



国防科技图书出版基金

Design and Effectiveness Analysis of
Smart Submunition



末敏末修灵巧弹药 技术与效能分析

杨涛 葛健全 张青斌 唐乾刚 丰志伟 张翼 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

末敏末修灵巧弹药 技术与效能分析

Design and Effectiveness Analysis of Smart Submunition

杨 涛 葛健全 张青斌 唐乾刚 丰志伟 张 翼 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

末敏末修灵巧弹药技术与效能分析/杨涛等著. —北京:
国防工业出版社, 2016. 1

ISBN 978 - 7 - 118 - 10346 - 5

I. ①末... II. ①杨... III. ①弹药 - 性能分析 IV.
①TJ41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 258836 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 19 1/4 字数 365 千字

2016 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 98.00 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出出版。

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 (按姓氏笔画排序)	才鸿年	马伟明	王小谟	王群书
	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

子母弹是通过较大覆盖面积来实现对目标毁伤的武器。为提升作战能力和效费比,在综合考虑命中精度、技术复杂性和研制成本的基础上,本书围绕“捷联成像探测器+弹道末端修正”这类末敏末修灵巧弹药总体设计和效能分析,系统深入地研究了相关的总体设计、弹道设计、伞—弹系统动力学、融合伞—弹动力学的目标检测识别算法、小型固体发动机优化设计、弹道末修控制、战斗部设计、反机场跑道效能分析和总体参数优化等问题。

本书共分为9章。第1章简要介绍子母弹相关技术的发展状况。第2章介绍了末敏末修灵巧弹药总体设计思想、设计原理、系统组成与飞行试验技术。第3章从弹体气动力计算和伞—弹系统动力学入手,利用协方差函数法探讨了典型子母弹的飞行弹道设计问题。第4章基于伞—弹系统的多体动力学,给出了伞—弹系统下落过程中考虑子弹的姿态运动特性时末敏信号探测与识别问题。第5章根据总体对修正发动机的技术要求,给出了末修固体发动机和脉冲发动机组的优化设计方法。第6章首先分析了低速自旋子弹动力学特性和脉冲力作用对弹体运动的影响,然后提出了单次弹道修正控制原理和风修技术,给出了连续脉冲控制作用修正原理和增速修正一体化控制原理。第7章介绍了子弹战斗部聚能装药结构设计方法,并研究了装药结构对聚能射流的影响。第8章研究了不同运载平台的子母弹对大型线目标毁伤效能评估问题。第9章给出了总体参数工程设计方法和基于效能的优化方法。

本书是作者长期科研工作和工程实践的总结,也包含课题组郑平泰、寇保华、葛健全、范培蕾、刘巍、程兴华、刘欣、马洋等博士的研究成果,不仅可作为从事该领域研究人员的参考书,也可供高等工科院校相关专业师生参考。

感谢国防工业出版基金资助,及出版社肖志力编辑与其他同志的协助。由于时间和作者水平所限,书中难免有不当和错误之处,敬请读者批评指正,不胜感谢。

作者

2015年6月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 灵巧弹药简介	1
1.1.1 末敏弹	1
1.1.2 弹道导弹子母弹	2
1.1.3 末制导弹药	4
1.1.4 反跑道子母弹	4
1.2 关键技术简介	6
第 2 章 末敏末修灵巧弹药	11
2.1 工作特点概述	11
2.1.1 子母弹工作过程	12
2.1.2 末敏末修灵巧弹药构成	16
2.2 气动设计与气动特性计算	18
2.2.1 子弹气动外形设计	19
2.2.2 子弹气动特性工程估算	20
2.2.3 卷弧翼—身组合体流场数值模拟	29
2.3 飞行试验技术	33
2.3.1 试验投放平台的选择	33
2.3.2 外弹道测量技术	34
2.3.3 虚拟靶线设计	34
第 3 章 弹道设计	36
3.1 末敏末修灵巧弹弹道设计	36
3.1.1 弹道参数特性分析	36
3.1.2 弹道设计的约束条件	38
3.1.3 弹道设计的协方差描述函数法	38

