




导弹与航天技术概论

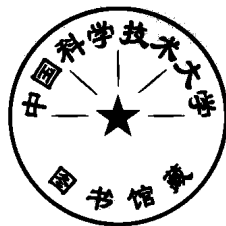
金永德等 编著



哈尔滨工业大学出版社

导弹与航天技术概论

金永德 崔乃刚 关英姿 编 著
齐乃明 李中郢 赵 钧



哈尔滨工业大学出版社
·哈尔滨·

内 容 简 介

本书介绍了导弹、运载火箭和航天器的组成及分类;动力装置;导弹的弹道及其制导原理;航天器的轨道及其控制原理;航天器的姿态动力学及姿态控制原理;战斗部和航天器有效载荷的分类及工作原理;导弹、运载火箭和航天器的外形和结构设计原理;航天器的应用。

本书可作为高等学校导弹和航天工程专业的教材,也可以作为相关专业的选修课教材,也可供从事导弹、航天事业的工程技术人员和相关专业人员参阅。

图书在版编目(CIP)数据

导弹与航天技术概论/金永德编著. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2002.8

ISBN 7-5603-1775-8

I. 导… II. 金… III. ①导弹—概论②航天工程—概论 IV. ①TJ76②V4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 055385 号

出版发行 哈尔滨工业大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区教化街 21 号 邮编 150006
传 真 0451-6414749
印 刷 地矿部黑龙江省测绘印制中心印刷厂
开 本 787×960 1/16 印张 18.5 字数 360 千字
版 次 2002 年 8 月第 1 版 2002 年 8 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 7-5603-1775-8/V·8
印 数 1~3 000
定 价 22.00 元

前 言

导弹与航天技术是以多门相关学科的成果为基础的综合性现代科学技术,它又不断地对相关学科提出新的要求而推动相关学科的发展。

导弹与航天技术的发展水平反映了一个国家的综合国力,正因为如此,国家投入了大量的人力、物力、财力发展导弹与航天技术。

经过几代人的努力,我国在导弹与航天技术领域内取得了显著的成绩,在世界上占有重要的地位。为了航天事业的发展,为了体现中华民族的实力,我们一代又一代航天人要持之以恒地努力奋进。基于以上理念我们编写了这本教材,为更多热爱航天的人提供一份学习的资料。

本教材以1991年编写、1998年修订的哈工大校内讲义《航天技术概论》为基础,根据20年本课程的教学体会,参考国内外新发表的相关资料及最新发展状况而编写。内容系统全面,是高校导弹与航天相关专业的专业基础课教材,也可作为其他非航天专业本科生及研究生的参考书。

本教材以导弹与航天技术有关的基本概念的论述为主,用基本公式及图示,加深对基本概念的理解,使学生牢固掌握导弹、航天技术的基本概念与基本理论。

导弹与航天技术由多门学科构成。本教材有助于专业人员全面了解导弹与航天技术,及其与相关专业的相互关系。

本教材分为两部分,第一篇为导弹技术、第二篇为航天技术。

参加本教材第一篇编写工作的有崔乃刚(第一、三章)、关英姿(第二章)、齐乃明(第四章)、李中郢(第五章)、赵钧(第六章)和金永德(第七章),第二篇由金永德编著。

由于作者的水平有限,难免存在不足之处,希望读者批评指正。

本教材编写过程中,参考了很多国内外文献资料和兄弟院校有关教材,在此对原作者表示衷心的感谢。

作 者

2002年3月

目 录

第一篇 导弹技术

第一章 绪 论	(1)
1.1 火箭和导弹的发展史	(1)
1.2 导弹的分类和组成	(4)
1.3 反作用飞行原理	(7)
第二章 动力装置	(10)
2.1 动力装置的分类	(10)
2.2 空气喷气发动机	(11)
2.3 化学火箭发动机	(15)
2.4 组合发动机	(30)
2.5 其他火箭发动机	(33)
第三章 导弹飞行力学基础	(38)
3.1 空气动力学基本知识	(38)
3.2 导弹飞行运动方程	(45)
3.3 导弹的机动性、稳定性和操纵性	(51)
3.4 导引规律	(53)
第四章 导弹的制导	(58)
4.1 概述	(58)
4.2 自主式制导系统	(60)
4.3 遥控式制导	(73)
4.4 自寻的式制导系统	(76)
4.5 复合制导	(77)
第五章 导弹的外形与结构	(79)
5.1 弹道式导弹	(79)

