



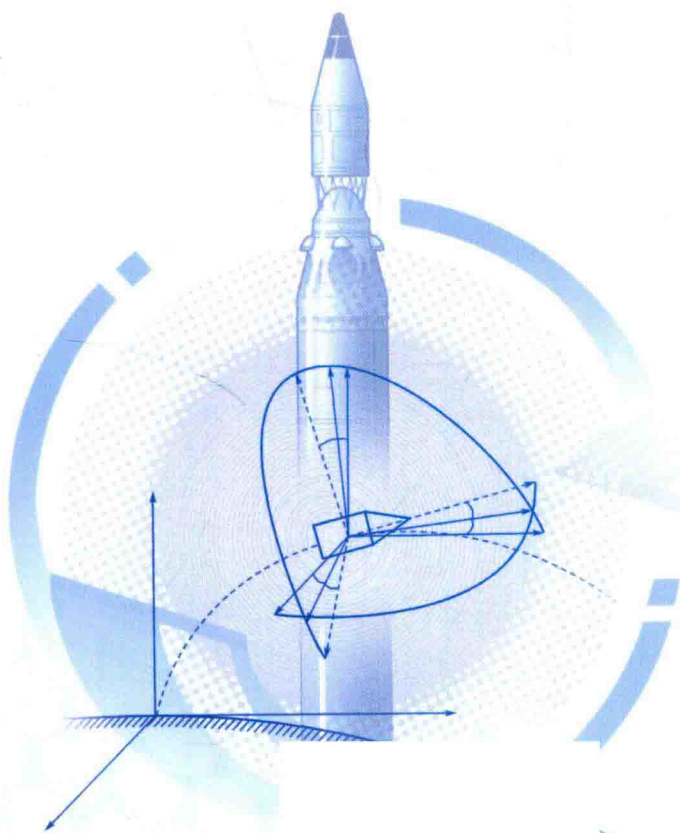
普通高等教育“十三五”规划教材

# 导弹控制原理

主编 陈 坚

编者 廖守亿 刘志国 张金生

杨艳丽 王 蜂



西安交通大学出版社  
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS



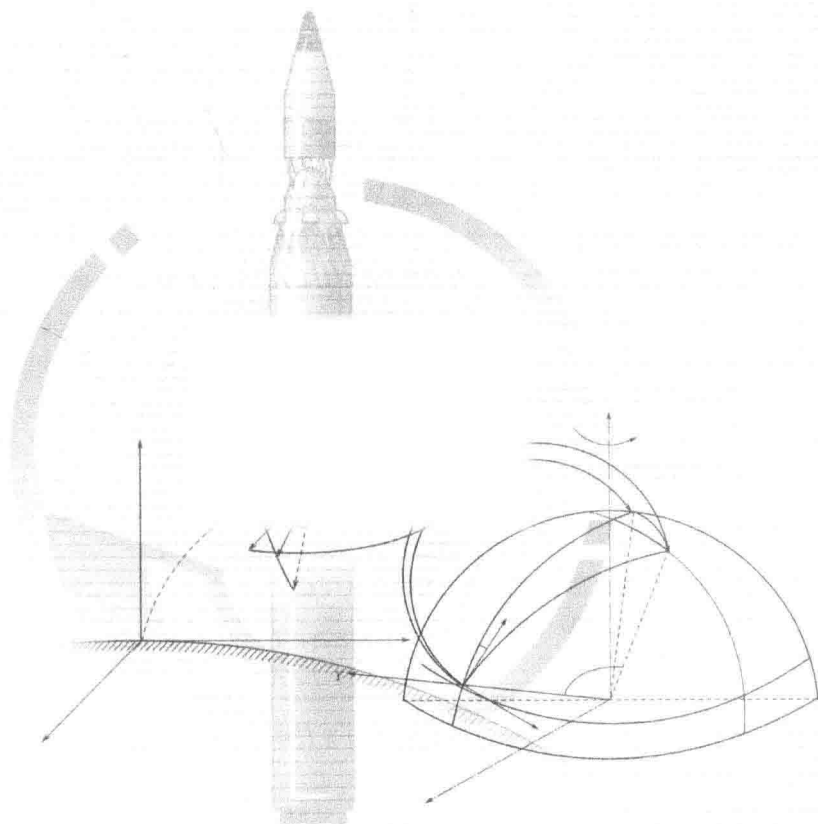
普通高等教育“十三五”规划教材

# 导弹控制原理

主编 陈 坚

编者 廖守亿 刘志国 张金生

杨艳丽 王 蜂



西安交通大学出版社  
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

---

图书在版编目(CIP)数据

导弹控制原理/陈坚主编;廖守亿等编. —西安:西安交通大学出版社,

2015.9

ISBN 978-7-5605-7939-9

I. ①导… II. ①陈… ②廖… III. ①导弹控制 IV. ①TJ765

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 218191 号

---

书 名 导弹控制原理  
主 编 陈 坚  
编 者 廖守亿 刘志国 张金生 杨艳丽 王 蜂  
责任编辑 屈晓燕 田 华

---

出版发行 西安交通大学出版社  
(西安市兴庆南路 10 号 邮政编码 710049)  
网 址 <http://www.xjtupress.com>  
电 话 (029)82668357 82667874(发行中心)  
(029)82668315(总编办)  
传 真 (029)82668280  
印 刷 虎彩印艺股份有限公司

---

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 12.75 字数 306 千字  
版次印次 2016 年 6 月第 1 版 2016 年 6 月第 1 次印刷  
书 号 ISBN 978-7-5605-7939-9/TJ·2  
定 价 26.00 元

