

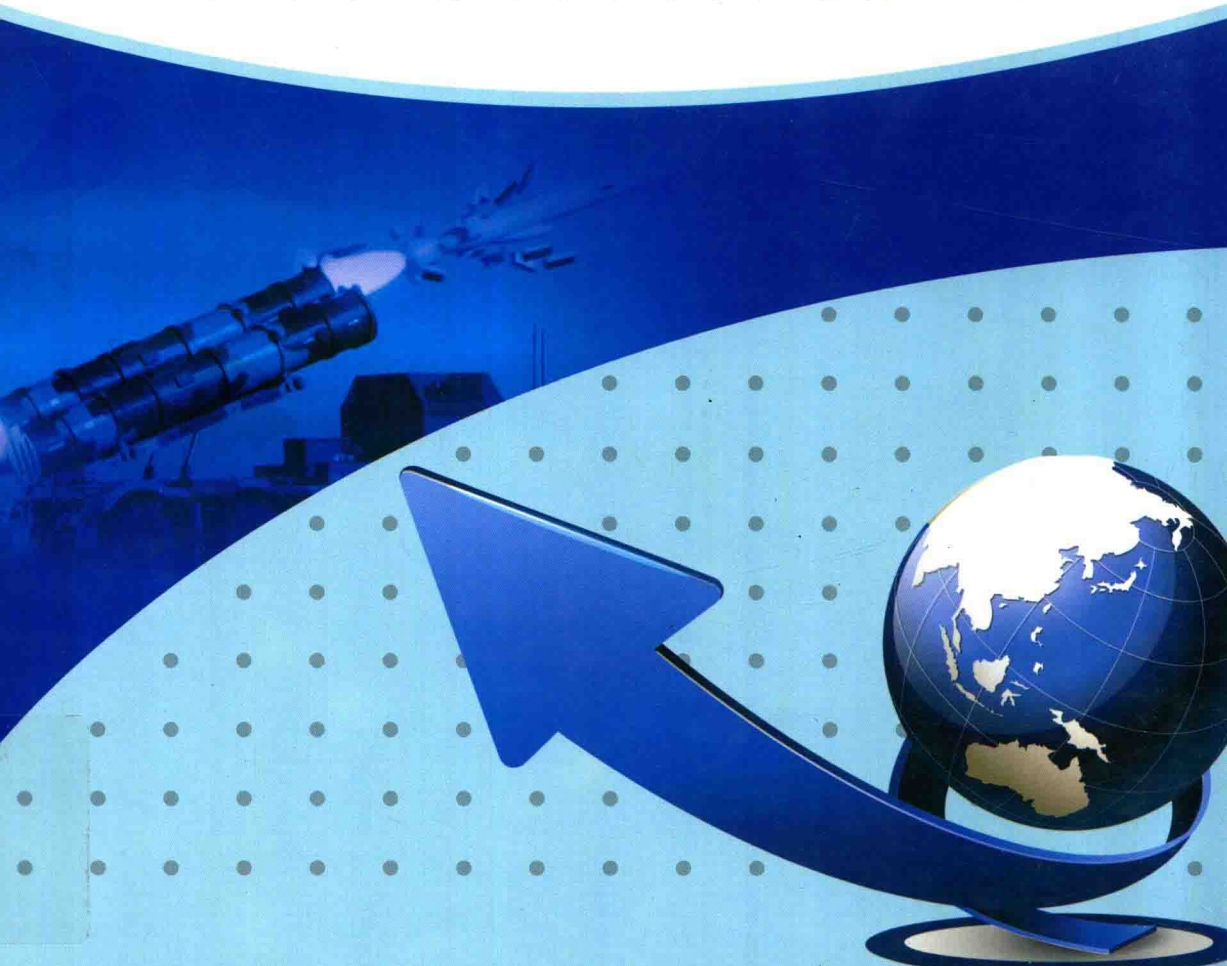


工业和信息化部“十二五”规划教材

现代导弹制导控制

杨 军◎主编

杨 军 袁 博 朱苏朋 朱学平 贾晓洪◎编



西北工业大学出版社



工业和信息化部“十二五”规划教材

XIANDAI DAODAN ZHIDAO KONGZHI
现代导弹制导控制

杨 军 主 编

杨 军 袁 博 朱苏朋 朱学平 贾晓洪 编

西北工业大学出版社

【内容简介】 本书重点讲述了导弹制导控制的相关理论和工程问题,系统地介绍了导弹制导控制的原理。其内容包括绪论、导弹制导控制基本原理、导弹的基本特性、目标特性和环境、对导弹的基本要求、导弹飞行控制系统分析与设计、导弹制导系统分析与设计、导弹制导系统抗干扰技术、典型导弹制导系统分析、数字化导弹制导控制系统软件快速开发技术、导弹制导控制系统仿真试验技术、导弹制导控制系统飞行试验技术,既有深入浅出的理论推导,又有多年从事相关领域研究工作的工程经验积累。通过本书的学习,读者既能对导弹制导控制系统的基本知识有系统的了解,又能深入掌握相关的专门技术。

本书中的基本内容可以满足飞行器制导与控制专业的本科教学需求,也能作为研究生及相关专业技术人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

现代导弹制导控制/杨军主编. —西安:西北工业大学出版社,2015.10

ISBN 978-7-5612-4640-5

I. ①现… II. ①杨… III. ①导弹制导—研究②导弹控制—研究 IV. ①TJ765

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 253966 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpup.com

印 刷 者:兴平市博闻印务有限公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:23.25

字 数:566 千字

版 次:2016 年 3 月第 1 版 2016 年 3 月第 1 次印刷

定 价:56.00 元

前 言

探测、制导控制技术专业最新教材《现代导弹制导控制》，是在1997年西北工业大学出版社出版的《导弹控制系统设计原理》和2010年国防工业出版社出版的《导弹控制原理》的基础上，汇集了近年来国内外最新研究成果，结合笔者多年工程设计经验编写完成的。本书可作为探测、制导控制技术专业和飞行器设计专业本科生教材，也可供相关专业研究生和工程设计人员作为学习之参考书籍。

