

末敏弹系统理论

杨绍卿 著

陕 西 出 版 集 团
陕西科学技术出版社

序

20 世纪 60 年代,美国和苏联两个超级大国开始发展末敏弹,之后的三十余年间,在世界范围末敏弹技术得以迅速发展,一批性能优良的末敏弹相继面世,如美国的“Skeet”航空布撒器末敏弹和“SADARM”炮射末敏弹、俄罗斯的“SPBE—D”航弹末敏弹和“9M55K1”火箭末敏弹、德国的“SMARt”炮射末敏弹、法国和瑞典的“BONUS”炮射末敏弹等。21 世纪的今天,末敏弹已发展成生机勃勃的智能弹药领域,在弹药的作用原理、技术内涵、设计理论、试验方法、作战使用等方面与传统弹药和导弹有着本质的差别,可以说这是真正意义上具有自主搜索、探测、识别直至攻击目标能力的“打了不用管”的精确打击弹药。

我国从 20 世纪 80 年代末开始将末敏弹技术列为国防关键技术开展预研工作,跨单位、跨行业组织精干力量进行技术攻关,我所在的研究所有幸成为主要的承研单位,负责技术上的抓总和总体技术、复合信号处理技术、稳态扫描技术以及 EFP 战斗部技术的研究工作。光阴荏苒,转眼二十余年已经逝去,这二十年间我亲眼目睹了该书作者及其团队所经历的艰难曲折历程,分享了他们无数次的失望、希望、悲伤、喜悦,见证了他们锲而不舍的奋斗精神和取得的巨大成就。是他们研制成了我国第一个末敏弹装备,创建了我国自己的末敏弹设计、分析、仿真、试验、制造与验收的方法和理论体系,开辟了我国新的智能弹药装备和技术领域,这在我国弹药发展史上具有里程碑意义。我由衷为有这样一支队伍感到欣慰、骄傲和自豪。

《末敏弹系统理论》总结了作者及其团队近二十余年的研究成果,从理论高度深入地阐述了末敏弹系统设计的基本问题,是一部内容新颖丰富、实践基础厚重坚实的智能弹药领域的开篇理论专著,相信该书的面世必将对我国末敏弹领域的发展产生重要影响。

中国工程院院士



2009 年 2 月

前言

本书总结了作者及其研究团队近 20 年的研究成果,是一部关于末敏弹总体设计的理论专著。近年来,末敏弹技术和装备发展迅速,已形成新的技术和装备领域。从末敏弹的作用原理、技术内涵到末敏弹的作战使用等均与传统弹药和导弹有很大不同,因此,其设计理念、设计方法和设计理论等也必然有自己的特点。本书试图从总体设计的角度初步阐述这些理念、方法和理论,希望有关工程技术人员经过对本书的阅读、应用、思考后,提出修改、补充、完善甚至是质疑的宝贵意见,以使该书在日后再版时,内容更加丰富完整,理论更加系统严谨,工程应用更具参考价值。

末敏弹是真正意义上“打了不用管”的智能型弹药,到目前为止,主要用于反装甲目标,如坦克、自行火炮、装甲输送车、步兵战车、火箭及导弹发射车等,必要时也可用于打击机场上停放的飞机、停机坪上的直升机、雷达站等。末敏弹多为子母式结构,即一发母弹装载若干枚末敏子弹,末敏子弹一般由降落伞/翼系统、计算机系统、电源系统、敏感器系统、爆炸成形弹丸(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时间抛出末敏子弹,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、航弹、航空布撒器等。

末敏弹集诸多技术于一身,如传统弹药技术、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、抗高过载技术等。因此,末敏弹的发展水平从一个侧面反映了一个国家的科学技术、工业制造、元器件、原材料等水平,这也许是什么目前世界上只有为数不多的国家研制生产末敏弹的重要原因。从 20 世纪 70 年代美国和前苏联开始研制末敏弹起,至今已诞生了多种末敏弹,如美国的斯基特(Skeet)航空布撒器末敏弹和萨达姆(SADARM)155mm 炮射末敏弹、俄罗斯的 SPBE-D 航弹末敏弹和 9M55K1 远程火箭末敏弹、德国的斯玛特(SMArt)155mm 炮射末敏弹、法国和瑞典的博纳斯(BONUS)155mm 炮射末敏弹等。2003 年美国在伊拉克战场上使用 Skeet 和 SADARM 末敏弹攻击伊拉克的装甲部队,取得了显著的效果。实战充分说明,末敏弹是非常有效的反装甲武器。

经过 20 余年的艰苦奋斗,我国的末敏弹技术取得了长足进展,我们不仅掌握了末敏弹的核心技术,而且创建了我国自己的末敏弹系统分析、设计、试验、测试、仿真的方法和理论体系。本书从总体设计角度阐述了系统分析、设计、仿真等的基本概念、方法和理论,是一部基础性著作,虽然还不够系统完善,但对于末敏弹的总体设计而言,相信会有很大帮助。

最后需要说明的是,书中所阐述的方法和理论是我和我的研究团队近 20 年心血的结晶,我有幸作为这个团队的代表将这些方法和理论汇集成书,算是为团队写了一篇研究工作总结吧。

衷心感谢团队中的每一个人,感谢他们的支持、帮助和无私的奉献,有了他们,才有了这本书。

作者
2007 年于西安

目 录

第 1 章 末敏弹系统设计的基本理论问题	(1)
1.1 末敏弹系统简化模型	(1)
1.1.1 末敏弹基本构造	(1)
1.1.2 末敏弹作用过程	(1)
1.1.3 蒙特卡罗法原理	(4)
1.1.4 末敏弹系统数学模型	(6)
1.2 总体方案优化	(18)
1.2.1 作用流程优化	(18)
1.2.2 动态补偿	(21)
1.2.3 捕获准则	(43)
1.3 系统参数分析及误差分配	(49)
1.3.1 EFP 散布对命中概率的影响	(49)
1.3.2 末敏子弹作用距离对命中概率的影响	(49)
1.3.3 敏感器扫描线切向定位精度分析	(50)
1.3.4 末敏子弹分离距离对命中概率的影响	(51)
1.3.5 误差分配	(52)
第 2 章 捕获准则分析	(54)
2.1 捕获准则的概念	(54)
2.2 选取捕获准则时考虑的因素	(54)
2.2.1 捕获准则的评价指标	(54)
2.2.2 影响选取捕获准则的因素	(55)
2.3 命中概率计算与结果分析	(57)
2.3.1 计算内容	(57)
2.3.2 计算方法及流程	(57)
2.3.3 计算结果及分析	(59)
2.4 识别方式对捕获准则的影响	(65)
第 3 章 末敏弹系统数学仿真	(68)
3.1 末敏弹运动方程	(68)
3.1.1 母弹运动方程	(68)
3.1.2 末敏子弹减速减旋段运动方程	(72)
3.1.3 末敏子弹主伞张开段运动方程	(77)
3.1.4 末敏子弹稳态扫描段运动方程	(86)
3.2 末敏弹数学仿真软件结构设计	(89)
3.2.1 软件总体结构	(89)

