



国家出版基金项目



国防特色学术专著·兵器科学与技术

National Defense Monograph



# 现代防空导弹制导控制技术

杨 军 朱学平 袁 博 著

西北工业大学出版社



国家出版基金项目



国防特色学术专著·兵器科学与技术

# 现代防空导弹制导控制技术

杨 军 朱学平 袁 博 著



西北工业大学出版社

**【内容简介】** 本书是作者在多年从事现代防空导弹制导控制技术理论研究和工程设计的基础上撰写而成的,较全面地介绍了现代防空导弹制导控制系统建模、设计、分析和评估方法。本书主要内容包括现代防空导弹制导控制系统建模技术、防空导弹制导系统、防空导弹制导规律、防空导弹飞行控制系统设计理论方法、防空导弹大攻角飞行控制技术、防空导弹直接力/气动力复合控制技术、防空导弹推力矢量/气动力复合控制技术、防空导弹静不稳定弹体控制技术等。

本书内容丰富,具有工程应用特色,可供从事防空导弹或其他飞行器制导控制技术研究、设计、试验的技术人员参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

现代防空导弹制导控制技术/杨军,朱学平,袁博著. —西安:西北工业大学出版社,2014. 11  
ISBN 978-7-5612-4194-3

I. ①现… II. ①杨… ②朱… ③袁… III. ①防空导弹—导弹制导—制导控制  
IV. ①TJ761.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 272883 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:11.625

字 数:278 千字

版 次:2014 年 12 月第 1 版 2014 年 12 月第 1 次印刷

定 价:38.00 元

# 前 言

在现代战争中,空中威胁日益增强。随着航空技术的迅猛发展,西方军事大国研发的第四代/第五代战斗机、无人作战飞机(UCAV)和高超声速飞行器等作战武器平台对我国的国防安全构成严重挑战;具备高速大机动能力的弹道导弹、防区外投放的高速精确制导武器等空袭武器的使用,已经对防空导弹技术的发展提出了更高的要求。防空导弹技术的发展一直与空袭武器威胁的发展相适应,主要用于对抗传统作战飞机的第三代防空导弹技术已经不能完全适应现代战争的需要。自20世纪90年代以来,西方国家普遍开始研究防空导弹现代飞行控制技术,实现防空导弹具备拦截第四代/第五代战斗机、弹道导弹、高超声速飞行器等高速大机动目标的能力。

我国防空导弹研制事业经历了50余年的历程,研制生产了多种武器系统,为国防现代化做出了重要贡献。科研工作者积累了丰富的理论与实践经验,也编写和出版了诸多优秀的专著。然而,新一代防空导弹在总体设计与制导控制技术方面发生了很大的变化,出现了气动力/直接力/推力矢量复合控制技术、大攻角控制技术、大静不稳定弹体控制技术等先进的控制技术。可是,目前国内还没有一本反映现代防空导弹制导控制技术较为系统的学术著作,难以从事该技术研究、设计的人员提供参考。笔者长期从事现代防空导弹制导控制技术的理论研究和工程设计,积累了大量的工作经验,并以此为基础撰写了本书,希望能为有志于从事现代防空导弹制导控制技术的研究人员提供些帮助,如能达到此目的,笔者将备感欣慰。

全书共分为13章。第1章叙述了防空导弹概况和防空导弹制导控制技术发展历程;第2章介绍了防空导弹模型与弹体特性分析;第3章和第4章介绍了防空导弹制导系统和制导规律;第5章介绍了防空导弹制导控制设备;第6章重点论述了防空导弹现代制导控制总体技术;第7~12章介绍了大静不稳定导弹控制技术、弹性弹体控制技术、大攻角控制技术、推力矢量控制技术、直接侧向力控制技术和旋转防空导弹控制技术;第13章介绍了防空导弹现代飞行控制技术的发展趋势。

与本课题相关的研究成果是在国内从事相关技术领域研究的科研院、所支持下完成的,在此表示衷心的感谢!在本书成稿过程中,梁雪超、席杰、李权成等同志付出了辛勤的工作,在此表示感谢!

由于水平有限,书中难免有疏漏和不妥之处,欢迎读者批评指正。

著 者

2014年10月

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 防空导弹概述 .....	1
1.2 世界主要防空导弹概况 .....	3
1.3 防空导弹制导控制技术发展趋势 .....	6
<b>第 2 章 防空导弹动力学模型与弹体特性分析</b> .....	8
2.1 坐标系定义及坐标系转换 .....	8
2.2 弹体动力学基本方程 .....	13
2.3 气动力/推力矢量组合控制导弹动力学模型 .....	17
2.4 气动力/喷流组合控制导弹动力学模型 .....	18
2.5 弹体动力学模型简化 .....	19
2.6 防空导弹弹体特性分析 .....	23
<b>第 3 章 防空导弹制导系统</b> .....	27
3.1 防空导弹制导系统基本组成 .....	27
3.2 防空导弹制导系统设计任务 .....	28
3.3 防空导弹制导系统设计的基本阶段及步骤 .....	30
3.4 遥控制导系统 .....	32
3.5 TVM 制导系统 .....	37
3.6 自动寻的制导系统 .....	39
3.7 复合制导系统 .....	44
<b>第 4 章 防空导弹制导规律</b> .....	46
4.1 概述 .....	46
4.2 制导规律选择的基本要求 .....	46
4.3 防空导弹经典制导规律 .....	47
4.4 防空导弹现代制导规律 .....	51
<b>第 5 章 防空导弹制导控制设备</b> .....	64
5.1 地面制导设备 .....	64
5.2 导引头 .....	67
5.3 弹上传感系统 .....	75
5.4 弹载计算机 .....	79

