

高等学校教材

无线电制导技术

刘永坦 主编

729944

国防科技大学出版社

729944

V448/13

高等学校教材

无线电制导技术

刘永坦 主编

刘永坦 乔小林 编
邵树永 权太范

4K21/13



C0159023

国防科技大学出版社

5

内 容 简 介

本书是机械电子工业部审定的统编教材, 主要介绍无线电制导技术的基本原理与常用的制导方法以及几种典型的制导系统。全书共分九章: 绪论, 导弹飞行的力学原理, 导引方法, 无线电遥控制导, 无线电自动导引, 自主式制导系统, 光-电制导系统, 复合制导以及制导技术的发展。

本书除作为高校电子工程专业本科生专业课教材外, 对广大无线电工程技术人员亦不乏参考与启发作用。

无线电制导技术

刘永坦 主 编

责任编辑 钟 平

*

国防科技大学出版社 出版

湖南省新华书店发行

国防科技大学印刷厂印装

*

开本: 787×1092 1/16 印张: 13.5 字数: 303 千字
1989年5月第一版, 1989年5月第一次印刷 印数: 3000 册

ISBN 7-81024-053-6

TN·5 定价: 2.70 元

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全国高等学校、中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与审编工作的广大教师共同努力，有关出版社的紧密配合，从1978年至1985年，已编审、出版了两轮教材，正在陆续供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要，贯彻“努力提高教材质量，逐步实现教材多样化，增加不同品种、不同层次、不同学术观点、不同风格、不同改革试验的教材”的精神，我部所属的七个高等学校教材编审委员会和两个中等专业学校教材编审委员会，在总结前两轮教材工作的基础上，结合教育形势的发展和教学改革的需要，制订了1986~1990年的“七五”（第三轮）教材编审出版规划。列入规划的教材、实验教材、教学参考书等近400种选题。这批教材的评选推荐和编写工作由各编委会直接组织进行。

这批教材的书稿，是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐，由编审委员会（小组）评选择优产生出来的。广大编审者、各编审委员会和有关出版社为保证教材的出版和提高教材的质量，作出了不懈的努力。

限于水平和经验，这批教材的编审、出版工作还会有缺点和不足之处；希望使用教材的单位，广大教师和同学积极提出批评建议，共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

前 言

本教材系按电子工业部的工科电子类专业教材1986—1990年编审出版规划，由无线电技术与信息系统教材编审委员会电子系统编审小组征稿，推荐出版，责任编委朱德君。

本教材由哈尔滨工业大学刘永坦担任主编，中国人民解放军国防科学技术大学陆仲良和北京理工大学金振玉担任主审。

本课程的参考教学时数为40~60学时，其主要内容是论述无线电制导技术的基本原理与常用的各种制导系统。基本原理部分包括绪论，导弹飞行的力学原理，导引方法三章。制导系统部分的内容有无线电遥控制导、无线电自动导引、自主式制导系统，光电制导系统、复合制导五章。最后在第九章介绍了与制导技术进一步发展有关的内容。本书宗旨是介绍无线电制导系统的基本原理，但为便于理解无线电制导系统的工作过程，对电子工程专业类的学生所不熟悉的飞行力学知识也作了入门性的介绍；在常用制导系统部分对无线电遥控与自动导引作了较详细的介绍。鉴于光电复合制导的发展，本书对光电制导技术也作了一些介绍。使用本教材时应注意本教材的前续课是《雷达原理与系统》。

本教材由刘永坦编写第一、三章，乔小林编写第二、五、八章及第四章的一、六节，邵树永编写第六、七章及第四、九章的部分内容，权太范编写第九章的三、四节，刘永坦统编全稿。

由于编者水平有限，书中难免还存在一些缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

— 编 者 —

1988. 6

目 录

第一章 绪 论

§ 1-1 引言	1
§ 1-2 导弹的主要组成部分	2
§ 1-3 导弹的分类	3
§ 1-4 制导系统的初步概念和分类	5
§ 1-5 战术技术要求	6

第二章 导弹飞行的力学原理

§ 2-1 火箭的推力与速度	9
§ 2-2 导弹的空气动力及力矩	15
§ 2-3 导弹的控制飞行	26

第三章 导引方法

§ 3-1 飞行轨迹与分类	33
§ 3-2 两点法的一般运动方程式	34
§ 3-3 纯追踪法	36
§ 3-4 平行接近法	39
§ 3-5 比例导航法	40
§ 3-6 三点法	42
§ 3-7 飞行轨迹的图解法	49

