

飞行器制导与 控制原理

李元凯 李滚 雍恩米 秦开宇 编著



高等教育出版社

飞行器制导与控制原理

李元凯 李滚 雍恩米 秦开宇 编著



高等教育出版社·北京

内容简介

本教材以导弹和航天器作为主要研究对象,同时面向未来临近空间飞行器,对精确制导飞行器的核心技术之一——制导与控制——的原理进行了系统介绍,主要内容涉及动力学模型、飞行控制与制导方法等方面。

全书共十章,主要包括飞行器制导控制系统概述、飞行器常用坐标系、导弹飞行动力学模型、导弹飞行控制和制导方法、航天器姿轨运动模型、航天器姿轨控制和相对运动控制、远程导弹和高超声速飞行器的制导与控制等内容。本书空天兼顾,由浅入深,既重视讲解基本概念和基础技术,又力求反映空天一体发展的新趋势和新成果。

本教材可作为高等学校探测制导与控制技术、航空航天工程等专业高年级本科生、研究生的教材,也可供相关专业技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

飞行器制导与控制原理 / 李元凯等编著. -- 北京: 高等教育出版社, 2017.12

ISBN 978 - 7 - 04 - 048988 - 0

I. ①飞… II. ①李… III. ①飞行器 - 制导系统 - 高等学校 - 教材②飞行器 - 飞行控制系统 - 高等学校 - 教材
IV. ①V47

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 287620 号

策划编辑 杨 希 责任编辑 杨 希 封面设计 张 楠 版式设计 童 丹
插图绘制 杜晓丹 责任校对 胡美萍 责任印制 毛斯璐

出版发行	高等教育出版社	网 址	http://www.hep.edu.cn
社 址	北京市西城区德外大街 4 号		http://www.hep.com.cn
邮政编码	100120	网上订购	http://www.hepmall.com.cn
印 刷	三河市华骏印务包装有限公司		http://www.hepmall.com
开 本	787mm × 1092mm 1/16		http://www.hepmall.cn
印 张	23		
字 数	570 千字	版 次	2017年12月第1版
购书热线	010-58581118	印 次	2017年12月第1次印刷
咨询电话	400-810-0598	定 价	44.60 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物料号 48988 - 00

序

当前,临近空间和空天飞行技术发展特别迅速,航空和航天的界线逐渐变得模糊,空天一体成为明显的发展趋势。因此,作为飞行器关键技术的制导与控制就不能仅限于大气层内的飞行状态,还要进一步考虑轨道飞行状态以及新出现的空间过渡状态,例如再入飞行、滑翔跳跃飞行等。目前,国内已经出版了一批关于制导与控制系统理论与技术方面的优秀教材,这些教材绝大多数是针对稠密大气层内飞行的传统导弹,对于当前快速发展的具有跨大气层飞行能力的空天飞行器制导与控制的内容涉及较少,为了更好地满足这方面的教学需求,电子科技大学的李元凯老师等撰写了这本教材,我认为很有意义,有利于读者更广泛地了解和学习制导与控制的基本原理和技术。

本书有两个主要特点。一是面向空天飞行器。作者先以导弹和航天器为对象讨论传统的气动和轨道飞行的情况,再以远程导弹和高超声速飞行器为对象讨论跨大气层飞行的情况,侧重讲解基本概念并进行适当拓展,这非常适合初学者的入门学习。二是体现了一些最新的研究成果。作者围绕近几年来飞行器发展中空天一体的变化趋势,对其中的空间相对运动、高超声速飞行器轨迹优化等问题进行了较深入的介绍,也具有一定的学术参考价值。

总而言之,本书内容航空与航天兼顾、实用性和创新性兼顾,特色比较鲜明,教材结构清晰。虽然深度有限,但我相信,对于当前快速发展的空天技术,本书的出版能够给予读者一个良好的入门途径。

 研究员

中航工业成都飞机设计研究所

2017年5月24日

前 言

精确制导飞行器是现代战争中的主要作战力量之一,受到高度重视。在快速发展的空天一体飞行技术推动下,近年来出现了能够跨大气层超远程作战的面向未来战场的空天飞行器。该类飞行器跨越空中和空间两个飞行领域,使得气动飞行和轨道飞行两种典型飞行方式的相对独立性逐渐被打破,制导与控制问题也变得更为复杂。

在这样的背景下,对航空航天相关专业教学来说,有必要两者兼顾,把制导与控制原理放在同一个体系下展示出来,这也是能够进一步讨论空天兼备的具有跨大气层飞行能力的制导飞行器的关键前提。现有的“制导与控制”方面教材尚未反映出这个趋势,前沿专著又较为艰深,为此,本书面向空天飞行新方式,以制导控制传统理论为基础,对新兴理论技术适当拓展,以满足相关专业本科生和研究生的教学需求。

本教材以精确制导飞行器为对象,针对空基(导弹)和天基(航天器)两类典型飞行器阐述制导控制的基本理论,在此基础上讨论具有跨大气层飞行能力的飞行器(远程导弹、高超声速飞行器)的制导与控制问题,并融入了作者的一些研究成果(非开普勒相对运动控制、再入轨迹优化制导等)。全书内容共分为三个部分,第一部分为总述,即第一章,概述本书的飞行环境、飞行器和制导控制系统。第二部分为基本理论,包括第二章至第八章,其中,第二章介绍飞行器常用坐标系,第三、四、五章分别阐述导弹飞行动力学模型、飞行控制和制导方法,第六、七、八章分别阐述航天器姿轨运动模型、姿轨控制和空间相对运动控制。第三部分为第二部分的延伸,包括第九、十章,在气动飞行和轨道飞行的基础上,分别从远程导弹和高超声速飞行器的角度讨论跨大气层飞行的制导与控制问题。

