

杨绍卿 著

SMART MUNITION ENGINEERING

灵巧弹药工程



國防工業出版社

National Defense Industry Press

灵巧弹药工程

Smart Munition Engineering

杨绍卿 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

灵巧弹药工程 / 杨绍卿著. —北京:国防工业出版社, 2010. 9

ISBN 978 - 7 - 118 - 07080 - 4

I. ①灵… II. ①杨… III. ①弹药 - 研究
IV. ①TJ41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 164307 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 × 960 1/16 印张 18 字数 319 千字

2010 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 72.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

序

不久前,杨绍卿研究员将他的新作《灵巧弹药工程》一书的样稿送给我,请我为该书作序。作为一名同行和见证人,能够为我国灵巧弹药工程的开山立论之作作序,感到非常荣幸。

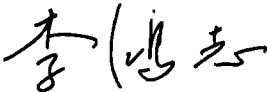
我结识杨绍卿研究员是在十五年前。那年,我作为中国兵工学会弹道专业委员会主任委员主持召开了当年的学术年会。会上杨绍卿研究员做了题为“灵巧弹药技术及其发展”的学术报告,他关于灵巧弹药的技术内涵、工作原理、作战效能、关键技术以及发展思路的精辟论述给我留下了深刻印象。约二年之后,时任南京理工大学校长的我专程赴杨绍卿研究员就职的中国兵器工业第203研究所,聘请他为我校的兼职教授,并颁发了聘书,目的在于加强我们在灵巧弹药技术领域的合作,促进我校该专业的建设和发展。自那以后,杨绍卿研究员与我校的合作日益紧密和深入,我校的灵巧弹药毫米波敏感器技术和小型弹载激光雷达探测技术等也因他的大力支持和悉心指导得到了迅速发展,并成功地应用于工程型号。光阴转瞬即逝,十五年来,我亲眼目睹了杨绍卿研究员及其所率领的科研团队作为我国灵巧弹药领域的拓荒者所走过的艰难曲折历程和付出的巨大努力,见证了他们所取得的令人瞩目的成果和开辟的重大技术领域。他们攻克了灵巧弹药的代表性弹种——末敏弹的关键技术,建立了我国末敏弹的设计、分析、仿真、试验、制造、验收和评估等的方法、规范和理论体系,使我国跻身于美、俄、德、法等少数能自行研制末敏弹的国家之列;他们研制成功在我国弹药发展史上具有里程碑意义的第一个末敏弹武器系统,该系统已成为我军具有世界先进水平的远距离反规模装甲最有效、最具威慑力的武器。如果说《灵巧弹药工程》一书是杨绍卿研究员对多年工程实践的总结、提炼和升华的话,那么书中的观点、方法、技术和理论则是对他们所取得成果的最好诠释。

《灵巧弹药工程》一书内容十分丰富,涵盖了灵巧弹药的技术内涵、工作原理、作战效能、发展思路、总体技术、弹道气动力技术、稳态扫描技术、复合

探测识别技术、EFP 战斗部技术等,读来有一股新风沁人心肺之感。可以说,这是我国灵巧弹药领域中实践基础坚实、技术先进实用、理论严谨深刻、具有丰富原创性成果的工程技术专著,必将对我国灵巧弹药技术的发展发挥重要作用。