---

读者购书、书店添货、如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。

订购热线:(029)82665248 (029)82665249

投稿热线:(029)82669097 QQ:8377981

读者信箱:lg\_book@163.com

版权所有 侵权必究

# 前 言

现代战争是高技术战争,而精确制导武器特别是导弹是决定战争胜负的关键因素。导弹武器系统是复杂工程系统,其中导弹控制系统是导弹武器系统的关键系统,而导弹控制原理是导弹控制系统的核心问题,是保证导弹按照预定轨迹稳定准确命中目标从而完成战斗任务的最根本的技术措施。它是在飞行力学、自动控制原理和计算机技术的基础上发展起来的。近年来,先进导航、精确末制导技术已经开始运用到弹道导弹上,成为了弹道导弹的发展方向。

本书主要以地地弹道导弹的主动段控制为主,兼顾了末段的制导控制;同时根据导弹武器作战流程,导弹的控制又分为地面测试发射控制和弹上控制,以弹上控制为主。弹上控制依据自动控制原理分为被控对象(导弹动力学与运动学)、控制器(弹上控制系统)和控制原理三部分,其中以控制原理为主。本教材共分6章,对弹道导弹的弹上控制系统、控制原理以及地面测试发射控制原理进行了介绍,其中第1章为绪论,主要介绍被控对象所涉及的理论基础;第2章介绍弹上控制系统;第3章和第4章介绍导弹弹上控制原理,分为质心控制原理(制导原理,第3章)和绕质心控制原理(姿态控制原理,第4章);第5章介绍了末制导原理;第6章介绍地面测试发射控制原理。

本书是在作者长期从事导弹控制系统原理与分析多年教学科研工作的基础上编写而成的,其中第1、2、6章及附录由陈坚编写,第3章由廖守亿编写,第4章由刘志国编写,第5章由廖守亿、张金生编写,杨艳丽、王峰参与编写了第1、2章部分内容。全书由陈坚负责总筹划,廖守亿统稿和审校,杨艳丽绘制了插图并参与了审校工作。

本书大量引用了国内外研究成果,在此对引用文献的作者表示感谢。

由于作者水平有限,加之时间仓促,书中难免有不妥和考虑不全面的地方,恳请读者批评指正。

作者

2016年1月

# 目 录

第 1 章 导弹控制理论基础	(1)
1.1 导弹控制飞行的任务和特点	(1)
1.1.1 导弹控制飞行的任务	(1)
1.1.2 导弹控制飞行的特点	(3)
1.2 导弹飞行运动及弹道	(7)
1.2.1 导弹刚体运动	(7)
1.2.2 导弹弹体弹性振动	(9)
1.2.3 导弹液体晃动	(10)
1.2.4 导弹的复合运动	(10)
1.2.5 导弹飞行弹道	(11)
1.3 导弹运动常用坐标系及力学基础	(15)
1.3.1 导弹运动分析的常用坐标系	(15)
1.3.2 导弹运动所受的力	(19)
1.3.3 导弹运动所受的力矩	(31)
1.4 导弹运动模型	(34)
1.4.1 变质量体运动模型	(34)
1.4.2 导弹刚体质心运动模型	(36)
1.4.3 导弹刚体绕质心运动模型	(38)
1.4.4 导弹弹性振动运动模型	(39)
1.4.5 导弹液体晃动模型	(41)
1.4.6 导弹飞行复合运动模型	(42)
1.5 导弹飞行控制原理	(44)
1.5.1 导弹控制飞行的基本原理	(44)
1.5.2 导弹的稳定性和操纵性	(45)
1.5.3 导弹的机动性和过载	(46)
思考题	(46)
第 2 章 导弹控制系统概述	(47)
2.1 导弹控制系统的基本组成和特点	(47)
2.1.1 导弹控制系统的基本组成	(47)
2.1.2 导弹控制系统的特点	(49)
2.2 导弹飞行控制系统	(50)
2.2.1 飞行控制系统基本原理	(50)

2.2.2	制导系统 .....	(53)
2.2.3	姿态控制系统 .....	(55)
2.3	电源和时序配电系统 .....	(60)
2.3.1	电源系统 .....	(61)
2.3.2	时序配电系统 .....	(62)
2.4	导弹安全自毁系统 .....	(64)
2.4.1	安全自毁系统的任务 .....	(64)
2.4.2	安全自毁系统的组成 .....	(64)
2.4.3	安全自毁系统工作原理 .....	(64)
	思考题 .....	(67)
<b>第3章</b>	<b>导弹制导原理 .....</b>	<b>(68)</b>
3.1	概述 .....	(68)
3.1.1	弹道导弹制导 .....	(68)
3.1.2	弹道导弹落点偏差 .....	(70)
3.1.3	弹道导弹制导的任务 .....	(73)
3.2	导弹质心运动信息的获取 .....	(73)
3.2.1	利用惯性系统获取导弹质心运动信息 .....	(73)
3.2.2	利用无线电获取导弹质心运动信息 .....	(73)
3.2.3	利用天文导航获取导弹质心运动信息 .....	(74)
3.2.4	复合方式获取导弹质心运动信息 .....	(75)
3.3	弹道导弹摄动制导 .....	(77)
3.3.1	弹道导弹摄动制导原理 .....	(77)
3.3.2	位置捷联惯性制导方案 .....	(82)
3.3.3	速率捷联惯性制导方案 .....	(86)
3.3.4	惯性平台制导方案 .....	(88)
3.4	弹道导弹显式制导原理 .....	(91)
3.4.1	显式制导基本原理 .....	(92)
3.4.2	弹道导弹显式制导方法 .....	(93)
3.5	弹道导弹精度分析 .....	(96)
3.5.1	制导技术发展过程和水平 .....	(96)
3.5.2	导弹的精度 .....	(98)
3.5.3	制导误差 .....	(100)
3.5.4	提高导弹命中精度的措施 .....	(103)
	思考题 .....	(104)
<b>第4章</b>	<b>导弹姿态控制原理 .....</b>	<b>(105)</b>
4.1	导弹绕质心运动信息的获取 .....	(105)
4.1.1	导弹绕质心运动的信息 .....	(105)
4.1.2	利用惯性测量获取导弹绕质心运动信息 .....	(105)

