


制导与控制系统

于秀萍 刘 涛 编 著

 哈尔滨工程大学出版社

制导与控制系统

于秀萍 刘 涛 编著

 哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

本书是以导弹作为应用对象来研究制导与控制技术的。本书共分10章,集制导、控制与仿真为一体,系统地阐述导弹制导控制理论和技术,介绍制导与控制系统分析、设计及仿真方法并给出应用实例,同时概括作者多年来的主要教学和科研成果。其主要内容有:导弹的制导系统的基本功能及组成、制导方式及制导规律、导弹控制方法及原理、导弹数学模型及其特性分析、常用制导装置及其原理、导弹飞行控制系统分析与设计、自动寻的制导系统分析与设计、地空导弹遥控指令制导系统分析实例、导弹制导控制系统数学仿真、导弹制导控制系统半实物仿真。每章后配有一定数量的习题及思考题。

本书可作为高等院校探测制导与控制技术专业 and 飞行器设计专业本科生课程教材,也可作为导航、制导与控制专业研究生和相关专业领域工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

制导与控制系统/于秀萍,刘涛编著. —哈尔滨:
哈尔滨工程大学出版社,2014. 1
ISBN 978 - 7 - 5661 - 0762 - 6

I. ①制… II. ①于… ②刘… III. ①导弹制导 ②导弹控制 IV. ①TJ765

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 021533 号

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451 - 82519328
传 真 0451 - 82519699
经 销 新华书店
印 刷 黑龙江省地质测绘印制中心印刷厂
开 本 787mm × 1 092mm 1/16
印 张 16. 5
字 数 391 千字
版 次 2014 年 2 月第 1 版
印 次 2014 年 2 月第 1 次印刷
定 价 35. 00 元

<http://www.hrbeupress.com>

E-mail:heupress@hrbeu.edu.cn

前 言

本书是以导弹作为对象来研究制导与控制技术的,制导与控制系统是导弹最重要、最关键的系统之一,它的科学分析与正确设计在很大程度上决定着导弹武器的功能和性能;系统仿真是实现导弹精确制导与控制不可缺少的技术手段。因此,本书集制导、控制与仿真为一体,系统地阐述导弹制导与控制理论和技术,介绍制导与控制系统分析、设计及仿真方法并给出实例。

全书共分 10 章,其主要内容有:导弹制导系统的基本功能及组成、制导方式及制导规律、导弹控制方法及原理、导弹数学模型及其特性分析、常用制导装置及其原理、导弹飞行控制系统分析与设计、自动寻的制导系统分析与设计、地空导弹遥控指令制导系统分析实例、导弹制导控制系统数学仿真、导弹制导控制系统半实物仿真。每章后配有一定数量的习题及思考题。

本书要求读者具有自动控制理论、飞行器概论、飞行力学等有关课程基础。

本书依据本科教学大纲编写而成。全书由哈尔滨工程大学自动化学院于秀萍教授负责统稿。于秀萍教授负责编写第 1 章~第 4 章,第 5 章 5.1.1~5.1.4 节、5.1.6 节及 5.2 节,第 6 章~第 9 章;哈尔滨工程大学自动化学院刘涛负责编写第 5 章 5.1.5 节和第 10 章。全书由哈尔滨工程大学自动化学院博士生导师史震教授主审。

本书中引用了相关参考文献的内容,特向相关参考文献的作者表示感谢。

本书编写过程中,得到了哈尔滨工程大学 2012 年本科生教材立项评审专家组和哈尔滨工程大学自动化学院教材建设小组领导以及同事的热情支持和鼓励,哈尔滨工程大学自动化学院的研究生马娜娜协助绘制部分插图与仿真验证工作,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在错误、疏漏或不妥之处,欢迎读者提出批评和加以指正,并将修改意见尽快反馈给我们。E-mail:yuxiuping@hrbeu.edu.cn。

编著者

2013 年 8 月于哈尔滨

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 导弹的分类和组成	1
1.2 制导系统的功能及组成	6
1.3 对制导系统的基本要求	8
习题与思考题	10
第 2 章 制导方式及制导规律	11
2.1 制导方式基本概念	11
2.2 各种制导方式及其原理	11
2.3 精确制导技术及其应用	19
2.4 制导规律	21
习题与思考题	27
第 3 章 导弹控制方法及原理	28
3.1 导弹飞行控制的力学环境	28
3.2 导弹控制方法分类	43
3.3 导弹横向机动方法	45
3.4 滚动控制	45
3.5 气动力控制	46
3.6 推力矢量控制	52
3.7 导弹操纵飞行原理	55
习题与思考题	57
第 4 章 导弹数学模型及其特性分析	59
4.1 导弹刚体的运动方程	59
4.2 弹体运动方程简化	64
4.3 弹体运动传递函数	68
4.4 导弹弹体动态特性分析	72
4.5 导弹的机动性和操纵性	78
习题与思考题	82
第 5 章 导弹上制导装置及其工作原理	83
5.1 弹上测量装置	83
5.2 导弹的执行机构(舵机与舵回路)	105