5.2	有翼导弹	(91)
5.3	导弹的结构设计程序	(103)
第六章	战斗部系统	(107)
6.1	概述	(107)
6.2	战斗部的工作原理	(108)
6.3	引信和保险装置	(118)
第七章	导弹、运载火箭的发射	(122)
7.1	概述	(122)
7.2	陆基发射及其发射装置	(124)
7.3	海基发射及其发射装置	(128)
7.4	空基发射及其发射装置	(129)

第二篇 航天技术

第八章	绪论	(131)
8.1	航天技术发展史	(131)
8.2	航天技术内容	(133)
8.3	航天器的分类	(135)
8.4	航天技术系统的特殊性	(136)
8.5	航天器的研制程序	(137)
8.6	航天器飞行环境	(138)
第九章	运载火箭	(143)
9.1	运载火箭的分类、组成及功用	(143)
9.2	运载火箭飞行轨道的测量与遥控	(145)
9.3	发射窗口	(147)
9.4	我国的运载火箭	(148)
9.5	国外主要运载火箭	(152)
9.6	运载火箭的捆绑	(159)
第十章	航天器的轨道	(161)
10.1	人造地球卫星发射	(161)
10.2	中心引力场中质点的运动	(167)

10.3	三个宇宙速度和地球静止轨道卫星发射速度	(170)
10.4	人造地球卫星轨道根数	(173)
10.5	轨道控制	(174)
10.6	星下点轨迹	(178)
10.7	轨道摄动	(181)
第十一章	航天器的姿态动力学与控制	(183)
11.1	姿态运动学	(183)
11.2	姿态动力学基本方程	(187)
11.3	几种姿态控制原理	(189)
第十二章	人造地球卫星结构	(195)
12.1	结构形式	(195)
12.2	对结构的主要要求	(195)
12.3	结构设计程序	(196)
12.4	结构分析	(196)
12.5	结构材料	(197)
12.6	结构试验	(198)
第十三章	航天器的温度控制	(199)
13.1	航天器的热环境	(199)
13.2	航天器的热能平衡	(200)
13.3	航天器的温度控制	(200)
13.4	热真空模拟实验	(203)
第十四章	航天器的遥测遥控及测控地面站	(204)
14.1	遥测	(204)
14.2	遥控	(206)
14.3	测轨原理	(207)
14.4	测控地面站	(210)
第十五章	航天器的有效载荷及其应用	(212)
15.1	遥感技术的基本原理	(212)
15.2	空间遥感仪器	(213)
15.3	空间遥感仪器的应用	(219)
15.4	航天武器系统	(221)

15.5	导航卫星	(222)
15.6	通信广播卫星	(224)
第十六章	航天器的返回	(231)
16.1	返回过程	(231)
16.2	返回型航天器的分类	(233)
16.3	着陆	(234)
16.4	防热结构	(235)
第十七章	载人航天器	(238)
17.1	概述	(238)
17.2	载人飞船	(238)
17.3	登月飞行	(246)
17.4	航天飞机	(248)
17.5	空间站	(254)
第十八章	空间科学与空间探测	(261)
18.1	概述	(261)
18.2	空间科学	(262)
18.3	空间探测	(265)
18.4	探测地外文明	(283)
附录	(285)
参考文献	(287)

第一篇 导弹技术

第一章 绪 论

自第二次世界大战德国首先研制并在战争中率先使用 V - I、V - II 导弹以来,经过 50 余年的发展,导弹已经成为种类繁多、用途广泛的现代化武器,是国家军事实力的重要标志之一,并在现代战争中发挥着越来越重要的作用。近代几场局部战争如美越战争、中东战争、马岛战争、海湾战争、科索沃战争及美国对阿富汗的军事打击充分体现了导弹武器在现代战争中的重要性。导弹武器已逐渐成为决定现代战争胜负的关键因素之一。

本章首先介绍火箭和导弹的发展史,并对导弹的组成和分类、反作用飞行原理等作详细介绍。

1.1 火箭和导弹的发展史

1.1.1 火箭和导弹

作为军事用途的飞行器,有飞机、火箭、导弹及各种军用卫星。飞机是一种有人或无人架驶的飞行器,而火箭和导弹是无人架驶的飞行器。下面就火箭和导弹的概念做简要说明。

火箭是依靠火箭发动机产生的喷气反作用力推进的一种无人驾驶飞行器。火箭的用途广泛,当它装有战斗部系统时,称为火箭武器。火箭也可用于发射卫星、空间站、载人飞船等各类航天器,称之为运载火箭,是目前的主要航天运载工具。还可应用火箭进行各种科学探测和试验,如生物火箭、探空火箭等。火箭可以是有控的,也可以是无控的,区别在于可控火箭上带有制导系统,可对火箭的运动进行控制,而无控的则与之相反。