全书包含12章内容。内容包括绪论、导弹制导控制基本原理、导弹的基本特性、目标特性和环境、对导弹的基本要求、导弹飞行控制系统分析与设计、导弹制导系统分析与设计、导弹制导系统抗干扰技术、典型导弹制导系统分析、数字化导弹制导控制系统软件快速开发技术、导弹制导控制系统仿真试验技术、导弹制导控制系统飞行试验技术。其中加*标注部分作为扩展及延伸阅读内容，不作为教学要求。

本书的特色之一是既考虑了面向大多数学生的教学需要，同时对少数学有余力的同学提供了一些拓展阅读内容。本书的另一个特色是在主要章节中给出了例题和实例，且在每章的最后列出了习题及参考文献，供复习和查询相关资料之用。

本书要求读者具有自动控制原理、导弹概论、飞行力学等有关课程的学习基础。

全书由杨军教授负责统稿。杨军负责编写第1, 11~12章，袁博负责编写第6~9章，朱苏朋负责编写第2~3章，朱学平负责编写第4~5章，贾晓洪负责编写第10章。在本书成稿过程中，许瑞杰硕士、周立硕士、本科生葛云鹏等人完成了大量的资料准备、书稿校对和绘图工作，在此表示衷心感谢。

书中介绍的很多研究成果的资料是在航空、航天、兵器、电子等行业专业院所大力支持下获得的，特别是得到了中国空空导弹研究院李治民、鲁浩、马文政、杨晨和段朝阳等研究员的支持和帮助，在此一并致谢。

由衷感谢本专业前辈陈新海教授、周凤岐教授和阙志宏教授多年来的一贯支持和帮助。

本书涉猎导弹制导控制技术领域的各个方面，提出的观点难免偏颇，欢迎批评指正。

编 者

2015年10月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 导弹的基本概念	1
1.2 导弹发展的历史	9
1.3 发展意义	11
1.4 导弹对制导控制系统的要求	12
1.5 导弹制导控制系统的地位和作用	17
1.6 导弹制导控制系统面临的理论问题	17
1.7 本书概貌	18
本章要点	18
习 题	18
参考文献	18
第 2 章 导弹制导控制基本原理	20
2.1 导弹制导控制系统组成原理	20
2.2 导弹制导系统分类	21
2.3 导弹控制的基本原理	25
2.4 导弹火力控制系统原理	38
本章要点	58
习 题	58
参考文献	59
第 3 章 导弹的基本特性	60
3.1 导弹运动方程组	60
3.2 导弹弹体动力学小扰动线性化模型	67
3.3 导弹弹体动态特性分析	72
3.4 导弹弹性弹体动力学模型*	77
3.5 高超声速飞行导弹的特殊问题*	85
本章要点	89
习 题	89
参考文献	89
第 4 章 目标特性和环境	90
4.1 目标的特性	90
4.2 目标的典型运动形式	92
4.3 目标的辐射特性及散射特性	93