3.1.4	弹道设计的动力学模型	43
3.1.5	设计算例	53
3.2	子母弹末修精度分析的随机动力学方法	55
3.2.1	子弹末修段随机动力学模型	56
3.2.2	末修精度分析算例	61
3.3	子弹弹道设计的伞—弹系统动力学	63
3.3.1	伞—弹系统质点刚体动力学模型	64
3.3.2	考虑伞—弹系统动力学的弹道分析	67
3.3.3	工作时序设计算例	74
第4章	目标探测与识别	76
4.1	机场跑道目标	76
4.1.1	机场跑道目标的基本模型	76
4.1.2	机场跑道目标的检测识别方法	77
4.1.3	机场跑道目标的跟踪技术	84
4.1.4	跟踪数据结果分析算例	88
4.2	线目标测量信息获取方法及空投试验验证	89
4.2.1	跑道目标末敏信号的获取	89
4.2.2	末敏信号 $D(i)$ 的参数估计	91
4.2.3	末敏信号 $D(i)$ 的精度评估方法	91
4.2.4	试验弹空投试验	92
4.2.5	小扰动分析法与消除晃动干扰的处理方法	95
4.3	机场小幅员目标检测与识别	99
4.3.1	目标邻域点边界跟踪方法	100
4.3.2	确定小矩形目标几何中心点的方法	101
第5章	末修发动机设计与优化	104
5.1	总体设计方法	104
5.1.1	性能指标	104
5.1.2	结构形式的设计原则	105
5.1.3	主要参数的设计	105
5.2	装药的设计方法	108
5.2.1	装药的种类及选择	108

5.2.2	药型的设计原则	109
5.2.3	主要计算公式	110
5.3	点火器设计	118
5.3.1	结构设计	118
5.3.2	点火药选择	118
5.3.3	点火药粒度选择	119
5.3.4	点火药量选择	120
5.4	发动机喷管气动设计	121
5.4.1	计算模型	122
5.4.2	侧、直喷管流场数值模拟对比	124
5.4.3	外圈喷管参数设计	126
5.4.4	长尾管效应对内圈发动机性能的影响	130
5.5	小型发动机设计与优化	133
5.5.1	单脉冲发动机优化设计	133
5.5.2	发动机组优化设计	134
5.5.3	BP 网络模型设计	136
5.5.4	改进的遗传算法——多方式 FGA	139
第 6 章	弹道末修控制技术	147
6.1	自旋弹体飞行特性	147
6.1.1	自旋弹体运动耦合特性	147
6.1.2	自由飞行角运动模型	148
6.1.3	自由运动稳定性分析	151
6.2	脉冲作用对修正效果的影响	156
6.2.1	脉冲作用的矩形波近似	157
6.2.2	转速对修正效率的影响	158
6.2.3	脉冲作用位置的影响	160
6.2.4	脉冲间隔时间的影响	162
6.3	末敏末修灵巧弹药单脉冲弹道修正技术	163
6.3.1	末段弹道修正原理	163
6.3.2	末段弹道修正中的风修模型	167
6.4	末制导多脉冲修正弹连续脉冲弹道修正技术	171
6.4.1	末段弹道修正原理	171

6.4.2	多次修正弹寻的导引律	175
6.4.3	利用捷联导引头测量信息实现脉冲比例导引	184
6.4.4	基于 Simulink 的数字仿真	194
6.5	增速末修弹预置角度弹道修正技术	196
6.5.1	增速飞行弹道分析	196
6.5.2	系统稳态扫描参考状态	197
6.5.3	增速末修弹探测系统及控制指令	198
第7章	战斗部聚能装药结构设计	202
7.1	聚能装药结构设计方法	202
7.1.1	药型罩材料的选择	203
7.1.2	药型罩结构设计原则	204
7.1.3	主装药的设计	204
7.1.4	起爆方式	205
7.2	装药结构的工艺误差对聚能射流的影响分析	207
7.2.1	聚能射流横向速度计算模型	207
7.2.2	药型罩壁厚不均匀性对射流的速度的影响	210
7.2.3	炸药组分的非均匀性对射流的速度的影响	210
7.2.4	装药厚度的非对称性对射流的速度的影响	210
7.2.5	壳体结构的非对称性对射流的速度的影响	212
7.3	聚能射流侵彻混凝土介质数值模拟	214
7.3.1	LS-DYNA 软件及数值模拟算法简介	214
7.3.2	混凝土材料本构模型	216
7.3.3	材料模型参数	221
7.3.4	有限元模型的建立	223
第8章	反跑道作战效能	229
8.1	子母弹对机场跑道的攻击特点	229
8.1.1	子母弹对机场跑道的毁伤	229
8.1.2	横向切断跑道的多瞄准线攻击策略	231
8.2	机场跑道毁伤评估准则	233
8.2.1	机场跑道毁伤效果评估指标	233
8.2.2	机场跑道毁伤效果评估方法	234