第四章 无线电遥控制导

§ 4-1 无线电指令制导系统	51
§ 4-2 导弹与目标运动参数的观测	53
§ 4-3 制导指令的形成	56
§ 4-4 无线电指令传输信道	61
§ 4-5 波束制导	65
§ 4-6 法国“响尾蛇”地空导弹系统	71

第五章 无线电自动导引

§ 5-1 无线电自动导引系统的构成	77
§ 5-2 雷达自动导引头	79

§ 5-3 制导指令形成器	88
§ 5-4 被动式雷达自动导引	90
§ 5-5 半主动式雷达自动导引	98
§ 5-6 目标照射雷达	114
§ 5-7 TVM(经导弹) 制导	116
§ 5-8 主动式雷达自动导引	119
§ 5-9 目标的天线罩效应	125
§ 5-10 目标的多路径效应	127
§ 5-11 目标的角闪烁效应	130
§ 5-12 最小作用距离与控制死区	132

第六章 自主式制导系统

§ 6-1 惯性导航系统	140
§ 6-2 捷联式惯导系统	146
§ 6-3 多普勒导航系统	149
§ 6-4 地形匹配制导系统	150

第七章 光-电制导系统

§ 7-1 红外探测器	153
§ 7-2 红外导引头	156
§ 7-3 电视跟踪末制导	163

第八章 复合制导

§ 8-1 战术导弹的复合制导	168
§ 8-2 串联复合制导的轨迹衔接	170
§ 8-3 理想弹道轨迹的衔接	173
§ 8-4 实际弹道轨迹的衔接	175
§ 8-5 目标的再截获	180
§ 8-6 “飞鱼”导弹的复合制导	183
§ 8-7 “黄蜂”导弹的复合制导	186

第九章 制导技术的发展

§ 9-1 精密制导系统	190
§ 9-2 数字技术在制导中的应用	194
§ 9-3 最优导引规律	198
§ 9-4 制导系统的仿真技术	204

第一章 绪 论

§ 1-1 引 言

无线电电子学在导弹（广义地讲是无人驾驶飞行器）上的应用已形成了一门综合性的技术，称为无线电制导技术。该技术研究导弹无线电制导的理论与实现，涉及的技术领域及学科相当广泛。如果包括复合制导所涉及的光电制导技术，那么与无线电制导技术相关的主要技术领域与学科有雷达系统与技术、自动控制理论与技术、信号处理、信号检测与估值、图象处理、无线电导航、无线电通信、电视技术、激光技术、红外技术、微电子学、电子计算机、电子设备的结构与工艺等。

导弹制导系统的任务就是应用无线电电子技术（包括电视、激光、红外技术）的手段不断地判定目标与导弹的相对位置，按照预定的飞行轨迹纠正实际飞行路线的偏差，控制导弹飞行，最后击中敌对目标。

在国防现代化的建设中，导弹武器的研制与生产无疑是一件十分重要的工作。本书将对无线电制导技术的原理与技术进行研究。从内容上看，将侧重原理与技术概念而不是介绍详细的技术构成，所以，它是为高校电子工程类专业学生准备的一本专业课教材。

导弹是在火箭技术的基础上发展起来的，为此让我们首先回顾一下火箭及导弹发展的概略历程。

火箭的发明与火药的发明是分不开的。黑色火药是中国发明的，早在唐代就有了火药的配方，从宋朝开始就成功地把火箭武器应用到军事上。

火箭是在元朝时传至欧洲的，那时已是公元十三世纪了。在一个历史时期内，火箭武器与火炮是同时应用于军事上的。到十九世纪中叶，在它们的竞争中，火炮明显地跑到了前面。这是由于工业的发展，化工、机械工艺的成就，火炮由命中率低、射程近的滑膛炮发展成近代的尾部装弹的新型火炮。它们射程远，又由于有了来复出膛线，其命中率也大大提高了。这样，火箭技术相形见绌，处于低潮。但各国科学家对火箭的研究与试验一直在进行，液体火箭推进剂与固体火箭推进剂大约在二十世纪三十年代研制成功，加上电子技术、材料技术与空气动力学的成就又给火箭技术恢复了活力。德国人在二十世纪四十年代，大力发展了这一技术，制造出一系列新型火箭，其代表作就是飞航式导弹 V-1 和弹道式导弹 V-2，它们都曾经用来对英国进行空袭，他们还研制了一些“地—空”导弹系统。当然，这一切努力并不能挽救德国法西斯的覆灭。

