



唐乾刚 张青斌 杨涛 葛健全 著

末修子弹动力学

Dynamics of Terminal
Correction Submunition

唐乾刚 张青斌 杨涛 葛健全 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



末修子弹动力学

Dynamics of Terminal Correction Submunition

唐乾刚 张青斌 杨涛 葛健全 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

末修子弹动力学/唐乾刚等著. —北京:国防工业出版社,2013.8

ISBN 978-7-118-08993-6

I. ①末... II. ①唐... III. ①导弹—空气动力学
②导弹—飞行动力学 IV. ①TJ760.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 166626 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)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 10 1/4 字数 226 千字

2013 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 45.00 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	王 峰			
副主任委员	吴有生	蔡 镭	杨崇新	
秘 书 长	杨崇新			
副 秘 书 长	邢海鹰	贺 明		
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	陆 军	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
	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

本书针对末端修正的灵巧子弹相关动力学问题,综合应用总体设计、空气动力学、飞行力学和多体动力学等学科知识,系统深入地研究了伞—弹系统空气动力学、伞—弹多体系统动力学、融合伞—弹动力学的目标识别算法、系留绳索动力学等理论问题。

本书共分为六章。第一章简单介绍灵巧子弹的发展状况。第二章进行了子弹弹道设计方法研究,从末修灵巧子弹的工作原理入手,通过分析弹道参数特性和约束条件,用协方差描述函数法设计了子弹弹道,分析了阵风对子弹运动轨迹和末段弹道修正的影响,并提出子弹的风修方法。第三章给出了伞—弹系统的空气动力学特性的计算方法,并与空投试验结果进行了对比分析。第四章研究了伞—弹系统的多体动力学建模方法,建立了九自由度和十二自由度的多体动力学模型,并仿真分析伞—弹系统下落过程中子弹的姿态运动特性,给出了确定子弹与攻击目标相对位置的计算方法。第五章针对阵风扰动下的红外目标识别问题,给出了伞—弹系统九自由度的线性化动力学方程,并提出了融合伞—弹动力学的图像目标识别算法。第六章采用 Kane 法建立了飞艇—绳索—子弹系统的开链式多刚体动力学模型,研究了高空飞艇系留投放试验的绳索动力学问题。

本书不仅可作为灵巧子弹等领域研究人员的参考书,也可作为高等工科院校飞行器设计、一般力学、航空航天等相关专业师生的参考书。限于作者水平,本书必有许多不足之处,恳请读者批评指正。

最后,作者十分感谢国防科技图书出版基金的资助,并对所有给予关心和帮助的各位同仁,表示诚挚的谢意!

作者
2013 年 6 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 灵巧子弹技术	3
1.2 末修子弹总体设计	8
1.2.1 子弹工作过程	8
1.2.2 末修控制方法	10
1.3 关键动力学问题	13
1.3.1 子弹总体设计	13
1.3.2 伞—弹系统空气动力学	14
1.3.3 伞—弹系统轨迹动力学	16
1.3.4 多系统动力学	17
1.3.5 绳索动力学	19
第 2 章 子弹弹道设计	23
2.1 子弹弹道参数特性分析	26
2.1.1 子弹弹道的约束条件	28
2.1.2 子弹弹道设计步骤	28
2.2 协方差描述函数法	30
2.2.1 统计线性化原理及描述函数计算	31
2.2.2 协方差分析方法	34
2.2.3 协方差描述函数法精度分析	35
2.3 弹道动力学模型	35
2.3.1 基本假设及坐标系定义	35
2.3.2 子弹减速段平面质心动力学模型	37
2.3.3 子弹末修段六自由度动力学模型	46
2.4 末修子弹弹道设计流程	48
2.4.1 确定最大末段修正距离 L_{XM}	48

2.4.2	确定子弹群最大抛撒半径 R_{PM}	48
2.4.3	仿真算例	49
2.5	末修子弹风修模型	52
2.5.1	确定母弹攻击点坐标的风修模型	53
2.5.2	末段弹道修正中的风修模型	55
第3章	伞—弹系统空气动力学	59
3.1	模型假设	61
3.2	CFD 计算模型	62
3.2.1	物理模型及网格	62
3.2.2	子弹网格划分	63
3.2.3	控制方程及湍流模型	64
3.2.4	CFD 离散格式	68
3.2.5	不可压流体流场数值解法	68
3.2.6	数值仿真边界条件	70
3.3	结果分析	71
3.3.1	计算结果与试验结果对比	71
3.3.2	伞—弹周围流场分析	75
第4章	伞—弹系统多体动力学模型	79
4.1	伞—弹系统九自由度动力学模型	81
4.2	伞—弹系统十二自由度非刚性连接模型	86
4.2.1	动力学模型	87
4.2.2	吊带张力的计算	89
4.3	动力学模型的验证与分析	92
4.3.1	末修子弹空投试验简介	93
4.3.2	伞—弹系统动力学模型的试验验证	93
4.3.3	不同动力学模型仿真结果对比	95
4.4	末修子弹姿态运动特性分析	96
第5章	基于动力学的目标识别技术	105
5.1	红外图像识别处理方法	107