4.4 空气动力环境	99
4.5 干扰特性*	102
本章要点	105
习题	105
参考文献	105
第5章 对导弹的基本要求	106
5.1 导弹的速度特性	106
5.2 导弹最大可用过载	107
5.3 导弹的阻尼	108
5.4 导弹的静稳定度	108
5.5 导弹的固有频率	109
5.6 导弹的副翼舵效	110
5.7 导弹的俯仰/偏航舵效	110
5.8 导弹弹体动力学特性的稳定	111
5.9 导弹法向过载限制	113
5.10 导弹结构刚度及敏感元件的安装位置	113
5.11 导弹操纵机构及舵面刚度	114
5.12 对动力系统的基本要求	115
本章要点	115
习题	116
参考文献	116
第6章 导弹飞行控制系统分析与设计	117
6.1 传感系统	117
6.2 舵机及舵传动机构	121
6.3 姿态控制系统	124
6.4 法向过载控制系统	135
6.5 速度控制系统	141
6.6 导弹弹性弹体飞行控制*	143
6.7 导弹捷联惯导数字式自适应控制*	149
6.8 导弹控制的空间稳定问题*	150
6.9 高度控制与航向偏差控制	153
6.10 导弹角速率反馈系统设计实例	165
6.11 导弹法向过载控制系统设计实例	168
6.12 静不稳定控制技术*	170
6.13 大攻角飞行控制技术*	172
6.14 推力矢量控制技术*	176
6.15 倾斜转弯控制技术*	180
6.16 直接力控制技术*	183
本章要点	187

习 题	188
参考文献	189
第 7 章 导弹制导系统分析与设计	190
7.1 基本概念	190
7.2 导引规律	196
7.3 导弹制导系统解析分析方法	206
7.4 导弹制导系统仿真分析法	211
7.5 倾斜转弯导弹中制导技术*	218
7.6 导弹多模制导技术*	221
本章要点	225
习 题	226
参考文献	226
第 8 章 导弹制导系统抗干扰技术*	228
8.1 导弹制导系统面临的干扰环境	228
8.2 导弹制导系统抗干扰技术	230
8.3 导弹制导系统抗干扰性能评定	235
本章要点	238
习 题	238
参考文献	239
第 9 章 典型导弹制导系统分析	240
9.1 自主制导	240
9.2 遥控制导	250
9.3 自动寻的制导	265
9.4 复合制导	281
9.5 空空导弹制导系统实例	290
9.6 地空导弹制导系统实例	299
9.7 空地导弹制导系统实例	313
本章要点	317
习 题	317
参考文献	318
第 10 章 数字化导弹制导控制系统软件快速开发技术*	319
10.1 线性系统模型及 Matlab 表示	319
10.2 基于 Matlab 的线性控制系统辅助分析	320
10.3 Matlab 的 C 代码自动生成及快速原型技术	322
本章要点	326
习 题	326
参考文献	327

第 11 章 导弹制导控制系统仿真试验技术*	328
11.1 概述	328
11.2 模型与仿真	329
11.3 仿真模型校核、验证与确认	331
11.4 系统仿真分类	334
11.5 系统仿真在制导控制系统设计过程中的应用	336
11.6 导弹制导控制系统数学仿真技术	338
11.7 导弹制导控制系统半实物仿真技术	341
本章要点	346
习 题	347
参考文献	347
第 12 章 导弹制导控制系统飞行试验技术*	348
12.1 飞行试验的一般程序	348
12.2 面对空导弹的飞行试验原理	349
本章要点	354
习 题	354
参考文献	355
附录	356
1. 符号对照表	356
2. 频域分析法相关证明(对应 7.3.2)	358
3. 线性二次型最优控制问题(对应 7.2.6)	361
4. CADET 中线性系统状态矢量的均值和协方差传播方程推导(对应 7.4.2)	362