二次世界大战结束后，美国与苏联两大集团很快形成了对峙的局面。他们花了大量的财力与人力发展导弹武器，这是与他们的全球政治战略相适应的。苏美战后在航天技术上都取得了令人瞩目的成就。众所周知，1957年苏联发射了第一颗人造地球卫星，六

十年代成功地发射了“东方号”和“联盟号”宇宙飞船，七十年代至八十年代成功地建立了“礼炮号”与第三代的“和平号”空间站，并加强了对空间运输系统与空间防御系统的研究。美国则在六十年代实现了登月，七十年代发射了大批实用卫星，向金星、火星、水星及太阳系外发出了宇宙探测器，八十年代成功地研制了航天飞机，现在正开展着 SDI（战略防御倡议——即以卫星、地面为基地的反导弹系统）的研究。

导弹武器技术是航天航空技术的一个重要分支。苏、美都已经历了两代导弹武器的发展过程，现在研制的都是属于第三代的设备了。

以防空导弹的制导设备为例，第一代导弹是以电子管为元件制造的。体积、重量、精度、抗干扰性能都比较差，这些导弹大部分都已退役了，如苏制“萨姆—1”，“萨姆—2”，美国的“奈基”导弹等。

第二代导弹在电子装备上已发展成以固态器件为主，在制导方式上较多地采用了复合制导技术，如法国的“响尾蛇”，美国的“霍克”改进型，“麻雀”，苏联的“萨姆—6”等。这些导弹系统在体积重量上已有所降低，在命中精度、机动性、抗干扰能力上都比第一代导弹有较大的提高，这些系统仍然是国际上的主战系统。

第三代防空导弹采用大规模集成电路及先进的数字信号处理技术，使导弹的性能获得较大提高。一些新的制导技术（如 TVM 制导）开始出现，如美国的“爱国者”等。

毫米波技术的进展，使精确制导系统开始付诸实施。如美国研制的从空中攻击坦克群的“黄蜂”导弹，采用工作于 94GHz 的自动寻的导引头，可以直接命中目标。

中国在航天技术上的成就也是举世皆知的，五十年代起步，从无到有地建立了一个较完整，较现代化的航天工业体系，培养了一批为航天事业奋斗的高质量的工程技术人才。

近年来，我国又取得了同步通信卫星、太平洋火箭发射与水下火箭发射的成功，这一切都标志着我国的航天技术已进入了一个新的时期。

我国的导弹工业从五十年代仿制开始，早已进入了自行设计的时期，我们正不断研制出各种类型的导弹系统，装备我军，为保卫祖国，保卫世界和平作出贡献。

§ 1-2 导弹的主要组成部分

导弹作为武器可以认为由四个主要部分组成：战斗部、发动机、制导系统和弹体。

一、战斗部系统

它的任务是摧毁目标。它是由战斗部、引信和保险装置三部分组成的。

战斗部：装填炸药，起到杀伤敌对目标的作用。其中有以爆炸的直接能量杀伤的爆炸式战斗部，有以爆炸时产生的聚能流去穿透装甲、工事的聚能战斗部，还有装有各种杀伤物（如破片、条状杆等）的杀伤战斗部。

引信与保险装置：战斗部的引爆时间、地点与条件都应有严格规定。引信就是保证这一要求实现的装置。引信又分触发引信与非触发引信两大类，在体积、重量与可靠性上有十分严格的要求。

