

现代引信技术丛书



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

Design of Small Intelligent Ammunition Sheering Gear System

中小型智能弹药舵机系统 设计与应用技术

邓宏彬 王超 赵娜 徐远清 © 编著

- 以中小型智能弹药为应用背景
- 智能弹药与引信舵机工作原理
- 系统阐述电动舵机设计与控制
- 电动舵机建模仿真算法与试验



国防工业出版社
National Defense Industry Press

中小型智能弹药舵机 系统设计与应用技术

邓宏彬 王超 赵娜 徐远清 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书以中小型智能弹药或弹道修正引信中使用的舵机系统为基础,以电动舵机的系统总体设计、结构设计、控制器设计、算法设计等为主要内容。在总体设计方面,介绍舵机系统的设计思想、设计原则、总体布局设计方法、结构设计方法、可靠性及安全性设计方法等;在结构设计方面,介绍机械设计的基本思路、机构的工作原理、常用电动机的基本原理与选型、电气系统走线及布局、火工品的使用等;在控制器设计方面,介绍闭环控制系统的总体设计、电源管理、常用传感器的基本原理与选型、典型驱动电路设计、典型控制接口电路的设计、弹载数据记录使用方法等;在算法设计方面,介绍经典比例-积分-微分(PID)算法、自适应PID控制算法、模糊自适应PID控制算法、神经网络控制算法、滑模控制算法等。

中小型智能弹药电动舵机系统设计与应用技术涉及机械工程、电气工程、计算机应用技术、传感技术等多个学科,本书既可供灵巧弹药、近炸引信、引信对抗等领域的工程技术人员参考,也可作为高等学校探测制导与控制技术、机电系统工程、引信技术、武器系统工程等专业本科生和研究生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

中小型智能弹药舵机系统设计与应用技术/邓宏彬等编著. —北京:国防工业出版社, 2016.4

(现代引信技术丛书)

ISBN 978-7-118-10851-4

I. ①中… II. ①邓… III. ①弹药—智能引信—系统设计
IV. ①TJ43

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第117063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 22 字数 446千字

2016年4月第1版第1次印刷 印数 1—2000册 定价 119.00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和研究集体撰写的。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

近年来，智能弹药或灵巧弹药得到了迅速发展。其原因是：一方面科技的巨大进步给智能弹药的发展提供了强有力的支持；另一方面现代军事的变革给常规弹药提出了新的要求，促使其向更加精确的智能弹药方向发展。20世纪末和21世纪初，美国在科索沃战争、伊拉克战争、利比亚战争中，没有见到大兵团作战和“弹雨”式的狂轰乱炸场面，取而代之的是利用空中优势，进行精确打击和定点清除。因此，现代战争对精确制导弹药、具有弹道修正能力的智能弹药、自主攻击的智能弹药等现代弹药的发展提出了全新要求。舵机系统是制导子弹药、弹道修正引信和修正弹药、自主攻击弹药等现代智能弹药中制导与控制系统的重要组成部分，也是智能弹药制导与控制系统的执行机构，其性能的好坏直接影响智能弹药飞行过程的动态品质。因此，根据智能弹药的发展趋势，全面系统地介绍舵机系统设计与控制技术是本书的一大特色。

近20年来，国际热点地区的局部战争实践表明，精确打击、远程打击、超机动打击、自主攻击、智能毁伤等已成为未来智能弹药发展的必然趋势。随着时代的发展和技术的进步，许多传统上仅在高价值鱼雷和导弹上使用的技术、方法及设计手段也逐步在常规弹药中得到应用与推广。由于常规弹药在战术应用、发射环境（发射过载高、初速高、转速高等）、后勤保障、毁伤模式等方面与传统战略战术导弹和鱼雷均存在极大的差异，因此也给智能弹药及智能子弹药的发展提供了广阔的发展空间。与传统导弹和鱼雷一样，智能弹药也具有信息感知与处理、探测和识别目标、精确执行某种动作与任务等功能，但智能弹药不是传统导弹的复制和小型化，而是导弹技术在更小空间、更恶劣环境、更低成本、更高要求下的延伸和发展。