第 1 章 绪 论

1.1 导弹的基本概念

1.1.1 导弹的定义

导弹是一种携带战斗部,依靠自身动力装置推进,由制导系统导引控制飞行航迹,导向目标并摧毁目标的飞行器。导弹通常由战斗部、制导系统、发动机装置和弹体结构等组成。有翼导弹作为一个整体直接攻击目标,弹道导弹飞行到预定高度和位置后弹体与弹头分离,由弹头执行攻击目标的任务。导弹摧毁目标的有效载荷是战斗部(或弹头),可为核装药、常规装药、化学战剂、生物战剂,或者使用电磁脉冲战斗部。其中,装普通装药的称常规导弹,装核装药的称核导弹。

1.1.2 导弹的基本结构

一般讲,导弹通常由推进系统、制导系统、战斗部、弹体和供电系统(弹上电源)等组成(见图 1.1)。

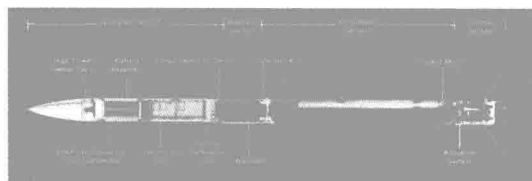


图 1.1 导弹的组成

1. 推进系统

推进系统以发动机为主体,为导弹提供飞行动力,保证导弹获得需要的射程和速度。

导弹常用的发动机有火箭发动机(固体、液体火箭发动机)、空气喷气发动机(涡轮喷气和冲压喷气发动机),以及组合型发动机(固-液组合、火箭-冲压组合发动机)。

有的导弹,如面对空导弹、反坦克导弹用两台或单台双推力发动机。其中,一台用作起飞助推,使导弹从发射装置上迅速起飞和加速,因此也称为助推器;另一台作为主发动机,用来使导弹维持一定的速度飞行,以便能追击目标,因此称为续航发动机。远程导弹、洲际导弹,其飞行速度要求在火箭发动机熄火时达到每秒数千米,因而需要用多级火箭才能完成,每级火箭都要用一台或几台火箭发动机。

2. 制导系统

制导系统是导引和控制导弹飞向目标的仪器和设备的总称。为能够将导弹导向目标,一方面需要不断地测量导弹实际运动状态与理论上所要求的运动状态之间的偏差,或者测量导弹与目标的相对位置与偏差,以便向导弹发出修正偏差或跟踪目标的控制指令;另一方面还需要保证导弹稳定飞行,并操纵导弹改变飞行姿态,控制导弹按所需要的方向和轨迹飞行而命中目标。完成前一个方面任务的部分是导引系统,完成后一个方面任务的部分是控制系统。两个系统集成在一起就构成制导系统。

制导系统可以完全装在弹上,如自寻的制导系统。但也有些导弹弹上只装控制系统,导引系统则装在地面指挥站或载舰、载机上,如面对空导弹等。

3. 战斗部

战斗部是导弹上直接毁伤目标、完成其战斗任务的部分。由于战斗部大多置于导弹头部,故习惯称为导弹头。

由于导弹所攻击的目标性质和类型不同,所以相应地要求导弹配置有毁伤作用不同、结构类型不同的战斗部,如爆破战斗部、杀伤战斗部、聚能战斗部、化学战斗部、生物战剂战斗部以及核战斗部。导弹的战斗部和发动机部分如图 1.2 所示。导弹的战斗部分类如图 1.3 所示。

