



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

现代引信技术丛书

Precise detonation Control in Integration Encounter of Attitude and Trajectory

弹目姿轨复合交会 精准起爆控制

杨喆 吴炎烜 范宁军 ◎ 编著

- 弹目姿态轨迹复合交会
- 制导与引信一体化应用
- 弹体姿态修正起爆控制
- 定向毁伤元的精准命中



国防工业出版社
National Defense Industry Press

弹目姿轨复合交会 精准起爆控制

杨 喆 吴炎烜 范宁军 编著

国防工业出版社

• 北京 •

内 容 简 介

本书以弹目姿态与轨迹复合交会下的毁伤元精准命中控制研究为基础,主要介绍了毁伤元定向飞散战斗部、弹药和目标运动模型、弹目交会信息获取、弹目轨迹交会引战配合方法、弹目姿轨复合交会引战配合方法、引战配合仿真等内容,并以防空导弹定向战斗部、巡飞弹多模式 EFP 战斗部的精准起爆控制为例,对起爆控制进行了深入说明。

本书适合相关领域的研究人员和工程技术人员阅读,也可作为高等学校相关专业的教学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

弹目姿轨复合交会精准起爆控制/杨喆,吴炎烜,范宁军编著.

—北京:国防工业出版社,2016.3

(现代引信技术丛书)

ISBN 978-7-118-10912-2

I. ①弹… II. ①杨… ②吴… ③范… III. ①武器引信—研究 IV. ①TJ43

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 105933 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公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 14¼ 字数 290 千字

2016 年 3 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 79.00 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

《现代引信技术丛书》

编委会

名誉主任 马宝华

执行主任 范宁军 娄文忠

编委会委员 (按姓氏拼音排序)

陈慧敏 邓宏彬 冯 跃 何光林 李世中

李晓峰 牛兰杰 申 强 宋荣昌 隋 丽

王军波 吴炎烜 熊永家 杨 喆 张 亚

丛书策划 王京涛

秘 书 吴炎烜 冯 晨

审委会

主 任 朵英贤

副 主 任 黄 峥 秦光泉 谭惠民 游 宁

审委会委员 (按姓氏拼音排序)

蔡瑞娇 陈科山 崔占忠 冯顺山 傅调平

高春清 韩子鹏 胡景林 李长福 李世义

刘明杰 刘小虎 牛少华 齐杏林 施坤林

石 坚 石庚辰 宋道志 徐立文 徐立新

伊福廷 袁 正 张菁华 邹金龙

引信是利用目标、环境或指令信息，在预定的条件下解除保险，并在有利的时机或位置上起爆或引燃弹药战斗部装药的控制系统（或装置）。弹药是武器系统的核心部分，是完成既定战斗任务的最终手段。引信作为弹药战斗部对目标产生毁伤作用或终点效应的控制系统（或装置），始终处于武器弹药战场终端对抗的最前沿。大量实战案例表明：性能完善、质量可靠的引信能保证弹药战斗部对目标实施有效毁伤，发挥武器弹药作战效能“倍增器”的作用；性能不完善的引信则会导致弹药在勤务处理时、发射过程中或发射平台附近过早炸，遇到目标时发生早炸、迟炸或瞎火，不仅贻误战机，还可能对己方和友邻造成严重危害。

从严格的学科分类意义上讲，“引信技术”并不是一个具有相对独立的知识体系的学科或专业，而是一个跨学科、专业的工程应用综合技术领域。因此，现代引信及其系统是一类涉及多学科、专业知识的军事工程科技产品。纵观历史，为了获取战争对抗中的优势，人们总是将自己的智慧和最新科技成果优先应用于武器装备的研制和发展。引信也不例外，现代引信技术的发展一方面受到武器弹药战场对抗的需求牵引，另一方面受到当代科学技术进步的发展推动。