以舵机系统为例，舵机系统按照所使用的能源通常可以分为液压舵机、气动舵机、电动舵机等。舵机是几乎所有导弹都不可缺少的重要组成部分，传统导弹大多采用大力矩、高可靠性的电液舵机或推力矢量舵机，但这种舵机在高过载、高频率响应、高旋转、小体积、低成本的智能弹药中并不一定适用。传统导弹舵机往往结构复杂、加工精度高、质量大、成本高、技术难度大，随着微电子技术和兵器科学技术的发展，具有更强机动变轨能力和更强目标识别能力的先进精确制导武器对舵机的控制精度、频率响应、力矩、体积、质量、成本等指标的要求越来越高，促使舵机朝着体积、质量不断减小，负载能力不断

增强,控制性能不断提升,成本不断降低的方向发展。

电动舵机以其结构简单、可靠性高、工艺性好、使用和维护方便、能源单一、成本低、控制精度高、频率响应快、负载能力强、与弹载计算机集成容易等特性引起了人们的广泛注意和深入研究,近年来,已在空空导弹、反坦克导弹、中小型反舰导弹、制导火箭弹、制导炮弹、弹道修正引信、智能水雷等诸多领域得到了广泛的重视与应用。毫不夸张地说,电动舵机已成为未来中小型智能弹药舵机系统发展的必然趋势。

电动舵机并不是一个全新的概念,第二次世界大战期间,美国制造了功能完善的C-1电气式自动驾驶仪(苏联仿制品为AH-5),其中就采用了电动舵机。早期的电动舵机输出力矩小、响应速度慢、控制精度相对较低,但其结构紧凑、制造成本低、易于维护、经济性好等特点仍然得到了肯定,如美国的“标准”RIM-66/67中远程舰空导弹、苏联的“根弗”SA-6地空导弹和“萨格尔”AT-3反坦克导弹、法国的R-530中距空空导弹等均采用了电动舵机方案。20世纪60年代末和70年代初,美国空军针对发生的几起飞行事故,提出了电动作动器计划,从而拉开了深入研究电动舵机的序幕。

本书共7章:第1章主要对智能弹药与引信舵机控制系统及国内外发展状况进行深入和详细介绍;第2章对智能弹药与弹道修正引信电动舵机控制的总体设计提出基本要求、技术指标、设计原则和关键要素等;第3、4章重点介绍系统的总体设计包括结构布局、传感器选型、电动执行器选型等的具体技术细节;第5~7章以MATLAB平台详细介绍机电系统的分析与仿真、主要算法以及针对舵机系统的地面试验。

本书以弹道修正引信、炮射制导弹药、便携制导弹药、制导子弹药等中小型智能弹药为应用背景,对电动舵机系统的设计与控制技术进行系统、全面的阐述。在取材方面体现了新颖和实用的特点,在内容编排上体现了全面及重点突出的特点,强调设计理论与工程设计相结合、单元部件与系统设计应用相结合、性能优化与成本控制相结合、系统工程与器件选型相结合。作为“现代引信技术丛书”的一部分,内容涉及未来引信舵机系统发展的多个方面。

本书是在充分调研国内外智能弹药、弹道修正引信和电动舵机相关资料文献的基础上,更加系统、全面论述其设计与应用技术。本书在前人所述控制技术内容基础上进行深化和完善,同时对近年来出现的新体制、新原理智能弹药和弹道修正引信电动舵机用新型器件进行探讨和补充,所述内容为读者更加深入地理解智能弹药与弹道修正引信电动舵机设计与应用技术提供参考。

参与本书编写相关工作的还有北京理工大学的彭腾、陈振满、张国秀、彭演宾、李东方、王旭、李科伟等,对他们表示感谢。

由于水平有限,书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

第1章 绪论	1
1.1 中小型智能弹药舵机系统	1
1.1.1 智能弹药概述	1
1.1.2 中小型智能弹药	5
1.1.3 中小型智能弹药舵机系统	6
1.2 舵机的分类	7
1.2.1 液压舵机	7
1.2.2 气动舵机	12
1.2.3 电动舵机	15
1.2.4 阻尼舵执行机构	18
1.3 智能材料舵机	23
1.4 舵机系统的国内外研究现状及发展趋势	24
1.5 舵机系统的集成设计问题	26
1.6 舵机设计过程	27
1.7 舵机系统设计方法	29
第2章 电动舵机系统总体设计	31
2.1 电动舵机系统设计的基本原则	31
2.2 电动舵机分类	32
2.3 电动舵机系统的性能指标	33
2.3.1 一般性能	33
2.3.2 静态性能	34
2.3.3 动态性能	39
2.3.4 力学性能	40
2.3.5 可靠性	41
2.4 电动舵机系统结构总体设计	41
2.4.1 电动舵机系统使用环境分析	41
2.4.2 舵片与舵效力学参数匹配	42
2.4.3 电动舵机系统内部组成与布局	43