5.5	弹上执行机构	82
<b>第6章</b>	<b>防空导弹现代制导控制总体技术</b>	<b>85</b>
6.1	防空导弹飞行控制系统设计的理论基础	85
6.2	防空导弹典型自动驾驶仪的结构形式	97
6.3	不同自动驾驶仪结构对静不稳定弹体的稳定边界分析	99
6.4	制导控制系统与舵系统指标的关系分析	104
<b>第7章</b>	<b>防空导弹大静不稳定控制技术</b>	<b>111</b>
7.1	放宽静稳定度的基本概念	111
7.2	人工稳定原理及稳定条件	112
7.3	静不稳定导弹人工稳定的飞行特性	113
7.4	大静不稳定导弹自动驾驶仪设计方法	113
<b>第8章</b>	<b>防空导弹弹性弹体控制技术</b>	<b>116</b>
8.1	弹性弹体控制问题的提出	116
8.2	弹性弹体弹性变形动力学数学模型	116
8.3	导弹弹性弹体动力学传递函数	117
8.4	弹性弹体飞行控制系统设计方法	119
8.5	陷波滤波器设计	120
8.6	敏感元件安装位置的选择	123
8.7	结论	124
<b>第9章</b>	<b>防空导弹大攻角飞行控制技术</b>	<b>125</b>
9.1	概述	125
9.2	防空导弹大攻角空气动力学耦合机理	125
9.3	耦合因素的特性分析	129
9.4	防空导弹大攻角飞行控制系统的解耦策略	129
9.5	防空导弹大攻角飞行控制系统设计方法评述	130
9.6	基于多变量线性化模型的性能指标模型设计方法	130
9.7	大攻角飞行控制系统的评估方法	132
<b>第10章</b>	<b>防空导弹推力矢量控制技术</b>	<b>136</b>
10.1	推力矢量控制系统在防空导弹中的应用	136
10.2	推力矢量控制系统的分类	136
10.3	推力矢量控制系统的性能描述	140
10.4	典型推力矢量控制导弹的数学模型	140
10.5	推力矢量控制系统的应用方法	142

<b>第 11 章 防空导弹直接力控制技术</b> .....	144
11.1 引言 .....	144
11.2 直接力控制在防空导弹中的应用 .....	144
11.3 直接力机构配置方法 .....	146
11.4 直接力控制系统方案 .....	149
11.5 直接侧向力/气动力复合控制方法 .....	151
11.6 直接侧向力/气动力复合控制系统稳定性分析方法 .....	153
<b>第 12 章 防空导弹旋转弹体控制技术</b> .....	158
12.1 引言 .....	158
12.2 防空导弹旋转弹体数学模型 .....	158
12.3 防空导弹旋转弹体控制系统 .....	162
12.4 防空导弹旋转弹体纵侧向运动的交连与解耦 .....	168
<b>第 13 章 现代防空导弹制导控制技术的发展趋势</b> .....	172
<b>参考文献</b> .....	175

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 防空导弹概述

### 1.1.1 防空导弹构成与功能

防空导弹武器系统种类和型号繁多,其设备构成差异很大,小至单兵便携式导弹,大到由数辆或数十辆车载设备构成的高空远程防空导弹武器系统。防空导弹用于拦截空中目标,必须具有以下功能设备:搜索指挥、目标识别、目标跟踪、导弹发射、导弹制导和杀伤目标等。

#### 1. 搜索指挥

拦截空中目标的前提是必须首先搜索、发现空中目标,并对拦截作战进行指挥协调。不同的防空导弹武器系统,能完成的任务各不相同,但是搜索指挥这一作战功能是必不可少的。例如“霍克”中远程防空导弹武器系统,由两部搜索雷达和信息协调控制中心来完成搜索指挥功能,而单兵便携式导弹系统则是由使用该导弹的操作人员来完成搜索指挥功能。

#### 2. 目标识别

为了拦截空中目标,必须事先分清敌我,确保不误伤我机。另外为了进行有效的防空作战,还需要识别来袭目标类型。1945年1月1日轰炸法国和荷兰的德国轰炸机在返航途中,因德军高射炮兵无敌我识别系统,致使德军的184架轰炸机被高射炮击落。在中东战争中,叙利亚一天内击落己方飞机10架。这些事件表现了在防空作战中敌我识别的重要性。