保险装置则是保证在勤务操作中，战斗部不会爆炸。

二、发动机系统

它提供导弹运动的动力。导弹用的发动机都是喷气发动机，若是自带氧化剂的则称为火箭发动机；那些利用空气中的氧气作为氧化剂的则称为空气发动机。

火箭发动机又分为液体火箭发动机与固体火箭发动机两大类，由于它本身自带氧化剂与燃烧剂，它不仅可以在大气层中工作，还可以在太空中工作。

空气发动机由于只带燃烧剂，所以只能在稠密的大气层中工作。按空气增压的方式不同，又可分为涡轮式喷气发动机和冲压喷气发动机两种。

近几年来出现了火箭-冲压发动机，它基本上属于空气喷气发动机类型，是一种很有前途的动力装置。

三、制导系统

它的任务是引导导弹准确地击中目标。这一系统实际上是导弹导引系统与控制系统（稳定系统）的综合。其详细分类下面还要讲述，此处就从略了。

四、弹体

它把导弹的各部分连成一整体并要求其外表形成一个好的气动外形。弹体又分为弹身、弹翼和舵面几部分。

弹身，它容纳战斗部、制导设备、动力系统并连接翼与舵形成一整体。

弹翼，或提供升力以克服重力，使导弹作水平飞行（如对飞航式导弹）；或提供作曲线飞行所需之法向力（如地-空弹等）。

舵面，它是用来操纵导弹并使其作稳定飞行的必要部分。一般装有升降舵、方向舵和副翼。可控制导弹作俯仰、偏航和滚动动作。

§ 1-3 导弹的分类

导弹的分类方法很多，我们采用按发射地点和目标所在位置的分类方法，这样，就可分成四大类，它们是地-地、地-空、空-地、与空-空等系统。

一、地对地导弹

这是由‘地’面发射攻击‘地’面目标的导弹。‘地’有广义含义，可指陆地、水面、地下、水下等，细分为弹道式与飞航式两类。

弹道式导弹：是攻击不动的地面目标（如工业中心，铁路枢纽等）的导弹。从其弹道来看分成主动段、抛物弹道段与再入段。后两段都是被动段，因为发动机已不工作，靠惯性飞行。主动段用火箭发动机推进。

弹道式导弹一般是使用多级火箭推动的，在飞行过程中，它陆续地把用过的火箭抛去，因此，导弹的体积重量在不断地减少，最后只剩下导弹本体。

这种导弹一般都采用自主式制导体制。按射程不同也可细分为：近程（100～800km）、中程（800～3000km）、远程（3000～8000km）、洲际（8000km以上）弹道导弹。

飞航式导弹：它与飞机外形差不多，大部分时间均在大气层内作水平飞行，多采用空气喷气发动机，大部分是采用自主式制导系统的。还有不少飞航导弹上装有末制导系统，这样对准确地命中目标有很大的作用。这种导弹可以从不同的母体上发射，所以，往往需要加上辅助的火箭发动机作为发射的助推装置。

飞航式导弹的射程也可分为近、中、远程几种。

二、地对空导弹

它是从地面或海面发射攻击空中目标的导弹。空中的敌对目标可以是飞机及各种无人驾驶飞行器（如弹道导弹、飞航式导弹，航空炸弹、航空鱼雷等）。这种导弹大部分工作在大气层中，广泛采用空气喷气发动机作动力装置；在制导方式上采用遥控制导或遥控制导与自动寻的相结合的体制。

按攻击目标的高度又可分为中高空（射高为10～35km）、低空（射高为3～10km）和超低空（射高在3km以下）地对空导弹。

三、空对地导弹

它是从飞机上或直升机上发射攻击地面或海上目标的导弹，又可细分为：机载反坦克导弹、机载飞航式导弹、机载弹道式导弹、航空炸弹和航空鱼雷。

机载飞航式与弹道式导弹是从飞机上发射的，除了发射装置外，大部分特点与地面发射的导弹是相似的。

机载反坦克导弹的特点是有破甲战斗部，另外，其制导准确度也是较高的，因为要求直接命中。

航空炸弹与飞航式导弹相比是不装发动机，但有翼面与舵面，又分俯冲式与滑翔式两种，前者距离近且母机必需高飞至目标上空，而滑翔式虽然距离远但速度太慢，这种武器的缺点比较明显。

航空鱼雷与航空炸弹相似，是从飞机上发射攻击水面目标与潜艇的。可以直接从空中攻击，也有一种是先入水，后再攻击的。近代的航空鱼雷已有不少装上了发动机，可以远处实施攻击，并具有较高的速度。

四、空对空导弹

这种导弹是从飞机上发射用来攻击空中目标的。由于要从飞机上发射，这种导弹的体积与重量都比较小，这样，在作用距离上就出现了限制。

早期的空-空导弹大部分采用红外被动寻的方式，实行尾部攻击，但现在由于技术的发展已出现了全向攻击的新型导弹，在射程上也由于技术的进步而不断增加，出现了远程进攻的空-空型号。