5.1.1	目标的检测识别方法	108
5.1.2	线目标的跟踪方法	116
5.1.3	红外目标识别原理	122
5.2	基于小扰动动力学目标识别算法	123
5.2.1	伞—弹系统小扰动动力学	123
5.2.2	基于动力学的目标识别算法	127
第 6 章	系留投放动力学	131
6.1	引言	133
6.2	开链式多刚体模型	133
6.3	CFA 快速算法	140
参考文献		148

Contents

1. Introduction	1
1.1 Terminal correction submunition technology	3
1.2 General design for terminal correction submunition	8
1.2.1 Schemes of submunition operating	8
1.2.2 Methods for terminal control	10
1.3 Key dynamic problems	13
1.3.1 System design of submunition	13
1.3.2 Aerodynamics of parachute – munition system	14
1.3.3 Trajectory dynamics of parachute – munition system	16
1.3.4 Multibody dynamics of parachute – munition system	17
1.3.5 Tethered system dynamics	19
2. Trajectory design of submunition	23
2.1 Analysis of munition trajectory parameter	26
2.2.1 Constraint condition of trajectory	28
2.2.2 Process of trajectory design	28
2.2 Covariance Analysis Describing Function Technique	30
2.2.1 Statistical linearization theory and describing function	31
2.2.2 Covariance analysis method	34
2.2.3 Covariance description function for accuracy analysis	35
2.3 Model of ballistic trajectory	35
2.3.1 Basically assumption and reference frames	35
2.3.2 Mass center dynamics model for descent phase	37
2.3.3 Six freedoms model for terminal phase	46
2.4 Design process of submunition trajectory	48

2.4.1	Determination of maximum terminal correction distance	48
2.4.2	Determination of maximum cluster dispensing radius	48
2.4.3	Simulation example	49
2.5	Wind correction model of terminal submunition	52
2.5.1	Wind correction model for attack points	53
2.5.2	Wind correction model for terminal trajectory	55
3.	Aerodynamics of parachute – submunition system	59
3.1	Model assumption	61
3.2	CFD calculating model	62
3.2.1	Physical model of submunition	62
3.2.2	Mesh generation of submunition	63
3.2.3	Control equation and turbulence model	64
3.2.4	CFD discretization schemes	68
3.2.5	Numerical method of incompressible flow field	68
3.2.6	Nnumerical simulation of boundary condition	70
3.3	Simulation result analysis	71
3.3.1	Comparison of numerical and experimental result	71
3.3.2	Flow field analysis around parachute – submunition system	75
4.	Multibody dynamics of parachute – munition system	79
4.1	9 DOF rigid connected model of parachute – submunition system	81
4.2	DOF non – rigid connected model of parachute – submunition system	86
4.2.1	12 DOF dynamic model	87
4.2.2	Calculation of riser tension	89
4.3	Verification and analysis of dynamic model	92
4.3.1	Introduction of terminal corection submunition airdrop test	93
4.3.2	Test verification of parachute – submunition system dynamic model	93
4.3.3	Simulating results comparison of different dynamic model	95
4.4	Attitude analysis of terminal correction submunition	96

5. Target identification technique based on dynamic model	105
5.1 Infrared image recognition method	107
5.1.1 Target detection method	108
5.1.2 Target tracking method	116
5.1.3 Theory of infrared recognition	122
5.2 Target identification algorithm based on perturbation theory	123
5.2.1 Small perturbation dynamic model of parachute – sumunition system	123
5.2.2 Target identification algorithm based on dynamics model	127
6. The dynamics model of tethered airdrop system	131
6.1 Introduction of airdrop test	133
6.2 Open chain multibody system	133
6.3 Constraint force algorithm	140
Refrences	148