3.2.2	弹道分析模块	(89)
3.2.3	命中概率计算模块	(91)
3.2.4	系统参数分析模块	(93)
3.2.5	子弹扫描过程演示模块	(93)
3.2.6	计算结果管理模块	(93)
3.3	末敏弹数学仿真软件功能、使用方法及算例	(93)
3.3.1	弹道分析	(95)
3.3.2	命中概率计算	(97)
3.3.3	系统参数分析	(100)
3.3.4	子弹扫描过程演示	(103)
第 4 章	末敏弹效能分析	(106)
4.1	末敏弹对三种典型目标的易损性分析	(106)
4.1.1	末敏弹的威力	(106)
4.1.2	T-72 坦克的易损性分析	(107)
4.1.3	BMPI-1 步兵战车的易损性分析	(109)
4.1.4	2C3 式 152mm 自行榴弹炮的易损性分析	(111)
4.2	末敏弹毁伤概率计算分析	(113)
4.2.1	EFP 毁伤目标的随机模型	(113)
4.2.2	不同的目标状态对毁伤概率的影响	(114)
4.3	效费比分析	(116)
4.3.1	152mm 末敏弹的效能分析	(116)
4.3.2	152mm 榴弹的效能分析	(117)
4.3.3	155mm 子母弹的效能分析	(118)
4.3.4	152mm 末制导炮弹的效能分析	(118)
4.3.5	费用分析模型	(119)
4.3.6	效费比分析	(119)
第 5 章	末敏子弹抛射分离过程	(121)
5.1	子弹抛射过程	(121)
5.1.1	子弹抛射过程的实物模型和物理模型	(121)
5.1.2	抛射内弹道数学模型	(122)
5.1.3	模型中部分参数的确定方法	(125)
5.1.4	模型求解	(130)
5.1.5	抛射装药结构设计	(133)
5.1.6	抛射内弹道数学模型试验验证	(135)
5.2	子弹分离过程	(137)
5.2.1	分离问题概述	(137)
5.2.2	弹底分离过程分析	(138)
5.2.3	推板分离技术研究	(146)
5.2.4	子弹分离技术研究	(148)

第 6 章 扫描平台近似理论	(160)
6.1 稳态扫描角	(160)
6.1.1 稳态扫描角的近似分析	(160)
6.1.2 稳态扫描过程的仿真计算	(161)
6.1.3 稳态扫描角试验验证	(165)
6.2 旋转伞分析	(166)
6.2.1 旋转伞稳定性分析	(166)
6.2.2 旋转伞开伞过程分析	(169)
6.3 减速减旋装置分析	(174)
6.3.1 减速装置分析	(174)
6.3.2 减旋装置分析	(175)
第 7 章 复合敏感器概论	(177)
7.1 复合敏感器功能	(177)
7.2 复合敏感器技术要求	(177)
7.2.1 复合敏感器主要技术指标	(177)
7.2.2 复合敏感器对分系统技术要求	(177)
7.3 复合敏感器总体分析	(178)
7.3.1 单一敏感器的性能分析	(178)
7.3.2 复合敏感器的性能分析	(179)
7.3.3 融合级的选择	(181)
7.3.4 复合敏感器逻辑框图	(181)
7.4 复合敏感器融合方法	(181)
7.4.1 各信源的信息特点	(181)
7.4.2 融合方法	(183)
7.5 复合敏感器设计要点	(184)
7.5.1 复合敏感器组成框图	(184)
7.5.2 复合敏感器设计要点	(185)
参考文献	(189)

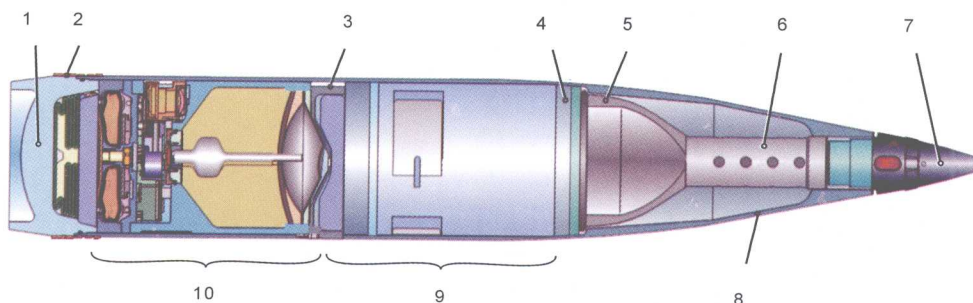
第1章 末敏弹系统设计的基本理论问题

1.1 末敏弹系统简化模型

根据末敏弹系统的原理组成、特点、作用过程,建立能反映末敏弹全系统作用过程的系统模型,是我们进行系统分析工作的关键之一。在末敏弹命中概率分析研究中,我们建立了一个简化模型,并以命中概率作为评价标准初步分析优化了系统的参数,提出了对各分析系统的性能要求。