4.1.3	利用天文测量获取导弹绕质心运动信息 .....	(108)
4.2	导弹姿态控制方法 .....	(109)
4.2.1	导弹姿态控制指标 .....	(110)
4.2.2	导弹姿态控制的特点 .....	(112)
4.2.3	姿态控制系统模型及其分析 .....	(114)
4.2.4	导弹姿态运动控制指令生成 .....	(121)
4.3	先进控制理论在姿态控制设计中的应用 .....	(123)
4.3.1	二次型性能指标最优姿态控制系统设计 .....	(124)
4.3.2	时间最优姿态控制系统设计 .....	(125)
	思考题 .....	(126)
<b>第5章</b>	<b>导弹末制导原理</b> .....	(127)
5.1	自寻的制导原理 .....	(127)
5.1.1	寻的制导导引律 .....	(127)
5.1.2	自寻的制导分类 .....	(130)
5.2	末制导系统与导引头原理 .....	(132)
5.2.1	末制导系统 .....	(132)
5.2.2	导引头 .....	(132)
5.2.3	寻的制导回路 .....	(140)
5.2.4	脱靶量计算 .....	(141)
5.3	红外成像制导原理 .....	(142)
5.4	激光制导原理 .....	(144)
5.4.1	激光半主动制导技术 .....	(144)
5.4.2	激光驾束制导 .....	(149)
5.4.3	激光指令制导 .....	(150)
5.4.4	激光主动成像制导 .....	(150)
5.5	雷达制导原理 .....	(153)
	思考题 .....	(154)
<b>第6章</b>	<b>导弹测试与发射控制原理</b> .....	(155)
6.1	导弹测试与发射控制系统 .....	(155)
6.1.1	测发控系统的任务 .....	(155)
6.1.2	测发控系统的组成 .....	(155)
6.1.3	测发控系统的特点 .....	(158)
6.2	导弹测试与发射控制的实施 .....	(158)
6.2.1	导弹控制系统测试 .....	(159)
6.2.2	导弹发射控制 .....	(166)
6.3	导弹测试与发射控制方案及总线技术 .....	(171)
6.3.1	导弹测发控方案 .....	(171)
6.3.2	导弹测发控系统总线技术 .....	(172)

6.4 导弹测试与发射控制技术的发展 .....	(174)
6.4.1 导弹测发控技术发展历程 .....	(174)
6.4.2 导弹测发控技术发展趋势 .....	(176)
6.4.3 导弹测试与发射的关键技术 .....	(176)
6.4.4 新型测发控技术的应用 .....	(177)
思考题 .....	(178)
<b>附录 坐标系之间的转换</b> .....	(179)
1. 发射坐标系与弹体坐标系之间的关系 .....	(179)
2. 发射坐标系与速度坐标系之间的关系 .....	(182)
3. 弹体坐标系与速度坐标系之间的关系 .....	(184)
4. 速度坐标系与轨迹坐标系之间的关系 .....	(185)
5. 发射坐标系与轨迹坐标系之间的关系 .....	(186)
6. 弹体坐标系与轨迹坐标系之间的关系 .....	(187)
7. 惯性坐标系与发射坐标系之间的关系 .....	(187)
8. 惯性坐标系与弹体坐标系之间的关系 .....	(191)
9. 地心直角坐标系与发射坐标系之间的关系 .....	(193)
<b>参考文献</b> .....	(196)



# 第 1 章 导弹控制理论基础

导弹是依靠自身能量推进、由控制系统控制其飞行轨迹,将弹头导向并毁伤目标的武器。从应用的角度来讲,导弹的控制包括导弹在地面的测试控制和发射控制,以及导弹在空中的飞行控制。其中,导弹的飞行控制是由导弹弹上控制系统控制导弹的飞行运动,以完成其飞行任务,这是导弹控制的核心。在本教材范围内,如无特别说明,则“导弹控制系统”专指导弹弹上控制系统。

导弹飞行控制的理论基础分为两部分:一是导弹控制系统理论,包括导弹控制系统的设计、分析和综合理论,以及控制系统组成和工作理论,即以自动控制理论为基础的基本原理,可以统称为“飞行控制原理”;二是导弹有控飞行运动理论,包括导弹空间运动理论和导弹飞行弹道理论,可以统称为“有控飞行原理”。很显然,第一部分理论研究的是导弹控制系统,第二部分理论研究的是导弹控制系统的被控对象。

本章以第二部分“有控飞行”理论为研究对象,以导弹的飞行任务为主线,从导弹控制系统的被控对象——导弹空间运动出发,以定性分析为主,辅以简单的定量表达,建立起导弹飞行运动的数学模型;而对于第一部分“飞行控制”理论,将在后续章节中介绍。

## 1.1 导弹控制飞行的任务和特点

对于导弹控制的任务可以从多个层次去理解,本节以导弹武器、导弹飞行和导弹控制飞行之间的内在联系为线索,逐层简要地分析它们的任务,并进一步由导弹飞行的特点分析导弹控制飞行的特点。

### 1.1.1 导弹控制飞行的任务

#### 1. 导弹武器的任务

导弹与火箭有着诸多相似之处,通常可以说“导弹是载有战斗部(弹头)的有控火箭”,其区别在于火箭是单纯的运载工具,而导弹是武器。导弹的任务是将战斗部(弹头)稳定准确地送到目标区域,并由战斗部遂行打击。因此,作为武器来说,导弹的任务可以分为两个部分,一是作为有控火箭,担负着运载工具的任务,将战斗部稳定准确地送到目标区域;二是作为战斗部,担负着遂行打击敌方目标的任务。以下主要介绍导弹战斗部的不同任务区划,而将导弹作为运载工具的任务放在后面进行分析。