本书适用于探测制导与控制技术、航空航天工程等专业的教学,书中某些章节可根据不同专业的教学要求有所侧重和取舍。

本书第一章和第二章由李滚教授执笔,第三章至第八章由李元凯副教授执笔,第九章和第十章由雍恩米副研究员执笔。全书由李元凯副教授统稿,秦开宇教授审定并修改了全稿。本书由哈尔滨工业大学丁亮教授主审,他在肯定本书选材和内容的同时,提出了许多宝贵意见和建议;另外,电子科技大学航空航天学院的研究生陈路、王奇、王兰参与了教材文本编辑和校正工作,在此表示衷心感谢。

本书的撰写得到了电子科技大学新编特色教材建设基金资助,电子科技大学航空航天学院和高等教育出版社理工事业部给予了大力支持和帮助,在此一并表示感谢。

由于作者水平有限,书中错误之处在所难免,恳请读者批评指正。

编者邮箱:yuankai.li@uestc.edu.cn

编 者

2017年3月

目 录

第一章 飞行器制导控制系统概述	1	3.2 导弹所受空气作用力矩	50
1.1 目标和飞行环境	1	3.2.1 总气动力矩	50
1.1.1 目标的物理特性	1	3.2.2 压心和焦点	51
1.1.2 目标的电磁特性	2	3.2.3 俯仰力矩	51
1.1.3 目标的干扰特性	2	3.2.4 偏航力矩	57
1.1.4 飞行环境特性	3	3.2.5 滚转力矩	57
1.2 精确制导飞行器	3	3.3 导弹所受推力和重力	59
1.2.1 空基制导武器	4	3.3.1 推力	59
1.2.2 天基制导武器	10	3.3.2 重力	60
1.2.3 临近空间制导武器	13	3.4 导弹动力学运动方程组	60
1.3 导弹制导和控制系统	15	3.4.1 动力学方程	61
1.3.1 制导控制系统工作原理	15	3.4.2 运动学方程	65
1.3.2 制导性能指标	16	3.4.3 其它约束方程	66
1.3.3 制导控制系统分类	17	3.4.4 导弹的一般运动方程组	68
1.3.4 制导控制系统构成	20	3.5 导弹运动的分解	70
1.4 航天器飞行控制系统	23	3.5.1 纵向运动和侧向运动	70
1.4.1 轨道控制系统构成	24	3.5.2 铅垂面运动和水平面运动	72
1.4.2 姿态控制系统构成	26	3.6 弹道与过载	75
第二章 飞行器常用坐标系	31	3.6.1 质心运动与弹道	75
2.1 坐标系建立的一般原则	31	3.6.2 机动性与过载	77
2.2 导弹坐标系及变换	31	第四章 导弹飞行控制方法	82
2.2.1 导弹坐标系	32	4.1 动态特性分析方法	82
2.2.2 导弹坐标系变换	33	4.1.1 导弹的扰动运动	82
2.3 航天器坐标系及变换	40	4.1.2 线性化与系数冻结法	83
2.3.1 航天器坐标系	40	4.1.3 稳定性与操纵性	91
2.3.2 航天器坐标系变换	44	4.2 导弹动态特性分析	94
第三章 导弹飞行动力学模型	45	4.2.1 纵向动态特性分析	94
3.1 导弹所受空气作用力	45	4.2.2 侧向动态特性分析	107
3.1.1 气动外形与总气动力	45	4.3 导弹运动的稳定控制	111
3.1.2 升力和侧力	47	4.3.1 倾斜运动的稳定	112
3.1.3 阻力	48	4.3.2 俯仰运动的稳定	117

4.4 导弹运动控制系统	118	6.3 航天器轨道描述	159
4.4.1 姿态控制系统	119	6.3.1 轨道的几何描述	159
4.4.2 高度和航向控制系统	120	6.3.2 轨道根数描述	163
第五章 导弹制导方法	125	6.4 航天器的姿态运动方程	165
5.1 相对运动方程	125	6.4.1 姿态运动学方程	165
5.1.1 寻的制导的相对运动方程	125	6.4.2 姿态动力学方程	168
5.1.2 遥控制导的相对运动方程	127	6.5 航天器的一般运动方程	171
5.2 追踪法	128	6.5.1 六自由度运动方程	171
5.2.1 弹道方程	128	6.5.2 六自由度线性化运动方程	172
5.2.2 命中时间	129	6.6 摄动问题	174
5.2.3 法向过载	130	6.6.1 摄动力与轨道摄动	174
5.2.4 允许攻击区	131	6.6.2 摄动力矩与姿态摄动	177
5.3 平行接近法	133	第七章 航天器姿轨控制	181
5.3.1 直线弹道的条件	133	7.1 轨道保持	181
5.3.2 法向过载	134	7.2 异面和共面轨道机动	182
5.4 比例导引法	135	7.2.1 轨道机动的概念	182
5.4.1 弹道特性	136	7.2.2 平面外的轨道机动	183
5.4.2 比例系数的选择	139	7.2.3 平面内的轨道机动	185
5.4.3 广义比例导引法	139	7.3 霍曼转移	188
5.5 三点法	140	7.4 航天器的再入返回	190
5.5.1 弹道方程	142	7.4.1 再入返回原理	190
5.5.2 转弯速率	144	7.4.2 再入返回控制过程	191
5.5.3 等法向加速度曲线	146	7.4.3 再入返回方式	193
5.5.4 攻击禁区	147	7.5 被动姿态稳定:自旋	196
5.6 前置量法	147	7.5.1 自旋航天器的稳定与章动	196
5.6.1 弹道方程	148	7.5.2 自旋航天器的章动阻尼	202
5.6.2 转弯速率	149	7.6 主动姿态稳定:喷气推力	206
5.6.3 半前置量法	151	7.6.1 喷气推力姿态稳定系统	206
第六章 航天器姿轨运动模型	152	7.6.2 喷气推力系统的非线性 控制	208
6.1 轨道运动的基本定律	152	7.7 自旋稳定航天器的喷气姿态 机动	212
6.1.1 开普勒定律	152	第八章 航天器相对运动控制	217
6.1.2 牛顿运动定律	154	8.1 相对运动问题	217
6.2 二体问题与轨道运动方程	154	8.1.1 航天器的空间交会	217
6.2.1 N 体问题	154		
6.2.2 二体运动方程	157		