#### 3. 目标跟踪

为把导弹导向目标,必须对其进行跟踪,以获得目标的有关数据。根据导弹制导体制的不同,对目标的跟踪可由地面设备或弹上导引头来完成,实现手段通常是雷达或光电跟踪器。

#### 4. 导弹发射

这一功能是使处在战备状态下的导弹转变为起动和飞行状态。在稳定地跟踪目标并获得为发射导弹所必需的目标数据之后,满足发射条件(确保导弹在杀伤区内与目标交会)时,即可发射导弹。发射方式有倾斜发射和垂直发射两种。

#### 5. 导弹制导

根据所获得的目标信息,并按照预定的导引规律把导弹导向目标的过程称为导弹制导。对导弹实施制导控制是防空导弹拦截目标的最关键功能。

#### 6. 杀伤目标

杀伤目标是防空导弹武器系统最终要达到的目的。这一功能由弹上引信战斗部系统来实现。当导弹按导引规律所确定的弹道接近目标时,引信开始工作,当其敏感到目标存在时即适时引爆战斗部来杀伤目标,完成防空导弹武器对来袭目标的拦截。

防空导弹武器系统除装备具有上述6项基本功能的设备之外,还必须装备具有供电、空调和行驶等辅助功能的设备,以及用于维修、检测作战装备的支援装备。



### 1.1.2 防空导弹武器系统组成

防空导弹武器系统一般由防空导弹、发射设备、陆基制导设备(在我国又称为“制导站”)和技术保障设备等构成。

(1)防空导弹——由弹体、动力装置、弹上制导设备和战斗部组成。

(2)发射设备——由发射和装填设备(如发射架、发射筒、装填机)以及发射控制设备组成。其主要功能是,发射前支撑导弹,并与其他设备一起协助完成发射前的准备工作;发射前赋予导弹以规定的发射角度;发射后与输弹设备一起完成再装填。有的导弹(如“爱国者”、C-300)的发射设备也是导弹的储存、运输装置。

(3)陆基制导设备——由搜索、跟踪、通信和数据处理(指挥)设备组成。在复杂的防空导弹武器系统中,陆基制导设备主要包括搜索雷达、跟踪雷达、光电跟踪设备(微光电视、红外跟踪仪、激光测距仪等)和高速数字计算机与显示装置等。单兵便携式防空导弹的这部分设备比较简单,几乎可由射手来担任制导站。

(4)技术保障设备——即保障武器系统正常工作而配备的技术设备、器材,如备件、电子维修设备、机械维修设备等。

### 1.1.3 防空导弹武器系统分类

防空导弹是“陆基防空导弹”或“地面防空导弹”的简称。“地”是指从位于陆地的发射平台上发射,其陆地发射平台可以是地下发射井、地面固定发射阵地、可机动的发射载车和发射架以及射手的肩膀;“空”表示拦截的目标来自天空与太空空间。

#### 1. 按作战用途分

按作战用途一般分为“国土防空导弹”和“野战防空导弹”。国土防空导弹系统配备于国土防空系统,又称要地防空导弹系统,具有作战空域大、杀伤概率高的特点,用于防护具有战略价值的地面目标。野战防空导弹系统具有很强的机动转移作战能力,主要用于陆军阵地防空和部队行进、集结地的防空作战。

#### 2. 按作战空域分

按导弹最大射程划分,可分为远程、中程、近程和短程防空导弹武器系统。

按作战高度和射程或只按高度划分,可分为全空域、高空远程、中高空中远程、高空、中高空、中低空和低空、超低空防空导弹武器系统。

#### 3. 按导弹制导方式分

按导弹制导方式可分为指令制导、驾束制导、寻的制导和复合制导防空导弹武器系统。指令制导是由地面制导站测量导弹与目标之间的偏差,并按此形成导弹控制指令,经遥控线传送给导弹,控制导弹飞向目标的一种制导方式。驾束制导是由地面制导站形成对目标的照射波束,并控制导弹沿波束中心飞向目标的一种制导方式。驾束制导又可分为单波束和双波束制导,而对目标的跟踪照射波束可用雷达波束或激光束。寻的制导是利用来自目标(辐射或反射)的信息,导弹自动地寻向目标的一种制导方式。复合制导分为串联复合制导和并联复合制导。串联复合制导是将不同的制导方式(包括捷联惯导)串接起来,从而可增大射程,确保制导精度,它也用于导弹发射的初制导向主要制导方式的过渡。并联复合制导主要用于近程防空导弹武器系统,通常采用雷达制导和光电制导并行转换,以提高系统的抗干扰能力。

#### 4. 按攻击的目标分

按攻击的目标一般可分为反飞机防空导弹、反飞机反导通用型防空导弹、反导专用型防空导弹、反卫星专用防空导弹、反辐射专用型防空导弹。反飞机防空导弹不具备反导能力；反飞机反导通用型防空导弹具备反飞机、反巡航导弹、低层末端反战术弹道导弹综合作战能力；反导专用型防空导弹分战略弹道导弹专用型和反战术弹道导弹专用型两大类。