1.1.1 末敏弹基本构造

末敏弹多为子母式结构,由于发射平台、载体、作战目的等差异,其具体结构形式可以千差万别,但从功能上讲,其主要的组成部分却大同小异。末敏弹一般由母弹(载体)、抛撒分离机构和多枚末敏子弹组成。其载体可以是炮弹、火箭弹、导弹、航空炸弹、航空布撒器等。根据其载体不同,其装载的末敏子弹数量少则一枚,多则数十枚。图 1.1 为典型的炮射末敏弹的基本组成。末敏子弹一般由减速伞、旋转伞、高度计(有些末敏弹由敏感器实现测高功能)、敏感器、弹载计算机、电源、安全起爆装置、EFP(Explosively Formed Penetrator,爆炸成形弹丸)战斗部和子弹结构件组成。由线膛炮发射的末敏弹,其子弹一般还带有减旋翼。也有些末敏子弹没有旋转伞,而是利用导旋翼或特殊的结构设计和抛射方式实现子弹的稳定下落和旋转。末敏子弹的敏感器一般为毫米波敏感器(3mm 或 8mm,主动或被动)、红外敏感器($0.9\sim 1.1\mu\text{m}$ 、 $3\sim 5\mu\text{m}$ 或 $8\sim 14\mu\text{m}$,单元或多元线阵,制冷或非制冷)、激光雷达中的一种或几种复合。图 1.2 即为毫米波/红外复合敏感体制的末敏子弹。

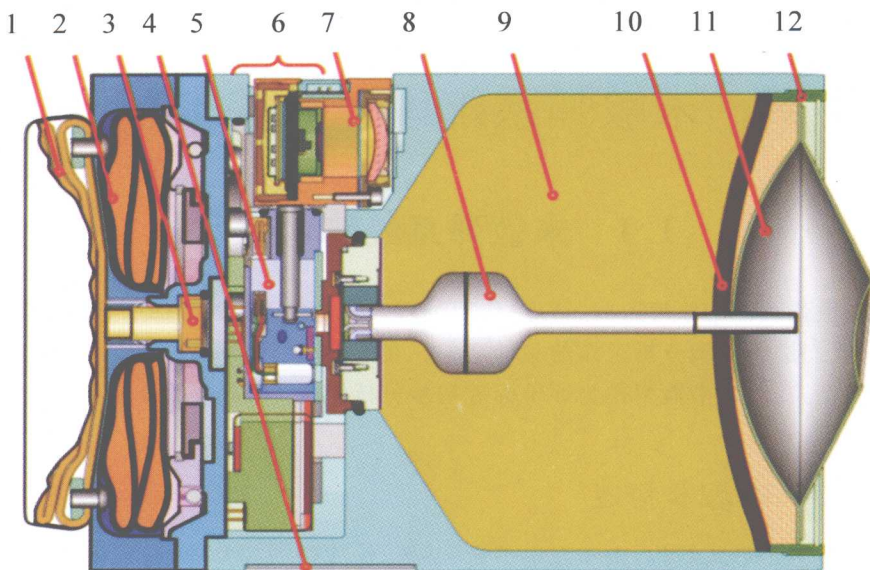


1—弹底 2—弹带 3—后保护盖 4—前保护盖 5—拱形推板
6—抛射药管 7—时间引信 8—薄壁弹体 9—前子弹 10—后子弹

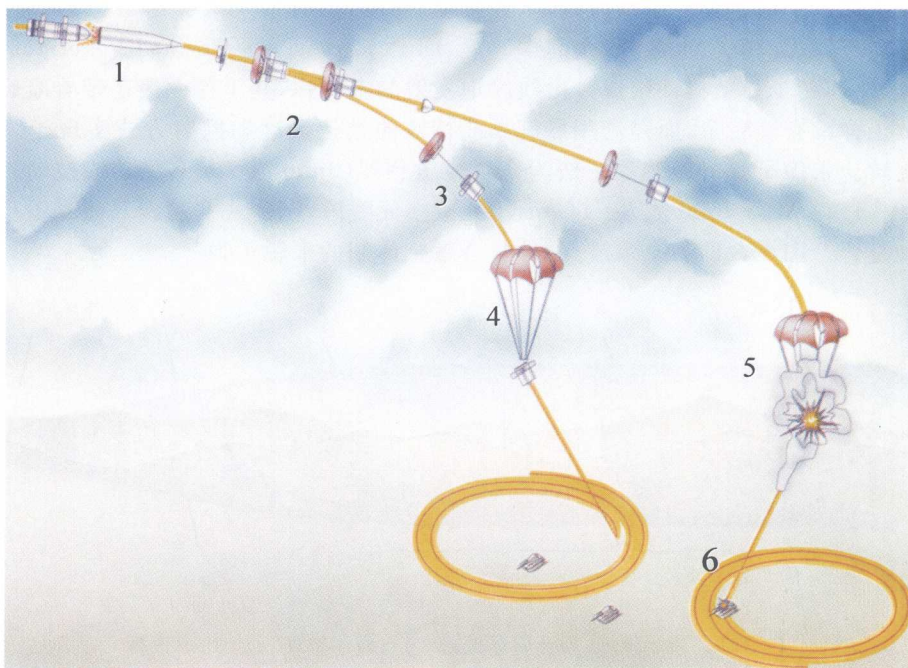
图 1.1 末敏弹组成示意图

1.1.2 末敏弹作用过程

为形象起见,从末敏弹抛撒子弹开始,其作用过程如图 1.3 所示。



1—减速伞 2—旋转伞 3—分离机构 4—减旋翼 5—安全起爆装置 6—电子模块
7—红外敏感器 8—毫米波组件 9—高能炸药 10—药型罩 11—毫米波天线 12—定位环
图 1.2 末敏子弹组成示意图



1—抛撒子弹 2—子弹分离 3—释放旋转伞
4—搜索目标 5—识别目标并起爆战斗部 6—击中目标

图 1.3 末敏子弹作用过程示意图

为建立模型,末敏弹飞行过程可简化为:母弹飞行段、减速减旋段、稳态扫描段三段弹

道,其飞行各阶段弹道如示意图 1.4 所示。

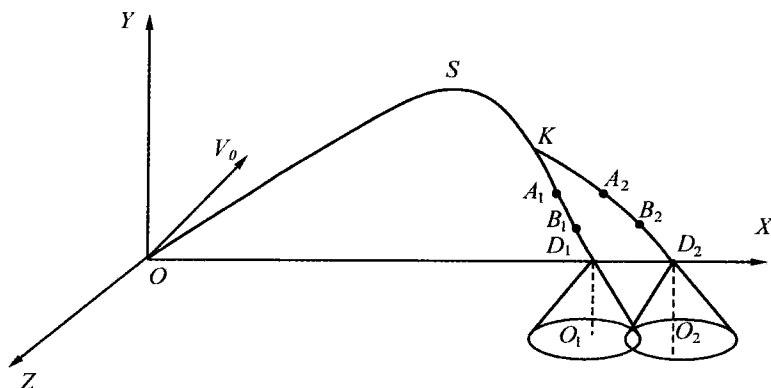


图 1.4 末敏弹飞行弹道示意图

图中各点含义说明:

O : 火炮炮口;

S : 末敏弹弹道最高点;

K : 母弹开舱点;

A_1 、 A_2 : 两发子弹减速减旋结束点;

B_1 、 B_2 : 两发子弹稳态伞拉直充气结束点;

D_1 、 D_2 : 两发子弹起始扫描点;

OSK 段: 母弹飞行段弹道;

KA_1 、 KA_2 段: 两子弹减速减旋弹道;

A_1O_1 、 A_2O_2 段: 两子弹稳态扫描段弹道。

末敏弹与常规炮弹的区别主要反映在末敏子弹的作用过程,因此将这一过程作一简述:

母弹飞行到预定区域上空的预定高度时,时间引信作用,抛射机构以后抛的方式抛出子弹。末敏子弹脱离母弹后速度转速仍相当大,并有一定的弹道倾角。

末敏子弹由母弹中抛出后,在极短的时间内,展开减速伞和减旋翼片。经过一定时间(减速减旋段所用时间与减速伞和减旋翼片的大小有关)子弹速度及转速降到所需要的值,此后在弹载计算机或延时火工品控制下,在规定高度抛掉减速伞,张开主伞,再经过一定时间,伞弹系统的落速和转速基本稳定,进入稳态扫描状态。此时落速 v 、转速 ω ,扫描角 θ 基本保持稳定。

伞弹系统的稳态扫描给末敏子弹提供了一个较为稳定的平台。子弹一边铅垂下落,一边旋转扫描。敏感器视场的中心,即敏感轴和目标水平面的交点就形成阿基米得螺旋线。该扫描螺旋线的间距为 Δ ,则: $\Delta = v \times \tan\theta / \omega$ 其中, v : 下落速度、 ω : 转速、 θ : 扫描角。

理想的情况下, v , ω , θ 均为定值常数,间距 Δ 也为常数,即等间距扫描。实际上,三参数 v , ω , θ 并不恒定,而是随时间在变化,在稳态扫描时其值随时间还在波动。故而,间距 Δ 必然不是常数,实际的扫描曲线也不是理想的阿基米得螺旋线,而是在其上叠加了波动。

伞弹系统达到稳态扫描之后,随着子弹的下落,进入敏感器的最大敏感距离和 EFP 战斗部的有效作用距离 $S_{\max}$ 。在没有横风干扰的情况下末敏子弹的扫描区域是一个以子弹在目标水平面的投影为圆心, $S_{\max} \times \sin\theta$ 为半径的圆。

如果扫描区域内没有目标,子弹就在落地前由弹载计算机时间控制自毁。

如果扫描区域内有目标,子弹下落时,扫描轨线将扫过目标。扫描轨线扫过目标而且符合了捕获准则,就称作末敏子弹捕获了目标。捕获准则是一个条件,不满足此条件时,敏感器不应给出识别目标信号;满足此条件时,认为敏感器识别目标的条件已具备,而且在此条件下,末敏子弹才有可能命中目标。

敏感器捕获目标后,正确地识别目标的能力是由敏感器的性能参数识别概率和虚警概率反映的。敏感器的识别概率和虚警概率是相关连的,它们和目标/背景情况以及末敏子弹的扫描角 θ 高度 H (或斜距 S) 均有关系。

敏感器扫描目标时还需要一段处理时间,才能给出识别目标的信号,即敏感器识别目标滞后于扫描目标。为此,在末敏子弹结构设计时,使敏感轴超前于威力轴。使敏感器识别出目标,并发出起爆信号时,威力轴正好瞄准目标上理想瞄准区。这就是末敏子弹的动态补偿,动态补偿解决末敏子弹瞄准目标的问题。

如果动态补偿很理想,末敏子弹的战斗部瞄准目标上理想区起爆。由于 EFP 战斗部存在着散布,实际的弹着点是随机的。对目标的命中不仅与瞄准点有关,而且与 EFP 的散布有关。

EFP 命中目标之后。对目标的毁伤情况,取决于目标的易毁区域的分布和战斗部的威力。不同类型的目标,其易毁度相差很大;同一个目标的不同部位,装甲厚度和角度不同,易毁度也相差很大。对目标的毁伤程度的判定必须综合战斗部威力和目标的装甲防护性两者来考虑。

1.1.3 蒙特卡罗法原理

蒙特卡罗法是一种试验数学方法,是借助于概率化的数学模型和被研究实际问题的运动过程,对建立的模型进行多次试验,并以此为基础对试验数据作统计处理,得出被研究过程的特征。

设所要求的量 x 是随机变量 ξ 的数学期望 $E(\xi)$,那么近似确定的算法 x 是对 ξ 进行 N 次重复抽样,产生相互独立的序列 $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N$,并计算其算术平均值。

$$\bar{\xi}_N = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \xi_i \quad (1-1)$$

根据柯尔莫哥罗夫强大数定理有,

$$P(\lim_{N \rightarrow \infty} \bar{\xi}_N = x) = 1 \quad (1-2)$$

因此,当 N 充分大时, $\bar{\xi}_N \approx E(\xi) = x$ 成立的概率等于 1,亦即可以用 $\bar{\xi}_N$ 作为所求量 x 的估计量。

对于末敏弹毁伤概率这一实际问题, x 分别为捕获概率、命中概率、 M 级毁伤概率、 F 级毁伤概率、 K 级毁伤概率。

(1-2) 式中 N 为样本的大小,到底多大合适呢? 现在我们来回答这一问题,设随机变量 X 为变量,对 X 进行 N 次独立试验,得到试验结果为 $X_1, \dots, X_N$,则统计量

$$T = \frac{(\bar{X} - a) \sqrt{N}}{\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}} \quad (1-3)$$