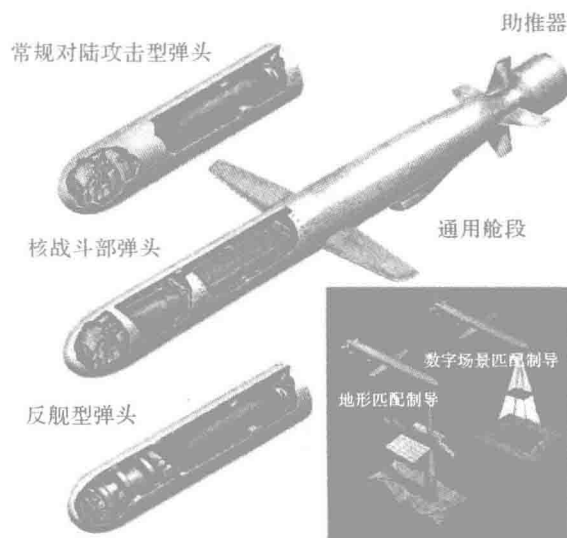


图 1.2 导弹的战斗部和发动机部分

4. 弹体

弹体是导弹的结构主体,是各舱、门、空气动力翼面、弹上机构及一些零组件连接而成的,具有良好气动外形的壳体,用以安装战斗部、制导系统、动力装置、推进剂及供电系统(弹上电源)、空气动力翼面(包括产生升力的弹翼)、产生操纵力的舵面,以及保证稳定飞行的安定面(尾翼)。对弹道式导弹,由于弹道大部分在大气层外,其主动段只作为程序转向飞行,因此导弹没有弹翼或根本没有空气动力翼面。

5. 供电系统(弹上电源)



图 1.3 导弹的战斗部分类

供电系统负责给弹上各分系统供给正常工作所需要的电能,主要包括电源,各种配电、变电装置等。常用的电源有电池,如银锌电池、镍铬电池等,发动机带动的小型发电机,如有的巡航导弹采用涡轮风扇发动机带动小型发电机作为弹上电源。还有的导弹,如个别有线制导的反坦克导弹,弹上没有电源,由地面电源提供电能供弹上使用。

制导系统用于控制导弹的飞行方向、姿态、高度和速度,引导导弹或弹头准确地飞向目标。导弹通常使用无线电制导、惯性制导、寻的制导、地形匹配制导、遥控制导、有线制导等方式。不同类型的导弹可用不同的制导方式。有的导弹只用其中的一种,有的用几种进行复合制导。弹道导弹早期曾用过无线电指令制导,后来大多用惯性制导,也有用天文-惯性和惯性-地形匹配复合制导的。巡航导弹多用惯性-地形匹配复合制导,地空或舰空导弹多用遥控、寻的或复合制导。反坦克导弹常用有线制导。导弹是导弹武器系统的核心。只有导弹还不能保证战斗任务的完成,还需要导弹武器系统的各个组成部分协调一致地工作,才能完成战斗任务。

动力装置是导弹飞行的动力源。导弹的动力装置常用固体或液体火箭发动机,有的用涡轮风扇或涡轮喷气发动机、混合推进剂火箭发动机、冲压喷气发动机。巡航导弹通常用固体火箭发动机助推、涡轮风扇或涡轮喷气发动机巡航。弹道导弹一般用固体或液体火箭发动机。导弹发动机组成如图 1.4 所示。

弹体结构是把导弹各部分连接起来的支承结构。巡航导弹的弹体结构在外形上和飞机相似。对弹体结构的主要要求是质量轻、空气动力外形好。

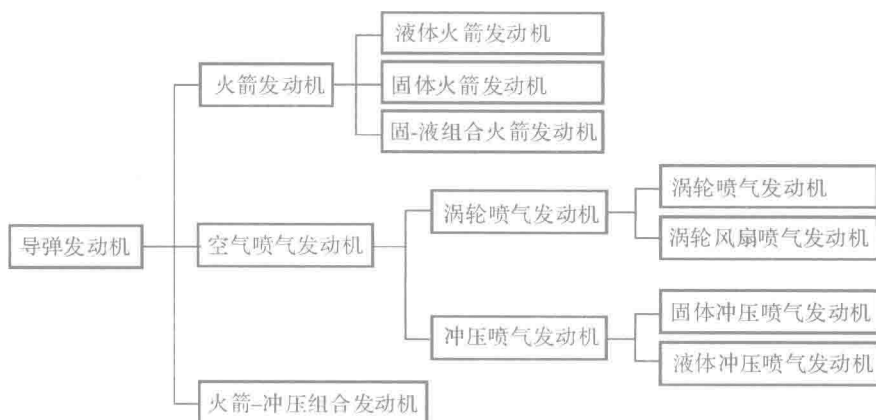


图 1.4 导弹发动机组成

1.1.3 导弹的基本类型

导弹是一种可以指定攻击目标,或能追踪目标动向的飞行武器。根据导弹的制导差异,通常有两种分类方式,一种是根据信号传送的不同,如有线制导、雷达制导、红外线制导、激光制导、电视制导等;另外一种是根据导弹制导方式的不同,如惯性制导、驾束制导、主动雷达制导和指挥至瞄准线制导等。