## 1.2 世界主要防空导弹概况

### 1.2.1 第一代防空导弹的发展

从20世纪40年代中期至1960年初,是第一代防空导弹发展研制的时期。这一时期的防空目标重点是采用高空、高速突防的战略轰炸机和战略侦察机,研制的防空导弹类型主要是中高空和中远程型,其代表型号是美国的“波马克”和“奈基”I, II型,苏联SA-1和SA-2。第一代防空导弹一般射程可达50 km左右,个别达140 km,射高也能达30 km左右,但这一代防空导弹尺寸较大,机动性较差,只能固定发射,目前大都已退役。

美国在研究了“瀑布”防空导弹后,“通用电气”公司在其基础上制造出一种“日耳曼人(Термек-А1)”试验导弹,其外形与“瀑布”导弹一样,但发动机推力稍小一些。与此同时,美国陆军自行研制“奈基I”防空导弹。它是一种带固体助推器和液体火箭巡航发动机的两级防空导弹,其飞行距离为48 km,拦截高度为20 km。在20世纪50年代上半期开始批量生产,总共生产了约16 000枚导弹,用于美国最重要城市和工业区的防空。50年代末代替“奈基I”研制出“奈基II”防空导弹,能在140 km距离上拦截目标。美国空军于1952年9月装备了“波马克”防空导弹。

20世纪40年代,在苏联第88科研所有几个分部都在研究防空导弹,积累经验。E. B. 西里尼什科夫和C. E. 拉什科夫领导下的分部对“瀑布”和“III METTEPJIHHR”防空导弹进行了完善研制,并赋予“P-101”和“P-102”的代号。这些导弹的发动机是在第88科研所H. JI. 鲁曼斯基A. M. 伊萨耶夫领导下的分部进行研制的。该分部对“台风”无控火箭进行了完善研制,并赋予P-110“小水鸭”的代号。虽然生产出一些试验样机,并在卡波斯金-雅尔靶场通过了飞行试验,但这些研制工作都没有进行到底。

1950年前,苏联政府决定第一设计局(KB-1)为莫斯科防空系统的主导研制单位,该防空系统被赋予的代号C-25或“贝尔库特(Веркут)”系统(即SA-1)。该系统的防空导弹代号为“205”,在“拉沃奇金(Лавоцкин)”设计局研制。C-25系统和“205”导弹的研制周期非常短暂。获得试验结果之前已经开始了其部件的批量生产。50多个工厂生产发动机、导弹结构部件和组件、控制系统组合等。

1951年夏,苏联进行了第一批防空导弹发射,1953年春对第一批空中真实目标进行了拦截。这些真实目标是“米格-15”“图-4”“伊尔-28”飞机,因为当时无人驾驶靶机还未研制出来。靶机上的飞行员将飞机飞行至给定的航路,将控制转给自动驾驶仪,之后他们就跳伞离开飞机。“205”导弹是按“鸭式”气动布局设计的,它从发射台上垂直起飞,这大大简化了发射装置。动力装置采用了捆绑式四台伊沙也夫结构的液体火箭发动机,总推力约为88.3 kN,这保证导弹起飞时的纵向过载为2.5g。从发射台起飞后,导弹按制导控制系统的指令靠燃气舵向目标方向转

弯,在燃气舵抛开后果弹按照从地面制导站接收到的指令对空气舵进行飞行控制。“205”导弹上采用了圆柱形预制钢破片杀伤战斗部,它保证在最大距离上,即 50 m 半径内杀伤目标。

在 C-25 防空导弹发展的基础上,在 20 世纪 50 年代中期建立了莫斯科防空系统,它具有两个防御环,包括工作在分米波段的远程和近程搜索雷达系统,以及 56 个带发射“205”导弹的固定发射装置的防空导弹团。每个防空导弹系统能对 20 个空中目标进行射击,射击目标的最大距离为 30 km,高度为 3~20 km,水平内拦截扇区角为  $50^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 。C-25 是装备苏联和俄罗斯的第一种防空导弹型号,它经历了一系列改型,在部队服役了约 30 年。

在第一代防空导弹发展中,C-75(即 SA-2)机动式防空导弹的出现是防空导弹发展历史上的一件大事。它是在第一设计局 A. A. 拉斯普莱金领导下研制的,而在第二设计局(KB-2),即后来的“火炬”设计局,在 И. Л. 格鲁森领导下为该防空系统研制出 B-750 导弹。

C-75 防空导弹系统在部队服役超过了 30 年,经历了一系列改型,是第一代防空导弹中最先进的型号。B-750 防空导弹于 1960 年 5 月 1 日击落由马乌爱尔斯驾驶的美国 U-2 侦察飞机。C-75 在越南战争中和其他局部地区冲突中均发挥了重要作用。B-750 导弹及其后续改型均是两级导弹,带固体火箭发动机的助推器,它能使导弹获得前所未有的加速度,二级气动布局为“正常式”,导弹为倾斜发射。

### 1.2.2 第二代防空导弹的发展

第二代防空导弹是在 20 世纪 50 年代末至 70 年代末发展的,此时期的防御重点转向了对付低空、超低空突防的目标,因此,所研制的第二代防空导弹机动性能好,反应速度快,导弹系统自动化程度和可靠性高,远、中、近程,高、中、低空各型号的火力衔接,形成了全空域的火力覆盖,不少国家参与了防空导弹的发展,同时一大批性能较好的便携式导弹也得以迅速发展。