近30年来，随着人类社会进入以信息科技为主要特征的知识经济时代，作战方式发生了深刻的变化，目标环境也日趋复杂。为适应现代及未来作战需求，高新技术武器装备得到快速发展，弹药战斗部新原理、新技术层出不穷，促使现代引信技术在进一步提高使用安全性和作用可靠性的同时，朝着多功能、多选择，以及引爆-制导一体化、微小型化、灵巧化、智能化和网络化的方向快速发展。

“现代引信技术丛书”共12册，较系统和客观地反映了近30年来现代引信技术部分领域的理论研究和技術发展的现状、水平及趋势。丛书包括：《激光引信技术》《中小型智能弹药舵机系统设计与应用技术》《引信安全系统分析与设计》《引信环境及其应用》《引信可靠性技术》《高动态微系统与MEMS引信技术》《现代引信装配工程》《引信弹道修正技术》《高价值弹药引信小子样可靠性评估与验收》《弹目姿轨复合交会精准起爆控制》《侵彻弹药引信技

术》《引信 MEMS 微弹性元件设计基础》。

这套丛书是以北京理工大学教师为主，联合中北大学及相关科研单位的教师 and 研究人员集体撰写的。这套丛书的特色可以概括为：内容厚今薄古；取材内外兼收；突出设计思想；强调普适方法；注重科技创新；适应发展需求。这套丛书已列为 2015 年度国家出版基金项目，既可作为从事兵器科学与技术，特别是从事弹药工程和引信技术的科技工程专业技术人员和管理人员的使用工具，也可作为高等学校相关学科专业师生的教学参考。

这套丛书的出版，对进一步推动我国现代引信技术的发展，进而促进武器弹药技术的进步具有重要意义。值此丛书付梓之际，衷心祝贺“现代引信技术丛书”的出版面世。



2016 年 1 月

科学技术的发展和战争模式的转变,对弹药技术在“打得远、打得准、打得狠”的基础上提出了“打得巧”的更高要求。具有毁伤元小锥角定向飞散特性的战斗部,因具有能量利用率高、附带毁伤小等优点,在灵巧弹药等精确制导武器中的应用前景日益广泛,这也对战斗部的精确起爆控制提出了更高的要求。

引信与战斗部系统是弹药系统的有效载荷,直接担负着毁伤目标重任。弹目相对运动轨迹为基础的引战配合,以起爆适时性为核心,主要适用于毁伤元具有较大分散角度的战斗部。然而,毁伤元具有定向飞散特性的战斗部,命中精度将受到起爆时刻弹目交会轨迹和弹体姿态的共同影响,如何将战斗部毁伤元准确投射到目标的易损部位,是弹药引信技术发展面临的新问题。

面对这样一类问题,北京理工大学引信动态特性国防科技重点实验室开展了姿态与轨迹复合交会下的毁伤元精准命中控制研究。本书是在总结近来研究工作的基础上撰写而成。全书内容安排如下:

第1章介绍了制导弹药系统的组成,并重点介绍了引战系统的基本知识。第2章从选取定向战斗部、聚能破甲战斗部和电磁脉冲战斗部等,对毁伤元具有定向飞散特性的战斗部进行了介绍。第3章以弹体六自由度运动模型为重点,介绍了弹药和目标运动模型。第4章分别从引信和制导系统的角度,介绍了弹上所能获取的弹目交会信息。第5章在仅考虑弹目交会轨迹的条件下,介绍了起爆时间的计算方法。第6章从制导控制与引战系统的协调性分析的角度,介绍了姿轨复合交会条件下的起爆控制方法,并建立了相应的数学模型。第7章介绍了引战配合的计算机仿真和半实物仿真。第8章和第9章分别以配有定向战斗部的防定导弹和配有多模爆炸成型侵彻(EFP)战斗部的巡飞弹为例,对起爆控制进行了进一步说明。

本书在编写过程中得到了北京理工大学引信动态特性国防科技重点实验室各位老师的指导和帮助。陈建斌、韩静茹、曹昊哲、冯玮玮等多位博士和硕士研究生参与了资料收集、整理和排版的工作。

本书在编写过程中吸收借鉴了国内外许多专家学者的研究成果,谨此致以诚挚的谢意!