按发射平台分类,可分为空对空导弹(AAM)(见图 1.5)、空对地导弹(ASM)(见图 1.6)、地对空导弹(SAM)(见图 1.7)、地对地导弹(SSM)(见图 1.8)。



图 1.5 AIM-120 先进中程空空导弹

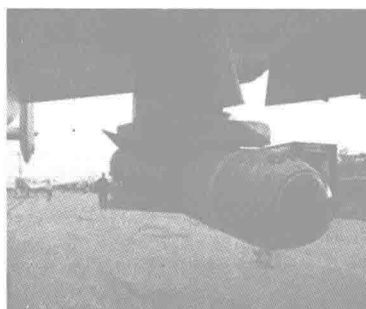


图 1.6 AGM-65 空地导弹

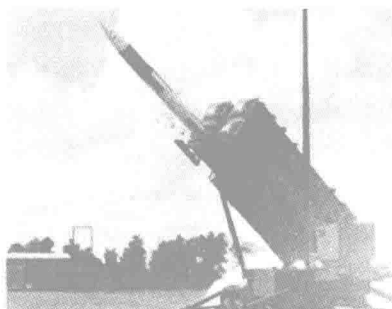


图 1.7 MIM-104 爱国者地空导弹



图 1.8 SS-1B 飞毛腿地地导弹

按用途分类,可分为反舰导弹(ASBM)(见图 1.9)、反坦克导弹(ATM)(见图 1.10)、反潜导弹(ASROC)(见图 1.11)、反卫星导弹(ASAT)(见图 1.12)。



图 1.9 鱼叉反舰导弹



图 1.10 FGM-148 反坦克导弹



图 1.11 法国 Malafon 反潜导弹



图 1.12 反卫星导弹

按弹道方式分类(见图 1.13 和图 1.14),可分为巡航导弹(CM)和弹道导弹(BM)。

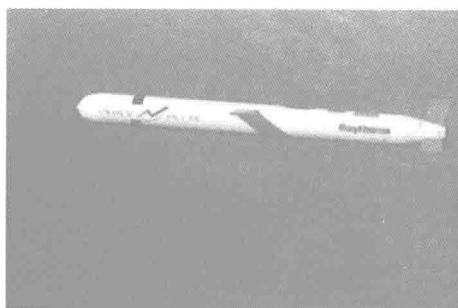


图 1.13 战斧巡航导弹

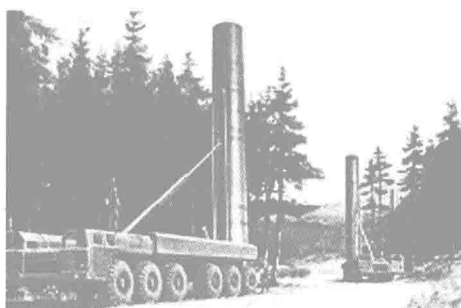


图 1.14 苏联 SS-20 车载版弹道导弹

巡航导弹采用了惯性制导、惯性-地形匹配制导和电视制导及红外制导等末制导技术,采用效率高的涡轮风扇喷气发动机和威力大的小型核弹头,大大提高了巡航导弹的作战能力。战术导弹采用了无线电制导、红外制导、激光制导和惯性制导,发射方式也发展为车载、机载、舰载等多种,提高了导弹的命中精度、生存能力、机动能力、低空作战性能和抗干扰能力。

按制导方式分类(见图 1.15~图 1.20),可分为有线制导导弹(TOW)、反辐射导弹(ARM)、红外制导导弹(IRH)、驾束制导导弹(Beam riding)、主动雷达制导导弹(ARH)、半主动雷达制导导弹(SARH)。