为自由度等于 $N-1$ 的 t 变量。它的分布为

$$S_{N-1}(t) = \sqrt{(N-1)\pi} \frac{r\left(\frac{N}{2}\right)}{r\left(\frac{N-1}{2}\right)} \left(1 + \frac{t^2}{N-1}\right)^{-\frac{N}{2}} \quad (1-4)$$

其中, $\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i$, $\Gamma(p)$ 为 Γ 函数。

在给定误差界 ϵ 与置信水平 $1-\alpha$ 情况下来决定样本 N 大小,

$$P(|T| < t_{\frac{\alpha}{2}}) = 1 - \alpha \quad (1-5)$$

$$P\left[\left|\frac{(\bar{X} - \alpha)\sqrt{N}}{\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}}\right| < t_{\frac{\alpha}{2}}\right] = 1 - \alpha \quad (1-6)$$

$$P\left[|\bar{X} - \alpha| < \frac{t_{\frac{\alpha}{2}}}{\sqrt{N}} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}\right] = 1 - \alpha \quad (1-7)$$

于是误差 ϵ 为

$$\epsilon = \frac{t_{\frac{\alpha}{2}}}{\sqrt{N}} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \quad (1-8)$$

根据 α 可查 t 分布的界限表得 $t_{\frac{\alpha}{2}}$, 再根据其值和 (1-8) 可确定 N 。

运用蒙特卡罗法的基础是使用随机数, 随机数可以由与计算机分开的设备产生(如用物理随机发生器产生), 也可以由计算机内确定的计算程序产生。由于计算机生成的随机数是根据确定的逆推公式求得的, 存在着周期现象, 初值确定后所有的随机数便被唯一确定了下来, 不满足真正的随机数的要求, 所以称这种方法产生的随机数为伪随机数。由于这些伪随机数能够充分显示统计意义的随机特性, 所以在实际应用中, 只要这些伪随机数序列通过必要的统计检验, 就可以把它作为“真正”的随机数使用。现在, 许多数字计算机上均把 $[0, 1]$ 区间上均匀分布随机数作为一种标准函数给出。由 $[0, 1]$ 区间上均匀分布随机数可用下列方法产生标准正态分布 $N(0, 1)$ 的随机数 y 。抽取 $[0, 1]$ 区间上均匀分布随机数 x_1, x_2 , 令

$$\begin{cases} y_1 = (-2 \ln x_1)^{\frac{1}{2}} \cos 2\pi x_2 \\ y_2 = (-2 \ln x_1)^{\frac{1}{2}} \sin 2\pi x_2 \end{cases} \quad (1-9)$$

则 y_1, y_2 是相互独立的正态分布 $N(0, 1)$ 随机数。事实上, x_1, x_2 随机变量的联合密度函数是

$$f(x_1, x_2) = \begin{cases} 1 & x_1 \in (0, 1), x_2 \in (0, 1) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (1-10)$$

从 (1-9) 可解出

$$\begin{cases} x_1 = \exp\left(-\frac{y_1^2 + y_2^2}{2}\right) \\ x_2 = \frac{1}{2\pi} \tan\left(\frac{y_2}{y_1}\right) \end{cases} \quad (1-11)$$

$$\frac{\partial x_1}{\partial y_1} = -e^{\frac{1}{2}(y_1^2 + y_2^2)} y_1$$

$$\frac{\partial x_1}{\partial y_2} = -e^{\frac{1}{2}(y_1^2 + y_2^2)} y_2$$

$$\frac{\partial x_2}{\partial y_1} = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{1 + \left(\frac{y_2}{y_1}\right)^2} \left(-\frac{y_2}{y_1^2}\right)$$

$$\frac{\partial x_2}{\partial y_2} = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{1 + \left(\frac{y_2}{y_1}\right)^2} \frac{1}{y_1}$$

变换的雅可比行列式为

$$\frac{\partial(x_1, x_2)}{\partial(y_1, y_2)} = \begin{vmatrix} -y_1 e^{-\frac{y_1^2 + y_2^2}{2}} & -y_2 e^{-\frac{y_1^2 + y_2^2}{2}} \\ -\frac{1}{2\pi} \frac{y_2}{1 + \left(\frac{y_2}{y_1}\right)^2} & -\frac{1}{2\pi} \frac{1}{1 + \left(\frac{y_2}{y_1}\right)^2} \frac{1}{y_1} \end{vmatrix} = -\left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{y_1^2}{2}}\right) \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{y_2^2}{2}}\right)$$

由于 x_1, x_2 是相互独立的并在 $N(0, 1)$ 均匀分布, 所以随机变量 y_1, y_2 的联合分布密度函数是

$$f(y_1, y_2) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{y_1^2}{2}}\right) \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{y_2^2}{2}}\right) \quad (1-12)$$

由式(1-12)可以看出, y_1, y_2 是相互独立的 $N(0, 1)$ 分布的随机变量, 即根据(1-9)可求出正态分布 $N(0, 1)$ 的随机数, 有了正态分布 $N(0, 1)$ 的随机数后再利用线性变换

$$Z = \mu\sigma y \quad (1-13)$$

将正态分布 $N(0, 1)$ 的随机数变换为正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$ 的随机数。

用蒙特卡罗法进行末敏弹系统仿真的实质就是: 根据建立的概率模型, 用计算机产生相应的伪随机数, 得到每一次模拟中的末敏弹运动各阶段随机干扰量的值, 将这些值代入运动模型中, 从而确定该次模拟的末敏弹运动规律, 然后通过传感器信号处理模型确定该次模拟末敏弹探测、识别、定位目标, 进而确定战斗部是否命中、毁伤目标。

