	紊流基本微分方程组	61
5.1.2	紊流模型理论	62
5.1.3	边界条件的处理	66
5.1.4	轴对称不可压缩紊流控制方程	68
5.2	控制方程的离散与求解	70
5.2.1	控制方程的离散	70

5.2.2	数值求解方法	73
5.2.3	计算细节的处理	76
5.3	应用与比较	79
5.4	本章小结	82
第6章	基于区域整体运动的制退机流场数值模拟	84
6.1	建立物理模型	84
6.1.1	制退机物理结构的模型化	85
6.1.2	制退机内部介质的模型化	87
6.1.3	制退机内部流动的模型化	88
6.2	制退机流场的数值模拟	90
6.2.1	建立计算模型	90
6.2.2	网格划分与运动区域处理	91
6.2.3	边界条件	94
6.2.4	数值模拟的结果与分析	94
6.2.5	与试验结果的比较	98
6.3	制退机流场的影响因素分析	101
6.3.1	后坐速度对制退机流场的影响	101
6.3.2	节制环类型对制退机流场的影响	103
6.4	本章小结	105
第7章	复进机内部气体特性的分段多变热力学分析	107
7.1	复进机内气体实际特性的理论分析	108
7.1.1	气体多变指数与 $p-V$ 之间的关系	108
7.1.2	气体多变指数与摩尔比热容之间的关系	109
7.1.3	单一多变理论条件下的复进机气体特性分析	110
7.1.4	分段多变理论条件下的复进机气体特性分析	111
7.2	复进机内气体的能量耗散机理	114
7.2.1	克劳修斯不等式	114
7.2.2	能量耗散机理分析	115
7.3	试验结果与分析	117
7.4	气体多变指数的修正	121

7.5	本章小结	122
第8章	火炮后坐复进运动协同仿真计算	123
8.1	协同仿真技术	123
8.2	运动模型求解	125
8.3	流场模型求解	127
8.4	协同仿真可行性分析	128
8.4.1	Matlab Compiler 运行机制	128
8.4.2	Fluent UDF 运行机制	128
8.4.3	数据通信与共享机制	130
8.5	协同仿真实现方案	130
8.5.1	嵌入式方案	130
8.5.2	并行式方案	131
8.6	射击条件下火炮反后坐装置动态性能试验	133
8.6.1	试验方案	133
8.6.2	试验结果	137
8.7	基于CFD的火炮后坐复进运动协同仿真结果及分析	137
8.7.1	后坐计算结果与试验结果对比	138
8.7.2	复进计算结果与试验结果对比	139
8.8	本章小结	141
第9章	基于协同仿真和热力学分析的故障诊断研究	142
9.1	火炮反后坐装置故障特点	142
9.2	火炮反后坐装置故障统计分析	143
9.2.1	工厂试验故障的统计分析	143
9.2.2	实际使用故障的统计分析	143
9.3	基于协同仿真模型的制退机典型故障模拟	144
9.3.1	节制环磨损	145
9.3.2	制退杆活塞套磨损	149
9.3.3	调速筒磨损	152
9.4	制退机典型故障对火炮后坐复进性能的影响	156
9.4.1	后坐参数变化规律	156

9.4.2 复进参数变化规律	159
9.5 反后坐装置故障诊断实例	160
9.5.1 问题的提出	161
9.5.2 制退机流场的模拟与分析	162
9.5.3 水弹射击条件下复进机的工作特性分析	167
9.6 本章小结	171
参考文献	173

Contents

Chapter 1	Summarization to simulation technology of gun recoiling and counter-recoiling movement	1
1.1	Summarization of gun recoil system	1
1.2	Summarization of research on fluid and thermodynamics areas	3
1.2.1	Present status of gas-solid flow calculation	3
1.2.2	Present status of complex flow channel and flow filed calculation	5
1.2.3	Present status of polytropic thermodynamics theory on pneumatic area	14
1.3	Present status of gun recoiling and counter-recoiling dynamic calculation	16
1.3.1	Present status of gun interior ballistics calculation	16
1.3.2	Present status of complex flow filed in gun recoil brake	18
Chapter 2	Simulation model of recoiling and counter-recoiling movement calculation	19
2.1	Structure and working principle of gun recoil system	19
2.1.1	Structure and working principle of recoil brake	19
2.1.2	Structure and working principle of counter-recoil brake	20
2.2	Model construction and analysis of gun recoiling and counter-recoiling movement	20
2.2.1	Stress analysis of gun recoiling movement	20
2.2.2	Stress analysis of gun counter-recoiling movement	21
2.2.3	Model of recoiling and counter-recoiling movement calculation	22
2.3	Conclusion	23

Chapter 3 Improvement of calculation model of traditional

recoil system	24
3.1 Improvement of liquid pressure model in recoil brake	24
3.1.1 Floating control equations of liquid in recoil brake	25
3.1.2 Physical model construction	28
3.1.3 Improvement of recoil brake pressure model	29
3.2 Improvement of gas pressure model in counter-recoil brake	37
3.2.1 Polytropic thermodynamics model of gas in counter-recoil brake	37
3.2.2 Polytropic index correction of gas	39
3.3 Conclusion	41

Chapter 4 Numerical calculation of resultant force in gun bore based

on two-phase interior ballistics	43
4.1 Resultant force calculation model of gun bore	43
4.2 Two-phase interior ballistics model	45
4.2.1 Ball movement in gun bore	45
4.2.2 Two-phase interior ballistics model	45
4.3 Numerical solution to two-phase interior ballistics model	49
4.3.1 Godunov principle	49
4.3.2 Godunov difference scheme	50
4.3.3 Godunov discontinuity decomposition	51
4.3.4 Initial condition	54
4.3.5 Boundary condition	55
4.3.6 Stability condition	56
4.3.7 Issues handling	56
4.4 Results and analysis of two-phase interior ballistics calculation	57
4.4.1 Calculation parameters	57
4.4.2 Calculation results and analysis	58
4.5 Resultant force comparison of gun bore based on traditional interior ballistics and two-phase interior ballistics	59
4.6 Conclusion	60

Chapter 5 Numerical simulation of turbulent flow field in recoil brake 61

5.1 Turbulent control equations and turbulent model 61

5.1.1 Turbulent differential equation system 61

5.1.2 Turbulent model theory 62

5.1.3 Boundary condition handling 66

5.1.4 Turbulent control equations of axially symmetric incompressibility 68

5.2 Discrete and solution to control equations 70

5.2.1 Control equations discrete 70

5.2.2 Numerical solution 73

5.2.3 Detail calculation handling 76

5.3 Application and comparison 79

5.4 Conclusion 82

Chapter 6 Flow field numerical simulation of recoil brake based on whole region movement 84

6.1 Physical model construction 84

6.1.1 Physical structure modeling of recoil brake 85

6.1.2 Internal media modeling of recoil brake 87

6.1.3 Internal flow modeling of recoil brake 88

6.2 Flow field numerical simulation of recoil brake 90

6.2.1 Calculation model construction 90

6.2.2 Mesh refinement and movement region handling 91

6.2.3 Boundary condition 94

6.2.4 Results and analysis of numerical simulation 94

6.2.5 Comparison with experimental results 98

6.3 Influencing factors analysis of flow field in recoil brake 101

6.3.1 Influences of recoiling velocity to flow field in recoil brake 101

6.3.2 Influences of control ring style to flow field in recoil brake 103