习题与思考题	114
第 6 章 导弹飞行控制系统分析与设计	116
6.1 自动驾驶仪与稳定回路的基本概念	116
6.2 姿态角稳定控制系统分析与设计	118
6.3 法向过载稳定控制系统的分析与设计	140
6.4 导弹质心的稳定与控制	142
习题与思考题	153
第 7 章 自动寻的制导系统分析与设计	154
7.1 运动学环节及其传递函数	154
7.2 制导精度分析与计算	161
7.3 自动寻的制导系统品质分析实例	166
7.4 基于协方差分析方法的寻的回路制导精度分析	172
7.5 基于伴随技术的寻的回路制导精度分析	176
习题与思考题	179
第 8 章 地空导弹遥控指令制导系统分析实例	180
8.1 导弹指令制导系统组成及工作原理	180
8.2 导弹指令制导系统各部分的传递函数	182
8.3 遥控指令制导和控制回路分析	187
习题与思考题	199
第 9 章 导弹制导控制系统数学仿真	200
9.1 系统仿真概述	200
9.2 利用 MATLAB 对导弹俯仰角稳定控制系统性能仿真	205
9.3 导弹滚动角稳定控制系统设计与性能仿真验证实例	212
9.4 导弹三自由度运动制导控制系统数学仿真实例	214
9.5 导弹六自由度运动制导控制系统数学仿真实例	219
习题与思考题	230
第 10 章 导弹制导控制系统半实物仿真	231
10.1 制导控制系统半实物仿真综述	231
10.2 射频制导半实物仿真及其系统设计	238
10.3 红外制导半实物仿真及其系统设计	246
10.4 成像制导半实物仿真及其系统设计	252
习题与思考题	256
参考文献	257

第 1 章 概 述

本书是以导弹作为对象来研究制导与控制技术的,制导与控制系统是导弹最重要、最关键的系统之一,它的科学分析与正确设计在很大程度上决定着导弹武器的功能和性能。导弹武器的诞生和发展,是同社会生产力、科学技术发展水平和社会需要紧密相关的。纵观近几十年来的越南、中东、马岛、两伊、海湾等局部战争表明,导弹武器已成为现代战争中的武器之一,把参战舰艇或飞机是否装备了先进的导弹武器作为衡量其战斗力性能的标志,也是一个国家国防现代化的重要标志。

导弹是在火箭的基础上为适应战争的需要衍生出来的。目前,世界各国几乎都有各种不同类型的导弹和火箭。那么,导弹和火箭有何异同呢?它们的共同点都是无人驾驶的飞行器,它们的主要区别是在动力、控制和用途等方面。所谓火箭,是指利用喷射一部分自身携带的工质而产生反作用力,既能在大气层中运动,也能在无空气空间运动的无人驾驶飞行器。根据不同的用途,火箭的有效载荷也不同,当它装有战斗部系统时,称为火箭武器。当它携带仪器、设备、动物时,则称为科研火箭。火箭武器能够操纵的,称为可控火箭,如弹道式火箭等;不进行操纵的称为非可控火箭,如火箭弹等。所谓导弹,是指装有动力装置、有破坏力(战斗部)、能够准确击中目标的可控制无人驾驶飞行器。它的动力装置可以是火箭发动机,也可以是空气喷气发动机。导弹必须有制导设备,对它飞行的全过程或某些阶段进行控制。

自从在第二次世界大战期间,德国制造了世界上最早的弹道式导弹“V-2”和飞航式导弹“V-1”以来,随着科学技术的迅速发展和工业水平的提高,导弹武器历经三、四代的发展、改进和完善,目前,各国已研制、装备了不同用途、多种系列的技术先进、准确度高的各种导弹数百种。

1.1 导弹的分类和组成

1.1.1 导弹的分类

自二次世界大战后,世界各国先后研制、装备了大约 500 多种导弹。导弹的分类,通常按作战使命、飞行弹道、发射点和目标位置等特征来进行。

1. 按作战使命

按作战使命分为战略导弹和战术导弹。

(1) 战略导弹

由国家最高统帅部决定,用于执行战略任务的导弹。这种导弹通常装有核战斗部。

(2) 战术导弹

在局部战争中,用于执行战役战术任务的导弹,如攻击地面目标、飞机、舰船和坦克等。这种导弹通常装有常规战斗部,也可装小当量的核战斗部。

2. 按飞行弹道的特点

按飞行弹道的特点分为弹道导弹和有翼导弹。

(1) 弹道导弹

它的飞行弹道除了一小段有动力并进行控制的主动段外,其余弹道是靠惯性及地球重力作用下在空气稀薄的高空飞行的被动段。

(2) 有翼导弹

这类导弹在稠密大气层中飞行,通过弹体、弹翼、舵面产生空气动力,控制和稳定导弹的飞行,战术导弹多属于有翼导弹。

3. 按发射点和目标位置的特征分类

因为导弹的发射点和它攻击的目标可在空中(飞机)、地面、水面(舰)和水下(潜艇),所以可把导弹分为空空、空地、地空和地地导弹。

(1) 空空导弹

指从空中(飞机)发射,攻击空中目标的导弹。通常分为远距(射程大于40 km)截击、中距(射程在10~40 km)和近距格斗(射程小于10 km)空空导弹。

(2) 空地导弹

指从空中发射,攻击地面或海上目标的导弹。空中发射攻击地(海)面的巡航导弹,一般射程小于160 km的称为近程巡航导弹;射程为160~1 000 km的称为中程巡航导弹;射程为1 000 km以上的称为远程巡航导弹。用机载空地导弹作反坦克导弹,其射程通常为4~40 km。目前,很少有从空中发射的弹道导弹。