8.1.2	空间交会中的相对运动动力学与控制	219	9.3.2	刚性弹体姿态运动稳定	289
8.2	近圆轨道相对运动模型	223	9.3.3	刚性弹体姿态运动控制	295
8.2.1	相对运动坐标系	223	第十章	高超声速飞行器制导与控制	298
8.2.2	近圆轨道的 HCW 方程	224	10.1	高超声速飞行器概述	298
8.2.3	HCW 方程的解	226	10.1.1	再入高超声速飞行器	298
8.3	视线约束的脉冲推力制导	229	10.1.2	返回飞船	302
8.3.1	最大视线角	229	10.1.3	吸气式高超声速飞行器	303
8.3.2	参考视线约束的多脉冲制导律	230	10.1.4	组合动力高超声速飞行器	305
8.4	非开普勒轨道相对运动的连续推力控制	234	10.2	高超声速飞行器运动方程	306
8.4.1	近圆轨道目标悬停控制	234	10.2.1	高超声速运动坐标系	306
8.4.2	最优滑模变结构控制	240	10.2.2	运动方程一般形式与计算方程	310
8.4.3	动态逆最优控制	247	10.2.3	运动方程组的简化	316
第九章	远程导弹制导与控制	251	10.3	高超声速飞行器轨迹优化与制导	317
9.1	远程导弹运动方程	251	10.3.1	高超声速飞行器轨迹优化方法综述	317
9.1.1	一般运动方程	251	10.3.2	高超声速飞行器一般制导方法	324
9.1.2	远程导弹弹道设计	270	10.4	高超声速飞行器控制律	345
9.2	远程导弹制导方法	275	10.4.1	高超声速飞行器控制律研究进展	346
9.2.1	摄动制导法	276	10.4.2	高超声速飞行器控制方法介绍	347
9.2.2	显式制导法	279	参考文献		355
9.3	远程导弹飞行稳定性与姿态控制	282			
9.3.1	线性化姿态运动方程	282			

第一章 飞行器制导控制系统概述

本章以精确制导飞行器为对象,对飞行器制导控制系统的基本概念、结构组成和系统设备进行论述。精确制导飞行器是飞行器中最为重要的一种,在军用、民用、航空、航天多种任务中被广泛运用。传统的精确制导飞行器往往专指大气层内飞行的导弹,因为早期的飞行器只有中近程导弹才有足够精确的制导性能,然而,随着空间和临近空间技术的发展,大气层外飞行与跨大气层飞行逐渐和传统的气动飞行平滑接轨,精确制导飞行器的范围也已经从传统的导弹向天基制导飞行器、临近空间飞行器的发展方向扩容。因此,针对气动飞行和轨道飞行这两种基本飞行方式,本章在介绍传统的导弹制导控制系统的同时,对航天器的制导控制系统也加以讨论,而在此之前,首先介绍飞行器执行制导任务过程中所可能涉及的目标和环境特性。

1.1 目标和飞行环境

精确制导飞行器执行任务的过程中离不开目标和飞行环境的制约,本节对常见的目标和环境特性进行简要介绍。目标的特性主要包括物理特性、电磁特性、干扰特性这几个方面,而环境特性则主要指制导飞行器的飞行介质特性。

1.1.1 目标的物理特性

精确制导飞行器常见的攻击目标有三类,即空中目标、地面目标和海上目标。严格地说,空间目标也已被列入攻击目标,如反卫星武器,不过目前为止该类武器还停留在实验阶段,并没有在任何实战中出现。考虑到空间目标以航天器为主,在空间背景下其特性与航天器相同,表现比较单一,因此这里仍然只介绍传统的三类目标,其种类更为丰富,并且特性也灵活多变。

1. 空中目标

空中目标可分为飞机和导弹两大类。飞机主要包括战略轰炸机、歼击机、侦察机、电子战飞机、预警机等,导弹主要指战术导弹,包括地地导弹、空地导弹、反舰导弹、巡航导弹等。

对制导飞行器作战性能有重大影响的是空中目标的飞行速度特性、高度特性和机动特性。飞行速度随不同的飞行高度而变化,飞行速度又反映机动能力,它们之间的关系可用飞行包络表示,飞行包络由最小速度、升限和动压限制线所组成。

空中目标的最大飞行速度受发动机的推力限制,最小飞行速度和升限由升力等于重力同时推力等于阻力的基本关系所决定。动压大小由飞行速度和高度所决定,受结构强度所限制。低空大气密度大,阻力大,相同的推力获得的最小飞行速度小。最小飞行速度随飞行高度增高而增大,因为只有这样才能维持升力等于重力的关系。升限随着飞行速度的增加而增加,达到最大速度后由于阻力的增加升限开始降低。