这一代防空导弹的代表型号有美国研制的“霍克”中高空、中远程防空导弹(见图 1.1)、“小檉树”车载机动式近程低空型防空导弹,“红眼睛”和“毒刺”单兵肩射式防空导弹;苏联研制的 SA-3, SA-4, SA-5, SA-6, SA-7, SA-8, SA-9, SA-11 防空导弹,英国研制的“山猫”“轻剑”“吹管”和“警犬 II”防空导弹;法国研制的“响尾蛇”防空导弹,法德联合研制的“罗兰特”防空导弹及瑞典研究的 RBS-70 防空导弹等。

这一代防空导弹型号只有极少数退役,大多数目前仍在服役,并经历次改型。

### 1.2.3 第三代防空导弹的发展

第三代防空导弹是由“反飞机为主”向“反飞机反导并重”发展的重大变革时期,经历两个明显的突变阶段,即从“反飞机为主”向“综合反飞机与通用、专用反导并重”发展的重大转变。综合反飞机是指在反飞机中突出增加了前期型号没有或不足的反隐身飞机、反预警指挥机、电子战飞机等超远程作战能力;在反导中,改进前期型号,增加反巡航导弹、反低层战术弹道导弹能力,同时,新研制专门用于反中、高层战术弹道导弹的防空导弹型号。

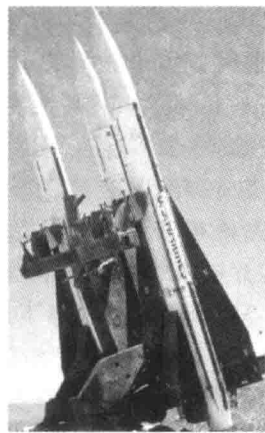


图 1.1 “霍克”防空导弹(HAWK Missile)

第一阶段是20世纪70年代末至80年代末发展的多种型号,目前仍然是各国防空导弹中的主力型号,现在仍不断获得完善和改进。70年代末期以来,虽然作战飞机仍采用低空、超低空突防战术,但地面战术弹道导弹却构成了新的威胁,使地面防空变得日趋复杂。由于飞机采用隐形技术,加之飞行速度已提高到两倍声速左右,所以目标机动低空突防能力较强。战术弹道导弹飞行弹道较高,但目标小,飞行速度快,也较易突防。为了防空反导,第三代防空导弹在重点发展防空导弹的基础上,还十分注意发展具有初步反隐身、反导能力的其他类型防空导弹,其代表型号有苏联SA-10(C-300Ⅱ系列前期三个改型)、美国“爱国者”(前期三个改型)、“霍克”改型、“罗兰特”改型,苏联的SA-12,SA-13,SA-15,SA-16,SA-17,SA-18,SA-19,美国和瑞士联合研制的“阿达茨”,法国的“西北风”,英国的“罗兰特”,日本的81式和意大利的“防空卫士”等。这一代防空导弹由于采用了相控阵雷达和先进的微电子技术,防空导弹系统可以跟踪和攻击多批目标,在命中精度和作战效能方面有了较大提高,但是,反隐身、特别是反导能力还很弱。

第二阶段从20世纪90年代初至今,是第三代防空导弹发展的后期阶段。从这个时期到未来相当一段时间内,防空导弹是要对付空天一体化打击的现实与潜在威胁。在此之前发展的防空导弹都是以反飞机为主,而这一时期的防空导弹不但要对付一般作战飞机,还要重点对付巡航导弹、战术导弹、隐形飞机、电子战飞机、预警机等。其发展主要表现在改进现役型号以适应反导需要,新研反导专用型和反辐射专用型防空导弹。一是改进以反飞机为主的国土防空导弹,使其适应超低空反巡航导弹和反隐形飞机以及低层反战术弹道导弹的需求,即反飞机、反巡航导弹与低层反战术导弹一体化,其代表型号有美国的“爱国者”PAC-3、俄罗斯“安泰”2500、欧美联合在研的MEADS(扩大的中程防空系统),欧洲联合在研的“未来空族”中的陆基系列型号;二是研制“高层反战术弹道导弹专用型防空导弹系统”,例如已装备部队的以美联合研制的“箭2”和美国在研的THAAD;三是研制“防空反辐射导弹”系统,专门用于攻击400 km距离上的预警机、电子战飞机等,目前一些国家正在加紧开展防空反辐射导弹的预研工作,并取得了一定成果。这是防空导弹装备革命性发展形成的三大新品种。目前,这一代防空导弹有的型号已经装备部队,并参加了实战或实战部署,有的还在研制或预研中。