我们建立的末敏弹系统仿真模型应该包括三方面内容: 第一, 反映末敏弹母弹飞行段、减速减旋段和稳态扫描段运动规律的运动模型; 第二, 反映传感器探测、识别、定位目标过程的信号处理模型; 第三, 反映末敏弹各个运动阶段随机干扰量及其概率分布特征的概率模型。需要说明的是: 基于目前尚不能准确描述末敏弹稳态扫描运动规律和传感器信号处理模型, 因此在我们建立的模型中, 对这两部分采用了适合目前系统参数分析需要的简化方法。如对稳态扫描运动, 仅用落速、转速和扫描角三个参数描述, 而抛开了尚不能准确描述的运动模型; 对传感器模型, 采用“黑箱法”处理, 这种处理法能够较准确地反映传感器的基本性能参数, 而抛开了尚不能准确描述的传感器信号处理模型。还需要说明的是: 对某些系统参数的分析, 为了简化算法, 对模型的某些地方有意做了简化。如对母弹飞行段运动模型采用概率模型加以代替。

下面就末敏弹各个运动阶段分别讨论其仿真模型。

1.1.4 末敏弹系统数学模型

1.1.4.1 末敏弹母弹飞行段数学模型

1.1.4.1.1 坐标系建立

我们采用地面坐标系描述末敏弹母弹运动规律。地面坐标系的定义如下:

以炮口中心为原点的右手直角坐标系,水平轴 ox 为射击面与炮口水平面的交线,沿射向为正;铅直轴 oy 在射击面内并与水平轴 ox 相垂直, oz 轴垂直于射击面,按右手法则决定其正向。

1.1.4.1.2 末敏弹母弹弹道

末敏弹母弹弹道指从母弹出炮口到母弹开舱点这一段弹道,开舱点是由母弹上时间引信控制的。弹道是典型的榴弹弹道,采用三自由度质心运动方程可描述该段标准弹道。从而确定我们所需要的开舱点诸元($x, y, z, v, \omega, \theta$)。

1.1.4.1.3 影响母弹开舱点诸元散布的因素

母弹开舱点散布主要包括距离散布、方向散布和高度散布,三者相互独立并且服从正态分布规律,下面具体讨论引起散布的因素:

(1) 起始条件引起的距离散布

我们知道质点弹道中,任何时刻的弹道诸元 v, θ, x, y 仅与起始条件有关,即:

$$v = v(c, v_0, \theta_0, t)$$

$$\theta = \theta(c, v_0, \theta_0, t)$$

$$y = y(c, v_0, \theta_0, t)$$

$$x = x(c, v_0, \theta_0, t)$$

起始条件 c, v_0, θ_0 三个参数因每发末敏弹的不同而有微小差别,它们都是随机变化的量,由于 c, v_0, θ_0 的散布必然会引起母弹距离上的散布。外弹道理论上假设 c, v_0, θ_0 的散布服从正态分布规律,并且彼此相互独立,因此,由起始条件的散布就能确定母弹的距离散布。设: $E_c, E_{v_0}, E_{\theta_0}$ 为 c, v_0, θ_0 的中间偏差;

c', v'_0, θ'_0 为 c, v_0, θ_0 的期望值;

$\sigma_c, \sigma_{v_0}, \sigma_{\theta_0}$ 为 c, v_0, θ_0 的均方差,其中, $\sigma_c = E_c / 0.6745, \sigma_{v_0} = E_{v_0} / 0.6745, \sigma_{\theta_0} = E_{\theta_0} / 0.6745$ 。

则, c, v_0, θ_0 服从如下分布:

$$c \sim N(c', \sigma_c)$$

$$v_0 \sim N(v'_0, \sigma_{v_0})$$

$$\theta_0 \sim N(\theta'_0, \sigma_{\theta_0})$$

对每一次计算机模拟, c, v_0, θ_0 可表示为:

$$c = c' + \sigma_c \xi_c$$

$$v_0 = v'_0 + \sigma_{v_0} \xi_{v_0}$$

$$\theta_0 = \theta'_0 + \sigma_{\theta_0} \delta_{\theta_0}$$

式中, $\xi_c, \xi_{v_0}, \xi_{\theta_0}$ 为标准正态分布 $N(0, 1)$ 产生的伪随机数。

根据外弹道误差理论和末敏弹母弹战术技术指标,我们可以得到 c, v, θ_0 的中间偏差 E_c, E_v, E_{θ_0} 的值。

由外弹道误差理论知道,在标准条件下:

$$E_x = (Q_c^2 E_c^2 + Q_{v_0}^2 E_{v_0}^2 + Q_{\theta_0}^2 E_{\theta_0}^2)^{\frac{1}{2}}$$

式中, $Q_c, E_c, Q_{v_0}, Q_{\theta_0}, E_{\theta_0}$ 都有一定的经验值可参考。如末敏弹母弹战术技术指标要求 $E_x / X \leq 1/250$, 我们取下面一组值:

$$Q_c = 85.5 \quad E_c = 2.75 \times 10^{-3}$$

$$Q_{v_0} = 28.5 \quad E_{v_0} = 2$$

$$Q_{\theta_0} = 0.275 \quad E_{\theta_0} \text{ 在 } 1 \text{ 以下}$$

这时 $E_x/X < 1/250$ 满足战术技术指标要求。对于加农榴弹炮在射角 45° 射击时, E_{θ_0} 对 E_x 的影响很微小, 故可将 θ_0 视为常数, 即 $\theta_0 = 45^\circ$, E_x 主要由 E_{v_0} 和 E_c 二者影响, 因此起始条件中影响距离散布的量是弹道系数 c 和初速 v_0 , 它们的中间偏差取 $E_c = 2.75 \times 10^{-3}$, $E_{v_0} = 2$ 。

(2) 时间引信引起的开舱点距离散布

我们计算末敏弹母弹弹道的目的是, 要获得母弹开舱点诸元, 末敏弹母弹开舱抛出子弹这一工作过程是由时间引信控制的, 因此, 开舱时间的误差也会引起母弹开舱点的距离散布。