弹目姿态轨迹复合交会条件下的毁伤元精准命中控制，是新型弹药和先进战斗部技术发展对起爆控制提出的一类新问题，对其认识和研究有待于进一步深入，加之作者经验不足、水平有限，书中缺点和错误在所难免，不当之处恳请读者批评指正。

作者

2015 年 12 月

第1章 绪论	1
1.1 制导弹药系统概述	1
1.2 引战系统概述	7
1.2.1 引战配合的概念	7
1.2.2 引战系统的地位和作用	8
1.3 引战配合的信息过程与效率评价	9
1.3.1 引战配合的信息过程	9
1.3.3 引战配合的性能评价	11
1.4 引战系统的特征参数与研究特点	14
1.4.1 引战系统的特征参数	14
1.4.2 引战配合的研究特点	17
1.5 引战系统的设计流程	17
1.6 制导引信一体化技术	21
1.6.1 制导引信一体化概述	21
1.6.2 制导引信一体化的类型	22
1.6.3 制导引信一体化的新动态	23
第2章 毁伤元定向飞散战斗部	25
2.1 定向战斗部	25
2.1.1 破片战斗部的基本原理	25
2.1.2 定向战斗部概述	26
2.1.3 定向战斗部的结构类型	28
2.1.4 定向战斗部的主要技术问题	36
2.2 聚能破甲战斗部	38
2.2.1 聚能效应	38
2.2.2 聚能射流的形成与破甲过程	41
2.2.3 聚能破甲战斗部的类型	45
2.3 电磁脉冲战斗部	56

第3章 弹药和目标运动模型	59
3.1 坐标系及其转换关系	59
3.1.1 常用的坐标系	59
3.1.2 坐标系的变换关系	62
3.2 弹药所受力和力矩	64
3.2.1 作用在弹体上的力	64
3.2.2 作用在弹体上的力矩	67
3.3 动力学方程	69
3.3.1 质心动力学方程组	69
3.3.2 绕质心转动的动力学方程	71
3.4 运动学方程	72
3.4.1 制导弹药质心运动学方程组	72
3.4.2 绕质心转动的运动学方程	72
3.5 弹体动态特性分析	74
3.5.1 运动方程组	74
3.5.2 运动方程线性化	77
3.5.3 纵向动态特性分析	79
3.5.4 侧向动态特性分析	80
3.5.5 弹体姿态调整时间窗口	81
3.6 弹目相对运动	82
3.6.1 弹目相对交会参数	82
3.6.2 三维弹目追逃模型	83
第4章 弹目交会信息的获取	85
4.1 引信获取弹目交会信息	85
4.1.1 连续波多普勒无线电引信	85
4.1.2 调频无线电引信	89
4.1.3 脉冲无线电引信	92
4.1.4 毫米波近炸引信	93
4.1.5 其他体制引信	94
4.2 导引系统获取弹目交会信息	97
4.2.1 地面雷达测量交会参数	97
4.2.2 导引头测量交会参数	99
第5章 弹目轨迹交会引战配合方法	107
5.1 战斗部的毁伤元区	107

