

高等学校教材



精 确 制 导 导 弹

制导控制系统仿真

JINGQUE ZHIDAO DAODAN ZHIDAO
XITONG FANGZHEN

符文星 于云峰 黄勇 尉建利 编著

西北工业大学出版社

／ 高等学校教材

精确制导导弹 制导控制系统仿真

符文星 于云峰 黄 勇 尉建利 编著

西北工业大学出版社

【内容简介】 本书介绍了精确制导武器制导导弹制导控制系统全数字仿真及半实物仿真的基本理论和方法。内容反映了近年来国内外在仿真实理论研究方面的最新成果,范围涉及连续系统仿真、计算机控制系统仿真和半实物仿真等,重点阐述了连续系统仿真的基本理论和方法。全书共分10章,内容包括绪论,仿真建模与模型变换,应用数值积分方法仿真连续系统,应用模型离散化方法仿真连续系统,特殊仿真模型的处理,计算机控制系统数字仿真,制导控制系统半实物仿真,MATLAB在仿真中的应用,多媒体视景仿真,仿真模型校核、验证与确认等。

本书可作为高等学校飞行器导航、制导与控制专业本科生的教学用书,也可作为硕士研究生的教学参考书,还可供相关专业科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

精确制导导弹制导控制系统仿真/符文星等编著. —西安:西北工业大学出版社,2010.3
ISBN 978-7-5612-2753-4

I. ①精… II. ①符… III. ①导弹制导—控制系统—系统仿真 IV. ①TJ765.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第036697号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路127号 邮编:710072

电话:(029)88493844 88491757

网址:www.nwpup.com

印刷者:陕西兴平报社印刷厂

开本:787 mm×1 092 mm 1/16

印张:10.875

字数:261千字

版次:2010年3月第1版 2010年3月第1次印刷

定价:25.00元

前 言

系统仿真是一门基于相似理论和模型试验的综合性学科,近年来随着计算机技术的发展而得到迅速发展。它通过建立系统的模型,并将模型编写成相关计算机能够实现的程序代码和软件,然后在计算机上运行,通过分析模型的运行结果来研究实际系统的性能。

由于航空、航天系统的特殊性,完全通过实物试验来验证其各种性能是不可能的,需要耗费大量的人力、经费和研制周期。因此,系统仿真的方法近年来在航空、航天领域得到了迅速的发展,已经成为飞行器研究过程中必不可少的重要手段之一,从方案论证、详细设计到定型试验,都离不开系统仿真的参与。基于这个原因,目前国内外相关研究单位均建立了相关的专用仿真实验室,用于飞行器设计过程中的分析和测试,并对仿真实论和方法进行深入的研究。

本书是导航、制导与控制专业的本科生教材,可供飞行器设计,导航、制导与控制等相关专业的高年级本科生使用,也可供相关专业的工程技术人员参考。

本书内容共分为10章。第1章介绍了系统仿真的基本概念及其在制导控制系统中的应用;第2章介绍了仿真建模的方法及不同类型的仿真模型之间的相互转换方法;第3,4章分别介绍了应用数值积分方法和模型离散化方法对连续系统模型进行仿真的方法;第5章介绍了间断特性和病态系统的仿真处理方法;第6章介绍了计算机控制系统的仿真方法;第7章介绍了制导控制系统半实物仿真系统的组成和主要仿真设备;第8章介绍了MATLAB在仿真中的应用;第9章对视景仿真技术做了简单介绍;第10章介绍了仿真模型校核、验证与确认技术。

本书在内容安排上力求体现以下特点:①强调基础理论。对系统仿真的基本概念、连续系统和计算机控制系统的基本方法做了系统、明确的介绍。②重视实用性。仿真本身是一门实践性很强的学科,本书在内容上力图同时满足理论学习和工程实际应用相结合的要求。③注意吸收近年来发展的新技术、新理论,如视景仿真、仿真模型的校核与验证等。