(3) 地空导弹

指从地面或海面(舰船)发射,攻击空中目标的导弹,按最大射程,可分为远程(射程大于100 km)、中程(射程在20~100 km)、近程(射程在5~20 km)和短程(射程少于5 km)地空导弹。按最大射高,又可分为高空(射高在15 km以上)、中空(射高在6~15 km)、低空(射高在0.1~6 km)、超低空(射高在0.1 km以下)地空导弹。目前,美、俄还布置了一种专门拦截大气层外或大气层内弹道导弹的反导导弹,一般前者的射程大于350 km,射高大于300 km,后者射程、射高均大于50 km。为了拦截低空飞行的巡航导弹,有些地空导弹也兼有反导弹作用。

(4) 地地导弹

指从地面、地下(井)、水面(舰船)、水下(潜艇)发射,攻击地面、水上目标的导弹。其中,弹道导弹按射程分为近程(射程小于1 000 km)、中程(射程在1 000~2 400 km)、中远程(射程2 400~6 400 km)、远程(射程在6 400 km以上)弹道导弹。射程在1 000 km以下的弹道导弹属于战术导弹,只用于战场火力支援,射程大于1 000 km以上的弹道导弹属战略导弹。还有一种轨道式导弹,是将弹道导弹的弹头送入绕地球运行的卫星轨道,并控制弹头在目标区域上空减速(制动),使其再入大气层,以攻击目标。这种导弹的弹道高、突防能力强,对方无法判断它的弹着点。地地导弹中的巡航导弹,其射程划分同空地巡航导弹,反坦克导弹则分为轻型便携式(射程在1~2 km)和重型车载型(射程在4 km以上)两种。

有的资料上把导弹发射点和攻击的目标按空和面(地面、海面)来区分。这样,导弹则可分为空空、空面、面空和面面导弹,这和上述四种称谓是一致的。

导弹的分类还有其他方法。例如:为突出攻击的对象,可按目标特征分类,如反坦克导

弹、反舰导弹、反潜(艇)导弹、防空导弹(反飞机导弹)等。还有只按发射点来分类,如机载导弹、舰载导弹、车载导弹、潜载导弹、炮射导弹等。这里,不一一赘述了。

1.1.2 导弹的组成和功能

由于导弹的类型不同,在结构上亦有所区别,但通常都是由弹体、发动机、战斗部、控制和制导五大部分组成,如图 1.1 所示。特殊用途的导弹(如诱骗导弹、干扰导弹等)不带战斗部。

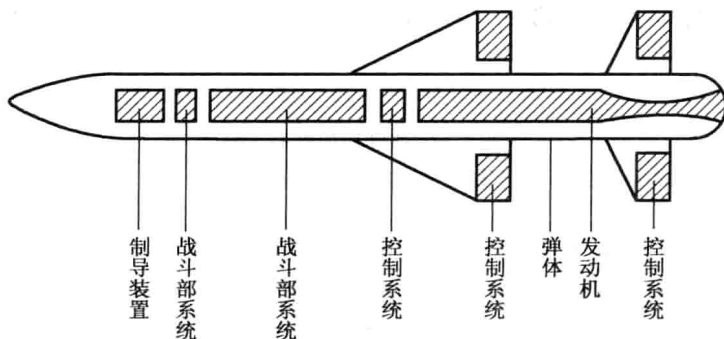


图 1.1 导弹的组成示意图

1. 弹体

弹体一般由弹身、弹翼、尾翼、舵和副翼等组成。弹体应具有良好的空气动力外形和一套相应的操作机构,以保证导弹有较好的操纵性和稳定性。弹身是弹体的主要组成部分,呈圆筒形壳体,头部一般呈圆锥形,以减少空气的阻力。发动机、战斗部、控制和制导装置及弹体的其他部分都安装在弹身上。弹翼一般安装在导弹的重心附近,主要用来产生升力和侧向力。尾翼保证导弹飞行时,有较好的纵向和侧向(横向)稳定性。舵一般安装在导弹尾部或头部附近,用来产生俯仰和偏航操纵力矩,使导弹作俯仰和偏航运动。副翼通常安装在弹翼的后缘,用来产生倾斜操作力矩,使导弹作倾斜运动。

由于对各类导弹的飞行速度、高度及机动性能要求不同,则导弹弹体的具体组成、配置和外形也不同。图 1.2 给出了各种导弹的外形示意图。

图 1.2 中,涂黑部分为活动面。图 1.2 中(a)~(f)为有翼导弹。根据空气动力的对称情况,又可分为轴对称和面对称两类。(a)~(e)为轴对称导弹,有两对与导弹纵轴相对称的弹翼,当弹体绕纵轴转 90° 时,空气动力的大小、方向和作用点不变,即在纵对称平面和侧平面上能产生大小相等的空气动力,对机动性要求较高的地空、空空和一些空地导弹通常采用轴对称弹体;(f)为面对称导弹,通常由一对与导弹纵对称平面对称的弹翼,外形很像飞机,在纵对称平面内能产生较大的空气动力,巡航导弹和多种空地导弹均采用面对称弹体。

图 1.2 中(g)表示了两种弹道导弹外形。由于弹道导弹的弹道大部分在大气层外,所以,大部分弹道导弹没有弹翼,有少部分弹道导弹装有不大的尾翼,作为安定面,保证导弹在大气层内飞行阶段稳定。