一般来说,战略轰炸机最大飞行速度在 $0.75 \text{ Ma} \sim 2.0 \text{ Ma}$ 之间,升限在 $13 \text{ km} \sim 18 \text{ km}$ 之间,而歼击轰炸机最大飞行速度在 $0.95 \text{ Ma} \sim 2.5 \text{ Ma}$ 之间,升限在 $12.5 \text{ km} \sim 20 \text{ km}$ 之间。侦察机的活动空域更广,高空侦察机飞机升限可达 25 km ,最大飞行速度可达 3.2 Ma ,而低空侦察机为了低空突防,利用地形跟踪可在 100 m 以下高度飞行。

2. 地面目标

地面目标分为机动目标和固定目标两类。最典型的机动目标就是坦克,坦克按尺寸和质量可以分为轻型、中型和重型三种,轻型坦克质量为 $20 \text{ t} \sim 30 \text{ t}$,长度为 $4 \text{ m} \sim 5 \text{ m}$,中型坦克质量为 $30 \text{ t} \sim 50 \text{ t}$,长度为 $5 \text{ m} \sim 7 \text{ m}$,重型坦克质量往往超过 55 t ,长度超过 7 m 。坦克的运动速度一般为 $40 \text{ km/h} \sim 100 \text{ km/h}$,目前坦克的加速性能都很好,在几秒内就能加速到 30 km/h 以上,具有制动和转向机动性能。固定目标包括交通枢纽、导弹基地、大中型桥梁、指挥通信中心、军事装备仓库、发电设备等,重要的战略目标往往都是固定的,因此,打击地面固定目标通常具有战略意义。

3. 海上目标

海上目标主要指各类舰船。海面舰船种类很多,小型的如各种快艇,中型的如驱逐舰、巡洋舰,大型的如航空母舰,尺寸一般相差一个数量级。小型舰(快艇)一般长几十米,宽和高有几米,中型舰船长一百多米,宽和高有十几米,而大型舰船长有几百米,宽和高有几十米。它们的运动特性常与几何尺寸成反比,这主要受推进系统的影响。大中型舰船速度为 $30 \text{ km/h} \sim 80 \text{ km/h}$,而小型舰中的快艇速度可达 120 km/h ,小型舰中的气垫船速度更快,可超过 150 km/h 。

1.1.2 目标的电磁特性

任何物体温度高于绝对零度都能辐射电磁波,其中,红外辐射能量与物体温度有关,温度越高,辐射能量越强,故称为热辐射,而且温度不同波长也不同,物体温度较低时辐射红外线,当温度较高时除红外辐射外,还会出现可见光辐射,它们都属于电磁辐射。

对于空中目标飞机来说,红外辐射源种类较多,引起红外辐射的因素也多,如喷气式战机的辐射源就包括发动机燃烧室的空腔金属体,尾喷管排出的热燃气流,机体表面的辐射,蒙皮表面反射的辐射能等。对于地面坦克来说,热源包括发动机的排气管,减震器、主动轮、诱导轮、轴承等长时间运动的高温部件等。海面舰船则主要是烟囱、船体等热源。

除了红外辐射等电磁辐射外,物体还对电磁波有散射特性。物体的散射特性主要由雷达散射截面(RCS)来表征,不同的尺寸和结构会造成不同的雷达散射特性。雷达散射截面的定义是对平面电磁波入射而言的,它与目标自身特性、目标方向随发射机和接收机的位置变化以及入射雷达频率有关,与目标距离无关,它可在给定方向上定量地观测入射电磁波能被目标散射或反射的情况。

1.1.3 目标的干扰特性

由于目标具有红外辐射等电磁特性,目标自身也会采取一些相应的干扰措施以防止基于电磁特性的制导武器如反辐射导弹的攻击。红外干扰技术就是伴随着红外反辐射技术的发展而发

展起来的。红外反辐射制导弹对载机威胁日趋严重,迫使人们开发出先进的机载红外对抗技术,包括有源干扰和无源干扰两种手段。其中,有源干扰包括红外诱饵弹、红外干扰机、定向红外对抗等,可以有效对抗红外导弹,确保载机自身的安全。红外诱饵弹的干扰效果与投放的时间间隔、投放时机和投放数量有关,而红外干扰机和定向红外对抗的干扰效果与开机的时机有关。

除红外干扰技术外,目标经常采用的还有针对雷达波的电磁干扰技术。电磁干扰技术会让制导武器的雷达导引头在完成的过程中遭遇复杂的电磁环境,降低攻击效能。电磁干扰不仅有人为干扰,如采用有源连续波噪声的功率型压制干扰、采用箔条的欺骗型干扰等,还存在自然干扰,如地面海面等杂波干扰。

1.1.4 飞行环境特性

精确制导武器的飞行质量离不开所处的环境,即飞行介质的特性,包括介质的压强、温度及其它物理属性。对于大气层外的飞行,其介质是真空,特性较为单一,而对于大气内飞行来说则特性较为复杂,大气的状况,如压强、密度、温度等参数在不同的地面高度、纬度、季节、时间上都是不同的。

1. 大气特性

标准大气表中规定的大气参数不随地理纬度和时间而变化,它只是几何高度的函数。表中以海平面作为几何高度计算的起点,按高度不同可以把大气分成若干层。11 km 以下的为对流层,对流层内的气温随高度升高而降低,高度每升高 1 km,温度下降 6.5 °C。11 km ~ 32 km 为同温层或平流层,一般飞机和有翼导弹就是在对流层和同温层内飞行,同温层内的大气温度在 11 km ~ 20 km 这一范围内保持为 216.7 K 不变,再往高去略有升高。超出 20 km 到 100 km 即进入临近空间,空气迅速稀薄,超过 100 km 到 200 km 被定义为亚轨道空间,大气变为近真空状态,而超过 200 km 则认为已经进入空间,飞行介质作真空处理。