导弹的战斗部是用于直接毁伤目标的装置,由于通常置于导弹的头部,所以又称为导弹弹头。导弹的战斗部由壳体、战斗装药、引爆控制系统和头部姿态控制系统等组成,有的还装有突防装置、子弹头及其释放系统、末段修正控制系统等。

导弹的分类方法有很多种,如图 1-1 所示。按照导弹战斗部的不同特点,可以将导弹进行不同的分类。例如,按照导弹战斗部装药类型的不同,可以将导弹分为常规导弹、核导弹和

特种导弹;按照导弹所携带战斗部的数量,可以将导弹分为单弹头导弹和多弹头导弹。通常来说,战术导弹主要配备常规战斗部,战略导弹主要携带核战斗部,而且尽可能采用分导式或机动式多弹头,以提高导弹战斗部的突防能力和打击多目标的能力。另外,动能导弹战斗部一般没有装药,以直接碰撞方式毁伤敌方目标。

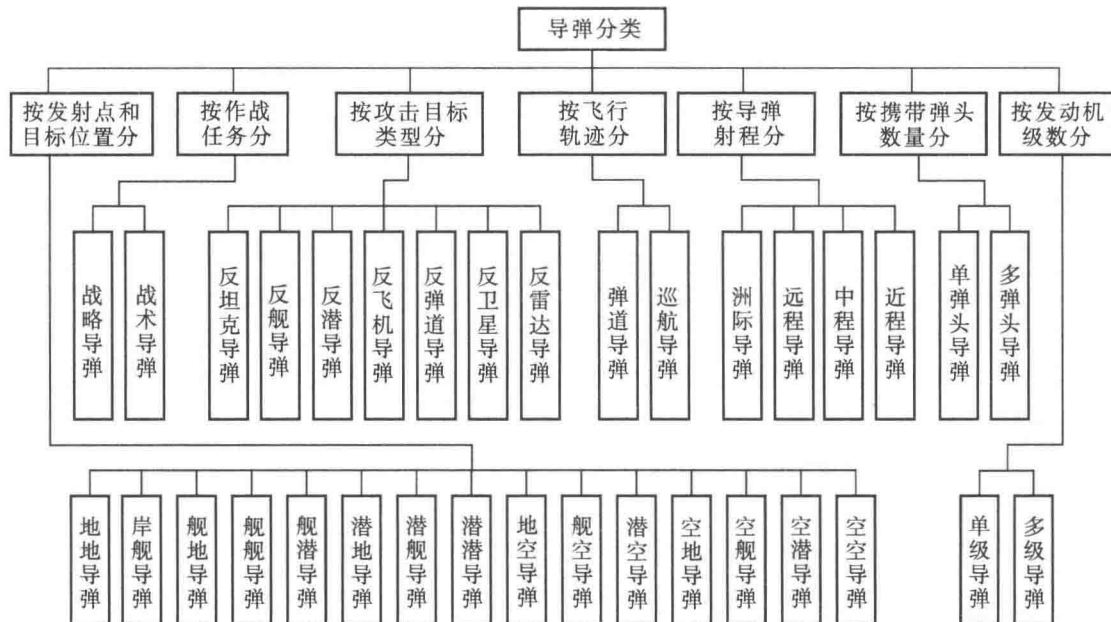


图 1-1 导弹的分类

导弹战斗部对目标毁伤或施加其他效应的能力,称为导弹战斗部的威力,又称弹头威力。影响导弹战斗部威力的主要因素是战斗部的装药,其类型和装药量直接关系到战斗部威力的大小。战略导弹携带的核战斗部,威力巨大,用梯恩梯(TNT)当量表示;战术导弹携带的常规弹头,威力较小,用威力半径或毁伤半径表示。核战斗部的威力不但与核装药的类型和药量有关,而且与核装药的浓缩度和利用率有关,质量相同、类型不同的核装药,核聚变战斗部比核裂变战斗部的威力大 3 至 4 倍;装药量越多,装药越纯,利用率越高,则战斗部的威力就越大。

提高战斗部的威力,不仅取决于战斗部的装药,还与导弹命中精度关系密切,在导弹命中精度一定的条件下,战斗部威力越大,则对目标的破坏作用越大;同样,在战斗部威力相同的情况下,导弹命中精度越高,则对目标的破坏作用越大。关于导弹命中精度的相关知识,我们将在第 3 章详细论述。

## 2. 导弹飞行的任务

如前所述,导弹作为武器的终极任务是由战斗部遂行对敌打击,因此,使战斗部能够稳定、准确地到达目标点即是导弹飞行的任务。

作为导弹控制系统的被控对象,在导弹的飞行任务中,包含“准确”性要求是比较容易理解的,因为人们一般可以直观地认为,战斗部距离目标越近,遂行对敌打击的效果就会越好,事实上也正是如此。在第 3 章中将针对飞行的准确性及其对打击效果的影响进行定量表达。

对于导弹飞行任务中的“稳定”性要求,理解起来相对比较复杂,本章首先从导弹的基本结

构、导弹的空间运动等方面进行定性分析,第4章将从导弹控制的角度进行定量的分析。

由于导弹的飞行表现为空间运动,因此从导弹飞行的角度可以将其任务简要而直接地分为以下两个方面。

**准确度任务:**导弹空间飞行的质心运动(运动轨迹)是准确的,而且其准确度指标的最终值——导弹落点(或空爆点)在导弹精度战标之内。

**稳定性任务:**导弹空间飞行的绕质心运动(运动姿态)是稳定的,而且各项稳定性指标均符合较高标准。

显然,准确度任务强调的是对飞行结果的要求,而稳定性任务则着重强调对飞行过程的要求。

### 3. 导弹控制飞行的任务

总的来说,导弹控制的任务是导弹控制系统在正常工作情况下,自动、高标准地完成导弹飞行任务。通常可以将导弹控制的任务分为两部分:第一部分是导弹控制系统能够正常工作,并且很好地遵循自动控制理论的各项原理;第二部分是对导弹飞行任务的控制性完成。第二部分任务与导弹飞行任务相对应,是导弹控制飞行任务的核心,可以表述为以下两点。