2.4.4	舵片折叠及展开	46
2.4.5	传动方式选择及动力学参数匹配	48
2.4.6	电动舵机系统抗过载设计	49
2.5	电动舵机系统电气总体设计	50
2.5.1	电动舵机系统控制方式	50
2.5.2	电气接口及通信协议	51
2.5.3	电动机参数匹配及选型要求	56
2.5.4	传感器参数匹配及选型要求	57
2.5.5	控制电路原理方案及功耗估算	59
2.5.6	电池参数匹配及选型要求	60
2.5.7	电磁兼容性设计原则	61
第3章	电动舵机系统结构设计	64
3.1	舵机空间布局及气动布局	65
3.1.1	正常式布局	66
3.1.2	无尾式布局	68
3.1.3	无翼式布局	69
3.1.4	鸭式布局	70
3.1.5	旋转弹翼式布局	74
3.1.6	气动布局	77
3.2	栅格舵片结构	78
3.3	减速器典型结构	83
3.3.1	常规齿轮减速器	83
3.3.2	行星齿轮减速器	88
3.3.3	蜗轮蜗杆减速器	90
3.3.4	谐波齿轮减速器	96
3.3.5	滚珠丝杠减速器	103
3.4	不同通道舵机系统的结构	106
3.4.1	单通道舵机结构	106
3.4.2	双通道舵机结构	109
3.4.3	三通道舵机结构	109
3.5	舵机舵效空气动力学校核	110
3.6	舵机结构强度和刚度校核	111
第4章	电动舵机系统电气设计	114
4.1	电动机工作原理与选型	115
4.1.1	有刷直流电动机	115

4.1.2	无刷直流电动机	119
4.1.3	其他类型电动机	128
4.1.4	电动机选用	134
4.2	传感器工作原理与选型	137
4.2.1	舵片运动与位置测量传感器	137
4.2.2	弹丸滚转姿态测量传感器	140
4.3	弹载电池工作原理与选型	149
4.3.1	锂电池	149
4.3.2	热电池	155
4.4	舵机系统控制电路工作原理	162
4.4.1	电源管理电路	162
4.4.2	传感器信号采集电路	167
4.4.3	电动机驱动控制电路	169
4.4.4	与弹载计算机通信的电路及协议	179
4.4.5	导线及接插件选型	186
4.4.6	布线规则与测试点设置	187
4.5	弹载高速数据记录仪工作原理与选型	188
第5章	电动舵机系统建模与仿真	190
5.1	建模与仿真概述	190
5.1.1	系统的分类	190
5.1.2	系统的特性	191
5.1.3	系统的评价	192
5.1.4	系统的三要素	192
5.1.5	系统的建模	193
5.1.6	建模过程	193
5.1.7	仿真	195
5.1.8	仿真研究的步骤	196
5.1.9	系统建模仿真流程	197
5.2	控制系统的性能指标分析	198
5.2.1	典型输入信号	198
5.2.2	系统的性能指标	201
5.2.3	一阶系统性能指标分析	202
5.2.4	二阶系统性能指标分析	205
5.2.5	高阶系统单位阶跃响应	214
5.3	非线性系统的线性化分析	215