我国的灵巧弹药技术正处于蓬勃发展阶段,该书的面世恰逢其时。祝愿杨绍卿研究员及其团队百尺竿头再进一步,取得更大成绩。

衷心祝贺《灵巧弹药工程》一书的出版面世。

中国工程院院士 
2010 年 8 月
于南京理工大学

前 言

20 年前,作者有幸步入灵巧弹药研究领域,成为我国该领域拓荒群体中的一员。从那时起,作者便与灵巧弹药的典型代表——智能化末敏弹这一神奇弹药结下了不解之缘,它的原理之新颖、内涵之丰富、效能之卓越极大地吸引并激励着作者和他的团队。之后的 20 年间,作者和他的团队走过了艰难曲折的历程,共享了无数次失败、成功、失望、希望、痛苦、喜悦,以锲而不舍的奋斗精神解决了系统总体技术、子弹抛射分离技术、减速减旋技术、稳态扫描技术、多模敏感器设计技术、目标探测与识别技术、EFP 战斗部技术,以及小型化与抗高过载技术等,初步建立了末敏弹设计、分析、仿真、试验、制造与验收的工程方法和理论体系,开拓了我国末敏弹装备与技术领域,使我国跻身于能够自主研制这一高技术武器装备的国家之列。到目前为止,虽然末敏弹主要用于攻击装甲目标,但它的作用原理和技术内涵告诉我们,如果根据不同种类目标的特征设计相应的敏感器和目标识别算法,选择适宜的毁伤方式与战斗部类型,构建合理的系统总体技术方案,则末敏弹可以用于攻击多种目标,如机场跑道、机场上的飞机、停机坪上或悬停的直升机、雷达站或雷达车、舰艇等,因此,它是发展前景十分广阔的灵巧弹药。

灵巧弹药技术与传统弹药技术、导弹技术、光电子技术、计算机技术、目标探测识别技术、弹道气动力技术、新型战斗部技术、抗高过载与小型化技术等密切相关,作者及其团队 20 年的工程实践过程从本质上讲就是解决并融合这些技术从而创造出新技术和新产品的过程。《灵巧弹药工程》一书则试图从工程技术的高度总结作者及其团队 20 年的工程实践,虽然全书以末敏弹技术为主线,但书中的方法、技术,以及理论在灵巧弹药领域仍具有普遍意义。

在本书写作过程中,研究员级高级工程师刘文举、郑斌、罗健和高级工程师方荣新给予了大力帮助,高级工程师魏琳和工程师程丽丽完成了全部

书稿的录入和编排工作,绘制了第2章、第3章和第6章的插图并校对了全部书稿,高级工程师黄耀华和工程师赵瑾对书稿提出了宝贵意见。因为有了他们的鼎力相助,本书才得以早日付印,在此由衷地表示感谢。

由于时间和水平所限,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

2010年6月

于西安中国兵器工业第203研究所

目 录

第 1 章 灵巧弹药概论	1
1.1 引言	1
1.2 灵巧弹药的技术内涵和特点	1
1.3 灵巧弹药的发展概况	3
1.3.1 末敏弹	3
1.3.2 末制导及制导弹药	4
1.3.3 弹道修正弹药	5
1.4 灵巧弹药的发展方向及关键技术探讨	6
第 2 章 末敏弹的基本构造与作用过程	8
2.1 全备末敏弹	8
2.2 末敏子弹	10
2.3 末敏子弹主要部/组件技术特性	12
2.3.1 减速减旋装置及旋转伞	12
2.3.2 复合敏感器系统	13
2.3.3 EFP 战斗部	14
2.4 末敏弹组装	15
2.4.1 子弹弹体与战斗部的组装	16
2.4.2 电子模块组装	16
2.4.3 末敏子弹组装	17
2.4.4 末敏弹全弹组装	20
2.5 末敏弹作用过程	21
2.5.1 末敏弹开舱抛射过程	21
2.5.2 末敏子弹分离过程	22
2.5.3 旋转伞张开过程	23
2.5.4 稳态扫描过程	23

2.5.5 战斗部起爆攻击过程	24
第3章 末敏弹总体设计	25
3.1 战术技术指标	25
3.2 总体设计的基本内容	26
3.3 外弹道设计	30
3.3.1 母弹开舱点与子弹抛伞点参数设计	30
3.3.2 稳态扫描参数设计	33
3.4 动态补偿参数设计	35
3.4.1 动态补偿的基本概念	35
3.4.2 敏感轴前置角设计	36
3.4.3 EFP 战斗部起爆时间设计	38
3.5 射程与密集度	40
3.5.1 射程	41
3.5.2 密集度	42
3.5.3 末敏子弹落入给定区域的概率	43
3.6 命中概率计算	44
3.6.1 蒙特卡洛 (Monte-Carlo) 方法简介	45
3.6.2 命中概率计算流程	47
3.6.3 母弹开舱点状态模拟	47
3.6.4 末敏子弹减速减旋段终点状态模拟	51
3.6.5 稳态扫描段状态模拟	53
3.6.6 目标及探测识别模拟	54
3.6.7 EFP 攻击目标的模拟	55
3.7 效能评估	57
3.7.1 对目标的毁伤概率	57
3.7.2 毁伤给定目标数的用弹量	58
3.7.3 末敏弹效能示例	59
第4章 末敏子弹的抛射与分离	63
4.1 末敏子弹抛射过程物理模型	63
4.2 末敏子弹抛射过程数学模型	64
4.2.1 基本假设	64