2. 发动机

发动机是推动导弹飞行的动力装置,导弹的推力是靠导弹自身携带的燃料在发动机内

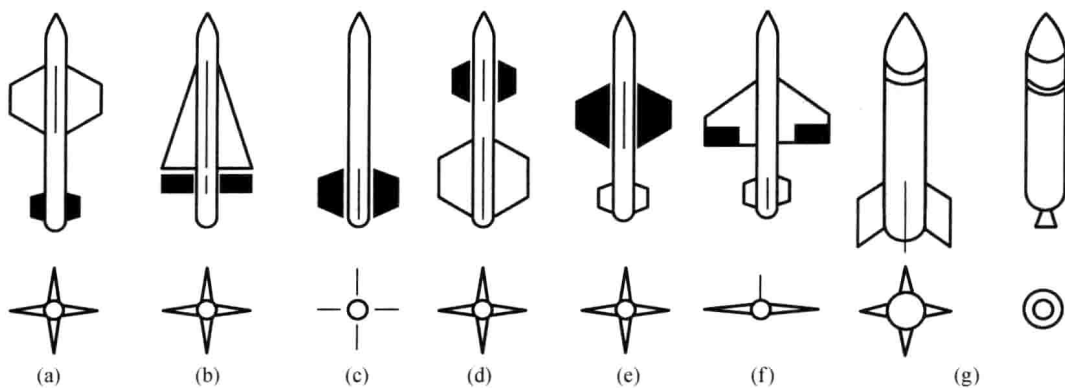


图 1.2 各种导弹的外形示意图

(a) 正常式; (b) 无尾式; (c) 尾翼式; (d) 鸭式; (e) 旋转弹翼式; (f) 飞航式; (g) 弹道式

燃烧,发生高温、高压燃气,燃气高速向后喷出,使导弹获得反作用力,这就是发动机的推力。发动机每秒钟喷出的燃气越多,发动机的推力就越大。根据燃料燃烧时所需氧化剂的来源不同,可分为火箭发动机和空气发动机两大类。火箭发动机自带氧化剂,不需外界空气助燃,可在真空中工作。火箭发动机又有固体和液体火箭发动机之分。空气喷气发动机自带燃烧剂,从空气中取得氧化剂,故只能在稠密大气层内工作。根据空气增压方式不同又有涡轮喷气发动机和冲压喷气发动机之分。

(1) 固体火箭发动机

固体火箭发动机所用推进剂(燃烧剂和氧化剂的总称)由固态燃烧剂(黑色火药、无烟火药等)、氧化剂和添加剂混合而成。发动机主要由燃烧室、喷管、火药柱和点火装置等组成。其优点为结构简单、维护使用方便、工作可靠、能在短时间内产生很大的推力,可作为主发动机或助推器用。固体火箭发动机的缺点是燃烧产物对喷管的烧蚀、冲刷厉害,需防烧蚀的材料和结构措施;燃烧产物喷出的火光与浓烟较大,使导弹发射阵地隐蔽性差;发动机工作时间短(一般十分之几至一百秒)。对其缺点已在研究改进,但目前这种发动机多用于射程比较小的空空、空地、地空和近程地地战术导弹上,在战略导弹和宇宙飞行器的运载火箭中使用的也不少。

(2) 液体火箭发动机

液体火箭发动机是液体推进剂。发动机开始工作前,氧化剂(如液氧、硝酸等)与燃烧剂(煤油、酒精等)分别储存在储箱中,发动机工作时通过增压设备和输送系统将燃烧剂与氧化剂输送到燃烧室中混合雾化之后,再点火燃烧,产生推力。这种发动机主要由燃料储箱、氧化剂储箱、喷注器、燃烧室和喷管组成。根据推进剂增压方式和输送过程的不同,液体火箭发动机分为挤压式和涡轮泵式两种。

液体火箭发动机的优点为可调节推力大小,可控制开车和停车时间,根据需要随意控制燃烧室内工作;本身携带燃烧剂和氧化剂,其工作不受环境条件限制;发动机工作时间长,可达几十至几百秒,甚至可工作几十分钟,液体火箭发动机的缺点是动力装置结构、地面设备复杂;由于燃料对金属储箱有腐蚀作用,故不能装在导弹内储存,需在发射前临时加注,地面勤务处理麻烦,使导弹武器的机动性差。因此,适应于远程弹道导弹和宇宙飞行器

中,目前,中、远程地空导弹中也常用这种发动机。

(3) 涡轮喷气发动机

目前广泛采用的涡轮喷气发动机是轴流式,它主要由进气道、轴流式压气机、燃烧室、涡轮、加力燃烧室和喷管等组成。其工作有三个基本过程:压缩(使空气压缩、增压);燃烧(燃油燃烧,提高气体温度);膨胀(高温高压气流膨胀,以很大速度喷出发动机喷管)。它的特性主要取决于压气机的增压比和涡轮前的气体温度。现在涡轮喷气发动机的增压比变化范围很大。当飞行器长期作亚音速和跨音速飞行时,其增压比为 $10 \sim 14$,燃料消耗率可达最小值。当飞行速度增加,航程减小时,增压比对发动机的质量影响很大,为了减轻发动机的质量,应将增压比减小到 $4 \sim 6$ 。