本书由符文星构思框架,符文星、于云峰、黄勇、尉建利共同完成编写,符文星负责本书的统稿和编排工作。

本书是笔者在总结西北工业大学飞行控制与仿真技术研究所多位教师教学和科研工作实际经验的基础上,并参考了国内外相关文献资料编写完成的,在编写过程中得到了研究所全体教师的大力支持和帮助,另外研究所的多位研究生参与了相关的资料收集和文字校核工作,在此一并致谢!笔者在编写过程中参考了多位学者的研究文献,在此也向他们表示感谢。

由于笔者水平有限,书中难免有不妥之处,希望广大读者批评指正。

编著者

2009年11月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 基本概念	1
1.2 制导控制系统仿真	6
第 2 章 仿真建模与模型变换	10
2.1 数学建模方法.....	10
2.2 线性控制系统常用数学模型描述形式.....	14
2.3 复杂模型的简化.....	17
第 3 章 应用数值积分方法仿真连续系统	22
3.1 单步法.....	22
3.2 多步法.....	26
3.3 预估-校正法	28
3.4 数值积分方法的误差和稳定性分析.....	29
3.5 数值积分方法选择的原则.....	31
3.6 微分方程组的数字仿真.....	32
第 4 章 应用模型离散化方法仿真连续系统	34
4.1 传递函数的离散相似法.....	34
4.2 状态方程的离散相似法.....	43
4.3 增广矩阵法.....	47
4.4 双线性替换法.....	49
4.5 根匹配法.....	51
4.6 多环节大系统的仿真.....	54
第 5 章 特殊仿真模型的处理	57
5.1 间断特性的仿真.....	57
5.2 病态系统的仿真.....	60
第 6 章 计算机控制系统数字仿真	63
6.1 计算机控制系统概述.....	63
6.2 计算机控制系统仿真.....	64
6.3 差分方程的数字仿真.....	67

6.4	纯延迟环节仿真	68
第7章	制导控制系统半实物仿真	70
7.1	半实物仿真基本概念	70
7.2	半实物仿真设备	75
7.3	半实物仿真软件	96
7.4	半实物仿真系统举例	98
第8章	MATLAB 在仿真中的应用	105
8.1	MATLAB 简介	105
8.2	MATLAB 的基本使用方法	108
8.3	MATLAB 程序设计	115
8.4	Simulink 仿真工具箱	123
第9章	多媒体视景仿真	136
9.1	概述	136
9.2	虚拟场景建模	137
9.3	虚拟场景管理	142
9.4	特效应用	148
9.5	应用举例	153
第10章	仿真模型校核、验证与确认	159
10.1	VV&A 的基本概念及发展现状	159
10.2	建模与仿真过程中的校核与验证	160
10.3	VV&A 的基本原则	161
10.4	仿真精度分析的 CLIMB 方案	162
10.5	仿真模型的校核方法	164
10.6	仿真模型的验证方法	165
参考文献		167

第 1 章 绪 论

系统仿真(System Simulation)是指通过构造一个“模型”来模拟实际系统内部所发生的运动过程,这种建立在模型系统上的试验技术就称为仿真技术或模拟技术。就仿真本身而言,这并不是是一种新技术,因为人类很早就采用各种基于模型仿真技术的方法来认识和研究客观世界。只有在 20 世纪 40 年代以后,随着电子计算机技术的发展,仿真技术才取得了迅速的发展,并逐步形成一门独立的学科。与电子计算机的发展过程类似,仿真的发展也经历了模拟机仿真、混合机仿真(模拟技术与数字技术相结合)、数字机仿真的发展过程。另外,近年来随着仿真技术的发展,半实物仿真(将数学模型和物理效应模型相结合)逐步成为一种主要的仿真手段。