4.2.2	抛射过程方程的建立	65
4.2.3	抛射过程方程的简化	67
4.3	抛射过程方程中参数的确定	68
4.4	抛射过程方程求解	75
4.4.1	数值解法的选择	75
4.4.2	初始值计算	75
4.4.3	特征点解法	75
4.5	抛射装药结构设计	79
4.5.1	装药品号及配比关系分析	79
4.5.2	抛射装药结构的确定	79
4.6	抛射过程数学模型试验验证	80
4.6.1	验证试验方案设计	80
4.6.2	被试品原始参数	81
4.6.3	试验结果及模型误差	82
4.6.4	结果分析	82
4.7	末敏子弹串分离过程分析	83
4.8	弹底分离数学模型	85
4.8.1	基本假设	85
4.8.2	分层弹底运动方程建立	85
4.8.3	弹底运动主要参数求解	87
4.9	弹底分离速度的影响因素	90
4.10	弹底分离数学模型的试验验证	91
4.11	推板分离方法	92
4.12	末敏子弹分离运动数学模型	94
4.13	末敏子弹分离方案设计举例	97
4.14	子弹分离距离数学模型验证	100
第5章	末敏弹飞行弹道	104
5.1	概述	104
5.2	末敏弹母弹飞行弹道	105
5.2.1	参考坐标系	106
5.2.2	末敏弹母弹运动方程	109
5.2.3	作用在末敏弹母弹上的力和力矩	113

5.2.4	末敏弹母弹 6 自由度刚体弹道方程	116
5.3	末敏弹减速减旋段飞行弹道	118
5.3.1	作用力和力矩	118
5.3.2	减速减旋段运动方程	119
5.3.3	减速减旋段弹道计算初始条件	120
5.4	末敏弹稳态扫描段弹道	122
5.4.1	主旋转伞运动模型	122
5.4.2	伞盘运动模型	129
5.4.3	末敏子弹弹体运动模型	133
5.4.4	联系方程	137
5.4.5	末敏子弹扫描角近似变化规律	138
5.5	EFP 飞行弹道	141
5.5.1	EFP 飞行弹道模型	141
5.5.2	EFP 命中点	143
第 6 章	稳态扫描系统	145
6.1	稳态扫描角	145
6.1.1	稳态扫描角设计	145
6.1.2	设计参数对稳态扫描角的影响	146
6.1.3	扫描角的摆动频率	148
6.2	旋转伞	149
6.2.1	旋转伞参数设计	149
6.2.2	伞弹系统旋转运动中的相对扭转问题	151
6.2.3	旋转伞稳定性分析	154
6.3	减速减旋装置	158
6.3.1	减速伞设计	158
6.3.2	减旋翼设计	160
6.4	稳态扫描参数测试	162
第 7 章	复合探测识别系统	164
7.1	复合探测识别系统概述	164
7.1.1	复合探测识别系统组成及特点	164
7.1.2	国外末敏弹探测体制概述	165