涡轮喷气发动机的优点是燃料消耗率小($0.082 \sim 0.102$) $\text{kg}/\text{N} \cdot \text{h}$,即产生 1 N 的推力在一小时内所消耗的燃料量。其缺点是结构复杂,体积、质量大。多用于射程较远的空地导弹和巡航导弹,其他导弹不宜采用。

(4) 冲压喷气发动机

冲压喷气发动机是一种应用广、发展快、前途光明的发动机。它主要由进气道、燃烧室、尾喷管等组成。其工作原理基本上与涡轮喷气发动机相同,即包括空气压缩、燃料燃烧、气流膨胀三个基本过程。按其飞行速度可分为亚音速、超音速、高超音速三种。近年来, $M = 5 \sim 15$ 的高超音速冲压喷气发动机的研究取得了较大的进展。

冲压喷气发动机的优点为:结构简单、质量轻、成本低(在 $M = 2$ 飞行时,估计冲压喷气发动机质量与涡轮喷气发动机的质量比为 $1/5$,制造成本比为 $1/20$);在高速飞行状态下($M > 2$),经济性好,燃料消耗率低,工作时间长。其缺点是:不能使导弹自行起飞,必须有固体火箭发动机作为助推器,使导弹达到一定速度时才能启动工作;低速飞行时推力小,燃料消耗率高;发动机的工作状态对飞行条件(飞行速度、高度、攻角及燃烧后的剩余空气量等参数)的变化很敏感。冲压喷气发动机一般用于射程较远的地空导弹和巡航导弹,用于空地导弹时可直接起动喷气发动机。

(5) 固冲发动机

固冲发动机是助推器的火药柱与冲压喷气发动机共同使用一个燃烧室。其助推器和主发动机的推进剂都是固态的,它分为两层,第一层是固体助推器的推进剂,第二层是冲压发动机的固体燃料。当发射导弹时,首先点燃第一层,燃烧完后,导弹加速到预定的速度,第二层开始燃烧。助推器结束工作,冲压发动机开始工作,第二层是冲压发动机的贫氧燃料,与进气道中进来的空气中的氧气混合进行燃烧,产生推力。

固冲发动机的优点为:比冲量高(可达 $500 \sim 1\,200 \text{ s}$);结构简单、质量轻、工作可靠;可获得较高的飞行速度和加速度,提高导弹的机动性。缺点是燃烧过程控制困难,有待进一步研究。这种新型发动机已在原苏联的“萨姆-6”地空导弹上成功地采用了。

3. 战斗部

广义的定义战斗部子系统是由战斗部、引信和保险装置组成的,而狭义的定义则认为战斗部是由壳体、装填物和引爆传爆系统所组成。壳体是战斗部的基体,全弹弹体的组成部分,起支撑连接作用。装填物是战斗部摧毁目标的能源,其作用是将本身储存的化学能(或核能)通过化学反应释放出来,形成破坏各种目标所需要的毁伤因素(如普通装药引爆后形成的聚能射流、高速破片和冲击波等)。引爆传爆系统的作用是把引信所受到的起始

信息转变为爆轰波(或火焰),并逐级放大,以起爆战斗部装药。

战斗部通常分为常规战斗部和核战斗部。常用的常规战斗部有:爆破型战斗部,主要用于摧毁地面和海上目标;聚能穿甲战斗部,主要用于对付地面防御工事、坦克、装甲车及水面舰艇等;破片式杀伤战斗部,利用战斗部爆炸时产生的大量高速飞散破片,以穿透、切割目标,或引起目标的燃烧和爆炸,主要用于攻击空中目标。核战斗部一般由核装药(铀、钚、钚等)、引爆装置、壳体三部分组成,利用爆炸时的冲击波、光辐射、贯穿辐射和放射性污染对目标进行综合性毁灭,主要用于战略地地导弹和地空导弹上,有些战术地地导弹和地空导弹也装有核战斗部。另外还有一些战术导弹可装有燃烧战斗部、化学战斗部、细菌战斗部等。战斗部是靠引信起爆的,引信可分为触发引信和非触发引信两大类。按工作原理可分为无线电引信、红外引信和多普勒引信等。

保险装置保证导弹飞离发射点后,按预定的程序分几次解除保险,引信在解除最后一级保险后,才能开始工作。

4. 控制系统

导弹控制系统是由信号综合放大器、敏感器件、执行机构、操纵器件(舵、转动弹翼或推力矢量机构)等组成,它与被控对象——弹体组成闭合回路,保证导弹姿态角和质心运动有良好的动态特性。详细分析见后面有关章节。

5. 制导装置

制导装置是用来测定或探测导弹相对目标或发射点的位置,按要求的弹道形成导引指令,并送给控制系统。一般制导装置是由测量装置(雷达、红外、电视成像等)指令形成装置组成。

1.2 制导系统的功能及组成

导弹是现代化武器库中重要的武器,其中心任务是准确地击中目标。导弹制导系统就是保证导弹在飞行过程中,能够克服各种干扰因素,使导弹按照预先规定的弹道,或根据目标的运动情况随时修正自己的弹道,使之命中目标的一种自动控制系统。制导系统以导弹为控制对象,包括导引系统和控制系统两部分。“制导”就是控制和导引的集合,制导系统是导引系统与控制系统的总称。