2. 风场特性

制导飞行器在飞行过程中所处风场特性对飞行质量会产生较大影响。不同的发射条件下对应的风场特性是不同的。风的影响按照来流方向分为顺风、逆风和侧风三种,而特性可以用定常风和阵风来刻画。

阵风的特点是风速和风向均会发生剧烈的变化。阵风的量级和方向是完全不同的,它们是时间和空间的随机函数,在工程设计中,只能根据实测数据统计确定,并以此对阵风进行估值。阵风可以分为垂直阵风和水平阵风,实测证明,一般情况下,水平阵风的风速是垂直阵风的两倍。在对流层和平流层的下层,阵风速度随着高度增加是逐渐增大的。

1.2 精确制导飞行器

以目标和环境特性为前提,精确制导飞行器的定义即可明确。精确制导飞行器指的是通过制导控制技术的运用,能够按照符合环境特性的既定准则确定飞行路径,并对指定目标进行精确

打击的一种制导武器。考虑到现有的制导武器多以无人飞行器为主,所以精确制导飞行器也可以简单称为制导武器。与一般武器相比,制导武器有两个基本特征,一是具有能够毁伤目标的战斗部,二是这个战斗部的载体具有制导功能,能够自动捕获、识别和跟踪目标。

制导武器的灵魂是制导控制技术,自20世纪70年代以来,制导控制技术迅速发展,制导武器的作战能力得到了显著提升,严格地说,这个时候才真正进入了精确制导飞行器的时代。为了满足局部战争中的信息化作战需要,先后出现了激光制导炸弹、电视制导炸弹、飞航导弹等高精度的制导武器,并在数次局部战争中大量使用。在早期越南战争中使用率不到1%,海湾战争使用率为8%,科索沃战争使用率为40%,阿富汗战争使用率为70%,伊拉克战争使用率则在90%以上。目前,制导武器从局部战争走向全局战争,从战术需要走向战略需要,出现了距离更远、高度更高、速度更快的远程弹道导弹、动能弹、高超声速导弹等更先进的制导武器。可以看出,制导武器已成为现代战争中的攻防主力,大规模使用多种类型的制导武器是现代战争的重要特征。

制导武器类别众多,目前并无统一的分类标准,然而就飞行器来说,可以将制导武器大致分为空基制导武器、天基制导武器、临近空间制导武器这几类。飞航导弹、弹道导弹是导弹的两大基本类型,属于空基制导武器,它们出现得最早,开发的门类最为齐全,技术也是最为成熟的;而后面两种则是近些年来提出,尚处于验证阶段还未投入实战的新型制导武器,这些武器有别于传统的导弹,距离更远、高度更高、速度更快,普遍能够进入空间或空天往返飞行,具有跨大气层执行任务的能力,兼备航空器和航天器的飞行特性。本节分别对这几类制导飞行器进行简要介绍。

1.2.1 空基制导武器

空基制导武器主要指大气层内飞行的导弹武器。导弹是依靠自身动力装置推进,由制导控制系统导引、控制其飞行路线,并导向目标的现代武器,在制导武器中最具代表性,其历史悠久,门类齐全,功能强大,使用广泛。导弹问世已经将近一个世纪,有几十种类型和数百种型号,它集攻防和威慑于一身,不仅可作为战术性武器使用,还是重要的战略性武器,既可作为单兵种武器使用,又可在多兵种联合作战中综合运用。导弹武器以飞航导弹和弹道导弹最为典型,下面分别加以讨论。

1. 飞航导弹

(1) 飞航导弹特点

飞航导弹是一种以火箭发动机或喷气式发动机为动力,装有战斗部的战略与战术兼容的进攻性武器,它主要依靠翼面所产生的气动力与制导控制系统来支持自身质量和控制其飞行轨迹。飞航是指导弹的升力与重力、推力与阻力在大部分时间处于平衡状态,且以某一最经济或特定高度和速度持续平飞。根据发射平台和攻击目标的不同,飞航导弹可以分为如图1.1所示的类型。

飞航导弹主要用于攻击各类地面和水面目标,完成各种战术任务。其中,巡航导弹和反辐射导弹最为常见。巡航导弹作用距离较远,主要用于攻击敌方纵深高价值的目标;反辐射导弹则是对目标雷达电磁辐射进行跟踪,用于攻击敌方地面、舰载和机载雷达系统。