5.2	引信探测场倾角与毁伤元飞散区的匹配关系	110
5.3	最佳起爆延时	114
5.3.1	引信设计计算示例	118
5.3.2	最佳延时计算	120
5.4	一种制导引信一体化数学模型	122
第6章	弹目姿轨复合交会引战配合方法	126
6.1	毁伤元定向飞散战斗部引战配合问题的特殊性	126
6.2	制导控制与引战系统协调性分析	127
6.2.1	导引、飞控与引战系统概述	127
6.2.2	导引、飞控与引战系统按时间序列协调	129
6.2.3	制导引信一体化的协调方式	130
6.2.4	现代引信控制功能的拓展	131
6.2.5	姿轨复合交会的导引、飞控与引战系统协调性设计	132
6.3	弹目交会姿态的数学描述	134
6.3.1	战斗部毁伤轴的数学描述	134
6.3.2	毁伤面与弹目交会姿态误差	135
6.3.3	弹目交会姿态误差在地面坐标系中的表示	136
6.3.4	弹目交会姿态误差在目连相对速度坐标系中的表示	137
6.3.5	毁伤面内起爆时间的求取	138
6.3.6	毁伤元精准命中方程	139
6.4	弹体运动参数对毁伤元命中点的影响分析	142
6.5	引信延迟时间宽容度与最优毁伤目标函数	145
6.6	姿轨复合交会条件下的引信启动区	145
6.7	姿轨复合交会条件下的引战配合效率	146
第7章	引战配合仿真	148
7.1	计算机仿真	148
7.1.1	计算机仿真概述	148
7.1.2	蒙特卡罗法简介	149
7.1.3	随机变量的抽样	151
7.1.4	目标投影面内落入概率	153
7.1.5	单发杀伤概率计算中随机变量的选取	156
7.1.6	单发杀伤概率统计量及统计精度	158
7.2	半实物仿真	160
7.2.1	半实物仿真概述	160

7.2.2	姿轨复合交会半实物仿真实验系统	161
第8章	应用举例一——防空导弹定向战斗部的精准起爆控制	165
8.1	背景概述	165
8.1.1	典型目标分析	165
8.1.2	定向战斗部对起爆控制需求分析	166
8.2	多点可选择起爆控制系统	167
8.3	定向战斗部起爆控制算法	169
8.3.1	目标机动模型	169
8.3.2	目标跟踪滤波器	175
8.4	防空导弹定向战斗部的起爆控制计算机仿真	180
8.4.1	起爆控制计算机仿真流程	180
8.4.2	仿真结果	181
第9章	应用举例二——巡飞弹多模式 EFP 战斗部精准起爆控制	188
9.1	巡飞弹概述	188
9.2	多模式 EFP 战斗部及其起爆控制系统	192
9.3	弹道末段弹体姿态调整	195
9.3.1	弹道末段弹体姿态调整时间窗口	195
9.3.2	弹体姿态自适应控制算法	195
9.3.3	弹体姿态控制仿真	201
9.4	姿轨复合交会毁伤元精准命中的蒙特卡罗仿真	211
参考文献		213

第1章 绪论

世界各国重视以武器装备智能化为标志的军队信息化建设是新军事变革的本质和最基本的特征。作为信息技术革命的产物，精确制导弹药 1972 年在越南战场首次亮相后，即以射程远、精度高、威力大、作战效能高而名声大震。精确制导弹药在战场上的出现，是人类社会开始推进新军事变革的重要标志。近年来的历次局部战争和武装冲突中，精确制导弹药大规模应用于战场，推动了世界新军事变革的快速发展和主要军事强国全面向 21 世纪信息化部队转型的步伐。超视距、高精度的“点穴式”精确打击对于威慑敌军、迅速取得战争胜利发挥了极其重要的作用，并成为主要参战国试验新式作战理念的基础。

当前，制导弹药在实现“打得远、打得准、打得狠”的基础上，正在向“打得巧”的方向迈进。随着新型战斗部技术的发展，传统的建立在弹药与目标相对运动轨迹基础上（不考虑姿态问题）的引战配合与起爆控制，已经难以满足先进制导弹药和新型战斗部毁伤元精准命中的要求。综合考虑弹药与目标交会轨迹和交会姿态条件下的毁伤元精准命中控制，即弹目姿轨复合交会精准起爆控制，是实现制导弹药精准毁伤、高效毁伤、低附带毁伤的重要技术手段。

弹目姿轨复合交会精准起爆控制，以制导引信一体化技术为基础，以引战系统设计为核心，以制导控制系统与引战系统的协调优化为手段，以实现战斗部毁伤元对目标易损部位的精准命中为最终目的。