7.2 辐射计在目标探测中的应用	166
7.2.1 辐射计探测目标的原理	166
7.2.2 目标探测波段的选择	172
7.2.3 目标/背景辐射特性	179
7.3 不同波段辐射计的对比分析	185
7.4 辐射计设计	188
7.4.1 辐射计设计的主要要求	188
7.4.2 视场角分析	190
7.4.3 信号带宽分析	191
7.4.4 灵敏度分析	193
7.4.5 辐射计分析	199
7.5 雷达在目标探测中的应用	205
7.5.1 雷达最小发射功率	205
7.5.2 毫米波近程雷达对目标的探测原理	207
7.5.3 激光雷达用于目标探测	213
7.6 恒虚警信号检测技术	216
7.7 提高探测系统性能的方法	218
第8章 EFP 战斗部设计	219
8.1 EFP 战斗部的概念及历史	219
8.2 EFP 的成形力学	222
8.3 EFP 的空气动力学	224
8.4 EFP 战斗部的设计方法	226
8.4.1 常用设计软件介绍	227
8.4.2 材料本构模型及状态方程	231
8.4.3 几种常用材料的性能参数	238
8.5 EFP 战斗部设计	239
8.5.1 EFP 战斗部的总体方案确定	239
8.5.2 结构设计	240
8.5.3 飞行稳定性分析	251
8.5.4 外弹道分析	256
8.5.5 EFP 的侵彻威力设计	256
8.6 EFP 战斗部试验	259

8.6.1 EFP 成形试验	260
8.6.2 EFP 飞行试验	263
8.6.3 EFP 穿甲威力试验	266
8.6.4 EFP 终点效应的评估	268
8.7 EFP 战斗部的发展及需要解决的问题	269
8.7.1 EFP 战斗部技术新的发展	269
8.7.2 EFP 战斗部技术研究中要继续解决的问题	271
参考文献	273

第 1 章 灵巧弹药概论

1.1 引言

弹药是武器系统对目标实施毁伤的单元,是最重要最活跃的元素之一。传统弹药,如枪弹、迫击炮弹、榴弹、火箭弹、航空炸弹等以其制造简单、使用方便、价格低廉、火力迅猛、密集压制等特点在战争的历史上发挥了巨大作用,但其缺点也暴露得越来越明显。主要表现在两个方面:其一,使用者在发射或投射弹药后再也无法干预和矫正弹药的行为和状态;其二,弹药自身亦没有修正和驾驭自己行为和状态的能力。因此,在诸多因素影响下,传统弹药的散布较大、精度较差、效能较低。在战场上,为达到一定的作战目的,如击毁敌方的坦克、自行火炮或破坏敌方的工事、据点、重要军事目标等,往往需要形成“弹雨”,消耗大量弹药。此时不是以发数计,而是以吨位计。这不仅给弹药的供给造成困难,而且也给自己的生存带来威胁。在许多情况下,由于战场情况瞬息万变,即使弹药的供给有保障,也很难有机会发射如此大量的弹药。导弹的出现则改变了这种状况。它利用制导装置控制飞行弹道,按已知目标位置和所要求的精度将自己导向目标。其高精度、高性能不仅对战斗双方的胜负起着重要的作用,甚至可以改变双方的作战方式。但战争的实践表明,导弹武器依然存在若干不足,诸如武器系统组成高度复杂,研制和采购成本高昂,使用维护难度巨大,对指挥、操控、维护等人员的知识和技术水平要求颇高,而且,由于不能形成迅猛而密集的火力,无法有效毁伤和压制群目标和面目标,因此它并不适宜于所有战争场合。

近年来,兼收传统弹药和导弹精华的灵巧弹药异军突起,已发展成全新的技术和装备领域,与传统弹药、导弹形成鼎立之势。因此,探讨灵巧弹药的技术内涵、特点、发展态势等则显得十分必要。

1.2 灵巧弹药的技术内涵和特点

“灵巧弹药”源自 Smart Munition,从英文字面上,意为“聪明灵巧”、“行动灵

活”、“反应机敏”的弹药;从技术内涵上,指的是一种新型的与传统弹药本质上不同的弹药。此种弹药在不同程度上克服了传统弹药的缺点,要么使用者在发射或投射后的适宜阶段上可以干预或矫正其行为和状态,要么其自身在适宜的阶段上可以修正或驾驭自己的行为或状态,如其位置和姿态的修正或控制,目标的搜索、探测、识别和选择,攻击方式和时机的决策等。因此,灵巧弹药应包括弹道修正弹药、制导弹药、末敏弹药、巡飞侦察监视弹药等。