#### 1.2.4 第四代防空导弹的发展

国内外普遍为,未来防空的主要样式是空天一体防御,其目的是对付现实与潜在敌人从空中和太空发起的空天一体化攻击。美国正在加紧发展空天一体化作战系统,实施空天进攻是美国实现其战争目的的主要作战形式,因此,空天防御范围越来越大,其任务越来越繁重。作为一个大国,不仅要防御航空空间攻击,同时也要防御太空空间攻击。因此,从20世纪80年代以来,苏联(俄罗斯)就已经开始意识到发展空天防御型防空导弹装备的迫切性和必要性,积极发展反导型防空导弹。美国人首先抛出了所谓的国家导弹防御战区导弹防御计划,其中的地面反导拦截装备是核心,目前,二者已合并为导弹防御计划。

第四代防空导弹的发展趋势是“地面防天反导”与“地面防空反导”型防空导弹综合一体化发展运用,以实现空天一体化防御为目标。“地面防天反导防空导弹”主要包括陆基反弹道导弹系统、陆基反卫星导弹系统,这是两种特殊的专用防空导弹装备。“地面防天反导型防空导弹”属于专用型,只拦截战略弹道导弹或低轨卫星。“地面防空反导型防空导弹”属于通用型,即把拦截飞机、巡航导弹、中近程战术弹道导弹等多种用途综合集成在一个武器系统中。地面

防空反导和反卫星导弹系统也可以各自独立研制,如美国的“地基中程拦截导弹”和“地基反卫星导弹”,但是,在部署使用时与导弹防御体系中的“地面防空反导防空导弹”综合一体化使用,即融入国家的整个导弹防御体系中,各自承担起不同层次的反导任务。

目前,俄罗斯的C-400(见图1.2和图1.3)代表着第四代防空导弹装备的发展趋势,也代表着国土防空导弹的发展趋势。该装备体系包括4种基本型号的防空导弹,即反导/反卫专用型以及远、中、近程全空域四大系列(十四种型别)的防空导弹。C-400地面防天反导与防空反导两大类防空导弹器,可以形成空天一体化的作战应用能力。其防空导弹型号包括“防天反导专用型”“400 km以内全空域型”“200 km以内全空域型”“150 km以内全空域型”四大系列,每个系列包括2个以上型别的防空导弹型号。它综合集成远、中、近程,高、中、低空各种防空导弹装备型号为一体,是一个集地面反卫、反战略弹道导弹、反战术弹道导弹、反巡航导弹、反飞机、反辐射为一体的高度综合的防空导弹武器装备复杂巨系统,如图1.4所示。



图 1.2 C-400 防空导弹系统

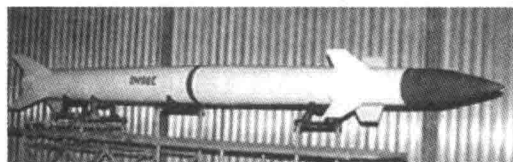


图 1.3 C-400 使用的防空导弹

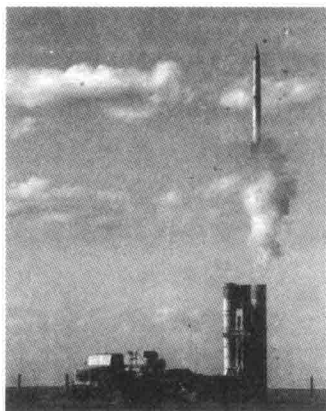


图 1.4 C-400“凯旋”防空导弹发射升空

### 1.3 防空导弹制导控制技术的发展趋势

新一代防空导弹武器的标志就是,多通道自主对付多目标、空天一体防御、反隐身抗干扰、精确打击、高速度高过载快速响应,机动、灵活地适应网络化作战需要。因此,新一代防空导弹制导控制技术也必须满足上述作战需求。

新一代防空导弹制导控制技术的发展着重于以下几个方面:

- (1)采用垂直发射快速转弯技术,满足全方位、快速响应、高机动性能需求;

(2)采用能快速反应的推力矢量控制和直接力控制技术,提高导弹过载响应时间;

(3)采用相控阵制导技术、成像制导技术和光电复合制导技术等先进制导技术,对抗各种干扰,从而满足精确打击和摧毁要害目标的目的;

(4)采用惯性制导、无线电指令制导、雷达半主动制导和末端自动寻的制导相结合的复合制导模式,提高防空导弹的作战空域及抗干扰能力;

(5)采用多功能相控阵雷达与光学探测结合,能精确跟踪 50~100 个目标,以适应多目标多方向作战的需要;

(6)采用网络化智能作战指挥系统,以合理组织与分配火力,完成防御体系的最佳作战方案。

# 第 2 章 防空导弹动力学模型与弹体特性分析

## 2.1 坐标系定义及坐标系转换

要描述带有方向性的物理量,如向量、物体姿态,均需选用适当的坐标系来描述。而研究物体的运动特性和规律时,必须将不同的坐标系所描述的物理量统一到一个坐标系中进行。因此,本章介绍常用坐标系及其相互转换关系。