导弹是依靠火箭发动机或航空喷气发动机产生的喷气反作用力推进的,本身带有制导系统和战斗部系统的一种飞行武器。制导系统的作用是保证导弹自动地飞向目标,并能较准确地到达目标附近或直接命中目标。在此条件下引爆战斗部,就可起到对目标的毁伤作用。

从火箭和导弹的定义可以看出,在含义上二者既有联系,又有显著的不同。图 1.1 清楚地表示了导弹和火箭的联系和区别。在交集部分,两个概念可以通用,如“洲际导弹”也可称为“洲际火箭”等。

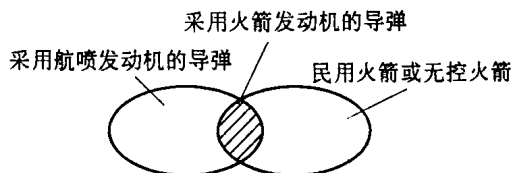


图 1.1 火箭和导弹的关系

1.1.2 火箭和导弹的发展史

1.1.2.1 火箭的发展史

中国是火箭的故乡,自从我国古代发明火药以来,火箭就开始了发展。从其出现开始就与战争有着密切的关系。在宋代初期(公元 969 年),冯义升和岳义方两人利用火药制成了世界上第一支火箭,将其作为武器用于宋灭南唐的战斗中。之后经过发展和传播,进入了阿拉伯和欧洲。这一时期的火箭从组成和原理上看都极其简单,属火箭发展的萌芽期。

公元 1896 年,俄国伟大的科学家齐奥尔科夫斯基发表了一篇重要的论文《用火箭征服宇宙》,他在这篇论文中详细阐述了火箭的基本原理,并对火箭赋与了新的用途——打开宇宙之门,即火箭是把各类卫星送入太空的运载工具。这标志着火箭技术进入了现代火箭技术发展时期。

进入 20 世纪,火箭技术由理论探索阶段向工程化迈进,1926 年美国科学家戈达德研制出了世界上第一枚液体推进剂火箭,进行了飞行试验并获得成功。特别值得一提的是在二战期间,德国在冯·布劳恩的领导下,研制出了首次在实战中使用的现代化火箭武器 V - II 导弹,标志着现代火箭技术已进入了实用化阶段,是火箭技术发展史上一个重要的里程碑。

二战结束后,前苏联、美国在德国 V - II 导弹技术的基础上大力发展自己的火箭技术,使火箭技术获得了突飞猛进的发展。除作为军事用途研制出多种火箭武器(导弹)外,还大力发展航天事业,将火箭作为开发太空的运载工具,终于在 1957 年 10 月 4 日,前苏联首先利用运载火箭把人类历史上第一颗人造地球卫星送入了太空。之后运载火箭与军用火箭逐渐分道扬镳,技术发展迅猛。到目前为止,美、俄、欧空局(ESA)、日本、中国及印度等国家已研制出 30 余种大、中、小型运载火箭,并将数千颗各类卫星、月球及行星探测

器,以及载人飞船和空间站等载人航天器送入太空,使航天事业获得了飞速的发展。世界各国已经和正在使用的运载火箭主要有:前苏联的“东方”、“闪电”、“联盟”、“质子”、“天顶”、“能源”,美国的“德尔他”、“宇宙神”、“大力神”、“土星”,欧空局的“阿里安”系列,日本的“M”系列和“H”系列及中国的“长征”系列运载火箭等。

进入 21 世纪后,为了适应人类空间活动不断增加、航天技术不断发展和国际商业竞争的需要,航天运载火箭仍面临着新的技术挑战。研制出运载能力系列化、低成本、高可靠性、无污染、高性能的一次使用运载工具及可重复使用运载工具已经是大势所趋,能够实现单级入轨和完全重复使用的航天运载工具将给航天运载技术带来革命性的变革。

