

脱壳动力学

陈国江 徐立华 著

国防工业出版社

脱壳动力学

DYNAMIC OF SABOT DISCARD

杨启仁 徐直军 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

脱壳动力学/杨启仁,徐直军著. —北京:国防工业出版社,1996.2

ISBN 7-118-01486-9

I. 脱… I. ①杨… ②徐… III. 脱壳炮弹:穿甲弹-飞行力学 IV. TJ413

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 09146 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)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 9 1/2 241 千字

1996 年 2 月第 1 版 1996 年 2 月北京第 1 次印刷

印数:1-1000册 定价:16.70 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,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. 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,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防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,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。
4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。
5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,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,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工业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

第二届评审委员会组成人员

名誉主任委员 怀国模

主任委员 黄宁

副主任委员 殷鹤龄 高景德 陈芳允

曾铎

秘书长 刘琯德

委员 尤子平 朱森元 朵英贤

(按姓氏笔划为序)

刘仁 何庆芝 何国伟

何新贵 宋家树 张汝果

范学虹 胡万忱 柯有安

侯迁 侯正明 莫梧生

崔尔杰

前 言

脱壳动力学是研究脱壳弹在脱壳过程中弹体和弹托卡瓣及其相互耦合的运动规律,进而研究脱壳扰动对弹丸运动特性影响的一门科学。

随着坦克装甲防护能力的不断提高,反装甲武器也得到加速发展。目前,尾翼稳定脱壳穿甲弹(APFSDS)已成为当今国内外炮用反坦克武器的主用弹,发展尤为迅速;将其配用于航炮、舰炮和高炮上,作为飞机格斗、拦截导弹、反装甲车辆、防空、反直升机等重要手段,也有着广泛的应用前景;用于发展脱壳榴弹、多用途弹等新弹种,也具有很大的开发潜力。

借助于弹托发射的脱壳弹,具有弹丸质量轻、初速高、飞行时间短、终端效应好等优点,但也由于使用弹托所带来的脱壳干扰而成为对射击密集度影响的不利因素。在现代化战争中,由于对首发命中率的要求愈来愈高,使得提高密集度的问题自然就成为当前脱壳弹发展中的一个十分重要的关键和主攻目标。因此,伴随脱壳弹发展而产生的脱壳动力学,便成为近 20 年来的一个研究热点。迄今,有关脱壳动力学方面的实验研究,国内外许多专家学者,特别是弹道学者们为之进行了孜孜不倦的努力,在脱壳机理、脱壳流场、脱壳干扰等方面的研究,已经取得了可喜的进展和有效的成果,并发表了不少可供查阅的相应文献。但是,在脱壳动力学理论研究方面,国内的研究者极少,国外的研究文献至少在国际联机检索中还未发现。由于脱壳过程是伴随着高温、高压、高速、高过载的非常复杂的物理、化学、力学等现象的瞬态过程,无论是实验研究或理论研究,显然都是具有很大难度的。

80 年代初,作者在采用外弹道综合测试方法来研究脱壳干扰

对射击密集度影响并取得实际效果之后,便着手于脱壳动力学的理论探索。针对脱壳弹研制中存在的密集度这一关键性问题,作者提出并被获准进行脱壳动力学的国防科技预研基金课题研究,并指导历届研究生紧密围绕脱壳动力学这一中心课题,不断地从多方面深入开展科学研究。十余年来,一个接一个的生力军加入到脱壳动力学研究课题组中,不断涉足于脱壳动力学理论,通过建立基本理论、建立物理数学模型,综合弹体和弹托卡瓣的运动建立耦合动力学微分方程组,从理论上探索脱壳规律和各干扰因素作用规律及其影响,进而开展了非对称脱壳过程的数值模拟计算分析以及脱壳弹总体参数优化设计与CAD等研究,在脱壳动力学理论研究这一处女地上精耕细作,逐渐形成了脱壳动力学的一套比较完整的独具特色的理论体系和研究方法。这些创造性的劳动和开拓性的成果,正是本书得以问世的背景和基础。因此,《脱壳动力学》这本学术专著的诞生,就是一二十年来理论和实验研究的结晶,是群体智慧的升华,代表了当今世界脱壳动力学理论的水平 and 进展。

本书主要研究尾翼稳定脱壳弹(包括阻力型弹托和混合型弹托)在脱壳过程中的运动规律,寻求脱壳过程的终点参数——自由飞行阶段的起始攻角及其角速度的形成过程、影响因素和计算方法及其对弹体运动特性的影响;分析脱壳过程中各种作用因素与弹托卡瓣几何、物理参数和弹托卡瓣啮合于弹体位置等参数及其对脱壳过程终点参数的影响规律;继而为脱壳弹总体参数优化设计提供理论依据和实施办法,以达到减小射弹散布,提高首发命中率的目的。