5.3.1	非线性系统概述	215
5.3.2	非线性系统的主要特征	216
5.3.3	非线性系统的分析方法	217
5.3.4	非线性系统的线性化	218
5.3.5	非线性系统的描述函数法	221
5.3.6	多个非线性环节的描述函数法	225
5.3.7	使用描述函数法分析非线性系统	227
5.3.8	非线性改善及非线性特性的应用	232
5.4	舵机系统核心要素的数学建模	234
5.4.1	电动机的数学建模	234
5.4.2	负载的数学建模	238
5.4.3	传感器的数学建模	241
5.4.4	减速器的数学建模	241
5.4.5	功率驱动器的数学建模	242
5.5	控制系统的 MATLAB 仿真	243
5.5.1	MATLAB 仿真介绍	243
5.5.2	利用 MATLAB 进行系统仿真	245
5.6	舵机系统动力学建模与仿真	252
5.6.1	常用的动力学建模与仿真软件介绍	252
5.6.2	动力学建模与仿真的一般步骤	254
第 6 章	电动舵机系统控制算法	263
6.1	PID 控制算法	265
6.1.1	PID 控制器	265
6.1.2	PID 控制算法	269
6.1.3	PID 控制器设计与舵机系统仿真	273
6.2	模糊控制算法	277
6.2.1	模糊控制的理论基础	277
6.2.2	模糊 PID 控制策略	279
6.2.3	模糊 PID 控制器的设计	283
6.3	神经网络 PID 控制算法	292
6.3.1	神经控制器基本结构	292
6.3.2	神经元 PID 控制器	295
6.3.3	单神经元自适应 PID 控制器	296
6.3.4	基于 BP 神经网络参数自适应 PID 控制器	298
6.4	滑模变结构控制算法	302

6.4.1	滑模变控制结构控制系统	302
6.4.2	滑模变控制结构控制算法设计	309
6.5	H_{∞} 控制理论	311
6.5.1	H_{∞} 鲁棒稳定性理论	311
6.5.2	H_{∞} 范数与 H_{∞} 空间	312
6.5.3	H_{∞} 控制器设计	313
第7章	舵机系统的地面试验	316
7.1	舵机系统地面试验简介	316
7.2	地面模拟加载试验	317
7.2.1	地面模拟加载的概况	317
7.2.2	舵片摆动型舵机地面模拟加载系统	319
7.2.3	舵片固定型舵机地面加载系统	320
7.2.4	地面模拟加载试验步骤与方法	320
7.3	舵机系统风洞试验	322
7.3.1	风洞试验的地位与作用	323
7.3.2	舵机系统风洞试验系统	324
7.3.3	风洞试验的步骤与方法	330
7.4	试验数据回读与分析	332
7.5	试验报告撰写及注意事项	333
7.5.1	试验报告撰写	333
7.5.2	试验过程中注意事项	333
参考文献	336

1.1 中小型智能弹药舵机系统

1.1.1 智能弹药概述

目前，智能弹药的概念还没有权威和统一的定义，在国内外大量的文献资料中，Smart Munition（灵巧弹药）和 Intelligent Munition（智慧弹药或智能弹药）均用来描述“智能弹药”，国内多数学者在用词上也不刻意区别 Smart 和 Intelligent 的内涵，但无论从字面上，还是从内涵上讲，两者都有明显差异。

在 *Merriam Webster Dictionary* 中^[3]，Smart 和 Intelligent 的定义分别如下：

Smart: “adjective. very good at learning or thinking about things; showing intelligence or good judgment; operating by automation.”^[4]（形容词。具有或表现出擅长学习和思考；显示智慧或良好的判断力；自动运行或自动控制。）

Intelligent: “adjective. having or showing the ability to easily learn or understand things or to deal with new or difficult situations; having or showing a lot of intelligence; able to learn and understand things; having an ability to deal with problems or situations that resembles or suggests the ability of an intelligent person; guided or controlled by a computer, especially using a built-in microprocessor for automatic operation and processing of data, or for achieving greater versatility.”^[5]（形容词。具有或表现出轻松学会或理解事物，或处理新的或困难情况的能力，具有或表现出很多智慧；能够学习和理解事物；具有能够通过提示、暗示等线索处理和解决问题的能力；由计算机控制制导或控制，特别是采用嵌入式微处理器进行自动操作或数据处理，或用于实现多种功能。）

从字面意思上理解，Smart Munition 可以翻译为“聪明灵巧”“行动灵活”

“反应机敏”的弹药，国内学者一般称为“灵巧弹药”。Intelligent Munition 可以翻译为“发射后不管”“自主”“智慧”的弹药，国内学者一般称为“智慧弹药或智能弹药”。显然，Intelligent 比 Smart 具有更高的智慧和更强的能力。因此，两者虽然都可以称为“智能弹药”，但在具有“智慧”和“技能”的程度上有显著差异。