本章首先以制导系统和引战系统为重点介绍制导弹药的系统组成，进而着重介绍制导弹药引战系统的概念、特点和设计流程，最后简要介绍制导引信一体化技术。

1.1 制导弹药系统概述

制导弹药通常由导引系统、飞行控制系统、引战系统、推进系统、能源

系统、数据链系统和弹体系统七大系统构成，在制导弹药的研制过程中还需要遥测记录系统等。导引系统和飞行控制系统合称制导控制系统，如图 1-1、图 1-2 所示。

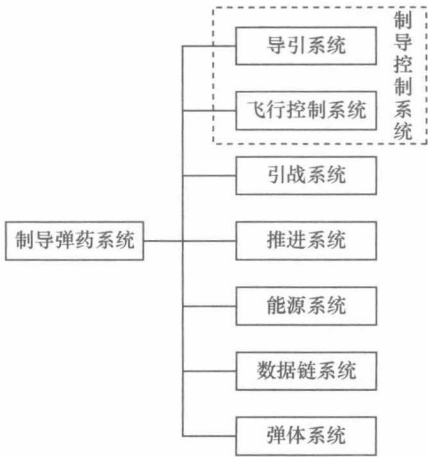


图 1-1 制导弹药系统组成框图

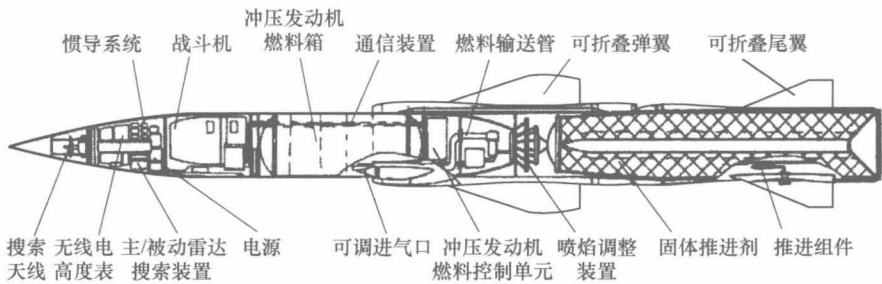


图 1-2 典型制导弹药系统组成示意图

1. 制导控制系统

制导控制系统相当于制导弹药的“大脑”，主要用来测量制导弹药的实际飞行弹道与理想飞行弹道之间的偏差，或测量制导弹药与目标的相对位置及其偏差，形成导引指令，操纵制导弹药改变飞行方向，同时稳定飞行过程中的弹体姿态，使制导弹药按照理想弹道飞行，并最终以最最小脱靶量命中目标。

制导控制系统可分为导引系统和飞行控制系统两个子系统，其组成框图如图 1-3 所示。

制导控制系统的工作过程为：制导弹药发射后，探测装置不断测量制导弹药相对于理想弹道（或目标）的偏差，并将此偏差送给导引指令形成装置。导引指令形成装置对该偏差信号加以变换和计算，形成导引指令，该指令包含改变制导弹药飞行方向和飞行速度的信息。导引指令送到飞行控制系统，经变

换、放大，通过舵机控制器驱动操纵面偏转，改变弹体所受力矩，进而改变弹体姿态。姿态的变化引起弹体所受气动力的变化，从而产生过载，改变弹体飞行方向，使制导弹药保持在理想弹道附近飞行。当弹体受到各种扰动因素的影响，姿态发生改变时，弹体姿态敏感元件检测出姿态的偏差，将其转换为电信号送入弹载计算机，从而驱动操纵面偏转，使弹体恢复到原有姿态，保持弹体在飞行过程中的姿态稳定。