全书内容共分十章。第一章阐述了脱壳动力学的基本理论。其中包括脱壳弹的物理模型、脱壳机理;根据阻力型弹托和混合型弹托的特点,对脱壳过程分别提出了若干个“转折点”的概念,并相应地将脱壳过程分为若干主时期和两个过渡时期,以便为分别建立各时期弹体和弹托卡瓣的运动微分方程和进行脱壳非对称性分析奠定基础。

第二、第三、第四章是建立脱壳动力学数学模型。其中,第二

章是建立脱壳弹(弹体)一般运动微分方程组,该统一形式的方程组描述了阻力型弹托和混合型弹托在脱壳过程中脱壳弹的整体运动和弹体运动基本相同的规律(只是它们在各时期所受的力和力矩有所不同)。第三章和第四章分别建立了阻力型弹托和混合型弹托脱壳弹一般运动微分方程组。二者的区别在于,前者分为四个时期、后者分为五个时期分别建立方程;前者第二时期弹托卡瓣是在空气动力作用下绕其后端与弹体接触点向后翻转,后者第二时期脱壳弹在膛内运动,在火药气体作用下弹托卡瓣绕其前端与弹体接触点转动,但由于受膛壁的约束而产生卡瓣与弹体和膛壁的相互碰撞,当膛壁约束解除进入第三时期后,卡瓣在火药气体作用下继续向前翻转,直至空气动力作用大于火药气体作用后,卡瓣才发生反向翻转。由于弹托结构不同,在脱壳过程中的受力和运动产生的差异,使得阻力型弹托与混合型弹托的脱壳弹具有不尽相同的脱壳特性。

第五章利用牛顿流理论建立了弹托气动力计算的理论模型,分析了攻角与卡瓣各几何参数变化对弹托阻力系数、升力系数和俯仰力矩系数的影响。

第六章是脱壳过程中各干扰因素的分析与计算,包括膛口流场对脱壳的影响,卡瓣与弹体的机械作用,气动干扰的分析与计算,以及利用凯恩方法建立卡瓣与弹体的碰撞模型等。

第七章和第八章分别对阻力型弹托和混合型弹托的脱壳弹(含弹体和弹托卡瓣)进行受力分析的基础上,对各自的脱壳过程进行了数值模拟,对脱壳非对称性和弹托卡瓣飞散规律进行了讨论分析。

第九章阐述了脱壳过程的优化设计,讨论了应用田口方法和数学规划法这两种优化方法对 APFSDS 总体参数进行优化设计,最后还介绍了脱壳弹 CAD 系统。

第十章介绍了脱壳动力学的试验研究和数据处理方法,还讨论了脱壳过程中的干扰力函数及其辨识脱壳干扰的方法。

《脱壳动力学》作为一部学术专著,凝聚着每一位参与者的心

血和奉献精神。先后参加脱壳动力学研究工作的有：方利君先生、徐直军博士、刘玉文硕士、龙应军硕士、臧涛成硕士、芮筱亭博士及博士生沈坚平等，他们的研究成果在本书中都有程度不同的体现。尤其是本书的合作者徐直军博士，无论在课题研究中或书稿撰写中，进行了艰苦细致的工作，做出了显著的贡献。

脱壳动力学的研究，曾得到国防科工委的大力支持和资助，以及中国兵器工业总公司兵器科学研究院和南京理工大学有关领导和专家、学者的关心与支持。这些都是脱壳动力学取得重大进展的力量源泉。

在本书撰写过程中，徐明友教授、李景云教授、朵英贤研究员曾给予了积极热情的支持和富有成效的帮助；郭锡福教授、闵杰教授、邵大燮教授、尤国钊教授、过企平高级工程师、刘成民副教授、吴姚华副教授、赵子华副教授、赵润祥高级工程师等都给予了热情的支持和帮助；盛红益硕士为本书大部分绘图付出了辛勤劳动，王光静女士一丝不苟地精心打印了全部书稿。这些都为完成本书提供了有利条件。

最后，也是最重要一点，是十分荣幸地获得了国防科技图书出版基金评审委员会的评审资助，以及评委会对申请书稿提出的宝贵意见。这对于书稿质量的提高给予了很大的鼓励和帮助，并为本书的出版提供了有力的保障。

借本书即将出版之际，谨向上述参与脱壳动力学研究，给予本书撰写、出版积极热情支持、关心和帮助的领导机关以及各位专家、学者和朋友们，致以深切的谢意！

脱壳动力学还是十分年轻的学科，而《脱壳动力学》也仅是脱壳动力学理论的处女作，该理论正将不断地发展和完善，我们撰写此书的目的在于抛砖引玉。限于水平，书中的缺点和错误在所难免，恳请专家、学者和广大读者不吝斧正。