第 1 章

绪 论

- 1.1 灵巧子弹技术
- 1.2 末修子弹总体设计
- 1.3 关键动力学问题

20 世纪以来的战争表明,以弹道导弹为运载平台的子母弹是实现远程精确打击的重要手段。子母弹主要分为无控和有控两类,其中有控子母弹包括末制导和末修两种子弹。相对于末制导子弹而言,末修子弹的结构比较简单,单发子弹的成本较低,适合于打击线目标或小幅员目标。本书重点研究末修子弹中的关键动力学问题,包括:伞—弹系统空气动力学、伞—弹多体系统动力学、伞—弹系统运动稳定性分析、融合伞—弹动力学的目标识别算法、伞—弹系统系留试验动力学等。

1.1 灵巧子弹技术

末修子弹是灵巧子弹的主要组成部分。近几十年来,国外发展了多种灵巧子母弹技术。子母弹具有较大的覆盖面积,主要用于打击集群目标和面目标。一枚母弹(如远程炮弹、航弹、火箭弹和导弹等)可携带几枚甚至几百枚子弹。图 1.1 所示是美国所研制的带有子母弹战斗部的 T-16 导弹。图 1.2 和图 1.3 描述了美

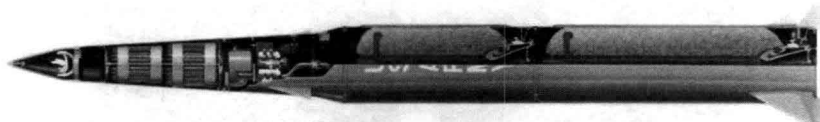


图 1.1 美国 T-16 子母弹

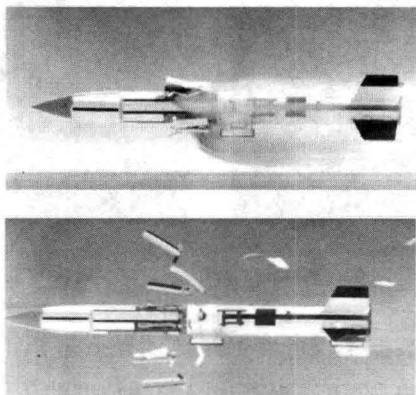


图 1.2 T-16 母弹抛撒 TGSB 子弹

国 T-16 子母弹的作战过程。当母弹飞至预定的抛撒点时开舱抛撒全部子弹,子弹群按照一定的散布形式飞向预定的攻击目标区域,对目标区域实施有效的覆盖。如图 1.4 所示,当子弹距离攻击目标达到一定的高度时,子弹经过一定的末段修正后,可有效攻击目标。

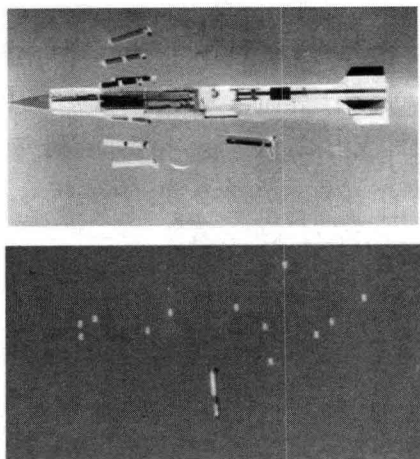


图 1.3 抛撒后的母弹和 TGSM 子弹

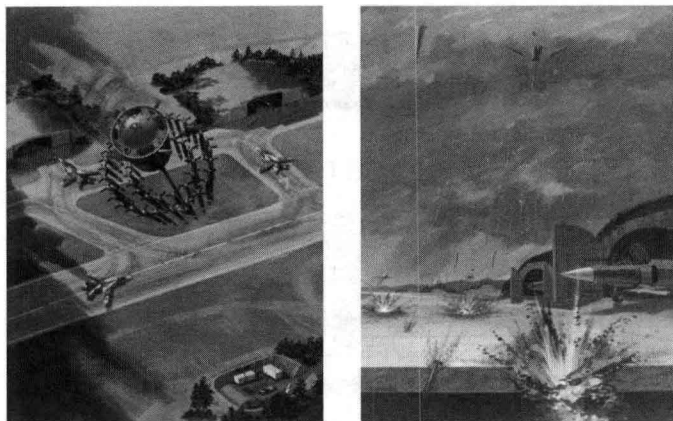


图 1.4 子母弹作战过程示意图

使用弹道导弹作运载器不仅可以远距离地抛撒末修子弹,而且还可以充分发挥弹道导弹射程远的优势,在不需提高现役导弹精度的条件下,利用子弹的末段弹道修正特性,形成大纵深、大覆盖面积、准确攻击多个目标的作战能力。20 世纪 80