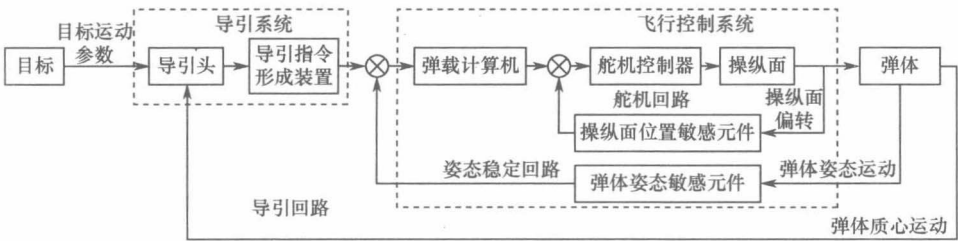


图 1-3 制导弹药制导控制系统组成

1) 导引系统

导引系统相当于制导弹药的“眼睛”，通过探测装置测定制导弹药相对于目标或发射点的位置，按照制导律形成导引指令，将其送至控制系统。根据探测装置的不同，导引系统具有多种体制，其分类如图 1-4 所示。

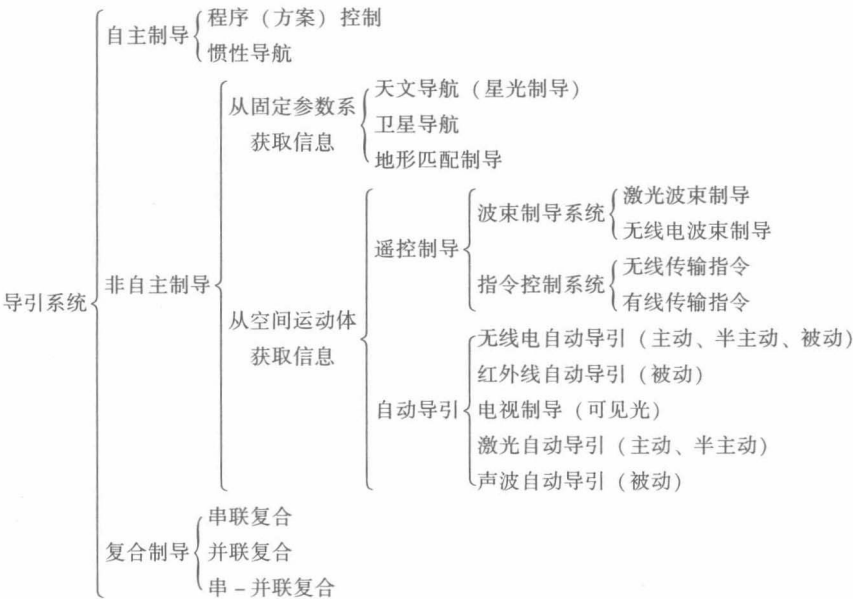


图 1-4 导引系统分类

2) 飞行控制系统

飞行控制系统的作用是控制弹体的飞行姿态，使其快速响应导引系统送来

的导引指令,通过调整弹体姿态产生作用力,改变弹体的飞行方向,使其按照理想的弹道飞行。同时,飞行控制系统还要保持飞行过程中弹体姿态的稳定。

制导弹药的姿态运动具有三个自由度,即俯仰运动、偏航运动和滚转运动,亦称为三个控制通道。飞行控制系统可以相应地分为单通道控制、双通道控制和三通道控制三类。

单通道控制多用于小型制导弹药。通过尾喷管斜置和尾翼斜置使弹体以较大角速度绕纵轴旋转。单通道控制可采用“一”字舵面,在旋转过程中,舵面按照一定的规律交替偏转,其综合效果产生的控制力使制导弹药沿着理想弹道飞行。

双通道控制亦称笛卡儿坐标控制。其基本原理是,将测量得到的弹目相对运动参数在相互垂直的俯仰和偏航方向进行分解,形成两个通道上的控制指令。滚转通道仅由稳定系统对其进行稳定,而不需要进行控制,其稳定方式分为滚转角位置稳定和滚转角速度稳定两类。

三通道控制是对俯仰、偏航和滚转三个通道都进行控制的方式。其工作原理是,测量弹目相对运动参数,分别形成三个通道的控制指令,送给执行机构。采用倾斜转弯(Bank to Turn, BTT)控制方式的制导弹药需要采用三通道控制方式。