1.2.1 制导系统的基本功能

把导弹导引控制到目标是制导系统的中心任务。为了完成这个任务,制导系统必须具备以下基本功能:

- (1) 导弹在飞向目标的过程中,要不断地测量导弹的实际运动与理想运动之间的偏差;
- (2) 据此偏差的大小和方向形成控制指令,在此指令的作用下,通过控制系统控制导弹改变运动状态,消除偏差;
- (3) 克服各种干扰因素的影响,使导弹始终保持所需要的运动姿态和轨迹。

制导系统最主要的性能指标是制导精度,它是决定命中精度的最重要的因素。

1.2.2 制导系统的基本组成

导弹制导系统的基本组成如图 1.3 所示,包括导引系统和姿态控制系统两部分。

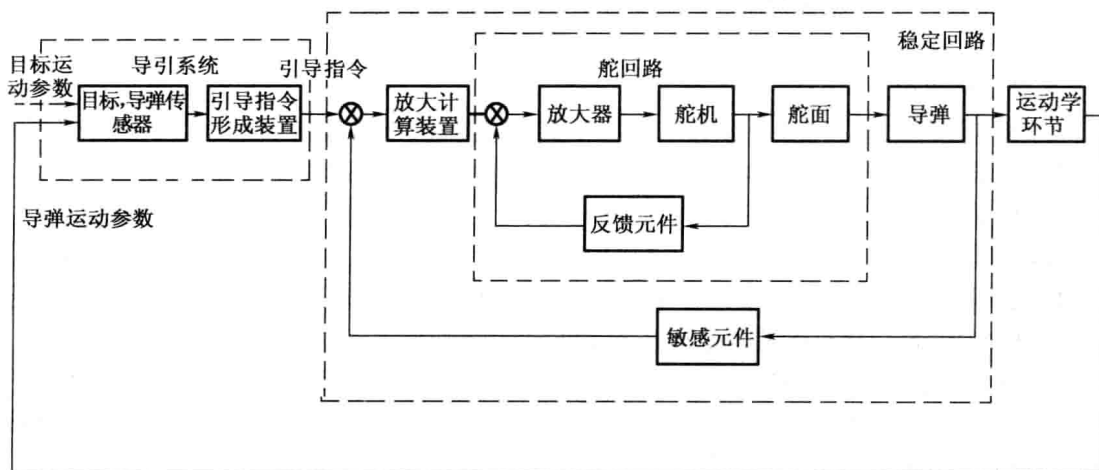


图 1.3 导弹制导系统的基本组成框图

导引系统一般由测量装置、导引计算机(装置)组成,其功能是测量相对理想弹道或目标的运动偏差,按照预先设计好的导引规律,由导引计算机形成控制指令。该控制指令通过导弹控制系统控制导弹运动。

导弹姿态控制系统又称自动驾驶仪,和飞机姿态控制系统一样,一般由姿态敏感元件、控制计算机和伺服机构组成。在制导控制系统中,一般将姿态控制系统称为稳定回路或“小回路”,其主要功能是保证导弹在引导指令作用下沿着要求的弹道飞行并能保证导弹的姿态稳定不受各种干扰的影响。

导弹的制导系统也是以导弹为控制对象的闭环回路,又称“大回路”。它由导引系统、弹上控制系统(小回路)、弹体环节及运动学环节(描述导弹与目标相对运动的运动学关系)组成,如图 1.4 所示。

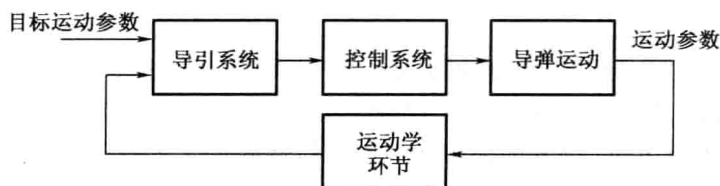


图 1.4 导弹制导回路原理图

1.3 对制导系统的基本要求

为了完成导弹的制导任务,对导弹制导系统有很多要求,最基本的要求是制导系统的制导准确度、对目标的鉴别力、可靠性和抗干扰能力等几个方面。

1. 制导准确度

导弹与炮弹之间的差别在效果上看是导弹具有很高的命中概率,而其实质上的不同在于导弹是被控制的,所以制导准确度是对制导系统的最基本也是最重要的要求。

制导系统的准确度通常用导弹的脱靶量表示。所谓脱靶量,是指导弹在制导过程中与目标间的最短距离。从误差性质看,造成导弹脱靶量的误差分为两种:一种是系统误差,另一种是随机误差。系统误差在所有导弹攻击目标过程中是固定不变的,因此,系统误差为脱靶量的常值分量;随机误差分量是一个随机量,其平均值等于零。

导弹的脱靶量允许值取决于很多因素,主要取决于给出的命中概率、导弹战斗部的质量和性质、目标的类型及其防御能力。目前,战术导弹的脱靶量可以达到几米,有的甚至可与目标相碰,战略导弹由于其战斗部威力大,目前的脱靶量可达到几十米。