图 1.15 陶式反坦克导弹



图 1.16 反辐射导弹



图 1.17 企鹅反舰导弹



图 1.18 RBS-70 防空导弹



图 1.19 车载版防空 AIM-120 导弹

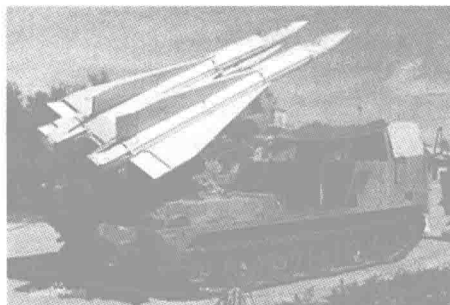


图 1.20 霍克防空导弹

1.1.4 世界各国著名的导弹

世界各国和地区著名的导弹如下：

德国：“V-2”“霍特”“罗兰特”探险者一号；

俄罗斯：“白杨-M”“飞毛腿”“日灸”“萨姆-2”“骄子”“安泰”；

中国大陆：“东风”、海基型号“巨浪”“红旗”“上游一号”“海鹰”“鹰击”“红箭”“霹雳”“闪电”“红鸟”；

法国：“飞鱼”“西北风”；

美国：“战斧”“爱国者”“鱼叉”“响尾蛇”“阿萨特”“地狱火”“潘兴”“民兵”；

中国台湾：“天剑”“雄风”“天弓”“青锋”；

印度：“天空”“烈火”；

巴基斯坦：“哈塔夫”；

朝鲜：“劳动”导弹、“大浦洞”导弹；

伊朗：“流星”“泥石”；

英国：“星光”防空导弹。

1. 美国“响尾蛇”导弹

“响尾蛇”AIM-9(见图 1.21)是世界上第一种红外制导空对空导弹。红外装置可以引导导弹追踪热的目标,如同响尾蛇能感知附近动物的体温而准确捕获猎物一样。

作战距离:2.84 km;

弹长:5.3 m;

弹径:127 mm;

最大速度:2 Ma。

2. 瑞典“萨伯”导弹

Rb05 是瑞典萨伯公司为瑞典皇家空军研制的一种战术空对面导弹(见图 1.22),用来攻击陆上和海上目标,也可用以执行空对空任务。

作战距离:8 km;

弹长:3.6 m;

弹径:300 mm;

最大速度:1 Ma;

载机:AJ35。

3. “战斧”系列巡航导弹

“战斧”系列巡航导弹是美国研制的反舰和防空两用巡航导弹(见图 1.23)。

射程:2 500 km;

速度:高超声速;

战斗部:核或常规战斗部。



图 1.21 美国“响尾蛇”导弹

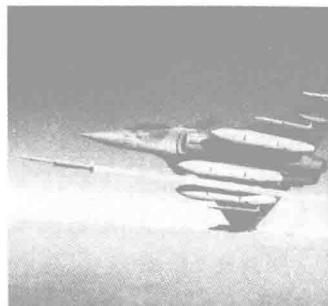


图 1.22 瑞典“萨伯”Rb05 导弹

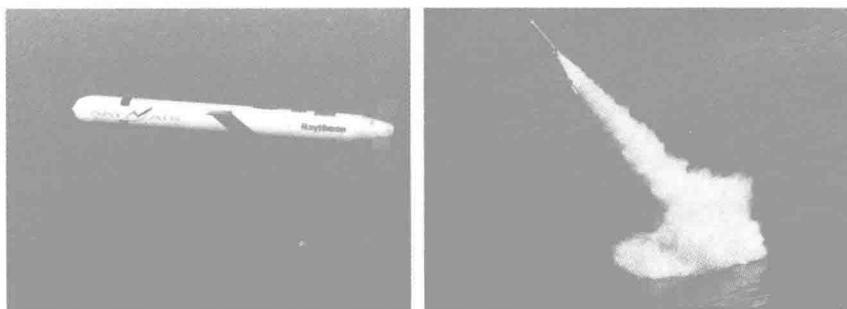


图 1.23 “战斧”系列巡航导弹

4. 东风-5(DF-5)

东风-5(DF-5)是中国研制的第一代洲际地地战略导弹(见图 1.24)。1980年5月18日全程飞行试验成功。

作战距离:12 000~15 000 km;

弹长:32.6 m;