2. 引战系统

引战系统即引信与战斗部系统,其功能是当制导弹药飞行至目标附近或碰撞目标后,按照预定要求适时引爆战斗部,从而有效地毁伤目标。从空间三维炸点坐标 (x, y, z) 精确控制的角度分析,制导控制系统是实现脱靶量坐标 (y, z) 的二维控制功能,而引信是实现另一维 (x) 方向上炸点坐标的精确控制功能。因此,引信对战斗部的适时起爆,可形象地称为制导弹药对目标的二次瞄准。

引战系统是制导弹药的运载对象,也是制导弹药的有效载荷,是直接毁伤目标或对目标施加影响、完成作战使命的专用装置,在制导弹药系统研制中具有优先地位。引战系统的设计主要取决于制导弹药所要攻击的目标的特性以及对制导弹药毁伤目标能力的要求。引信系统的安全与解除保险子系统应使制导弹药在勤务操作中、运输过程中以及发射之后一定的安全距离内,确保战斗部不会被引爆。而当制导弹药飞离发射平台一定的距离后,要确保引信能够可靠地接触保险,从而根据引爆信号适时可靠地引爆战斗部。

引战系统的功能框图如图1-5所示。

目前,制导弹药所采用的战斗部主要有以下几种类型:

(1) 爆破战斗部:依靠炸药爆炸后产生的大量高温高压气体形成的爆轰波对目标进行毁伤,主要用于毁伤地面或水面、地下或水下的目标。

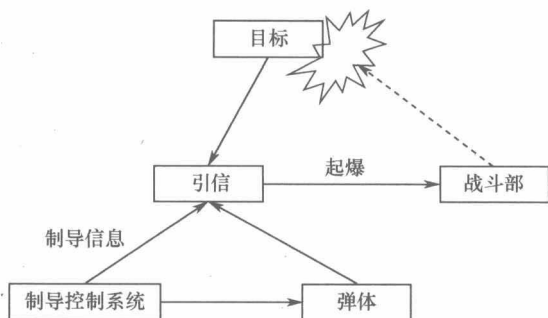


图 1-5 引战系统的功能框图

(2) 杀伤战斗部：又称破片战斗部，利用炸药爆炸后产生的高速飞散的破片群对目标的高速撞击、引燃和引爆作用来毁伤目标，主要用于毁伤空中、地面和水上作战装备及有生力量。

(3) 聚能破甲战斗部：利用空心装药的聚能效应压垮药型罩，形成高速爆炸成型侵彻体，主要用于毁伤装甲目标和混凝土工事等。

(4) 综合效应战斗部：综合集成多种毁伤元或机制（如破甲、破片、侵彻等），在起爆后可以同时生成两种或两种以上的毁伤元，可攻击不同类型的目标。

(5) 多模式战斗部：可根据目标类型而自适应地选择作用模式，形成不同的毁伤元素，实现相应的毁伤效果，从而实现一弹多用。

(6) 子母战斗部：以母弹为载体，内装一定数量的子弹，发射后母弹在预定位置开舱抛射子弹，由子弹完成毁伤目标的任务。

(7) 特种战斗部：包括电磁脉冲战斗部、激光战斗部、X 射线战斗部、化学毒剂战斗部、燃烧战斗部、发烟或发光战斗部等。

制导弹药所采用的引信主要有以下几种类型：

(1) 触感引信：指直接与目标接触，利用相互间的作用力、惯性力和应力波获取目标信息而作用的引信。包括瞬发引信、惯性引信、延期引信等。

(2) 近感引信：指在目标附近时，利用电磁场或其他物理场获取目标信息而作用的引信。包括无线电引信、毫米波引信、红外引信、激光引信等。从测量参数上进行分类，包括定距引信、定角引信（方位角）、定向引信及定线引信（也称定轴引信）。

(3) 环感引信：指利用目标周围环境的某种特殊信息（不是目标引起的）而作用的引信，即传统意义上的周炸引信，包括气压引信、水压引信、行程引信、位置引信（坐标引信）等。

(4) 时间引信：指按预先装定的时间而作用的引信。包括火药时间引信、