空-空导弹的发展是非常迅速的，因为人们对战斗中的制空权是十分重视的。

§ 1-4 制导系统的初步概念和分类

导弹从发射到击中目标的整个过程都要依靠制导系统的工作，可以分成三个阶段：
(1) 发射段控制，(2) 飞行段控制，(3) 爆炸段控制。

一、发射段控制

它包括下述作用：

- (1) 发现敌对目标并精确地确定其坐标。
- (2) 确定发射瞬间及导弹的指向。
- (3) 发射前各项装置的起动与通讯联络。

第一种作用由雷达站完成，第二种作用由引导指挥站中的计算机完成，第三种作用则可借助有关的通信设备完成。

二、飞行段控制

在这一阶段，制导系统应控制并引导导弹按预定飞行路线飞行直至击中目标。要实现这一要求，就需要由制导系统不断地测量出目标与导弹的相对位置，并按照导引规律的要求及时纠正导弹的航向，沿着预定轨迹飞行。我们把确定目标与导弹相对位置并按导引规律发出控制信号的系统称为导引系统。把接收导引系统的控制信号，给出控制飞行的命令，保证飞行器稳定飞行的系统称作稳定系统。制导系统实际上是这两部分系统的综合。我们可以依据导引信号产生的方式把制导系统分成三大类，即自主式、遥控式和自动寻的式制导系统。下面作一简要说明。

自主式制导系统

其导引信号的产生并不依靠控制站或目标辐射的能量，而是依靠弹上制导设备本身。安装在导弹上的制导系统可以测量地球或宇宙空间的物理特性，从而得知导弹的飞行轨迹，并实现航迹控制。例如，广泛使用的惯性导航系统就是用加速度计测得飞行体的加速度后，一次积分得出速度，二次积分得出导弹的位移的，把这些测量值与程序装置里的预置航迹进行比较就可得知其偏差从而实现航迹的纠正直至命中目标。借助目标区附近已知地形和雷达地图进行制导的地图匹配制导系统也得到了应用。

这种系统的特点是不与目标和指挥站发生联系，因此不易受干扰。但由于飞行航迹是预先给定的，所以，它不能攻击活动目标，主要用于飞航式导弹与弹道式导弹，攻击的对象往往是地面设施。

遥控式制导系统

其主要特点是由制导站对导弹发出导引信号。一个全自动的制导站其工作过程是这样的：由制导站测出导弹和目标的相对位置，通过计算机计算出目标的预推位置。导弹的航迹与导引规律的差别，从而产生出导引信号。这一信号由制导站发送给导弹，控制导弹击中目标。人们又按遥控指令信号的形成特点把遥控式系统区分为指令制导系统（控制指令由制导站形成）与遥远导引系统（其控制指令在弹上形成，制导站仅提供导

引信号，如波束制导系统和无线电导航的无人飞行器等）。

遥控制导系统可用来攻击活动目标，这种系统由于站、弹、目标三点之间有密切联系，故受干扰的可能性也较大，在设计中必须给予充分的注意。

自动寻的式制导系统

利用目标辐射或反射的能量作为导引的信号源。弹上的设备则可感知这些能量，从而可以测定目标和导弹的相对位置并形成导引信号，引导导弹自动飞向目标。

这种系统可以用来攻击活动目标，若按信号能量的物理形态又可分为红外、电视、激光及雷达的自动寻的系统。若按信号产生的方式又可分为被动式、半主动式与主动式三大类。

被动寻的系统是利用目标辐射的红外线、可见光或无线电波工作的，导弹本身不需要辐射任何能量，因而这种系统的自保护性能好，不容易被目标发现，且设备重量轻，是一种很好的系统。得到最广泛应用的是红外被动寻的头，它普遍用于空-空、地-空及空-地导弹上。

半主动寻的系统是利用目标照射站的能量工作的，由目标照射站把能量辐射到目标上，并形成对目标的准确跟踪。目标反射的能量就被弹上的制导设备所接收，从而完成寻的。目前用的最广泛的是雷达半主动制导系统，由于照射雷达可以设置在地面或母机上，在弹上安装一接收设备，故具有作用距离远、弹上设备简单、重量尺寸小的突出优点。但由于照射站能源在整个拦击过程中必须配合导弹工作，所以，整个系统的机动性就受到限制，而且被干扰的可能性也大大增加了。