**质心运动准确性控制:**首先控制导弹质心的运动轨迹按照设计好的规律进行变化,其次保障导弹在干扰作用下的质心运动轨迹的规律性变化能够保持准确度指标。准确性控制通常称为制导控制,需要由导弹制导系统和姿态控制系统共同执行。

**绕质心运动稳定性控制:**首先控制导弹的飞行姿态按照设计好的规律进行变化,其次保障导弹在干扰作用下的飞行姿态的规律性变化能够保持稳定性指标。稳定性控制通常称为姿态控制,主要由导弹姿态控制系统执行。

#### 1.1.2 导弹控制飞行的特点

导弹控制飞行的特点,主要是指在导弹控制系统的作用下,作为被控对象的导弹有控飞行所表现出来的特点。

##### 1. 导弹空间飞行的特点

由于导弹的飞行是在导弹控制系统作用下的有控的空间飞行,因此分析导弹控制飞行的特点首先需要从导弹空间飞行特点的分析着手。

第一,对于导弹的空间飞行,从运动体的外形特点来看,导弹通常是由一个圆锥体与一个或多个同底的圆柱体组合而成。圆锥体和圆柱体共有的轴称为导弹纵轴,纵轴的长度即为导弹长度 $l$ ,底圆的半径为 $r$ ,直径为 $D$ ,并将长度与直径之比 $l/D$ 称作导弹的长细比。事实上,导弹是具有较大长细比的巨大的运动物体,虽然此运动体的外形尺寸与其飞行的空间距离相比十分微小,但是由于此运动体自身的运动姿态对其运动轨迹具有巨大的影响,而且对于有控飞行运动的稳定性和安全性具有决定性的影响,因此在面对导弹空间飞行的质心运动和绕质心运动时,必须特别关注导弹的姿态运动,而不能将导弹的空间飞行简单地作为质点运动来处理。

第二,从运动体的运动本质特性来分析,导弹的空间运动是包括了刚体运动、弹性振动的复合运动,如果导弹采用的是液体推进剂,还需要考虑液体推进剂在贮箱内的晃动和在管道内的流动。其中,刚体的空间运动包括三个自由度的质心运动和三个自由度的绕质心运动;弹性

振动自身具有桁梁弹性变形的运动特点,同时又对刚体运动产生影响;推进剂贮箱内的液体晃动自身具有弹簧-质量体的运动特点,同时也对刚体运动产生影响;如果弹性振动与液体晃动同时存在,两者之间还会产生相互的铰链影响。

第三,从运动体飞行轨迹的外形特点来分析,导弹的空间运动是由质心(虽然导弹的质心在飞行过程中具有沿导弹纵轴的内部移动,但是这种变化相对于整个空间运动轨迹可以忽略不计)在基本运动平面内的直线运动和曲线运动,以及垂直于基本运动平面的空间曲线运动相互衔接的轨迹线(这个基本运动平面,即是后面定义的“射击平面”)。其中曲线运动的曲率在不同的飞行阶段变化很大,尤其是对于具有变轨机动能力的导弹,更具有垂直于基本运动平面的强烈的横向曲线运动的特征。

## 2. 导弹飞行预有准备的特点

导弹的控制飞行,是在预先进行了飞行姿态计算和飞行轨迹计算的基础上、预有准备的有控飞行。

导弹控制飞行的计算实际上就是对飞行标准的制定和完善,是在一定飞行条件下,在已知发射点、目标点的信息,根据导弹飞行能力和特点,或在地面预先计算,或在飞行过程中依据预定方案实时计算得到的。计算得到的飞行标准分为两部分,其中关于飞行姿态的变化标准称之为标准程序角,有三个自由度;而关于飞行质心运动轨迹的变化标准称之为标准弹道,也有三个自由度。同时,飞行标准对导弹飞行的约束不仅体现在空间姿态运动和质心轨迹的各三个自由度,还要求与时间轴一一对应。也就是说飞行标准可以表示为一个三元组  $P(t, \Delta, s)$ , 其中:  $t$  代表飞行时间,  $\Delta$  代表飞行姿态(三个自由度),  $s$  代表飞行质心(三个自由度)。这个三元组要求导弹在飞行的 A 时间点,必须具有 A 飞行姿态和 A 质心运动状态;而在飞行的 B 时间点,则必须具有 B 飞行姿态和 B 质心运动状态。导弹控制系统所需要做的,就是以标准程序角和标准弹道以及时间轴作为约束条件,控制导弹飞行的所有参数,并且消除各种干扰因素对飞行姿态和飞行质心运动轨迹的影响,保证导弹以尽可能高的精度同时满足标准程序角和标准弹道的要求。

需要指出的是,通常我们所说的“标准弹道”是包括了飞行姿态变化标准和飞行轨迹变化标准的那一条弹道,关于标准弹道及其相关知识,将在 1.2 节进行介绍。显然,预先计算得到的飞行标准是导弹控制飞行的目标,它的存在为对导弹控制飞行效果进行评估提供了明确的标准,并且使得导弹的控制飞行过程是有序且简单明了的。换句话说,飞行标准既是导弹控制飞行的出发点也是导弹控制飞行的落脚点,它的重要性是不言而喻的。

## 3. 导弹飞行轨迹分段的特点

导弹的飞行轨迹具有显著的分段特性。由于导弹空间飞行的时间很长,飞行特点体现在多个方面,因此可以以时间轴为标尺将弹道导弹的空间飞行分为若干个特色显著、相互联系的飞行段,弹道导弹飞行轨迹的典型分段如图 1-2 所示。