航空、航天技术领域研究的复杂性和特殊性,使其成为仿真技术应用最广泛的领域之一。从某种意义上讲,正是航空、航天等高新技术领域研究的需求牵引,才促使仿真技术水平得以迅速提高,因为世界上第一台数字计算机的主要工作就是解算导弹的飞行弹道。后来,仿真技术的应用范围逐步扩展到核能、机械、电子、化工、教育等领域,成为复杂系统设计、分析、研究、评价、决策、培训过程中的重要手段,而且其应用范围还在不断扩大。

在导弹研制过程中,仿真技术被广泛应用于选择系统方案和参数、检验产品性能、拟定飞行试验计划和安全范围、进行飞行试验结果分析、鉴定和改进导弹系统、培养导弹操作使用人员、指导作战使用等。可以说,在导弹武器研制和使用的全寿命过程中,仿真技术都发挥着重要的作用,是必不可少的技术手段。

本章主要讲述有关系统仿真的基本概念,并对仿真技术在导弹制导控制系统研制过程中的应用及发展趋势进行介绍。

1.1 基本概念

1.1.1 系统

系统是一个很宽泛的概念,很难进行精确描述,正如戈登(G. Gordon)在其所著的《系统仿真》一书中写到:“系统这个术语已经在各个领域用得如此广泛,以至很难给它下一个定义。”在这里仅给出一种较普遍接受的定义:系统是指自然界存在着的相互联系、相互作用、相互制约,而且按照一定规律运动着的实体组合。

从广义概念上讲,系统的范围是很广的,所包含的种类也很繁多。例如:地球上的自然气候、山川水土、各种动植物和森林海洋组成一个相互依存、相互制约且不断运动又保持着平衡状态的整体,就构成一个自然系统。又如图 1.1 所示的导弹姿态控制系统,它由姿态角传感器、控制器、舵机和弹体环节组成。

根据系统是否是由人类根据某种需要而建立的,可以将系统分为工程系统和非工程系统。

非工程系统也称为自然系统,是人类在长期的生产劳动和社会实践中逐渐认识世界而形成的,而工程系统是人类根据某种需要,为实现预定功能而构成的系统。显而易见,前述第一个例子为非工程系统,第二个例子为工程系统。由于本书的内容主要是讨论导弹制导控制系统的仿真技术,所以均属于工程系统仿真。如不特殊说明,本书中所讨论的系统均指工程系统。

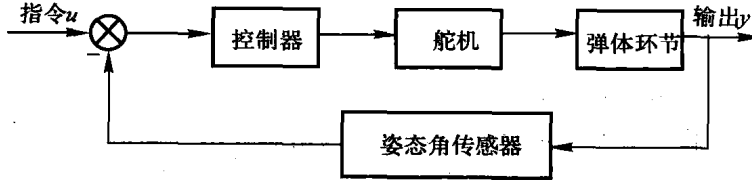


图 1.1 导弹姿态控制系统

虽然不同的系统其构成、功能和物理性质可能完全不同,但归纳起来,作为一个系统,它均具有下述基本性质。

1. 系统是实体的集合

一个系统一般由两个或两个以上的有效环节组成。系统的各个组成部分既具有一定的相对独立性,又相互联系构成一个整体。图 1.2 所示的导弹纵向飞行控制系统,就包括四个基本实体。

2. 组成系统的实体相互关联

要使一个系统能有效地按照预定目标完成任务,它的各环节或者各子系统之间就必然相互联系、相互作用。这种联系和作用可能表现为某一个子系统从其他子系统接受输入,从而产生有用的输出,同时该子系统的输出又可能是另一个子系统或环节的输入。即系统的关联性表现为各环节之间的信息流动和信息反馈作用。

3. 系统要按照预定的目的运行

人们设计一个系统,是为了实现预定的目的,也就是说系统具有目的性。一个系统的目的性表现为两个方面:一是系统要完成特定的功能;二是在完成基本功能的同时,要使系统达到最优化。