弹径:3 350 mm。

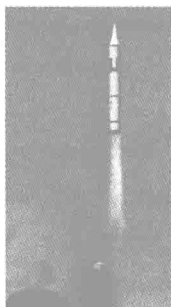


图 1.24 东风-5 导弹



图 1.25 “红箭”反坦克导弹

5. “红箭”反坦克导弹

“红箭”系列有红箭 73、红箭 73B、红箭 8 等系列(见图 1.25)。

作战距离:3 km 左右;

弹长:868 mm;

弹径:120 mm;

最大速度:120 m/s。

6. “霹雳”导弹

“霹雳”导弹是一种主动雷达导引的具备多目标“超视距”攻击能力的空对空导弹(见图 1.26)。

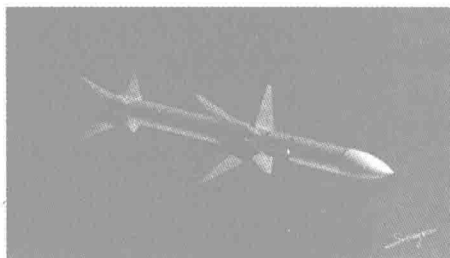


图 1.26 “霹雳”导弹

弹长:3 850 mm;

弹径:203 mm;

翼展:674 mm;

发射质量:197.7 kg;

战斗部:离散杆式战斗部;

推进系统:固体火箭发动机;

最大速度:4 Ma;

最大射程:80 km;

最大过载:38 g;

制导模式:惯性制导+中段修正+末段主动雷达制导。

1.1.5 导弹各种符号的含义

A(Air)表示空;S(Surface)表示面;U(Under Water)表示水下;I(Intercept)表示截击;G(Ground)表示地面;N(Navy)表示海军;M(Missile)表示导弹;例如 SS-N-2。

其中,美国现役的各种导弹编号为三个字母。第一个字母表示发射方式:A——空中平台发射,如 AIM-120 中距空空导弹;B——多种平台发射,如 BGM-109C“战斧”巡航导弹;C——地面发射,水平贮藏,如“波马克”CIM-10 地对空导弹;F——单兵携带发射,如 FIM-92“毒刺”单兵防空导弹;H——竖井贮藏,地面发射,如 HGM-25A“大力神”;I——洲际弹道导弹;L——竖井贮藏,地下发射,如 LGM-30G,“民兵”Ⅲ地对地洲际导弹;M——由地面车辆或移动式发射架发射,如 MGM-31A“潘兴”I地对地战术导弹;R——舰载发射,如“标准”RIM-66/67 舰载防空导弹;U——潜艇发射或水下其他装置发射,如 UGM-96A“三叉戟”I弹道导弹。

第二个字母表示用途:G——对地攻击或对海面目标攻击;I——空中拦截(对空中目标攻击);D——诱饵;对于还处于试验阶段的导弹会在第一个字母之前加上表示导弹状态的字母,如 X 表示实验性质的导弹。

西方对于俄罗斯(或苏联)的导弹编号方式相对简单,一般分为两部分。第一部分由两个字母组成:第一个字母表示发射环境,如 S 表示陆地或海面发射,A 表示空中发射;第二个字母表示打击目标,如 S 表示地面或海面目标,A 表示空中目标。

第二部分是数字,表示导弹具体型号,如“瘦子”SS-10 地对地洲际弹道导弹,“环礁”AA-2 红外制导空对空导弹,“斗士”SA-12 地对空导弹。如果由海上舰艇发射的导弹会在这两部分中间加上字母“N”,表示舰艇发射,如 SS-N-19 舰对舰导弹、SS-N-27 潜对舰导弹。

1.2 导弹发展的历史

1.2.1 第二次世界大战时期

导弹是 20 世纪 40 年代开始出现的武器。第二次世界大战后期,德国首先在实战中使用了 V-1 和 V-2 导弹,从欧洲西岸隔海轰炸英国。V-1 是一种亚声速的无人驾驶武器,射程 300 多千米,很容易用歼击机及其他防空措施来对付。V-2 是最大射程约 320 km 的液体导弹,由于可靠性差及弹着点的散布度太大,对英国只起到骚扰的作用,作战效果不大。但 V-2 导弹对以后导弹技术的发展起了重要的先驱作用。各国从德国的 V-1、V-2 导弹在第二次