### (1) 起飞段

导弹从飞行零秒至程序转弯开始时刻的飞行段,称为起飞段。接到发射命令后,导弹发动机点火或弹射装置工作,记作导弹飞行的零秒,导弹起飞,作直线运动。在起飞段,导弹控制飞行的特点有:

- ① 导弹发动机推力逐渐增加,由零推力达到额定推力,导弹受到较大的震动干扰;

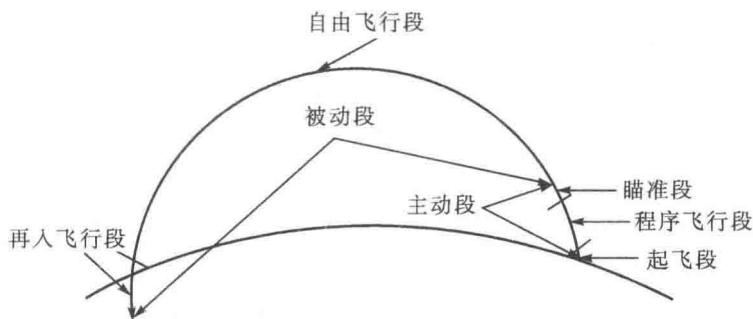


图 1-2 弹道导弹飞行分段示意图

②控制系统开始工作,维持姿态角不变,要求将姿态漂移控制在很小的数值,避免与地面发射装置发生碰撞。

起飞段也可称为发射段。对于垂直发射的导弹,起飞段也称垂直段,将发动机的推力全部用于垂直上升,具有最高的推力/高度比;对于以弹射方式发射的导弹,起飞段分为筒内飞行段和出筒段,可能伴有弹体外形的改变,如适配器的脱离或弹翼的展开等。

#### (2) 程序飞行段

导弹从程序转弯开始至程序转弯结束的飞行段,称为程序飞行段。在程序飞行段,导弹经过起飞段的直线飞行,上升到一定高度,控制系统控制导弹按照预定的标准程序角变化规律飞行,导弹的飞行速度、飞行高度及飞行距离逐渐增大,飞行轨迹逐渐向目标方向弯曲,直到飞行程序角达到额定值。在程序飞行段,导弹控制飞行的特点有:

- ①导弹飞行程序角逐渐减小,导弹飞行速度矢量与发射点水平面的夹角逐渐减小;
- ②导弹飞行轨迹穿越大气层,导弹的控制飞行受到较大气动干扰;
- ③导弹控制系统按照飞行参数的标准变化规律控制导弹飞行姿态和飞行轨迹,同时消除各种内外干扰因素的影响。

程序飞行段也称为转弯段。多级导弹通常选择在程序飞行段完成前级发动机关机、后级发动机点火以及级间分离等控制工作,是工作压力最大、控制飞行最困难的飞行段。

#### (3) 瞄准飞行段

导弹程序飞行结束至末级主发动机关机的飞行段,称为瞄准飞行段。在瞄准飞行段,导弹飞行姿态角保持程序飞行段终点的参数不变,控制系统主要完成质心轨迹的控制,并控制末级主发动机关机。在瞄准飞行段,导弹控制飞行的特点有:

- ①导弹控制受到的干扰较小或干扰变化较小;
- ②控制系统精确控制飞行姿态和飞行速度,对落点精度起到决定性作用。

瞄准飞行段简称瞄准段。在瞄准段,多弹头导弹可以按照预定方案完成多次飞行姿态和飞行轨迹调整,并完成多枚弹头的依次抛射,确保每枚弹头的落点精度。

#### (4) 自由飞行段

导弹末级主发动机关机至重新进入大气层的飞行段,称为自由飞行段。在自由飞行段,导弹主要控制工作已经完成,主发动机动力结束,导弹(弹头)依靠惯性飞行,头部控制系统完成再入大气层前的姿态调整等工作。在自由飞行段,导弹控制飞行的特点有:

- ①导弹通常在大气层外飞行,导弹控制所受干扰很小;

②飞行距离很长,占导弹整个射程的90%以上。

导弹自由飞行段的飞行轨迹包括飞行高度上升的升弧段和飞行高度下降的降弧段:在自由飞行段的起点,动能达到最大值,随后靠惯性继续上升,由于地心引力作用方向与速度方向相反,动能逐渐减小,而势能逐渐增大;飞到弹道的最高处(弧顶)时,动能为最小,而势能则最大;此后飞行轨迹下行,速度方向与地球引力方向一致,速度值由小变大,加速飞行,势能变为动能,弹道从最高点沿抛物线下降。

随着导弹控制技术的发展和成熟,在自由飞行段引入导弹质心运动控制,称作“中制导”,以消除质心运动偏差并实现飞行的机动,对提高导弹命中精度、扩大攻击范围和实现突防起到重要作用。

#### (5)再入飞行段

导弹从重新进入大气层至起爆战斗部的飞行段,称为再入飞行段。再入飞行段是导弹自由飞行段降弧段的延伸,从再次进入大气层起,空气密度逐渐增加,由于空气阻力的作用,导弹飞行速度大幅下降,导弹受到的空气动力作用加剧,出现严重的气动加热现象,使弹头壳体材料的抗拉强度明显降低;当导弹命中目标或起爆战斗部,导弹飞行结束。在再入飞行段,导弹控制飞行的特点有:

①空气密度逐渐增加的大气层对导弹飞行起到阻滞作用,使导弹飞行受到制动而稳定,保证头部朝目标俯冲,对头部控制系统的稳定工作有益;

②高速飞行和浓密空气使得导弹受到的动载荷比主动段大几十倍,导弹控制受到较大干扰;