1.1.2.2 导弹的发展史

自二战以来,经过 50 余年的发展历程,导弹已成为种类繁多、用途广泛的现代化武器。目前,世界上能自行研制导弹的国家有 20 多个,装备有自己研制或从别国购买导弹武器的国家有 100 余个。可以说,凡是有正规军的国家,几乎都装备了现代化导弹武器。

回顾导弹的发展历史,导弹的发展可大致划分为四个阶段:早期发展阶段、大规模发展阶段、质量进一步提高阶段和全面更新阶段。

1. 早期发展阶段(1945 ~ 20 世纪 50 年代初)

各国从第二次世界大战中德国使用 V - I、V - II 导弹所发挥的作战效果中认识到,导弹在未来的战争中将发挥重要作用。在二战结束后不久,美、前苏联、英、法、瑞士和瑞典等国家便开始启动或恢复原有的导弹研究工作。这一阶段的重点是对导弹的基础理论和关键技术开展了全面研究,并开始了新的导弹武器试验和研制工作。

2. 大规模发展阶段(20 世纪 50 ~ 60 年代初)

进入 20 世纪 50 年代,导弹开始了大规模发展时期,美、前苏联等国在早期发展阶段提出的各种导弹型号相继研制成功。现在所熟知的地地和潜地弹道式导弹、地(舰)空导弹、空空导弹、空地导弹、反舰导弹、反坦克导弹、反潜乃至反导弹导弹等,都是在这一阶段问世的。据资料统计,在这一阶段各国研制的各类导弹总数达 180 余种。

由于当时经济实力、科技工业水平及战争理论和作战思想的限制,这一阶段研制的导弹主要解决有无问题,导弹的作战性能还比较差。在此期间导弹已开始装备部队,导弹的种类和数量已达到相当规模,世界范围的导弹武器市场已开始形成。

3. 质量进一步提高阶段(20 世纪 60 ~ 70 年代初)

从 20 世纪 60 年代初开始,导弹进入了改进性能、提高质量的发展阶段。这一阶段改进的重点是:改进发动机性能,缩小导弹外形尺寸,减小结构质量,提高制导系统精度和抗干扰能力,提高各分系统可靠性和零部件的工艺质量,延长导弹的使用寿命和贮存期,降低成本,改善导弹的战术使用性能,使导弹向实用化方向迈进一大步。

在这一阶段,导弹技术的发展主要表现在两个方面,一是各类导弹都进行了多次改

进,性能有明显提高;二是一些国家根据战争需求,加强和补全了自己缺少的导弹类型。但是上述改进大多是在没有打破原有导弹基本方案的前提下进行的。因此,导弹性能提高的幅度是有限的。

4. 全面更新阶段(20世纪70年代以来)

国际形势的变化、战争的刺激、防御能力的增强、导弹需求量的增长都要求加快导弹更新换代的速度,要求各导弹生产国以更高性能的导弹投入国际竞争。

在此期间,导弹武器系统的设计思想有了新的发展,系统科学的理论和设计方法在导弹武器系统研制中发挥了重要作用。计算机技术已广泛应用于导弹武器研制的各个环节,模块化、多用途的设计思想在先进导弹的研制中有了充分体现,并广泛采用了“预埋改进技术”的研制方法。正是由于先进设计思想、设计方法的采用,在此期间先后出现了一些足以代表本类导弹发展方向的新型号,如弹道导弹中美国的“潘兴-Ⅱ”、“MX”和“侏儒”导弹,前苏联的“SS-20”导弹;巡航导弹中的美国“战斧”导弹;防空导弹中美国的“爱国者”,法国的“响尾蛇”,前苏联的“SA-12”、“S-300”导弹;空空导弹中美国的“不死鸟”导弹;反舰导弹中的法国“飞鱼”,美国的“捕鲸叉”系列导弹;反坦克导弹中的美国“海尔法”导弹等。它们的共同特点是:都考虑了复杂的电子对抗和火力对抗的作战环境,抗干扰能力显著增强;导弹具有高度的机动性,生存能力和杀伤能力、作战使用方便性不断提高,较集中地反映了导弹武器的发展方向。

进入20世纪90年代后,“精确打击”概念的提出对导弹武器的命中精度提出了更高的要求,性能先进的制导体制如毫米波制导、激光制导、红外成像制导、景像区域相关制导及GPS/惯导组合导航等技术得以进一步发展,并广泛应用于先进的导弹武器上。