除了半主动雷达的体制外，半主动寻的激光制导系统也曾在越南战场上使用过。

主动寻的系统的照射源是置于弹上的，这样，需要增加一部大功率的设备，重量尺寸都要有所增加，但其突出优点是整个制导与飞行逼近过程都与制导站无关，因而作战上是有利的，是所谓‘打了不管’的系统。显然，由于导弹上载荷的限制，这种体制的作用距离要比半主动式的小不少。

实际上，在一部导弹上只采用一种制导方法有时很难完成预定任务，所以，必须适当组合上述三种制导系统，特别是对那些射程较远的导弹系统，例如初始段可能用自主式，中间段采用遥控制导，在接近目标时，可转入自动寻的制导系统，我们把这种工作模式称为复合制导系统。

三、爆炸控制段

当导弹飞向目标，到达战斗部威力区时，应立即起爆，完成击中目标的任务。如前所述，这是由引信系统完成的。

§ 1-5 战术技术要求

战术技术要求是进行导弹研制工作的原始依据，它是描述导弹完成预定战斗任务时，对其各方面性能的要求，包括：导弹的类别、目标的类别、命中率、发射条件、射程、射高、射速、战斗部威力区。制导系统的类型、尺寸、重量、可靠性、运输包装贮

存要求、操作性能等。它实际上是战术、技术、经济、使用、维护各方面要求的总和。

下面我们简单介绍一下对制导系统的战术技术要求。

一、命中准确度

它是用导弹落在目标附近时与目标的最小相对距离的允许最大值来度量的，它将受到各方面因素的制约，如制导系统导引精确度、战斗部性能以及目标型式与装甲防护能力等，它是与摧毁概率密切相关的。

二、可靠性

这是一项极为重要的指标。由于制导系统包含了大批部件，必须首先提高其组成元件的可靠性。采用复用技术减少分系统数目，提高集成度等，都能有效地提高整个系统的可靠性。

三、抗干扰性

在当前电子战发展到很高水平的年代，导弹研究人员对制导系统的设计就必须对提高其抗干扰的能力给予充分的重视。

四、作用距离

五、响应时间

指接到拦击命令到发出第一枚导弹的时间。这个时间越短越好，它与系统结构与技术的先进性又有十分密切关系。

最后，应该指出，战术技术要求的论证是一项十分复杂而又细致的工作，只有坚持严肃的科学态度，又善于从实际出发，认真地从全局而不是从局部出发解决一个又一个的具体矛盾，才能真正制定出性能优良、切实可行的战术技术要求。

思 考 题

1. 导弹的出现给战争带来的重大影响是什么？
2. 导弹由哪几个主要部分构成？它与火箭弹的主要区别是什么？
3. 按本书的分类方法，指出各类导弹作战方式及特点。
4. 制导系统是由哪两部分组成的？它们的作用是什么？
5. 战术导弹的主要战术指标是什么？

参 考 文 献

- [1] М. Максиков, Г. И. Горсонов, Радиоэлектронные системы самонаведения, радио и связь, 1982.
- [2] 武凌斯, 有翼导弹概论, 国防工业出版社, 1979.
- [3] A. Locke, Guidance, Van Norstrand Company, Inc. 1955.

第二章 导弹飞行的力学原理

从广义上来说，导弹实际上是一个“无人驾驶飞行器”，只不过是比普通的飞行器多了一个装炸药的战斗部，用以摧毁对方目标。作为可控飞行体——导弹，它具有一般飞行体的基本特征。

在大气层内飞行的导弹，是以空气动力为其飞行控制的主要依据的。因此，在大气层内飞行的导弹，如同飞机一样，具有翼及舵。有时，我们也把这类导弹统称为有翼导弹。大多数战术导弹都是有翼导弹，本书亦主要研究有翼导弹。为了使导弹制导规律的研究具有坚实的力学基础和清晰的物理概念，本章将用一定的篇幅来研究导弹飞行的空气动力学原理。

在大气层外飞行的导弹，如远程洲际导弹，则不需要弹翼及空气动力舵。这类导弹常采用火箭为其动力。这类导弹飞行轨迹的控制是依靠改变发动机喷焰的方向、姿态控制小火箭或者用燃气舵等方法来实现的。