末敏弹母弹上的时间引信为电子时间引信, 电子时间引信的最大误差范围为 ± 0.1 s, 其误差分布假设服从正态分布规律。

设 t_k 为末敏弹母弹开舱时间, $t_{\max}$ 为时间引信的最大误差, E_{t_k} 、 σ_{t_k} 为时间引信 t_k 的中间偏差和均方差, t'_k 为 t_k 的装定值, 则:

$$\sigma_{t_k} = t_{\max}/3 = 0.1/3 \approx 0.033 \text{ s}$$

$$E_{t_k} = 0.6745\sigma_{t_k}$$

因此, t_k 服从如下分布:

$$t_k \sim N(t'_k, \sigma_{t_k})$$

对每一次计算机模拟 t_k 可表示为:

$$t_k = t'_k + \sigma_{t_k}\xi_{t_k}$$

式中, ξ_{t_k} 为标准正态分布 $N(0, 1)$ 产生的伪随机数。

(3) 方向散布

末敏弹战术技术指标要求: 方向散布小于 1.852 km。因为方向散布服从正态分布规律, 则 E_x 、 σ_x 为方向散布的中间偏差和均方差。

对于 152 mm 末敏弹母弹, 45° 射角的射程 $X = 16000$ 时:

$$E_x = 16 \text{ m} \quad \sigma_x = E_x/0.6745$$

因此, 对每一次计算机模拟, 开舱点 z_k 可表示为:

$$z_k = \sigma_x \xi_z$$

式中, ξ_z 为标准正态分布 $N(0, 1)$ 产生的伪随机数。

考虑上面引起母弹开舱点距离散布和方向散布的因素, 通过计算机模拟出每一发末敏弹母弹开舱点诸元: x_k 、 y_k 、 z_k 、 v_k 、 θ_k , 这些弹道诸元将作为末敏弹下一工作阶段计算的起始条件。

1.1.4.2 末敏子弹减速减旋段数学模型

1.1.4.2.1 坐标系的建立

采用地面坐标系研究末敏子弹运动规律。

1.1.4.2.2 减速减旋段弹道

减速减旋段指子弹从母弹抛出到末敏子弹二次抛筒开伞这一段过程。每发末敏弹母弹内装两枚末敏子弹, 因而减速减旋段就对应应有两条子弹弹道。该段弹道以母弹开舱点诸元作为起始条件, 把起始条件代入运动方程中可得出该段弹道的任一时刻的弹道诸元。下面给出对两枚子弹减速减旋段标准弹道的计算结果, 起始条件为末敏弹母弹标准弹道的开舱

点诸元。

为使两枚末敏子弹在稳态扫描时有一定的分离距离,可以采用使两枚子弹减速伞面积不同的方法,也可以采用使两枚子弹减速伞释放时间不同的方法。下面仅对第一种方法做了简单计算。

起始条件(即开舱点诸元):

$$t_k = 62.2 \text{ s}, x_k = 16224.3 \text{ m}, y_k = 800 \text{ m}, \theta_k = -0.9613688 \text{ rad}, v_k = 321.3 \text{ m/s}$$

两枚子弹伞面积:

$$\text{大伞: } S_1 = 0.22 \text{ m}^2$$

$$\text{小伞: } S_2 = 0.12 \text{ m}^2$$

计算结果:

$$\text{大伞: } x_1 = 172.36 \quad z_1 = 7.24 \times 10^{-2}$$

$$\text{小伞: } x_2 = 225.69 \quad z_2 = 3.54 \times 10^{-2}$$

两枚子弹拉开距离: $d_x = 225 - 172 = 52 \text{ m}$

若两枚子弹伞面积变为:

$$\text{大伞: } S_1 = 0.3 \text{ m}^2$$

$$\text{小伞: } S_2 = 0.1 \text{ m}^2$$

计算结果:

$$\text{大伞: } x_1 = 230 \text{ m}$$

$$\text{小伞: } x_2 = 141 \text{ m}$$

两枚子弹拉开距离: $d_x = x_1 - x_2 = 89 \text{ m}$ 。

1.1.4.2.3 引起减速减旋段子弹散布的因素

(1) 开舱抛撒过程引起的散布

末敏弹母弹在飞行中,时间引信作用,点燃抛射药,两枚末敏子弹以一定的速度被后抛出来这一过程叫做抛撒过程。

设: V_p 为子弹后抛速度; V_k 为母弹在开舱点的绝对速度; V_s 为子弹被抛出时的绝对速度。

则:

$$V_s = V_k - V_p$$

一般地, V_p 由于各发弹存在的制造误差,抛射药的装药量、药温、药性、装药条件等因素的差异,是一个随机变化的量,假设其服从正态分布规律, E_{v_p} 为 V_p 的中间偏差, σ_{v_p} 为 V_p 的均方差, $V_{p'}$ 为 V_p 的期望值,则 V_p 服从如下分布: $V_p \sim N(V_{p'}, \sigma_{v_p})$ 。

对每一次计算机模拟, V_p 可表示为:

$$V_p = V_{p'} + \sigma_{v_p} \xi_{v_p}$$

式中, ξ_{v_p} 是由标准正态分布 $N(0,1)$ 产生的伪随机数。

(2) 控制减速减旋段结束的时间误差引起的散布

减速减旋段的结束条件是由装在末敏子弹上的弹载计算机给出时间信号控制的。具体工作过程为:事先在弹载计算机内装定时间 $T_{装定}$,当母弹开舱抛撒后,激活热电池,热电池从激活到能正常稳定工作需要一个反应时间 $T_{反应}$,经过 $T_{反应}$ 时间后,弹载计算机上电复位工作,开始产生时间计数,当达到时间 $T_{装定}$ 时,弹载计算机发出信号,控制子弹上抛射机构

抛掉伞舱(即抛掉减速减旋伞,张开稳态扫描主伞)。

由以上工作过程可以看出,减速减旋段工作时间 t 可表示为:

$$t_{\text{减}} = T_{\text{反应}} + T_{\text{装定}}$$

一般地,受热电池微小特性差异和装定差异的影响,对每发弹的 $T_{\text{反应}}$ 和 $T_{\text{装定}}$ 都是一个小区内随机变化的量,其分布服从正态分布规律且相互独立。因此, $t_{\text{减}}$ 是一个随机量,其分布服从正态分布规律,设 $t_{\text{减}}'$ 为 $t_{\text{减}}$ 的期望值, $\sigma_{t_{\text{减}}}$ 为 $t_{\text{减}}$ 的均方差,则 $t_{\text{减}}$ 服从如下分布:

$$t_{\text{减}} \sim N(t_{\text{减}}', \sigma_{t_{\text{减}}})$$

对每一次计算机模拟, $t_{\text{减}}$ 可表示为:

$$t_{\text{减}} = t_{\text{减}}' + \sigma_{t_{\text{减}}} \xi_{t_{\text{减}}}$$

式中, $\xi_{t_{\text{减}}}$ 是由标准正态分布 $N(0, 1)$ 产生的伪随机数。

(3) 随机风引起的减速减旋段子弹的散布

随机风是影响减速减旋段子弹散布的重要因素。由于减速减旋段子弹的运动时间较短,只有 5~7 s。因此对具体的一发末敏子弹可认为在减速减旋段仅受一恒定风的影响,而对蒙特卡罗法模拟的各发子弹之间是受随机风的影响。将每发弹的恒风分解为纵风和横风,代入运动方程直接求解,就能得出恒风引起的散布。