为了使脱靶量小于允许值,就是提高制导系统的制导准确度,也就是减小制导误差。

下面从误差来源角度分析制导误差。从误差来源看,导弹制导系统的制导误差分为动态误差、起伏误差和仪器误差。

(1) 动态误差

动态误差主要是由于制导系统受到系统的惯性、导弹机动性能、导引方法的不完善以及目标的机动等因素的影响,不能保证导弹按理想弹道飞行而引起的误差。例如,当目标机动时,由于制导系统的惯性,导弹的飞行方向不能立即随之改变,中间有一定的延迟,因而使导弹离开基准弹道,产生一定的偏差。

导引方法不完善所引起的误差,是指当所采用的导引方法完全正确地实现时所产生的误差,它是导引方法本身所固有的误差,这是一种系统误差。

导弹的可用过载有限也会引起动态误差。在导弹飞行的被动段,飞行速度较低时或理想弹道弯曲度较大、导弹飞行高度较高时,可能会发生导弹的可用过载小于需用过载的情况,这时导弹只能沿可用过载决定的弹道飞行,使实际弹道与理想弹道间出现偏差。

(2) 起伏误差

起伏误差是由于制导系统内部仪器或外部环境的随机干扰所引起的误差。随机干扰包括目标信号起伏、制导回路内部电子设备的噪声、敌方干扰、背景杂波、大气紊流等。当制导系统受到随机干扰时,制导回路中的控制信号便附加了干扰成分,导弹的运动便加上了干扰运动,使导弹偏离基准弹道,造成飞行偏差。

(3) 仪器误差

由于制造工艺不完善造成制导设备固有精度和工作稳定的局限性及制导系统维护不良等原因造成的制导误差,称为仪器误差。

仪器误差具有随时间变化很小或保持某个常值的特点,可以建立模型来分析它的影响。

要保证和提高制导系统的制导准确度,除了在设计、制造时应尽量减小各种误差外,还

要对导弹的制导设备进行正确使用和精心维护,使制导系统保持最佳的工作性能。

2. 作战反应时间

作战反应时间,指从发现目标起到第一枚导弹起飞为止的一段时间,一般来说应由防御的指挥、控制、通信系统和制导系统的性能决定。但对攻击活动目标的战术导弹,则主要由制导系统决定。当导弹系统的搜索探测设备对目标识别和进行威胁判定后,立即计算目标诸元并选定应射击的目标。制导系统便对被指定的目标进行跟踪,并转动发射设备、捕获目标、计算发射数据、执行发射操作等。制导系统执行上述操作所需要的时间称为作战反应时间。随着科学技术的发展,目标速度越来越快,由于难以实现在远距离上对低空目标的搜索、探测,因此制导系统的反应时间必须尽量短。

3. 制导系统对目标的鉴别力

如果要使导弹去攻击相邻几个目标中的某一个指定目标,导弹制导系统就必须具有较高的距离鉴别力和角度鉴别力。距离鉴别力是制导系统对同一方位上、不同距离的两个目标的分辨能力,一般用能够分辨出的两个目标间的最短距离 $\Delta\gamma$ 表示;角度鉴别力是制导系统对同一距离上、不同方位的两个目标的分辨能力,一般用能够分辨出的两个目标与控制点连线间的最小夹角 $\Delta\varphi$ 表示,如图 1.5 所示。

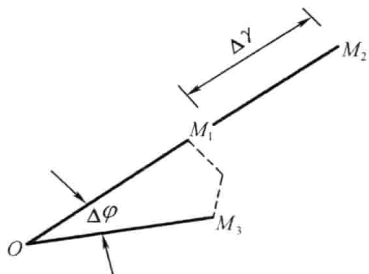


图 1.5 制导系统的目标分辨率原理图

如果导弹的制导系统是基于接受目标本身辐射或者反射的信号进行控制的,那么鉴别力较高的制导系统就能从相邻的几个目标中分辨出指定的目标;如果制导系统对目标的鉴别力较低,就可能出现下面的情况:

(1) 当某一目标辐射或反射信号的强度远大于指定目标辐射或反射信号的强度时,制导系统便不能把导弹引向指定的目标,而是引向信号较强的目标。

(2) 当目标群中多个目标辐射或反射信号的强度相差不大时,制导系统便不能把导弹引向指定目标,因而导弹摧毁指定目标的概率将显著降低。

制导系统对目标的鉴别力主要由其传感器的测量精度决定,要提高制导系统对目标的鉴别力,必须采用高分辨能力的目标传感器。

4. 制导系统的抗干扰能力

制导系统的抗干扰能力是指遭到敌方袭击、电子对抗、反导对抗和受到内部、外部干扰时,该制导系统保持其正常工作的能力。对多数战术导弹而言,要求具有很强的抗干扰能力。

不同的制导系统受干扰的情况各不相同,对雷达遥控系统而言,它容易受到电子干扰,特别是敌方施放的各种干扰,对制导系统的正常工作影响很大。为提高制导系统的抗干扰能力,一是要不断地采用新技术,使制导系统对干扰不敏感;二是要在使用过程中加强制导系统工作的隐蔽性、突然性,使敌方不易察觉制导系统是否在工作;三是制导系统可以采用多种工作模式,一种模式被干扰,立即转换到另一种模式制导。

对战略导弹而言,它的生存能力很重要。为提高生存能力,战略导弹可以在井下或水下发射、机动发射。

5. 制导系统的可靠性

可靠性是指产品在规定的条件下和规定的时间内,完成规定功能的能力。制导系统的

可靠性,可以看做是在给定使用和维护条件下,制导系统各种设备能保持其参数不超过给定范围的性能,通常用制导系统在允许工作时间内不发生故障的概率来表示。这个概率越大,表明制导系统发生故障的可能性越小,也就是系统的可靠性越好。