有翼导弹除采用喷气发动机外，也常常采用火箭发动机，因为简单的火箭发动机造价低廉且可获得较高的飞行速度。所以火箭技术在导弹控制中占有很重要的地位。事实上，导弹也是在火箭的基础上发展起来的。为此本章先从火箭技术谈起；然后分析导弹在空气中飞行的力学原理；最后分析一下导弹的机动性能。

§ 2-1 火箭的推力与速度

一、直接反作用式发动机

根据牛顿作用与反作用力的力学定律，物体的运动必然发生如下的现象和规律：赋予物体一个方向的运动和加速度，总是与另一物体获得一个相反方向的运动和加速度相联系着的。

火箭的运动也是反作用运动，如图 2-1 所示。火箭从它的内部喷出高速燃气流，在

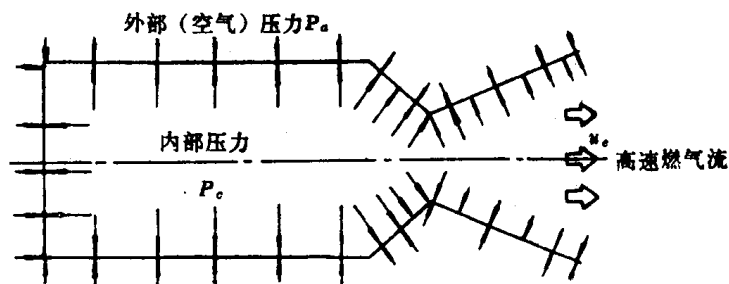


图 2-1 火箭反作用运动

这个燃气流的作用力推动下得到与燃气流相反方向的运动和加速度。显然，火箭运动时其相互作用的物体一个是火箭本身，另一个是从它内部喷出的燃气流，这个燃气流是火箭本身携带的推进剂燃烧产生的。由此可见，与火箭相互作用的物体来自其内部，火箭在运动时不需要借助于任何外界物体。我们把火箭这种反作用运动称为直接反作用运动，以区别于那种借助于外界物体（譬如划船借助于船外的水）的间接反作用运动。因此，我们也把推动火箭运动的火箭发动机称为直接反作用式发动机。除火箭发动机外，空气喷气发动机也是直接反作用式发动机。

二、火箭运动方程式

火箭在运动过程中，它的内部不断向外喷出高速燃气流，这种燃气流是火箭上所携带的推进剂燃烧后的产物。因此，随着推进剂不断消耗，火箭的质量在不断减少，所以，火箭是一个变质量物体。火箭的运动是变质量物体的运动。

火箭运动时，一方面有前进的速度 v ，另一方面推进剂燃烧后变成燃气，并以相对于火箭的速度 u_e 向后喷出。如果每秒钟喷出的燃气质量以 m 表示，则火箭的质量与时间的关系为

$$M = M_0 - \int_0^t m dt \quad (2-1)$$

式中， M ——火箭在某瞬时 t 的质量；

M_0 ——火箭在起始时的质量。

$m = -\frac{dM}{dt}$ ，由于火箭的质量是逐渐减少的，因而质量变化率 $\frac{dM}{dt}$ 为负值。

既然火箭的运动是变质量物体的运动，我们就不能直接应用常用的适用于定质量物体的运动方程式，而要从基本的力学原理来推导火箭的运动方程式。在研究这个问题时，如果我们把喷出的燃气质量也包括进来作为一个物系，这样，它就仍然为一个定质量物系的运动问题，并可以直接应用常用的物系的动量定理：任一时间 dt 内，物系的动量变化等于在该时间内外力作用在物系上的冲量。

设在任一瞬时 t ，物系（火箭系）的质量为 M ，速度为 v ，在 $t+dt$ 时，火箭系的质量分为两部分： $(M - mdt)$ 和 (mdt) 。这两部分质量的速度分别为 $\left(v + \frac{dv}{dt}dt\right)$ 和 $\left(v + \frac{dv}{dt}dt + u_e\right)$ 。其中 u_e 为火箭燃气的喷出速度。

dt 时间内火箭系的动量变化等于外力的冲量关系式如下

$$(M - mdt)\left(v + \frac{dv}{dt}dt\right) + mdt\left(v + \frac{dv}{dt}dt + u_e\right) - Mv = \Sigma F_i dt \quad (2-2)$$

将(2-2)式展开并略去二次微量，则得到

$$M \frac{dv}{dt} = -mu_e + \Sigma F_i = \frac{dM}{dt}u_e + \Sigma F_i \quad (2-3)$$