③导弹再入飞行角对导弹飞行成功和战斗部遂行作战任务起到关键作用,是导弹控制的重要参数。

再入飞行段简称再入段。在再入段,随着导弹控制技术的发展和成熟,应用自寻的制导技术,控制导弹的运动轨迹,以实现目标的精确打击,称作“末制导”。

有一种更加简要的导弹控制飞行分段方式:导弹从一级主发动机点火到末级主发动机关机的飞行段,称为主动段;从末级主发动机关机到命中目标或起爆战斗部的飞行段,称为被动段。显然,主动段实际上就是起飞段、程序飞行段和瞄准段的组合,而被动段是自由飞行段与再入飞行段的组合。另外,还有一些常见的分段方式是按照飞行的其他特点来命名的,如冷发射导弹的“筒内飞行段”、“弹射段”等,多级导弹的“I级飞行段”、“II级飞行段”等,末制导弹的“末修调姿段”、“末修飞行段”等等,它们实质上都可以通过特征提取和特征转换归结到前述飞行分段。

需要指出的是,以上飞行分段方式完全适用于中远程弹道导弹,而近程弹道导弹则可能在飞行速度、再入大气层等特点上略有不同,但不至于影响分段;被动段的命名并不意味着导弹控制的结束,尤其是随着导弹控制技术的发展和成熟,被动段控制的方式日益丰富,其重要性愈加显现,构成了导弹的全程控制。

### 4. 导弹飞行环境的特点

导弹的飞行环境条件十分恶劣,既是导弹飞行的重要特点,也是导弹控制的重要特点,可以从以下几个方面共同体现。

#### (1)飞行震动冲击剧烈

导弹在飞行过程中,既有由静止状态到高速飞行状态的急剧变化,也有由姿态稳定地缓慢

变化到遇到干扰后姿态急剧变化并带来稳定性风险的状况,还有由于多级导弹级间转换造成的综合性状态剧烈变化。这些飞行状态方面的剧烈变化,必然带来导弹飞行过程中的剧烈震动和冲击。

### (2) 环境温度大幅变化

导弹的飞行是在广阔空间中完成的,其飞行高度上的大幅变化,带来了导弹飞行环境温度的大幅变化;特别是导弹在再入大气层时,由于飞行速度非常高,与逐渐浓密的大气之间的摩擦会产生巨大的气动热,使得弹头表面温度能够达到几千摄氏度,可以造成严重的烧蚀。

### (3) 飞行干扰因素众多

导弹飞行过程中的干扰因素非常多,其外部干扰除了震动和温度外,还包括风干扰,尤其是切变风干扰;大过载干扰,尤其是再入飞行段的横向过载干扰;气象条件干扰,包括雷电、雨雪干扰;敌方施加的干扰,包括电磁干扰和核环境干扰。其内部干扰主要来源于导弹系统的制造、安装误差,以及控制系统的设计误差、方法误差和工作误差。

### (4) 控制系统工作条件恶劣

导弹控制系统除了在飞行过程中必须经受住各项外界恶劣条件和控制系统内部各项干扰(如零漂、非线性、电磁干扰等)的挑战外,还要面对由于导弹长期贮存、一次使用所带来的长期贮存后保持较高使用可靠性和稳定性要求的考验,以及由于控制系统组成繁复、工作任务及工作过程复杂多样,要求所有元件和设备都具有较低失效率的考验。

## 1.2 导弹飞行运动及弹道

导弹飞行的任务和特点与导弹控制系统的任务和特点之间,是相互联系、相互制约、相互妥协并最终达到平衡的辩证关系,本节以导弹飞行行为研究对象,重点分析导弹飞行的内特性——运动特性,以及导弹飞行的外特性——运动轨迹。导弹在空间的基本运动包括刚体运动、弹性振动,对于液体推进剂导弹,还包括推进剂贮箱液体晃动和管道液体流动,如果考虑导弹飞行与地球自转的关系,还包括牵连运动等等。以下主要针对导弹刚体的质心运动和绕质心运动、弹性振动、推进剂贮箱液体晃动展开分析。

### 1.2.1 导弹刚体运动

导弹刚体运动是在忽略导弹运动体变形的前提下的一种近似,对于多级弹道导弹和巡航导弹,刚体外形在飞行过程中会有跳跃式的变化,需要针对不同的阶段分别进行研究。刚体运动可以分为质心的平动运动和绕质心的转动运动,其质心运动的轨迹就是导弹的运动轨迹——弹道。

#### 1. 导弹刚体质心运动

导弹刚体质心运动包括两个方面:导弹质心在空间的运动和导弹质心在刚体内的移动。导弹在飞行过程中,依靠推进剂燃烧后所产生的高温燃气向后高速喷出,产生反作用力推动导弹以刚体形式向前运动,于是导弹质心表现为空间运动。与此同时,导弹的总质量在飞行过程中由于推进剂的持续消耗而呈现出时变性,而且质量分布也呈现出时变性,这种变化的结果就使得导弹的质心沿导弹纵轴移动。导弹质心在刚体内的移动将影响导弹的静稳定性(关于导弹质心与导弹静稳定性之间的关系,将在 1.5 节中进行分析),在控制系统完成绕质心运动稳

定性任务时必须加以考虑。导弹质心在空间的运动规律决定着导弹飞行的准确性,从而决定了导弹控制系统对质心运动准确性任务的完成,是导弹质心运动研究的重点。今后若不加特殊说明,则“导弹的质心运动”专指导弹刚体质心的空间运动,忽略导弹质心在弹体内的移动。

导弹质心的空间运动,从运动学的角度分析,是具有三个自由度的曲线运动,即在运动空间的三个方向上各自具有一个自由度。具体来说,只要定义一个三维空间坐标系,导弹的质心就可以确定为一组三维坐标,并能够进一步对质心运动进行定量分析。关于坐标系的定义和建立,将在 1.3 节做详细介绍。

在一个确定的三维空间坐标系内展开对导弹质心运动的研究时,所涉及参数都是我们熟知的:

- ① 导弹质心的位置——由质心的坐标值确定;
- ② 导弹质心运动的速度矢量——由单位时间内质心坐标值的变化率确定;
- ③ 导弹质心运动的加速度矢量——由单位时间内质心运动速度矢量的变化率确定。

很显然,在以上运动物理参量的描述下,导弹质心空间运动的运动规律都将遵循牛顿力学定律,其力学物理量是“力”。

## 2. 导弹刚体绕质心运动

导弹刚体外形巨大,在工程上,为了运动控制的便利,将质心设计在导弹的纵轴上,而且使得质心即便是在导弹内部有移动,也是稳定地在纵轴上作直线移动。导弹刚体在运动过程中,受到多个力的作用,这些力有的作用于质心或力的矢量通过质心,有的力其作用点和力的矢量都偏离质心,正是这些没有作用于质心的力及其力臂所产生的力矩,使得导弹产生绕质心运动。

当要求导弹的质心沿标准弹道作曲线运动时,就会要求导弹在控制系统的作用下主动做出姿态变化,即必须作绕质心运动,这是因为:导弹运动的主要动力是发动机的推力,推力矢量正常情况下与导弹纵轴重合,指向弹头方向,其作用点位于导弹尾部,与质心点有一段距离;导弹的质心在沿曲线轨迹运动时,导弹速度矢量的方向是沿着弹道轨迹的切线方向的,必须通过改变推力矢量方向才能够改变速度矢量方向并最终实现质心的曲线运动,而推力矢量方向的改变将带来两个结果:第一,使得导弹质心的受力方向不再与导弹纵轴重合,速度矢量方向改变,质心改变运动方向,开始做质心轨迹的曲线运动;第二,推力矢量产生与导弹纵轴垂直的分量,称为控制力,控制力将通过推力矢量作用点与导弹质心之间的力臂,产生相对于质心的控制力矩,使得导弹出现绕质心运动,如图 1-3 所示。

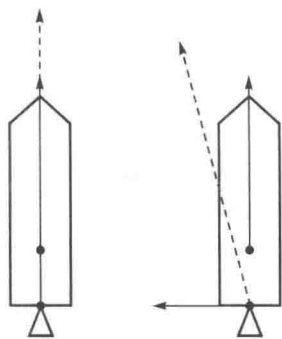


图 1-3 导弹绕质心运动原理示意图



总而言之,导弹的绕质心运动是为了控制导弹质心曲线运动的实现而由导弹控制系统控制实现的;换一种说法,导弹对质心曲线运动的控制是通过导弹控制绕质心运动来实现的。需要指出的是,以上的分析只考虑了导弹发动机推力和控制力,而导弹实际飞行中所受到的力和力矩是复杂多样的,我们将在1.3节择其要点进行分析,它们对导弹质心运动和绕质心运动的作用效果也是复杂多样的,我们既可以对它们逐一进行细致的分析,也可以从控制的角度一律作为干扰力和干扰力矩看待。另外,多级弹道导弹由于不断抛掉前一级弹体,从而在外形上呈现跳跃式的变化,巡航导弹由于在飞行过程中需要展开双翼,外形上也出现较大变化,这些因素都会带来导弹飞行所受力和力矩的极大变化,都需要在实施控制时详细考虑。

导弹绕质心的空间运动,从运动学的角度分析,也具有三个自由度,即在三维空间的三个方向上各自具有一个转动自由度。具体来说,只要定义一个三维空间坐标系,导弹就能够确定一组三维绕质心转动角度,能够进一步对绕质心运动进行定量分析。关于坐标系的定义和建立,将在1.3节做详细介绍。

在一个确定的三维空间坐标系内展开对导弹绕质心运动的研究,所涉及的参数也都是我们熟知的:

- ①导弹绕质心转动量——由相对坐标轴的转动角度确定;
- ②导弹绕质心运动的速度矢量——由单位时间内转动角度的变化率确定;
- ③导弹绕质心运动的加速度矢量——由单位时间内绕质心运动速度矢量的变化率确定。

很显然,在以上运动物理参量的描述下,导弹绕质心运动的运动规律都将遵循刚体陀螺力学定律,其力学物理量是“力矩”。

## 1.2.2 导弹弹体弹性振动

导弹弹体是一个梁式结构,且质量分布不均匀,各处刚度也不相同,是一个连续的非均匀梁。导弹飞行过程中,弹体受到各种外力的作用时,不可避免地产生或大或小的变形,而弹体的刚性始终在努力抵抗并恢复这个变形,于是外力与恢复力共同作用就产生了衰减的简谐振动。这种变形称为弹体弹性变形,这种简谐振动称为弹体弹性振动。

在飞行过程中,弹性振动运动状态相当于两端自由的、受到各种分布或集中载荷作用的弹性梁的变形-恢复过程。导弹弹体的弹性变形产生于三个不同方向,弹体弹性振动也由此而分为纵向振动、扭转振动和横向弯曲振动,其中纵向振动和扭转振动对导弹稳定性的影响较小,因此我们重点关注的是横向弯曲振动。

导弹弹性振动对导弹飞行运动的影响是非常巨大的,具体表现在以下两个方面。

第一,弹性振动的变形-恢复都会产生相应的力和力矩,这些力和力矩对于导弹刚体运动来说可以作为干扰处理,它的作用影响可以通过力和力矩的叠加显现出来。弹性振动的这种影响是比较简单而又直接的,只要弹性振动的力和力矩不大到破坏弹体结构强度的程度(这种情况出现的可能极小,而且可以通过增强弹体结构强度等方法来避免),就不会对导弹的飞行运动造成重大影响。

第二,导弹弹性振动的运动实质是简谐振动,具有一系列的振动频率,可能对弹体造成破坏(如弹体折断),给导弹飞行带来灾难性的影响。这种振动频率所造成的破坏可能通过三个渠道体现:

- ①如果弹体弹性振动的一阶频率较低,接近导弹刚体的固有频率,就有可能形成共振,破