另外，可以通过人类自身的智能活动来理解“智能”的概念。尽管对自身的智能尚未有明确的定义，但是人类智能活动大致可概括如下：

(1) 感知、认识与理解能力：通过感官活动接受并理解文字、图像、语言等各种信息的能力。

(2) 认知与决策能力：通过大脑活动对相关信息进行处理、判断、分析及推理的能力。

(3) 学习能力：通过教育学习提升自身知识与技能的能力。

(4) 自适应能力：对多变的环境灵活适应的能力。

随着传感器技术、微电子技术、信息技术和人工智能技术的不断突破，已制造出类似人的视、听、触觉等传感器，对目标进行高灵敏度和高精度的搜索、探测和跟踪；将观测到的信息通过类似人脑的计算机，对数据、图像、声音等多种特征进行识别、思维判断和决策，从而控制、制导导弹拦截目标；纳米技术、微机电系统（MEMS）技术为导弹的小型化、轻质化提供了条件；仿生技术为导弹精确制导另辟蹊径。以上技术的发展都为研制智能导弹提供了技术基础，现在不仅可以想象智能导弹的概念，而且可以有条件研制具有一定智能的导弹。但是由于智能导弹涉及多方面的技术，智能的定义也很难统一，因此可以将智能导弹定义分解为几个基本的概念，更有利于人们理解智能弹药，也更有利于进一步探索、发展智能导弹^[6]。

(1) 智能弹药是一个自主的概念。智能弹药的智能反映在它能够通过自主地通过对各种感知的信息进行处理，自主应对随机的外界环境以及变化的目标特性，并通过分析、判断和推理从而做出正确的决策。因此，所谓子弹长“眼睛”、地雷插“翅膀”、炮弹有“思维”、炸弹会“滑翔”、导弹能“自控”等都是“自主”概念的体现。相反，弹道式惯性制导地地导弹完全按人事先准备好的程序完成各种飞行动作并飞至事先设定的目的地，则不能称为智能弹药。智能弹药自身能够感知来自多方的信息，并自主分析、判断、决策，不过同时也应做好信息被强制中断及诱骗等准备，因此自主与信息依赖在现阶段需要适度。

(2) 智能弹药是一个相对的概念。例如：有对抗敌方干扰能力的防空弹药相对于没有对抗敌方干扰能力的弹药而言，是智能的；但如果要对付具有变速、变轨、机动能力的弹药而言，就不是智能的。因此，智能弹药是相对于敌方目标智能而言的。这也为智能弹药的发展提供了一种思路：不需要研制在各

方面都比敌方强的智能弹药，只需针对敌方弱势的方面，研制出我方相对智能的弹药，达到克敌制胜的目的。

(3) 智能弹药是一个渐进的概念。智能是随着时代变迁、技术发展而不断进步的。以导弹制导技术为例，已从过去的指令制导发展到目前的自动寻的，能实现“发射后不管”，自主地对准目标，这就具有了一定的智能化。而随着科学技术的发展，现阶段的自动寻的导弹也需要进一步完善；否则，会被进一步的智能化技术所淘汰。

因此，作为弹药的一种，智能弹药更强调“精确命中”“精确毁伤”与“功能的多样性”，其作战任务使命、作战使用方式、毁伤效能、技术架构和复杂程度等多方面均有显著特点。与传统弹药相比，智能弹药除具有在发射前后的适宜阶段上通过人工干预或者自动控制等手段实现状态和行为改变的“技能”之外，同时具有自身状态或行为感知、目标感知和识别、探测与制导、弹道与攻击方式选择、毁伤模式与毁伤时机的决策等一种或多种“智慧”，即战场上攻防对抗的博弈。

综上所述，广义地讲，智能弹药包括所有能根据作战任务需要自主或接收外部指令改变弹道轨迹，且在外弹道某段（包括全程弹道）或在目标区具有探测与感知、导航导引与控制等能力的弹药，如弹道修正弹药、制导子弹药、末敏弹药、区域封锁弹药、激光驾束制导弹药、红外成像制导弹药、巡航弹药、自主攻击弹药等。