### 2.1.1 常用坐标系定义

#### 1. 地心惯性坐标系 $O_E X_I Y_I Z_I$ (记为 I)

该坐标系(见图 2.1)的原点在地心  $O_E$  处。 $O_E X_I$  轴在赤道平面内指向平春分点。由于春分点具有进动性,根据 1976 年国际天文协会决议,1984 年起采用新的标准历元,以 2000 年 1 月 1.5 日的平春分点为基准。 $O_E Z_I$  轴垂直于赤道平面,与地球自转轴重合,指向北极。 $O_E Y_I$  轴与  $O_E X_I$  轴、 $O_E Z_I$  轴组成右手直角坐标系。

#### 2. 地心坐标系 $O_E X_E Y_E Z_E$ (记为 E)

该坐标系(见图 2.1)的原点在地心  $O_E$  处。 $O_E X_E$  轴在赤道平面内指向某时刻的起始子午线(通常取格林尼治天文台所在子午线), $O_E Z_E$  轴垂直于赤道平面指向北极。 $O_E Y_E$  轴与  $O_E X_E$  轴、 $O_E Z_E$  轴组成右手直角坐标系。由于坐标轴  $O_E X_E$  与所指向的子午线随地球一起转动,因此该坐标系为动参考系。

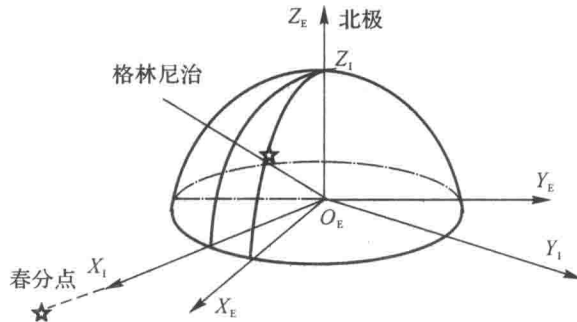


图 2.1 地心惯性坐标系与地心坐标系

#### 3. 发射坐标系 $oxyz$ (记为 G)

坐标原点与发射点  $o$  固连, $ox$  轴在发射点水平面内,指向发射瞄准方向, $oy$  轴垂直于发射点水平面指向上方。 $oz$  轴与  $xoy$  面相垂直并构成右手直角坐标系。由于发射点  $o$  随地球一起旋转,所以发射坐标系为一动坐标系。

需要说明的是,当把地球分别看成是圆球或椭球时,其坐标系的具体含义是不同的。因为过发射点的圆球表面的切平面与椭球表面的切平面不重合,即当把地球看成圆球时, $oy$  轴与

过 $o$ 点的半径 $R$ 重合,如图2.2所示;而当把地球看成椭球体时, $oy$ 轴与椭球过 $o$ 点的主法线重合,如图2.3所示。它们与赤道平面的夹角分别称为地心纬度(记作 $\varphi_0$ )和地理纬度(记作 $B_0$ )。在不同的切平面, $ox$ 轴与子午线切线正北方向的夹角分别称为地心方位角(记作 $\alpha_0$ )和发射方位角(记作 $A_0$ )。

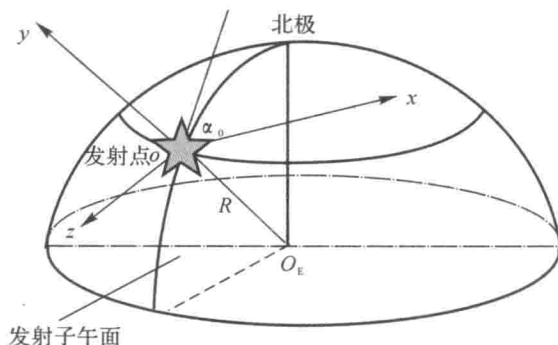


图 2.2 椭球形地球下的发射坐标系

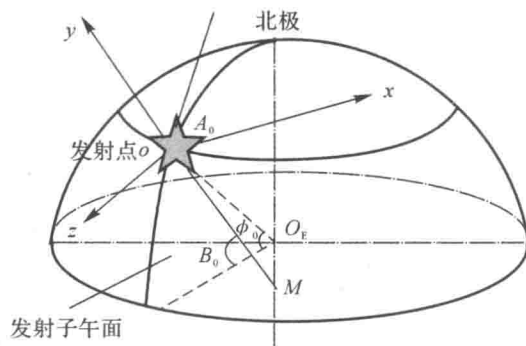


图 2.3 椭球形地球下的发射坐标系

#### 4. 发射惯性坐标系 $o_A x_A y_A z_A$ (记为 A)

飞行器起飞瞬间,坐标原点与发射点 $o$ 重合,各坐标轴与发射坐标系各轴也相应重合。飞行器起飞后, $o_A$ 点及坐标系各轴方向在惯性空间保持不动。利用该坐标系可建立飞行器在惯性空间的运动方程。

#### 5. 平移坐标系 $o_T x_T y_T z_T$ (记为 T)

坐标原点 $o_T$ 可根据需要选择在发射坐标系原点 $o$ ,或是飞行器质心 $o_1$ ,并始终与 $o$ 或 $o_1$ 重合,但其坐标轴与发射惯性坐标系各轴始终保持平行。该坐标系主要用来进行惯性器件的对准、调平以及导航计算。