1.2 导弹的分类和组成

1.2.1 导弹的分类

按不同的分类准则,导弹可分为不同的类型。

若按弹道特征分类,可分为弹道式导弹和飞航式导弹。

弹道式导弹是一种由地面垂直发射的远射程、大威力的进攻性武器,其弹道由主动段、自由飞行段和再入段组成(自由段和再入段又统称为被动段)。在主动段飞行阶段,导弹受到发动机推力和制导系统的作用,主动段飞行结束后,导弹飞出稠密大气层,实现弹头与弹体分离,转入自由飞行段。在此阶段导弹只受到地球引力的作用,按椭圆轨迹在稠密大气层外飞行,之后导弹再入大气层,在再入飞行段导弹受到强烈的气动加热,需要对弹头进行防热。早期的弹道式导弹在再入段不进行控制,因此落点精度及突防能力较差。

有些先进的弹道式导弹在再入弹头上增加了制导系统,进行再入控制,使其落点精度和突防能力都有较大提高。图 1.2 给出了弹道式导弹的一种典型弹道。

根据射程的不同,弹道式导弹可分为近程(100~1 000 km)、中程(1 000~4 000 km)、远程(4 000~8 000 km)和洲际(8 000~10 000 km 或以上)弹道式导弹。

飞航式导弹(西方通称为巡航导弹)是一种以火箭发动机或航空喷气发动机为动力,在大气层内飞行并有较长平飞段的自控飞行作战武器。“飞航”是指导弹在大气层内升力与重力、推力与阻力大致平衡的条件下,以某一较经济或特定的高度和速度飞行的方式。

飞航导弹的外形有些像飞机,飞行航迹大部分为等高、等速巡航飞行弹道。当从飞机上发射时,导弹先下滑后转入平飞;若从地面或舰艇上发射,导弹先助推爬升,然后转入平飞(自控段),捕捉到目标后自动导向目标(自导段),攻击陆上目标的现代巡航导弹还有地形回避/跟踪和末端机动飞行弹道,可大大提高突防能力。图 1.3 表示了一种飞航导弹的典型弹道。

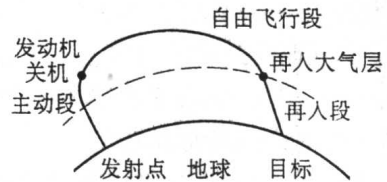


图 1.2 弹道式导弹的弹道

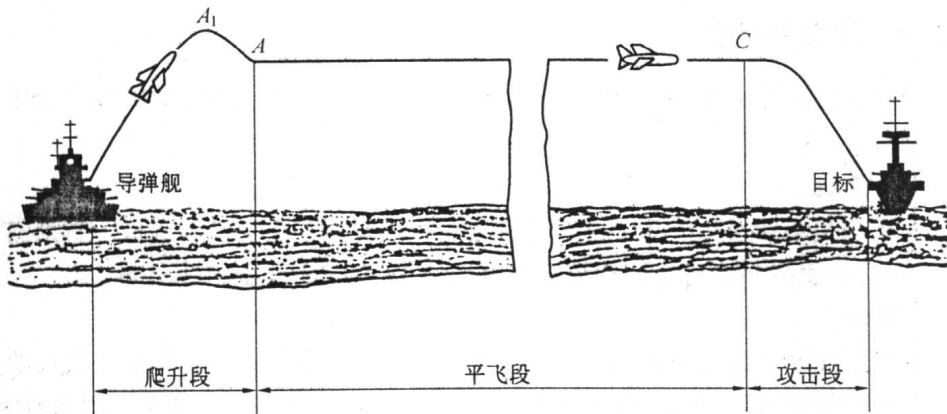


图 1.3 飞航导弹的典型弹道

若按发射点和目标的空间位置划分,导弹可分为地对空、空对地、空对空、地对地导弹。

地对空导弹又称防空导弹,是从地面或海上发射攻击空中目标的导弹,主要用于保卫城市、军事基地等重要设施、大型军舰等。攻击的目标包括飞机、导弹及军事卫星等。若攻击的目标是飞机,根据不同的作战空域,又可分为中高空(10~30 km)、低空(3~10 km)

和超低空(3 km 以下)的地对空导弹。

空对地导弹是由飞机上发射,攻击地上或海上目标的导弹,其打击的目标极其广泛,包括坦克及装甲车、车辆、军舰、人员、桥梁及指挥所等建筑、雷达等军事设施等地海一切目标,属进攻性压制武器。