在灵巧弹药中,那些对目标具有搜索、探测、识别、定向或定位能力的弹药称为 Intelligent Munition,即“智能弹药”。在大量的文献中,Smart 和 Intelligent 均用来描述“智能弹药”,尽管学者们在用词上并不刻意区分 Smart 和 Intelligent 的差异,但在技术内涵上两者却有显著差别,前者是一个较大的范畴,后者则是一个较小的范畴,或者说“智能弹药”是“灵巧弹药”的子集。由此可见,灵巧弹药中的末敏弹(传感器引爆弹药)、自寻的末制导弹药、巡飞侦察或监视弹药等应属于“智能弹药”的范畴。

综上所述,“灵巧弹药”和“智能弹药”可定义如下。

“灵巧弹药”——在适宜阶段上具有修正或控制其位置或姿态能力,或者对目标具有搜索、探测、识别、定向或定位能力的弹药。弹道修正弹药、制导弹药、末敏弹药(传感器引爆弹药)、巡飞侦察或监视弹药等应属于此类弹药。

“智能弹药”——灵巧弹药中对目标具有搜索、探测、识别、定向或定位能力的弹药。末敏弹药(传感器引爆弹药)、自寻的末制导弹药、巡飞侦察或监视弹药等属于此类弹药。

灵巧弹药有如下一些特点。

第一,利用已有的常规武器平台,发展相适应的灵巧弹药,必要时可对平台进行适应性改进,如在火炮、火箭炮、飞机等平台上发展末敏弹、末制导炮弹及制导炮弹、制导火箭、制导炸弹、弹道修正弹等。这样做的好处是,其一,由于不需要研制新的武器平台,可以大量减少研制和装备费用,缩短研制周期,提高武器平台的使用效率;其二,由于充分考虑了灵巧弹药与原武器平台的适应性、协调性,因此,在很多情况下,与火力配系相关的射程可通过平台来保证,而不需要像导弹那样靠动力装置来保证,如火炮发射的灵巧弹药就是如此。在需要增加射程时,可采用某些增程措施,此时所付出的代价要小得多。

第二,利用大口径制式炮弹、火箭弹、航弹、航空布撒器以及导弹等作为载体(母弹),运送灵巧子弹药。此类母式灵巧弹药从本质上是更换原弹的战斗部,解决好子弹药与母弹的兼容性和适配性,从而保证新弹的飞行特性与原弹一致。显而易见,这是一条发展灵巧弹药的经济而又有效的途径。

第三,大多数灵巧弹药是传统弹药技术与光电电子技术、计算机技术、制导技术、目标探测识别技术等相结合的产物,因此,它仍保留了传统弹药的诸多优良特性,如火炮、火箭炮发射灵巧弹药的齐射特性。此时,灵巧弹药同样可以形成迅猛而密集的火力,在准确打击多个点目标的同时,具有与传统弹药一样的压制功能;使用方便,射击时只需与传统弹药一样地装定射击诸元;有些灵巧弹药甚至保留了传统弹药的基本结构,如某些弹道修正弹和制导航弹,只是在原弹上安装修正装置或制导模块;多数情况下,灵巧弹药与传统弹药一样不需要维护等。

第四,多元化发展。在多种平台上,采用多种技术,发展用途和性能各异、优势互补的灵巧弹药,从而在战时为指挥员提供了更多的选择和保障。

1.3 灵巧弹药的发展概况

以俄罗斯和美国为代表的军事强国大力发展灵巧弹药,从 20 世纪 70 年代开始研制末敏弹、激光半主动末制导航弹和炮弹,至今已在加榴炮、迫击炮、火箭炮、飞机等多种平台上发展了数十种灵巧弹药,形成了一个全新的装备和技术领域。