飞航导弹具有如下显著特点:①通用性强,战术与战略兼容。它不仅能从地面车辆和水面

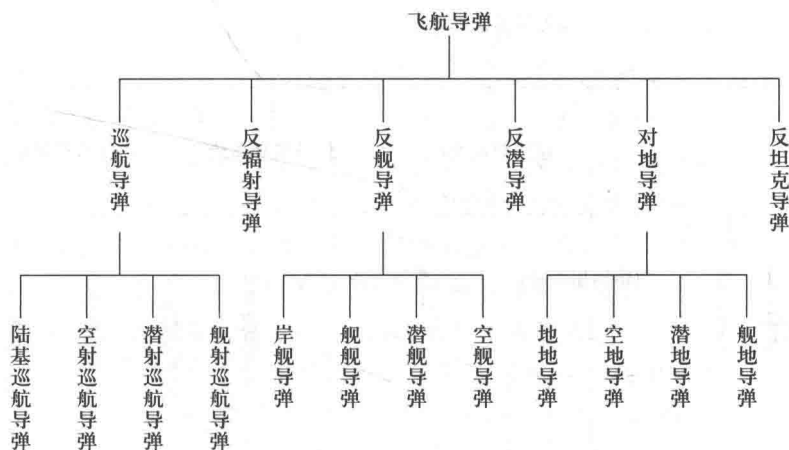


图 1.1 飞航导弹的分类

舰艇上发射,还可用飞机空射,用潜艇潜射,而且更换战斗部和导引头类型就可以对陆海各种点目标、面目标、固定目标、活动目标进行打击,既可进攻又可防守,既可战术攻防,又可战略威慑。②体积小、重量轻、机动灵活、部署隐蔽、生存力强,且采用隐身技术后可显著提高突防能力。③命中精度高、抗干扰能力强、摧毁威力大,采用先进的制导控制技术后还能够进一步提高命中精度,是一种性能理想的精确制导武器。④超低空突防能力强。这是由于飞航导弹普遍采用了一系列突防技术措施,如程控机动弹道、超低空地形跟踪与地形规避技术、超低空高速飞行技术和隐身技术等。⑤价格便宜,效费比高。防御飞航导弹所部署的防空设施花费通常在导弹本身的十倍以上。

应该指出,飞航导弹不能单独完成作战任务,它必须与支持系统(包括指控系统、任务规划系统和技术支援系统等)相配合构成一个完整的武器系统,才能完成作战任务,这一整套系统我们称之为飞航导弹武器系统。

(2) 飞航导弹武器系统

飞航导弹武器系统通常由飞航导弹、指挥控制系统、任务规划系统和技术支援系统四大部分组成,各部分构成如图 1.2 所示。

飞航导弹是飞航导弹武器系统的核心,用于对敌方战术或战略目标实施软、硬杀伤,完成各种作战使命。飞航导弹具有导弹的通用结构,由弹体、动力系统、制导控制系统、引战系统和电气系统组成。其中,制导控制系统包括导引系统和控制系统,是飞航导弹的中枢,用以稳定飞行并将导弹导向目标;引战系统主要由引信及战斗部组成,引信用于引爆战斗部从而摧毁目标;电气系统负责电源与信息传递,使得各设备间能够协同工作。

指挥控制系统在导弹上又称为火控系统,用于完成对目标信号系统的探测与通信,载体参数的测量与处理,大气参数的测量与处理,对导弹的射前检查,进行作战态势显示与决策,导弹射击参数计算与装载,并执行导弹的发射控制指令。指挥控制系统中的载体通用设备包括目标探测

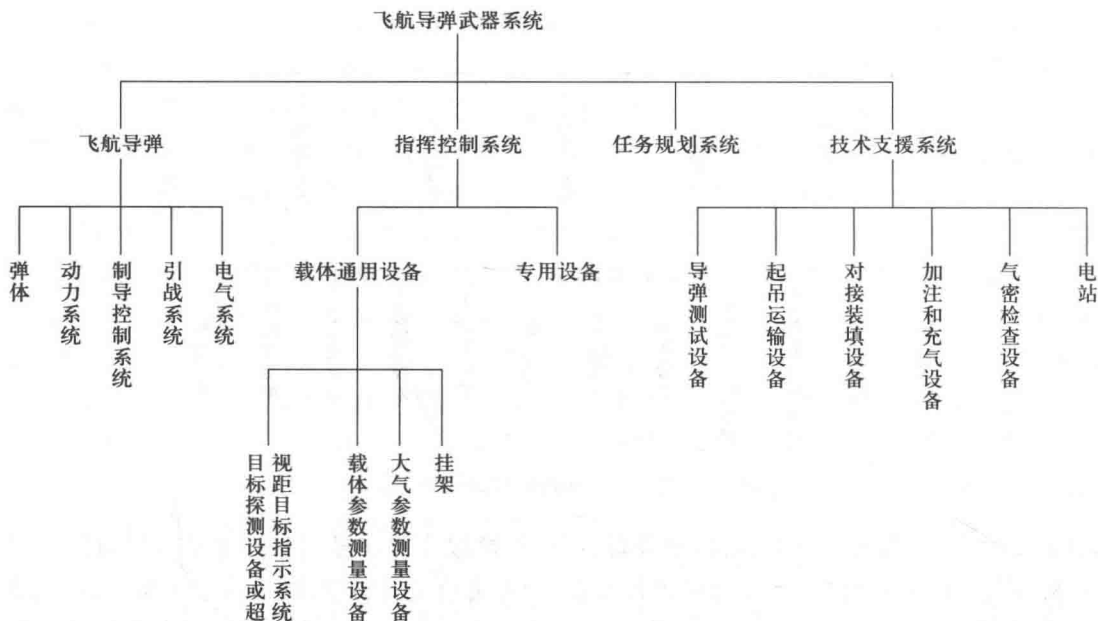


图 1.2 飞航导弹武器系统

设备、载体参数测量设备、大气参数测量设备、挂架等。其中,目标探测设备主要有雷达、声呐、光电测量仪等类型;载体参数测量设备包括载体惯导平台或陀螺稳定平台、高度表、计程仪、多普勒雷达等;大气参数测量设备有数据计算机、测风仪等。随着导弹射程的不断增大,目标探测设备还出现了超视距目标指示系统,用于探测跟踪并指示载体视距之外的目标。当然,超视距目标指示也可以由外部的舰载超视距雷达和预警机完成。