杨启仁

于南京理工大学

内 容 简 介

本书较全面系统地论述了尾翼稳定脱壳穿甲弹(包括阻力型弹托和混合型弹托)在脱壳过程中的运动规律。

全书共分十章。第一章阐述了脱壳动力学基本理论;第二章至第四章建立了脱壳动力学数学模型;第五章利用牛顿流理论建立了弹托气动力计算的理论模型;第六章介绍了脱壳过程中各干扰因素的分析与计算;第七章和第八章对脱壳弹进行了数值模拟;第九章阐述了脱壳过程的优化设计;第十章介绍了脱壳动力学的试验研究和数据处理方法。

本书可供从事兵器研究、设计、试验的科技人员参考,也可作为大专院校有关专业的师生参考书。

ISBN 7-118-01486-9/E · 33

定价:16.70 元

目 录

绪 论	1
§ 1 脱壳动力学的研究对象和任务	1
§ 2 脱壳动力学产生的背景	2
§ 3 脱壳动力学的发展概况	3
第一章 脱壳动力学的基本理论	6
§ 1.1 引言	6
§ 1.2 脱壳弹的物理模型	6
§ 1.3 脱壳弹弹托结构及脱壳机理	8
1.3.1 阻力型弹托脱壳弹的弹托结构及其脱壳机理	8
1.3.2 混合型弹托脱壳弹的弹托结构及其脱壳机理	9
§ 1.4 脱壳弹的脱壳过程	10
1.4.1 阻力型弹托脱壳弹飞行过程的描述	10
1.4.2 混合型弹托脱壳弹飞行过程的描述	12
1.4.3 脱壳弹的脱壳过程	13
§ 1.5 脱壳过程中的干扰源	13
§ 1.6 脱壳非对称性产生的根源及其发展	14
第二章 脱壳弹(弹体)一般运动微分方程	16
§ 2.1 引言	16
§ 2.2 坐标系及其变换	17
2.2.1 坐标系	17
2.2.2 坐标系基本转换矩阵	18
2.2.3 坐标系之间的相互关系	19
§ 2.3 脱壳弹(弹体)一般运动微分方程	22
2.3.1 质心运动微分方程	22
2.3.2 绕心运动微分方程	24

2.3.3 弹体(弹丸)运动微分方程组	26
第三章 阻力型弹托一般运动微分方程	29
§ 3.1 引言	29
§ 3.2 坐标系及其坐标变换	30
3.2.1 坐标系	30
3.2.2 坐标系之间的关系	32
§ 3.3 第二时期内弹托各瓣运动微分方程	38
3.3.1 绕定轴转动时卡瓣运动微分方程	38
3.3.2 绕定点转动时卡瓣微分运动方程	43
§ 3.4 第三时期内弹托各瓣的运动微分方程	51
3.4.1 卡瓣质心运动微分方程	51
3.4.2 卡瓣绕心运动微分方程	53
§ 3.5 第四时期内弹托各瓣的运动微分方程	55
3.5.1 第四时期内卡瓣质心运动方程	56
3.5.2 第四时期内卡瓣绕心运动方程	56
§ 3.6 脱壳过程各时期作用于弹托各瓣的力和力矩	56
3.6.1 作用于卡瓣上的力	56
3.6.2 作用于卡瓣上的力矩	57
§ 3.7 弹托一般运动微分方程组	57
3.7.1 第二时期内弹托运动微分方程组	57
3.7.2 第三时期内弹托运动微分方程组	58
3.7.3 第四时期内弹托运动微分方程组	60
3.7.4 小结	60
第四章 混合型弹托脱壳弹一般运动微分方程组	62
§ 4.1 引言	62
§ 4.2 坐标系	63
§ 4.3 第二时期内弹丸系统运动微分方程	65
4.3.1 弹丸系统的动力学方程组	65
4.3.2 弹丸系方程组的具体形式	66
§ 4.4 碰撞模型	74
§ 4.5 第三时期内弹托各瓣的运动微分方程	75
4.5.1 卡瓣质心运动方程	76

4.5.2 卡瓣绕重心的转动方程	77
§ 4.6 脱壳过程各时期作用于弹托各瓣的力和力矩	78
4.6.1 作用于卡瓣上的力	78
4.6.2 作用于卡瓣上的力矩	78
§ 4.7 混合型弹托脱壳弹一般运动微分方程组	79
第五章 弹托气动力分析与计算	81
§ 5.1 引言	81
§ 5.2 物理模型和基本假设	81
5.2.1 弹托形状	81
5.2.2 基本假设	82
§ 5.3 弹托气动力系数计算	84
§ 5.4 边界条件	90
§ 5.5 弹托气动力特性	92
§ 5.6 弹托设计准则	101
5.6.1 弹托设计要求	101
5.6.2 弹托设计准则	102
第六章 脱壳过程中各干扰因素的分析与计算	104
§ 6.1 引言	104
§ 6.2 膛口流场对脱壳弹脱壳的影响	104
6.2.1 一般膛口射流的特点	105
6.2.2 发射脱壳弹时的炮口流场特点	105
6.2.3 膛口射流轴向气流参数的计算	106
6.2.4 膛口冲击波的分析及其超压计算	108
6.2.5 马赫盘位置的确定	110
6.2.6 膛口压力场的近似处理	110
§ 6.3 脱壳过程中卡瓣与弹体间机械作用的分析与 计算	111
6.3.1 机械作用分析	111
6.3.2 作用于卡瓣和弹体上的机械作用力	112
6.3.3 机械作用力的近似计算	118
§ 6.4 卡瓣与弹体的碰撞模型	121