#### 6. 弹体坐标系 $o_1 x_1 y_1 z_1$ (记为 B)

坐标原点 $o_1$ 为飞行器质心。 $o_1 x_1$ 轴为弹体外壳的对称轴,指向飞行器头部。 $o_1 y_1$ 轴在飞行器的主对称面内,垂直于 $o_1 x_1$ 轴。 $o_1 z_1$ 轴垂直于主对称面,顺着飞行方向看去指向右方。 $o_1 - x_1 y_1 z_1$ 为右手直角坐标系。该坐标系在空间的位置反映了飞行器空中姿态。

#### 7. 速度坐标系 $o_1 x_v y_v z_v$ (记为 V)

坐标原点为飞行器质心 $o_1$ 。 $o_1 x_v$ 轴沿飞行器飞行速度方向。 $o_1 y_v$ 轴在验证机的主对称面



内,垂直于  $o_1x_v$  轴。 $o_1z_v$  轴垂直于  $x_vo_1y_v$  平面。顺着飞行方向看去, $o_1z_v$  轴指向右方。 $o_1x_vy_vz_v$  为右手直角坐标系。该坐标系可反映出飞行器的飞行速度向量状态。

#### 8. 弹道坐标系 $o_1x_hy_hz_h$ (记为 H)

坐标原点为飞行器质心  $o_1$ 。 $o_1x_h$  轴沿飞行器飞行速度方向。 $o_1y_h$  轴位于垂直平面内指向上方。 $o_1z_h$  轴位于当地水平面内,顺着飞行方向看去, $o_1z_h$  轴指向右侧为正。此坐标系与速度坐标系 V 的差别在于速度滚转角,速度滚转角主要用于描述导弹的飞行速度方向。

#### 9. 地理坐标系 $o_dx_dy_dz_d$ (记为 D)

坐标原点是飞行器当前地球表面投影点  $o_d$ , $o_dx_d$  轴位于当地水平面内,指向飞行方向, $o_dy_d$  轴垂直于当地水平面指向上方。 $o_dz_d$  轴与  $x_do_dy_d$  面相垂直并构成右手直角坐标系。

该坐标系类似于发射坐标系。在实际使用中,常将地理坐标系的  $o_dx_d$  轴指向北,相应地  $o_dz_d$  轴就指向东,因此此时的地理坐标系也称为北天东坐标系。

#### 10. 风洞坐标系 $o_1x_wy_wz_w$ (记为 W)

坐标原点为飞行器的质心  $o_1$ 。 $o_1x_w$  轴与飞行器质心运动速度向量  $V$  重合, $V$  的指向就是  $o_1x_w$  轴的正指向。 $o_1y_w$  轴在  $o_1x_1$  轴和  $o_1x_w$  轴构成的平面内,且垂直于  $o_1x_w$  轴,指向正上方。 $o_1z_w$  轴由右手法则确定。

#### 11. 视线坐标系 $o_1x_sy_sz_s$ (记为 S)

坐标原点为飞行器的质心  $o_1$ 。 $o_1x_s$  轴沿视线方向,指向目标为正。 $o_1y_s$  轴在包含  $o_1x_s$  轴的铅垂面内,垂直于  $o_1x_s$  轴,向上为正。 $o_1z_s$  轴由右手法则确定。

#### 12. 弹上视线坐标系 $o_1x_{s1}y_{s1}z_{s1}$ (记为 S1)

坐标原点取在导引头天线旋转中心(近似地看做与飞行器的质心  $o_1$  重合)。 $o_1x_{s1}$  轴沿视线方向,指向目标为正。 $o_1y_{s1}$  轴在  $x_{s1}o_1y_1$  平面内,垂直于  $o_1x_{s1}$  轴,向上为正。 $o_1z_{s1}$  轴由右手法则确定。

#### 13. 弹上测量坐标系 $o_1x_my_mz_m$ (记为 M)

坐标原点取在导引头天线旋转中心(近似地看做与飞行器的质心  $o_1$  重合)。 $o_1x_m$  轴在导引头敏感轴方向上,指向目标为正。 $o_1y_m$  轴在包含  $o_1x_m$  轴且与  $x_1o_1z_1$  平面垂直的平面内,与  $o_1x_m$  轴垂直,向上为正。 $o_1z_m$  轴由右手法则确定。

### 2.1.2 坐标系间的转换关系

#### 1. 初等变换矩阵

直角坐标系之间的向量转换基于以下初等变换矩阵:

(1) 绕坐标系 OX 轴转  $\gamma$  角,记为顺序 1,其变换矩阵为

$$M_1(\gamma) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\gamma & \sin\gamma \\ 0 & -\sin\gamma & \cos\gamma \end{bmatrix}$$

(2) 绕坐标系 OY 轴转  $\psi$  角,记为顺序 2,其变换矩阵为

$$M_2(\psi) = \begin{bmatrix} \cos\psi & 0 & -\sin\psi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\psi & 0 & \cos\psi \end{bmatrix}$$

(3) 绕坐标系 OZ 轴转  $\varphi$  角,记为顺序 3,其变换矩阵为