技术支援系统通常可分为机械和电气两类,包括导弹测试设备、起吊运输设备、对接装填设备、加注和充气设备、气密检查设备、电站等。对于机载导弹,还有机场运输设备、挂弹装填设备、检测设备等。技术支援系统主要用于完成导弹的起吊、运输转载、储存、维护、检测、供电、加注和充气、组装、装箱等技术准备,以保障导弹处于良好的技术状态和战备待发状态。

对远程作战的巡航导弹来说,还备有额外的任务规划系统。该系统由软硬件两部分构成。前者包括支撑软件、规划软件和数据库等;后者包括服务器、工作站、网络设备,以及其它外部设备。任务规划系统专门用于辅助巡航导弹执行作战任务,进行预先规划,通常情况下包括攻击规划和航迹规划。

2. 弹道导弹

(1) 弹道导弹特点

弹道导弹的直接战斗任务为摧毁给定的战略目标或战术目标,并由此分为战略弹道导弹和战术弹道导弹。战略弹道导弹包括洲际弹道导弹和中远程弹道导弹,用于攻击敌方城市、工业基地、军事基地、交通中心和大型舰队等战略目标。其中,洲际弹道导弹是战略弹道导弹的主体,作

战区域广、威力大,可摧毁一个城市甚至一个国家,因此是国家战略力量的象征和战略威慑的主要标志。战术弹道导弹则用于攻击敌方的战术目标,包括战役战术纵深的指挥所、军队、军事技术装备、铁道交通枢纽、机场、供应站等目标,作战距离较短,最大射程一般在 1000 km 以内。

和飞航导弹相比,弹道导弹具有如下特点:① 通常沿预先设计的弹道飞行,攻击固定目标。整个弹道可分为主动段和被动段,主动段是导弹在火箭发动机关机前的飞行轨迹,而被动段是从火箭发动机关机点到战斗部引爆点,以关机点获得的速度和弹道倾角所做惯性飞行轨迹。对于战略弹道导弹,被动段又可分为自由段和再入段,从弹头弹体分离到弹头再入大气层之前称为自由段,而再入大气层之后到引爆点称为再入段,起始高度通常为 70 ~ 100 km,如图 1.3 所示。为提高突防能力,先进的弹道导弹还会在被动段采取变轨技术。② 通常采用火箭发动机垂直发射方式,以缩短大气中的飞行距离,减少克服大气阻力和地心引力所需要的能量。③ 由于部分弹道处于稀薄大气层或大气层外,火箭发动机自身携带氧化剂和燃烧剂,不依赖大气层的氧气助燃。④ 战略弹道导弹一般采用多级火箭发动机,以减少发动机结构重量,从而可将更多的有效载荷送至目标区域。⑤ 导弹飞行控制通常采用直接改变推力矢量的方法来实现。

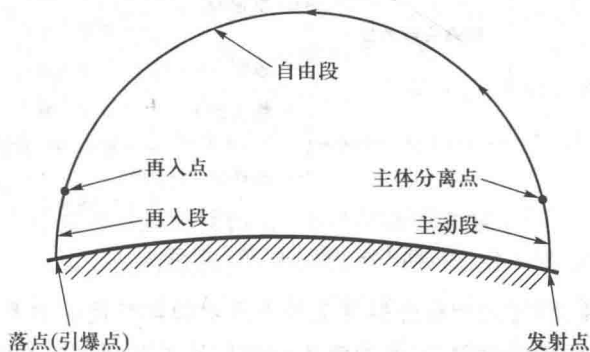


图 1.3 战略弹道导弹的飞行弹道

(2) 弹道导弹武器系统

弹道导弹武器系统是弹道导弹在从发射到完成任务的整个过程中所需要的设施设备和系统的总称。在通常情况下,弹道导弹武器系统主要由弹道导弹、地面设施设备和综合电子信息系统三部分组成。

弹道导弹是毁伤目标的综合战斗体,也是弹道导弹武器系统的核心。它由弹头、弹体、动力系统、制导控制系统和初始对准系统等基本部件构成。有的弹道导弹还装有遥测系统、安全系统等。

弹头是弹道导弹用于毁伤目标的专用装置和主要分系统,在整个弹道导弹武器系统中占有特别重要的地位。按照作战使命、装药、数量和弹道的不同,弹道导弹具有多种类型,常见的弹头如图 1.4 所示。

弹体是弹道导弹的承载和支撑构件,担负着安装和连接弹头、仪器设备、火箭发动机、承受地面运输、操作、发射和飞行中的载荷的任务。弹体的主要结构包括仪器舱、级间舱、尾舱、头罩和