狭义地讲，智能弹药仅指能根据作战任务需要自主改变弹道轨迹，且在外弹道某段（包括全程弹道）或在目标区具有探测与感知、识别与跟踪、导航导引与控制、分析与决策等能力的弹药。狭义智能弹药通常具有“发射后不管”、自主规划或优化弹道、自主识别目标种类和跟踪目标、自主选择目标薄弱环节和攻击模式、自动选择毁伤策略等高级“智慧”。目前的弹道修正弹药、激光驾束制导弹药等均不属于狭义范畴的智能弹药。

如未加特别说明，在本书后续章节中提到的智能弹药均指广义范畴的智能弹药。与传统弹药相比，智能弹药具有以下特点：

(1) 具有主动改变弹道的能力。由于传统炮弹或火箭弹没有舵机，因此无法为弹道改变提供灵活的操纵力。有些弹丸有翼片，但这些翼片主要是为弹丸提供升力或增强弹丸稳定性（如火箭弹、航弹等）。有些弹丸没有翼片，而是直接利用弹丸高速旋转的陀螺效应来增强稳定性（如榴弹等）。还有一些弹丸则介于两者之间，一般采用尾翼和低速旋转来增强稳定性（如迫弹等）。如果不考虑环境的干扰（如横向风、云雾等），理论上传统弹丸发射或抛撒后，便确定了其弹道和落点，弹丸的命中精度完全取决于发射和抛撒前的弹道计算及对环境干扰的预测，属于典型的开环控制系统，弹丸本身不具有主动改变弹

道来适应环境变化和目標位置变化的能力。

智能弹药实际上是与弹道环境和目标位置共同组成了一个大的闭环控制系统。当智能弹药检测到弹道偏离或目标偏离时，会主动通过舵机操纵来改变弹道，从而减小误差，提高命中精度。

值得一提的是，反坦克智能雷或反直升机智能雷是一种十分特殊的智能弹药，为了提高响应时间和穿透能力，智能雷大多采用金属爆炸成形弹丸（Explosively Formed Projectile, EFP），其主动改变弹道的能力是靠智能雷改变射流的方位来实现的。

(2) 具有弹道定位与定向能力或目标定位与定向能力。传统弹药中最“智能”的部分就是引信。根据 GJB 373A—1997《引信安全性设计准则》的要求，在引信解除保险过程需要检测或探测两个以上（含两个）的独立环境信号。传统引信常用环境信息包括脱机信号（弹丸是否脱离载机、火炮等武器平台）、弹丸发射后坐力、弹丸旋转离心力、弹丸发射或抛撒后的时间延迟、弹道风速等。传统引信解除保险过程中的这种探测只能感知弹丸发射后环境信息的存在或弹道的存在，目的是有效区分勤务处理和作战使用两种状态，而不能对弹道进行精确的定位和定向，即不具有弹道探测与感知能力。

此外，传统弹药为了提高毁伤效能，在引信起爆控制过程中还需要探测、计算并确定最优炸点。例如，近炸引信需要探测弹丸距离地面的高度，侵彻引信需要探测弹丸进入目标的深度等。传统引信起爆控制过程中的这种探测只能模糊地感知目标的存在区域、距离目标的距离和进入目标的深度等单一信息，无法精确获取目标的定位和定向信息。

智能弹药必须具有弹道定位和定向或目标定位和定向能力，目的是为弹道的改变提供依据，因此弹道定位和定向或目标定位和定向的准确性直接关系到命中精度。

(3) 具有导航导引与控制能力。传统弹药由于是开环系统，因此不需要弹道跟踪或目标跟踪，因此也就没有导航导引与控制能力，即制导能力。

导航是引导弹丸安全准确地命中目标的过程，导航的基本功能是确定弹丸在哪里、弹丸要去哪里、弹丸如何飞行才能命中目标。导引是导航的一种特殊形式，仅指在末端弹道通过探测、感知、识别和跟踪目标来实现命中目标的过程。导航过程中，弹丸飞行控制系统通过卫星定位、加速度计、陀螺或者惯性测量单元（IMU）等传感信息，结合相关飞行控制算法生成飞行控制指令，并通过调整舵机舵片的角度或频率等参数实现弹丸姿态和弹道轨迹的改变。

智能弹药导航可以是全弹道导航，也可以从弹道中间某点开始导航，与导引跟踪目标不同，导航主要是跟踪预设的理想弹道轨迹或飞行控制系统自主生成的弹道轨迹。智能弹药的导航导引与控制能力是“智能”的集中体现，其