1.3.1 末敏弹

末敏弹是灵巧弹药的典型代表,是真正意义上“打了不用管”的智能型弹药。其智能主要表现在以下几个方面。其一,末敏弹有光电探测装置,长了“眼睛”;其二,有信息采集及处理系统,即计算机系统,相当于“大脑”,其中储存有目标背景特征数据库,这是末敏弹的“经验库”、“知识库”,数据库越完备,经验或知识就越丰富;其三,有集专家智慧的目标识别软件,可在各种环境中自适应地建立阈值并选择适宜的目标识别逻辑,可对信息进行处理、运算、分析、推理并最终做出决策。诚然,对于不同用途、不同种类、不同阶段的末敏弹,其“智能”程度可能不同,甚至有较大差别,但就其本质而言,已经具有了“智能”的特征,“经验”、“知识”、运算、逻辑推理和判断决策等则是“智能”的集中体现。末敏弹的主要用途是反装甲目标,如坦克、自行火炮、装甲运兵车、步兵战车、火箭和导弹发射车等。2003 年美国在伊拉克战场上使用 Skeet 和 SADARM 末敏弹攻击装甲部队,取得了卓越的效果,充分说明,末敏弹是迄今为止反规模装甲最有效的武器。

末敏弹多为子母式结构,即一枚母弹装载若干枚末敏子弹,末敏子弹主要

由降落伞/翼系统、弹上计算机、敏感器、爆炸成形弹丸(Explosively Formed Penetrator, EFP)战斗部及安全起爆装置等组成。作战时母弹在目标区上空按预定高度抛出末敏子弹,待子弹达到稳态扫描状态时,开始对攻击区域内的目标自主搜索、探测、识别、瞄准直至起爆战斗部从顶部攻击目标。末敏弹可以由多种平台发射,母弹可以是炮弹、火箭弹、导弹、航弹、航空布撒器等,在某些情况下,甚至可以从飞机或无人机上直接投放末敏子弹。

从20世纪60年代美国人提出“目标定向激活弹”即末敏弹的概念起,在之后的三十余年间,美国耗资数十亿美元,研制成功Skeet航空布撒器末敏弹和SADARM155mm加榴炮末敏弹,其Skeet布撒器末敏弹已大量装配空军。到目前为止,世界各国已装备了多种末敏弹,如俄罗斯的9M55K1远程火箭末敏弹和SPBE-D航弹末敏弹、德国的SMArt155mm加榴炮末敏弹、瑞典及法国联合研制的BONUS155mm加榴炮末敏弹等。这些末敏弹的探测体制基本上分成两类,一类是红外体制,如Skeet,9M55K1,SPBE-D,BONUS等;另一类是红外与毫米波复合体制,如SADARM和SMArt。

在诸多末敏弹中,比较有代表性的末敏弹为SMArt155mm加榴炮末敏弹。其装备量最大、装备或即将装备的国家最多,包括德国、瑞士、希腊、澳大利亚、英国、美国等。SMArt的敏感器由 $3\mu\text{m}$ ~ $5\mu\text{m}$ 多元线阵红外辐射计、3mm波雷达、3mm波辐射计组成。与单一红外探测体制的末敏弹相比,探测性能更佳,抗干扰及去伪能力更强,对目标与环境适应性更好,基本上具备了全天候作战的能力。

1.3.2 末制导及制导弹药

末制导及制导弹药主要用于攻击重要的或较高价值的“点”目标。在已有的常规平台上发展末制导或制导弹药,受到世界许多国家的高度重视。美国最早在155mm火炮上研制成155mm“铜斑蛇”末制导炮弹,其制导方式为激光半主动寻的,导引头为半捷联式,射程为16km,CEP约为1m。其主要缺点是战时需要解决对目标的激光照射问题。继美国之后,俄罗斯在152mm火炮上发展了152mm“红土地”激光半主动末制导炮弹,采用全稳式导引头,射程为20km,对坦克的命中率可达0.9。为克服激光半主动制导的缺点,发展了毫米波或红外寻的末制导弹药,如瑞典的120mm Strix红外末制导迫弹,英国的81mm Melin毫米波末制导迫弹等。

近年来,各国在发展末制导或制导弹药中多采用GPS/INS(惯导)组合制导方案,虽然其精度不如半主动/主动寻的制导,但其全天候作战和价格优势仍使