规定的时间是可靠性定义中的核心。因为不谈时间就无可靠性而言,而规定时间的长短又随着产品对象不同和使用目的不同而异。如导弹、火箭(成败性系统)是要求在几秒或几分钟内可靠,地下电缆、海底电缆系统则要求几十年内的可靠,一般的电视机、通信设备则要求几千小时到几万小时内可靠。一般来说,产品的可靠性是随着使用时间的延长而逐渐降低,所以,一定的可靠性是对一定时间而言的。

规定的条件是指使用条件、维护条件、环境条件和操作技术,这些条件对产品可靠性都会有直接的影响,在不同的条件下,同一产品的可靠性也不一样。比如,实验室条件与现场使用条件不一样,它们的可靠性有时可能相近,有时可能会相差几倍到几十倍。所以不在规定条件下谈论可靠性,就失去比较产品质量的前提。

制导系统的工作环境很复杂,影响制导系统工作的因素很多。例如,在运输、发射和飞行过程中,制导系统要受到振动、冲击和加速度等影响;在保管、储存和工作过程中,制导系统要受到温度、湿度和大气压力变化以及有害气体、灰尘等环境的影响。制导系统的每个元件,由于受到材料、制造工艺的限制,在外界因素的影响下,都可能使元件变质、失效,从而影响制导系统的可靠性。为了保证和提高制导系统的可靠性,在研制过程中必须对制导系统进行可靠性设计,采用优质耐用的元器件、合理的结构和精密的制造工艺。除此之外,还应正确地使用和科学地维护制导系统。

规定的功能常用产品的各种性能指标来评估,通过试验,产品的各项规定的性能指标都已达到,则称该产品完成规定的功能,否则称该产品丧失规定功能。产品丧失规定功能的状态叫做产品发生“故障”或“失效”。相应的各项性能指标就叫做“故障判据”或“失效判据”。

关于可靠性定义中的能力,由于产品在工作中发生故障带有偶然性,所以不能仅看产品的工作情况而应在观察大量的同类产品之后,方能确定其可靠性的高低,故可靠性定义中的“能力”具有统计学的意义。如产品在规定的时间内和规定的条件下,失效数与产品总量之比愈小,可靠性就愈高,或者产品在规定的条件下,平均无故障工作时间愈长,可靠性也就愈高。

6. 体积小、质量轻、成本低

在满足上述基本要求的前提下,尽可能使制导系统的仪器设备结构简单、体积小、质量轻、成本低,对弹上的仪器设备更应如此。

习题与思考题

1. 导弹有哪些分类方法?
2. 导弹由哪几部分组成,各部分作用是什么?
3. 指出图 1.2 中哪些导弹为轴对称导弹,哪些导弹为面对称导弹?
4. 制导系统由哪几部分组成,制导系统的功能是什么?
5. 对制导系统有哪些基本要求?

第2章 制导方式及制导规律

2.1 制导方式基本概念

2.1.1 制导方式与制导系统

制导方式是指实现导引和控制飞行器按照特定规律,选择飞行路线去寻找和攻击目标的运动过程中所采用的手段和方法。采用该制导方式组成的系统为制导系统。

2.1.2 制导系统分类

粗略地分,所有制导系统可以分成两种类型,即程序制导系统和从目标获取信息的制导系统。

在程序制导系统中,由程序机构产生的信号起控制作用。这种信号确定所需的飞行弹道,制导系统的任务是力图消除弹道偏差。飞行程序在飞行器发射前根据目标坐标给定,因此这种制导系统只能导引导弹攻击固定目标。相反,带有接收目标状态信息的制导系统,可以在飞行过程中根据目标的运动改变飞行器的弹道,因此这种系统既可以攻击固定目标也可以攻击活动目标。

如果将制导系统作用原理作为分类基础,以在什么样的信息基础上产生制导信号,利用什么样的物理现象确定目标和飞行器的坐标为分类依据,那么就可按下面广泛采用的制导系统进行分类:自主式制导系统、自动寻的制导系统、遥控制导系统、复合制导系统。

2.2 各种制导方式及其原理

2.2.1 自主式制导

导引指令信号仅由弹上制导设备敏感地球或宇宙空间物质的物理特性而产生,制导系统和目标、指挥站不发生联系,称为自主制导。

导弹发射前,预先确定了导弹的弹道。导弹发射后,弹上制导系统的敏感元件不断测量预定的参数,如导弹的加速度、导弹的姿态、天体位置、地貌特征等。这些参数在弹上经适当处理,与在预定的弹道运动时的参数进行比较,一旦出现偏差,便产生导引指令使导弹飞向预定的目标。

为了确定飞行器的位置,在飞行器上必须安装位置测量系统。常用的测量系统有磁测量系统、惯性系统、天文导航系统等。自主式制导设备是一种由各种不同作用原理的仪表所组成的十分复杂的动力学系统。

采用自主制导系统的导弹,由于和目标及指挥站不发生任何联系,故隐蔽性好,不易被干扰。导弹的射程远,制导精度也较高。但导弹一经发射出去,其飞行弹道就不能再变,所