空对空导弹是从飞机上发射用于攻击空中目标的导弹,打击的主要目标是各种军用飞机和巡航导弹,又称之为航空导弹。空对空导弹根据攻击能力的不同又可分为尾部攻击导弹和全向攻击导弹。尾部攻击导弹只能从目标后方的一个区域内对目标进行攻击,而全向攻击导弹可从目标的前方、后方全区域攻击目标。按射程的不同,又可分为近距离格斗弹和远程攻击弹。

地对地导弹是指从地上或海上发射、打击地上或海上目标的导弹。在这类导弹中,弹道式导弹、陆射(海射)巡航导弹占有较大比例。

若按导弹打击的目标类型不同,可分为反飞机导弹、反导弹导弹、反卫星导弹、反舰导弹、反辐射导弹(用于攻击雷达等电磁辐射源),反坦克导弹及攻击地面常规目标导弹。其中攻击地面常规目标导弹的导弹打击目标极广,包括地面上的一切有生力量和重要设施。

另外,导弹还可按作战中的作用划分为战略导弹、战术导弹;按使用的推进剂划分为液体导弹、固体导弹和固液导弹;按级数划分可分为单级导弹和多级导弹等。

1.2.2 导弹的组成

虽然导弹武器的类型不同,大小差异很大,但作为一种可控武器,它们都有以下四个主要组成部分。

1. 战斗部系统

战斗部系统是摧毁目标的主要执行者,由战斗部、引信和保险装置组成。针对打击目标特点的不同,为使战斗部对目标有较好的破坏效果,有不同类型的战斗部。

2. 动力系统

动力系统是使导弹运动并达到一定速度要求的动力来源,其主要部分是发动机。导弹上经常使用的发动机有固体或液体火箭发动机和各种航空喷气发动机。除发动机外,动力系统还包括发动机架、推进剂输送和管理系统(对液体火箭发动机系统而言)等附属系统。

3. 制导系统

制导系统是导引系统和控制系统的综合,其任务是控制导弹准确命中预定目标。制导系统可以全部装在导弹上,也可以一部分装在导弹上,而另一部分安装在地面的指挥站内。

4. 弹体结构

弹体结构的作用是将导弹的各个组成部分牢固地连接在一起,并使导弹有一个良好的气动外形,是导弹的承力结构。

后续章节将对上述四个分系统做详细介绍。

导弹除具有上述四个主要分系统外,特别是对于试验弹来说还包括遥测系统、外弹道测量系统及安全自毁系统等。遥测系统主要任务是将导弹飞行过程中各种信息下传到地面,用于故障分析与判断及试验的评定;外弹道测量系统主要任务是对导弹的飞行弹道进行监视和测量,也是判定故障和进行试验评定的重要依据;安全自毁系统主要任务是保证导弹飞行试验区内地面设施和人员的安全,即根据外弹道测量结果一旦预报出导弹将飞出事先确定的安全轨道,则发出自毁指令使导弹在空中自毁。

1.3 反作用飞行原理

导弹的飞行动力是发动机的推力,推力的主要部分是喷气反作用力。产生喷气反作用力的代价是导弹要不断地消耗燃料,导弹的质量不断减小,因此导弹是一个变质量的力学系统。

1.3.1 喷气反作用力的产生

图 1.4 表示一个变质量力学系统,图中 M 、 v 分别代表 t 时刻导弹的质量和飞行速度; ΔM 、 Δv 分别代表经 Δt 时间段后导弹所消耗的推进剂质量和获得的速度增量; u 为发动机燃气经喷管排出的喷气速度(相对于导弹)。

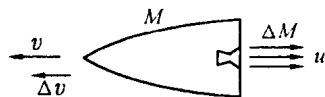


图 1.4 变质量力学系统

设导弹所受的外力的合力为 $\sum F_{\text{外}}$,则根据动量定理,有

$$(M - \Delta M)(v + \Delta v) + \Delta M(v - u) - Mv = \sum F_{\text{外}} \cdot \Delta t \quad (1.1)$$

忽略上式中的 $\Delta M \cdot \Delta v$,并求极限,有

$$M \frac{dv}{dt} = \dot{m}u + \sum F_{\text{外}} \quad (1.2)$$

其中, $\dot{m} = -\frac{\Delta M}{\Delta t}$ 代表推进剂的秒消耗量。

式(1.2)称为密歇尔斯基公式, $\dot{m}u$ 称为喷气反作用力,它与推进剂的秒消耗量及喷气速度成正比。要想获得较大的喷气反作用力,可通过提高发动机喷气速度和增加推进剂秒消耗量来实现。喷气反作用力是发动机推力的主要部分,一般称之为动推力,大约占总推力的 90% 以上。