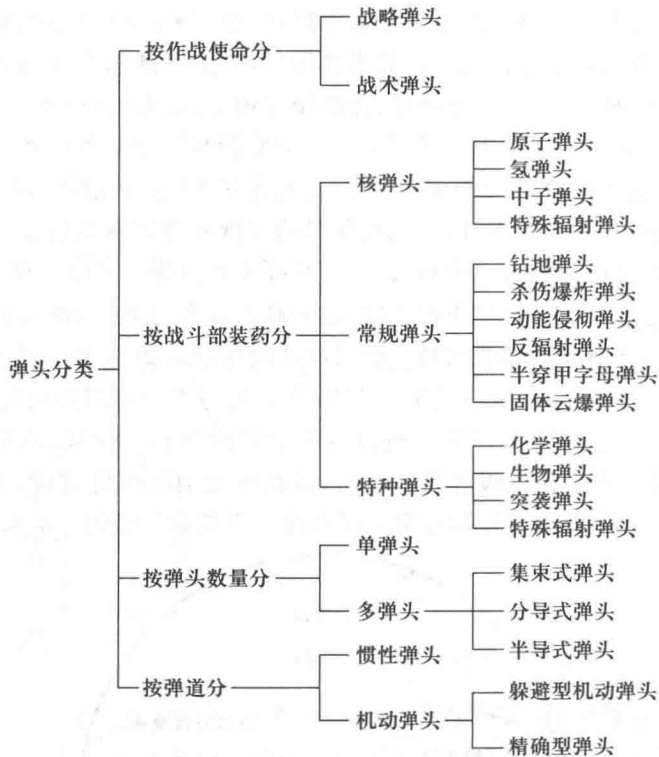


图 1.4 常见的弹头类型

尾罩等。重量轻、强度高、刚度大和良好的气动外形是对弹体结构的主要要求。

动力系统是导弹飞行的动力源,通常为液体或固体火箭发动机。当代弹道导弹大都采用固体火箭发动机,并使用复合推进剂。火箭发动机一般由燃烧室、喷管组件和安全点火装置等组成。其中,燃烧室是推进剂储存和燃烧的装置;喷管组件包括喷管和推力矢量控制组件,用于产生推力,改变推力方向,控制导弹的飞行姿态;安全点火装置用于安全点燃药柱,通常由点火装置、安全机构和远距离点火系统组成。为了减轻结构重量,提高战技性能,战略弹道导弹一般使用多级火箭发动机,而近程的战术弹道导弹常采用单级火箭发动机。

制导控制系统是弹道导弹的关键组成部分,用于可靠的发射,导引导弹克服各种干扰,按照既定规律自动飞向并命中目标。它包括地面测试系统、发射控制系统和飞行制导控制系统。其中,飞行制导控制系统是核心,是集导航、制导、飞行控制和弹上电路为一体的综合技术系统,也是本书的研究对象所在。本章将专门对其进行介绍。

初始对准系统用来确定位于发射点的导弹初始方位,并控制导弹对准目标。初始对准的目的在于使制导系统惯性测量装置的坐标系与发射坐标系的坐标轴方向保持一致或保持特定角度,为导航定位所用。目前,初始对准系统正朝着快速定位的自对准方向发展。

遥测系统由弹载测量系统、地面测量系统和航天测控站组成,一般用来测量弹道导弹在飞行

过程中的各系统工作参数和环境参数(如振动、冲击、噪声、压力、温度、脉冲、频率和时间等),完成采集、编码、传输;实施弹上系统的配供电控制和起始电平检查;进行导弹无线电信号接收、解调、实时处理飞行时序和其它测量参数等。战斗遥测系统还会判断导弹停火点各种参数是否正常,为分析打击效果提供依据。

安全系统包括外测安全系统和安全自毁系统。前者与地面测量及测控设备配合,完成导弹飞行的外弹道安全测量和地面无线安检任务,一旦发现故障,立即由地面终止导弹飞行。安全自毁系统通过各种自毁判据实施不同情况下的安全自毁,如超程自毁、程序自毁、核装置自毁、指令自毁等。

地面设施设备是导弹发射准备和实施发射的所有设施设备的总称,其规模相当庞大,是一个任务、功能和组成都十分复杂的系统,一般包括发射、运输、装填、转载、起竖、吊装、加注、配气配电、瞄准、定位、环境控制等设备。

地面设施设备的组成和特点与整个武器系统的作战使用性能密切相关,但主要取决于导弹发射方式,其方案论证及总体设计需要与射程、精度、威力、突防能力等战技指标进行并行设计和综合规划。保证弹道导弹武器系统的生存能力和突防能力是当前的重点。

在地面设施设备中,导弹发射系统是最为关键和重要的。为此,发射技术在 20 世纪末得到了快速发展,目前的弹道导弹发射已经具备随机机动发射能力和抗核冲击波能力,以及发射的高可靠性。为了提升弹道导弹生存能力和突防能力,未来弹道导弹的发射系统正朝着机动、快速、隐蔽、抗干扰、小型化、高精度方向发展。

综合电子信息系统又称指挥、控制、通信、计算机与情报系统,简称 C4I 系统,是目前各类武器平台系统及作战指挥控制体制的标准模式,通常由情报系统、指挥控制系统、通信系统和计算机系统等组成。计算机系统软硬件设备是系统的基础设施,而通信系统是中枢,连接着系统各单元,贯穿着作为核心的指控系统运转的全过程。各单元逻辑结构如图 1.5 所示。

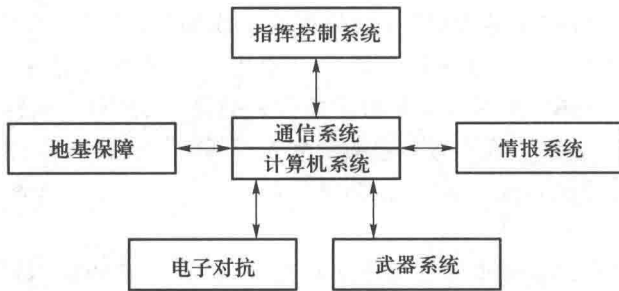


图 1.5 综合电子信息系统的逻辑结构

需要强调的是,战略弹道导弹武器系统作为一种政治和军事威慑手段,能够配合其它军事力量一起防止和遏制国际性战争的发生。为了达到威慑目的,保持世界军事格局平衡,我国和多数发达国家均建立了战略火箭军并长期处于战备状态,在任何环境下随时准备执行战略作战任务。在保持这种战略力量所需要的作战效能方面,战略火箭军的战略弹道导弹武器系统有着极关键