8.2.3	子母弹对跑道封锁概率算例	240
8.3	布撒器子母弹落点散布的数值模拟	245
8.3.1	子弹落点散布随机模拟方法	245
8.3.2	启控时刻子弹群近似分布方法	246
8.3.3	子弹落点散布算例数值模拟分析实例	247
8.3.4	提高跑道失效概率的方法	251
第9章	总体参数优化方法	261
9.1	总体参数优化的工程设计方法	261
9.1.1	田口方法参数优化设计	261
9.1.2	末制导子弹总体参数优化设计算例	268
9.2	基于效能的总体参数优化方法	278
9.2.1	目标函数及优化参数的确定	278
9.2.2	基于交叉变异改进的混合粒子群优化算法	281
9.2.3	末修子弹总体参数优化设计算例	288
参考文献		294

Table of contents

Chapter 1	Introduction	1
1.1	Smart munition	1
1.1.1	Terminal trajectory correction munition	1
1.1.2	Submunition for ballistic missile warhead	2
1.1.3	Terminal guidance munition	4
1.1.4	Terminal trajectory correction anti – runway munition	4
1.2	Summary of key technologies	6
Chapter 2	Terminal trajectory correction munition	11
2.1	Brief of working characteristics	11
2.1.1	Overview of the work process	12
2.1.2	System configuration	16
2.2	Aerodynamic shape design and performance prediction	18
2.2.1	Aerodynamic shape design	19
2.2.2	Aerodynamic performance estimation	20
2.2.3	Fluid simulation for wrap – around fins configuration	29
2.3	Method of flight test	33
2.3.1	Test platform	33
2.3.2	Optical measurement for trajectory	34
2.3.3	Design of virtual target line	34
Chapter 3	Flight mechanics and trajectories	36
3.1	Submunition trajectory design	36
3.1.1	Analysis of trajectory parameters	36
3.1.2	Constraint conditions of trajectory design	38
3.1.3	Covariance analyses describing function for trajectory design	38

3.1.4	Dynamic model of trajectory design	43
3.1.5	Example	53
3.2	Random dynamics method of trajectory design	55
3.2.1	Model of random dynamics	56
3.2.2	Example	61
3.3	Dynamics of parachute/submunition system	63
3.3.1	Dynamics model	64
3.3.2	Application of trajectory analysis	67
3.3.3	Example	74
Chapter 4	Target detection and identification	76
4.1	Target signature of aerodrome runway	76
4.1.1	Basic simplified model	76
4.1.2	Detection and recognition of line – target	77
4.1.3	Tracking Techniques	84
4.1.4	Flight test data Analysis	88
4.2	Detection and recognition for line target and test verification	89
4.2.1	Aiming signal acquisition	89
4.2.2	Parameter estimation of signal $D(i)$	91
4.2.3	Precision evaluation of signal $D(i)$	91
4.2.4	Airdrop test	92
4.2.5	Small disturbance analysis and elimination	95
4.3	Detection and recognition for area target	99
4.3.1	Tracking method for neighborhood boundary of target	100
4.3.2	Determination for the center of rectangular target	101
Chapter 5	Design and optimization of terminal correction engine	104
5.1	Introduction	104
5.1.1	Performance indexes	104
5.1.2	Principal of structure design	105
5.1.3	Major considerations	105
5.2	Propellant grain design	108
5.2.1	Propellant grain classification and selection	108