6.4.1	凯恩方法的基本理论	121
6.4.2	卡瓣与弹体碰撞初始条件的确定	124
6.4.3	碰撞模型的建立	129
6.4.4	碰撞模型的求解	133
§ 6.5	气动力干扰的分析与计算	134
6.5.1	概述	134
6.5.2	第二时期流场模型	138
6.5.3	第二时期流场作用于弹托各瓣与弹体上的力和力矩	140
6.5.4	第三时期弹托各瓣与弹体相互作用流场模型	143
6.5.5	第三时期相互作用流场作用于卡瓣和弹体上的力和力矩	148
6.5.6	脱壳过程第三时期和第二过渡时期结束条件的确定	156
第七章	阻力型弹托脱壳弹脱壳过程的数值模拟	158
§ 7.1	引言	158
§ 7.2	第一时期内作用于弹丸系的力和力矩	158
7.2.1	作用于单个卡瓣的力和力矩	159
7.2.2	作用于弹丸系的力和力矩	164
7.2.3	第一时期内诸力和力矩之综合	166
§ 7.3	第二时期内作用于卡瓣和弹体的力和力矩	166
7.3.1	作用于单个卡瓣的力和力矩	167
7.3.2	作用于弹体的力和力矩	169
7.3.3	第二时期内诸力和力矩之综合	171
§ 7.4	第三时期内作用于卡瓣和弹体的力和力矩	173
7.4.1	作用于单个卡瓣的力和力矩	173
7.4.2	作用于弹体上的力和力矩	177
7.4.3	第三时期内诸力和力矩之综合	178
§ 7.5	第四时期内作用于卡瓣和弹体上的力和力矩	180
§ 7.6	脱壳过程的数值模拟及分析	181
7.6.1	各时期运动方程组初始条件的确定	181
7.6.2	两过渡时期的处理及其衔接	182

7.6.3	数值积分方法和积分步长的确定	183
7.6.4	数值模拟结果分析	185
§ 7.7	脱壳非对称性分析	188
§ 7.8	阻力型弹托卡瓣飞散规律及安全性分析	191
7.8.1	弹托卡瓣飞散规律	191
7.8.2	安全性分析	192
第八章	混合型弹托脱壳弹脱壳过程的数值模拟	195
§ 8.1	引言	195
§ 8.2	第二时期内作用于弹丸系的外力和外力矩	195
8.2.1	作用于单个卡瓣的力和力矩	196
8.2.2	作用于弹丸系的力和力矩	201
§ 8.3	第三时期内作用于卡瓣和弹体的力和力矩	201
§ 8.4	脱壳过程的数值模拟分析	202
8.4.1	脱壳非对称性数值模拟分析	202
8.4.2	脱壳过程攻角角速度变化规律	208
8.4.3	卡瓣参数对攻角角速度的影响	209
8.4.4	初步结论	216
§ 8.5	升力型脱壳的探讨	217
第九章	脱壳弹总体参数优化设计与 CAD	219
§ 9.1	引言	219
§ 9.2	优化设计的一般原则	221
§ 9.3	APFSDS 脱壳过程参数优化设计	227
9.3.1	田口方法优化	227
9.3.2	数学规划法优化	236
§ 9.4	脱壳弹 CAD 系统	241
9.4.1	概述	241
9.4.2	CAD 系统软件	242
9.4.3	脱壳弹 CAD 系统	244
第十章	脱壳动力学试验概述	253
§ 10.1	引言	253
§ 10.2	脱壳过程的试验研究	255

10.2.1 弹道靶道试验	255
10.2.2 风洞试验	258
10.2.3 靶场试验	259
§ 10.3 实验数据的处理与分析	261
10.3.1 正交摄影照片的处理	262
10.3.2 $\delta(x)$ 曲线的处理与应用	265
§ 10.4 脱壳过程中的干扰力函数	268
10.4.1 干扰力函数的概念	268
10.4.2 干扰力函数描述的弹体运动微分方程	270
10.4.3 用非线性最小二乘法辨识脱壳干扰的方法	273
主要符号表	275
参考文献	282