(4) 子弹结构差异引起的散布

我们知道,子弹弹形、弹重、伞形状、伞面积、翼片加工情况都影响减速减旋段弹道,这些因素对弹道的影响有的比较大,有的比较小。受制造方法和加工精度的影响,这些因素会产生误差,使减速减旋段弹道偏离标准弹道。关于这些因素的分布规律和中间偏差目前没有进行分析研究,因此在具体计算中没考虑这些因素引起的散布,留待以后解决。

考虑上述随机因素,用减速减旋段弹道方程可模拟出该段每一枚子弹的运动。

1.1.4.3 末敏弹稳态扫描段数学模型

稳态扫描段指从末敏子弹张开主伞到末敏弹作用流程结束,即末敏子弹命中目标或落地这一过程。包括:主伞拉直充气过程,稳态扫描过渡过程,稳态扫描过程三个阶段。对前两个过程:主伞拉直充气和稳态扫描过渡过程的求解主要是得到末敏子弹起始扫描中心的 x 坐标和 z 坐标,这两个坐标值就是求解下一个过程的起始条件。因为前两个过程作用时间很短,所以在不考虑风的情况下,子弹在前两个过程中的 x 和 z 变化很小,在考虑恒风的情况下,子弹的 x 和 z 可由弹道方程直接解出。最后一个过程运动较复杂,也是末敏子弹探测、识别、命中目标的实质过程,因此我们主要讨论末敏子弹稳态扫描过程。

该过程中子弹以稳定的落速、转速和扫描角运动。同时,弹上的敏感器工作,随子弹的运动进行捕获、探测、识别、定位目标的工作,一旦敏感器捕获识别目标,就发出信号起爆 EFP 战斗部,形成爆炸成形弹丸飞向目标。

1.1.4.3.1 坐标系

为便于讨论,我们建立如下几个坐标系:基准坐标系 $o-xz$;以末敏弹理想瞄准点为原点,水平轴 ox 轴沿射向方向为正, oz 轴在水平面内垂直于 ox 轴,建立直角坐标系 $o-xz$ 。

直角坐标系 $o'-x'z'$:将基准坐标系原点移至末敏子弹起始扫描中心在 xz 平面上投影点 o' 点,坐标轴方向不变而得到的坐标系 $o'-x'z'$ 。

直角坐标系 $o''-x''z''$:末敏子弹起始扫描点与 o' 点的连线与 $o'x'$ 轴的夹角叫起始扫描角。坐标系 $o'-x'z'$ 绕 o' 点逆时针旋转一个起始扫描角,就构成 $o''-x''z''$ 坐标系。

极坐标系 $o''r$: 以 $o''x''$ 轴为极轴, o'' 点为极点建立极坐标系。

各坐标系关系如图 1.5。

图中各点含义为:

o 为理想瞄准点;

o' 为子弹起始扫描中心在 xz 平面上的投影点;

A 为起始扫描点;

α 为起始扫描角。

各坐标系间有如下关系:

图 1.5 坐标系关系

设平面内任一点 B , 在各坐标系下的坐标为: (x, z) 、 (x', z') 、 (x'', z'') 、 (θ, γ) , 子弹起始扫描中心 o' 在 $o-xz$ 中坐标 (a, b) , 则坐标关系为:

$$\begin{aligned} x &= a + x' \\ z &= b + z' \end{aligned} \quad (1-14)$$

$$\begin{aligned} x' &= x'' \cos \alpha - z'' \sin \alpha \\ z' &= x'' \sin \alpha + z'' \cos \alpha \end{aligned} \quad (1-15)$$

$$\begin{aligned} x'' &= \gamma \cos \theta \\ z'' &= \gamma \sin \theta \end{aligned} \quad (1-16)$$

1.1.4.3.2 末敏子弹扫描点轨迹方程的描述

当末敏子弹进入稳态扫描后, 子弹以稳定的落速、转速和扫描角运动, 敏感轴与水平面的交点(即扫描点)的轨迹可参考图 1.6 分析。

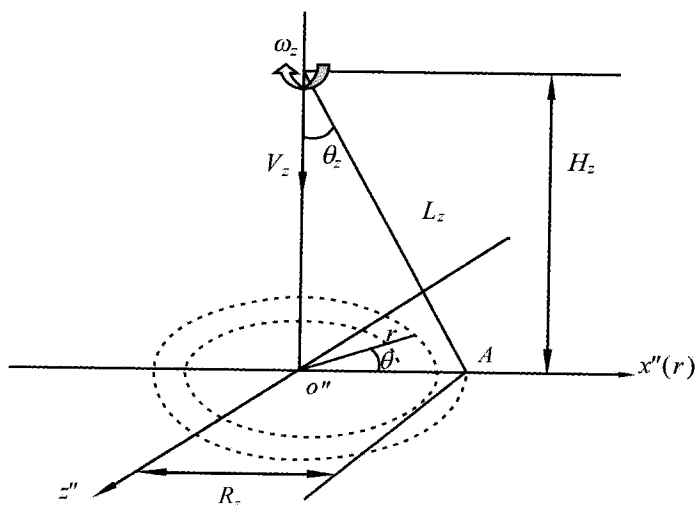


图 1.6 敏感轴与水平面的交点轨迹

图中各符号说明:

V_z 为子弹匀速下落速度;

ω_z 为子弹绕铅直轴匀速旋转的转速;

θ_z 为子弹弹轴与铅直轴的夹角(即扫描角);

o'' 为起始扫描中心在水平面上的投影;