1.3.2 火箭的理想速度公式

设火箭的初始速度为零,并假设火箭只受发动机推力(喷气反作用力)的作用,当 t_K 时刻发动机停止工作时(发动机关机点)火箭的质量为 M_K ,速度为 v_K ,火箭起飞时速度为零,质量为 M_0 。

由于假设了火箭在飞行过程中只受到喷气反作用力的作用,于是 $\sum F_{\text{外}} = 0$,则式(1.2)可表示为

$$M \frac{dv}{dt} = \dot{m} u \quad (1.3)$$

而 $\dot{m} = -\frac{dM}{dt}$,则有

$$dv = -\frac{1}{M} \cdot u dM \quad (1.4)$$

两边同时积分,有

$$\int_0^{v_K} dv = -u \int_{M_0}^{M_K} \frac{1}{M} dM \quad (1.5)$$

$$v_K = u \ln \frac{M_0}{M_K} = u \ln \left(1 + \frac{M_P}{M_K} \right) \quad (1.6)$$

M_P 为推进剂质量, $M_0 = M_P + M_K$ 。

式(1.6)为火箭理想速度公式,又称为齐奥尔科夫斯基公式。从式中可以看出,发动机关机时火箭所能达到的速度与发动机的喷气速度成正比,与火箭的发动机关火时刻的质量 M_K 成反比,如果喷气速度越大,发动机关机时火箭的结构质量越小(在带有同样多推进剂条件下),则火箭所能达到的速度越大。因此,提高火箭的飞行速度有两个途径,一是提高火箭发动机产生的燃气流排出速度,选用高能推进剂,即提高火箭发动机的性能;二是尽可能减轻火箭发动机关机点火箭的质量,尽量增加所带推进剂的质量。

1.3.3 多级火箭的概念

人造地球卫星是由运载火箭送入轨道的,要想用运载火箭发射人造地球卫星的条件是最低把人造地球卫星加速到第一宇宙速度(7.91 km/s)。而由于技术和工艺加工水平的限制,单级火箭是很难达到这一速度的,即实现单级入轨是极其困难的。

为了实现人类宇宙航行的宿愿,俄国伟大的科学家齐奥尔科夫斯基于1903~1914年间提出了多级火箭的概念,正是由于他的多级火箭理论和后来技术的工程实现,打开了人类通向宇宙的大门。多级火箭的技术出发点是减轻火箭结构质量,达到提高火箭速度的目的。多级火箭是由几级独立推进的火箭组成,每级火箭独立工作。当第一级工作时,其发动

机产生的推力使整个火箭加速飞行,第一级发动机推进剂燃烧结束时,火箭达到速度 v_1 。同时,第一级火箭自行脱落以降低结构质量,第二级火箭发动机点火开始工作,火箭继续加速至 v_2 。这样继续下去,火箭的飞行速度不断增加,直到达到第一宇宙速度,将有效载荷送入预定的宇宙航行轨道为止。如果是 n 级火箭,最终的速度为

$$v = \sum_{i=1}^n v_i = \sum_{i=1}^n u_i \ln \frac{M_{0i}}{M_{Ki}} \quad (1.7)$$

其中, u_i 为第 i 级火箭发动机的有效喷气速度; M_{0i} 为第 i 级火箭的起飞质量; M_{Ki} 为第 i 级火箭的发动机停火时刻的质量。

当然,随着火箭级数的增加,火箭系统要变得更为复杂,可靠性下降,所以火箭级数不宜太多。目前的运载火箭多为 2 ~ 4 级。用于发射载人航天器的运载火箭对可靠性要求更高,一般采用两级。除发射阿波罗登月飞船的土星 5 号采用三级之外,世界上载人航天器的运载火箭都是二级火箭。

随着科学技术的进步,新型高性能火箭发动机和质量更轻的新型火箭结构的问世,将给现代运载火箭带来革命性的变革,用单级运载火箭发射人造卫星、空间探测器和载人航天器终究会成为现实。美国已进行了以火箭发动机为动力的单级入轨飞行器 X - 33 的飞行试验并取得了一定的进展,预示着实现单级入轨的愿望已为期不远。