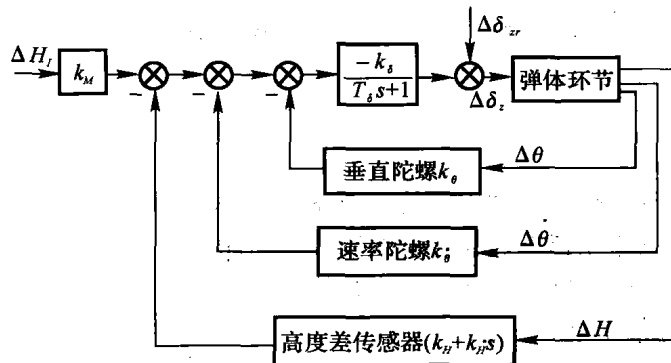


图 1.2 导弹纵向飞行控制系统

比如导弹的纵向飞行控制系统,其原理框图如图 1.2 所示。要求该系统完成以下任务:
①在垂直气流作用下对导弹的飞行高度进行稳定;②控制导弹按照给定高度爬高。无论是对

飞行高度进行稳定,还是按给定高度爬高,都要求系统有最优的动态品质。

1.1.2 模型

从理论上讲,研究系统最直接的方法是利用实际系统来做试验。但实际上出于经济、安全和缩短研制周期的考虑,一般希望首先在与真实系统具有某种相似性的模型上进行试验。另外,在真实系统未研制出来以前,为了预先掌握系统性能,也必须借助于系统的模型。

模型是为了研究系统性能而收集的与该系统有关的信息集合体,是系统某种特定性能的一种抽象形式。通过模型可以描述系统的本质和内在的关系。数学模型分为物理模型和数学模型两大类。

1. 物理模型

物理模型也称做“实体模型”,是根据系统之间的相似性而建立起来的模型。物理模型的种类很多,典型的有以下几种:

(1)缩比模型。例如:风洞试验中的导弹模型、飞机模型,试验池中的船体模型等。

(2)研制过程中的部件原理样机。例如:导弹导引头、飞控计算机、舵机等。

(3)“直接模拟”模型。例如:由于力学系统、水力学系统等与电学系统之间存在相似性,且电学系统容易改变,因此可以用电学系统模型来研究力学系统。

2. 数学模型

数学模型是通过理论分析推导和物理实验得出的一套反映对象运动规律的数学方程式。通过对数学模型的求解,揭示研究对象的内在规律。

数学模型是现代计算机仿真的基础。

根据数学表达式的性质,数学模型可以分为两大类:静态模型和动态模型。

静态模型的一般形式是代数方程、逻辑表达式。

动态模型根据系统类型不同,其形式各不相同。对连续系统,一般用常微分方程、偏微分方程、状态方程和传递函数来描述;对离散系统,一般用差分方程、离散状态方程、脉冲传递函数和概率模型来描述。

按照系统数学描述的差别,数学模型分类见表 1.1。

表 1.1 数学模型分类

模型类型	静态模型	动态模型			
		连续系统模型		离散系统模型	
		集中参数	分布参数	时间离散	离散事件
数学描述	代数方程	微分方程 状态方程 传递函数	偏微分方程	差分方程 离散状态方程	概率分布 排队论
应用举例	电位器输出	动力学系统	热传递系统	采样系统	交通系统 库存系统

对导弹制导控制系统而言,其数学模型包括静态模型和动态模型两种形式。其导弹运动学和动力学方程主要是常微分方程。

1.1.3 系统仿真

系统仿真是根据相似原理建立模型,利用模型试验来对实际系统进行研究的一种试验方法。它利用一个模型来模拟实际系统内部发生的运动过程,以达到某种实际应用效果,或者对系统动态性能进行求解。

1. 系统仿真的用途

系统仿真的用途非常广泛,尤其是近年来随着计算机技术的发展,其应用迅速扩展到国民经济的各个领域,简单归纳起来有以下几个方面:

- (1) 优化系统设计。通过调整仿真模型结构和参数可以达到优化系统设计的目的。
- (2) 预测、评价系统性能。
- (3) 缩短研制周期,节约研制经费。
- (4) 进行故障复现,判断故障原因。
- (5) 提高试验安全性。对于有危险性的试验,如试验有毒、有放射性,通过仿真可以极大提高试验安全性。
- (6) 训练系统操作人员。

2. 系统仿真的分类

根据不同的标准,系统仿真的分类方法有多种。

(1) 根据仿真所用的模型不同,可以将仿真分为数字仿真、物理仿真和半实物仿真。

1) 数字仿真(digital simulation)又称“计算机仿真”,是指在计算机上运行数学模型,在数学模型上进行试验的仿真技术。数字仿真可以是实时的,也可以是非实时的。

2) 物理仿真(physical simulation)是基于物理模型的仿真。如飞机、导弹模型在风洞中进行的吹风试验;用电学系统模拟力学系统;导弹原理样机在地面进行试验等。

物理仿真的优点是可以将数学模型建模过程中难以考虑到的非线性因素和干扰因素直接引入仿真回路,仿真结果可信度更高。

物理仿真的缺点是模型成本高、通用性差、参数调整比较困难。

3) 半实物仿真(hardware in the loop simulation)是将数字仿真和物理仿真结合起来的一种仿真技术,从英文字面理解就是“硬件在回路仿真”。在半实物仿真过程中,部分模型为数字模型,在仿真计算机上运行;部分模型为物理模型,直接接入仿真回路。半实物仿真比数字仿真更接近真实情况,同时又可以解决物理仿真中一些难以模拟的状态,是一种重要的仿真手段。例如导弹的地面仿真试验,导引头、惯性测量组件、舵机等可以接入仿真回路,然后采用目标模拟器模拟目标特性、采用转台模拟导弹空间姿态、采用负载模拟器模拟舵轴承受的铰链力矩、采用加速度仿真器模拟导弹线加速度;同时采用数学模型计算导弹的空间运动学和动力学参数,就构成导弹的半实物仿真系统。半实物仿真是导弹研制过程中不可缺少的重要手段。

(2) 根据仿真时间标尺 τ 和物理时间标尺 T 之间的相对比例关系可以将仿真分为实时仿真和非实时仿真。

- 1) $\tau/T = 1$, 则称为实时仿真;
- 2) $\tau/T > 1$, 则称为亚(欠)实时仿真;
- 3) $\tau/T < 1$, 则称为超实时仿真。

其中,亚实时仿真和超实时仿真统称为非实时仿真。

(3)根据仿真所用的计算机不同,可以分为模拟计算机仿真、数字计算机仿真、混合计算机仿真。

1)当模拟计算机仿真时,所有实际系统中的物理量,如速度、加速度、角度、角速度、位置等,均按照一定比例变换为电压量,在模拟计算机上进行求解,将系统中的物理量随时间变化的动态关系转变为电压随时间变化的关系。

模拟计算机仿真的优点:

- a. 计算延迟小,可以快速求解微分方程。
- b. 可以灵活选择进行实时仿真或非实时仿真。
- c. 易于和实物相连,不需要 A/D 和 D/A 转换。

缺点是求解精度低,模型修改困难,逻辑控制功能差。

2)数字计算机仿真时所有的物理量均以一定字长的二进制数码表示,字长越长,精度越高。

数字计算机仿真的优点:

- a. 计算精度高。现代数字计算机的最大字长已经超过 64 位,精度远高于模拟计算机。
- b. 模型修改方便。仅需要修改源程序,并重新编译即可。

数字计算机仿真面临的主要问题:

- a. 计算存在延迟,且在计算机硬件条件不变的前提下,模型越复杂,延迟越大。
- b. 需要研究各种仿真算法,且不同算法的复杂程度和计算精度有显著区别。
- c. 和实物相连需要有 A/D 和 D/A 转换装置。
- d. 实现实时仿真困难,尤其在模型比较复杂的情况下。