5.2.2	Principle of propellant grain shape design	109
5.2.3	Main formulas	110
5.3	Design of igniter	118
5.3.1	Igniter structure design	118
5.3.2	Selection of ignition composition	118
5.3.3	Selection of particle size of ignition composition	119
5.3.4	Igniter grain mass estimation	120
5.4	Aerodynamic design of engine nozzle	121
5.4.1	Computational model	122
5.4.2	Numerical analysis of lateral and straight nozzle	124
5.4.3	Parameter design of outer circle nozzle	126
5.4.4	long tail effect of inner circle nozzle	130
5.5	Design and optimization of lateral miniengine	133
5.5.1	Single engine design and optimization	133
5.5.2	Multi – engines design and optimization	134
5.5.3	BP neural network approach	136
5.5.4	Improved multi – mode FGA	139

Chapter 6 Impulse Control for Terminal Trajectory Correction 147

6.1	Dynamic characteristics of spin body	147
6.1.1	Coupling characteristic	147
6.1.2	Angular movement for free flight	148
6.1.3	Stability analysis of free flight	151
6.2	Influence of thrust on trajectory correction	156
6.2.1	Rectangular wave approximate	157
6.2.2	Influence of rotation speed on correction efficiency	158
6.2.3	Influence of thrust position	160
6.2.4	Influence of interval time	162
6.3	Application of single impulse control for trajectory correction	163
6.3.1	Principle of trajectory correction	163
6.3.2	Wind correction model	167
6.4	Multi – impulse terminal guidance submunition	171
6.4.1	Brief introduction of design Principle	171

6.4.2	Guidance law	175
6.4.3	Proportional navigation utilizing the information measured by strapdown seeker	184
6.4.4	Numerical simulation base on Matlab/Simulink	194
6.5	Aiming angle preset method for terminal propulsion and correction submunition	196
6.5.1	Trajectory analysis	196
6.5.2	Reference state of steady scan	197
6.5.3	Detection system and control method	198
Chapter 7	Structure design of shaped charge	202
7.1	Structure design method of shaped charge	202
7.1.1	Material of shaped charge liner	203
7.1.2	Principle of shaped charge liner structure design	204
7.1.3	Design of main charge	204
7.1.4	Detonation analysis model	205
7.2	Influence of structure technical error on shaped charge stream	207
7.2.1	Lateral speed model of shaped charge jet	207
7.2.2	Influence of asymmetry thick on stream speed	210
7.2.3	Influence of nonuniform charge on stream speed	210
7.2.4	Influence of asymmetry charge thickness on stream speed	210
7.2.5	Influence of asymmetry structure thickness on stream speed	212
7.3	Numerical simulation of shaped charge penetration on concrete target	214
7.3.1	Introduction for LS – DYNA	214
7.3.2	Concrete constitutive model	216
7.3.3	Material model parameters	221
7.3.4	Finite element method for penetration on concrete target ...	223
Chapter 8	Operational effectiveness analysis for anti – runway submunition	229
8.1	Attack characteristic of aerodrome runway	229

8.1.1	Analysis of runway's damage attacked by submunition	229
8.1.2	Multi aiming lines strategy for cutting off	231
8.2	Evaluation criterion of runway's damage	233
8.2.1	Evaluation index system	233
8.2.2	Evaluation method	234
8.2.3	Application of disable probability of runway simulation	240
8.3	Numerical simulation of dispenser's submunition distribution	245
8.3.1	Random simulation method	245
8.3.2	Approximately distribution model	246
8.3.3	Numerical simulation	247
8.3.4	Improve damage probability of the runway	251
Chapter 9	Tradeoff of system parameters	261
9.1	Engineering method of system parameter optimization design	261
9.1.1	Taguchi method	261
9.1.2	Application of parameters tradeoff for terminal guidance submunition	268
9.2	System parameters optimization base on operational effectiveness	278
9.2.1	Objective function and determination of major parameters	278
9.2.2	Hybrid particle swarm optimization based on crossover and mutation	281
9.2.3	Application for system parameters optimization of terminal trajectory correction submunition	288
References		294