3)混合计算机仿真是将模拟计算机和数字计算机通过 A/D, D/A 接口连接起来组成的数字/模拟混合计算机仿真系统。混合计算机仿真兼有数字计算机仿真和模拟计算机仿真的优点,但其缺点是组成复杂,造价高。

由于近年来数字计算机及外围接口设备(A/D, D/A, DIO 等)发展迅速,数字计算机仿真成为目前主流的仿真方式,基本已经替代模拟计算机仿真和混合计算机仿真。

(4)根据被研究对象的不同特征,可以将仿真分为连续系统仿真和离散事件系统仿真。

1)连续系统仿真是指对那些系统变量随时间连续变化的系统进行的仿真研究。这类对象的数学模型包括连续模型(微分方程等)、离散时间模型(差分方程等)以及连续-离散混合模型。

2)离散事件系统仿真则是指对那些系统状态只在一些时间点上由于某种随机事件的驱动而发生变化的系统进行仿真试验。这类系统的数学模型常用流程图或网络图来描述。

3. 数字仿真的过程和步骤

利用计算机进行数字仿真,一般需要经过的过程和步骤如下:

(1)定义阶段。它是确定原系统进行仿真的目的和基本仿真要求。

(2)建模阶段。它是建立系统的数学模型,将被研究系统用演绎法或实验法抽象出表达式或信号流图,这一阶段也称为一次化建模阶段。

(3)模型变换阶段。它是将数学模型转换成能在计算机上运行的仿真模型,即程序设计与编写,这一阶段也称为二次化建模阶段。

(4)仿真运行阶段。它是在仿真计算机上加载仿真模型,设定运行参数及初始条件,计算

得到仿真结果。

(5)结果分析阶段。它是整理分析仿真结果,确认仿真结果正确无误后,根据要求撰写仿真技术报告。

4. 系统仿真的发展趋势

系统仿真目前的应用范围在不断地扩大,总的来看其发展趋势可以归纳为下述几个方面:

(1)不断向大系统、复杂系统的建模与仿真方向发展,模型的复杂程度和规模迅速增大。

(2)向网络化的方向发展。

(3)和数字图像技术结合,向虚拟现实方向发展。

(4)向智能化建模和仿真方向发展。

(5)发展模型精度校核和置信度分析技术,不断提高模型的逼真度。

1.2 制导控制系统仿真

1.2.1 制导控制系统简介

1. 制导控制系统的概念

导弹的制导控制系统是导弹制导系统和控制系统的总称。

导弹制导系统是指在导弹攻击目标的过程中,导引和控制导弹按照预定的规律调整飞行路线,导向目标所需的全部装置。制导控制回路是指制导控制系统信息流程组成的闭环控制回路,具体包括目标和导弹信息、控制指令计算与传输、指令执行及导弹运动等环节。制导控制系统原理如图 1.3 所示。

导弹控制系统也称做稳定控制系统,是稳定导弹质心与姿态运动装置的总称。稳定控制回路是这些装置与导弹运动学、动力学特性所组成的闭环控制回路。稳定控制回路是制导控制回路的内回路,是制导指令的执行系统,其原理结构如图 1.4 所示。

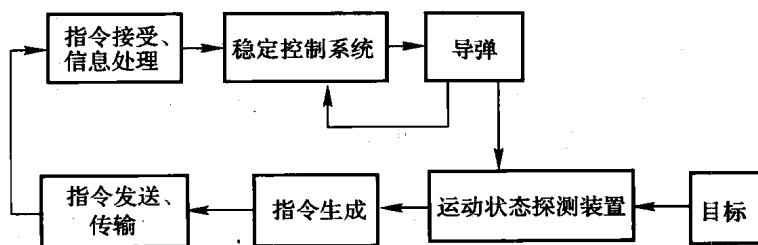


图 1.3 制导控制系统原理图

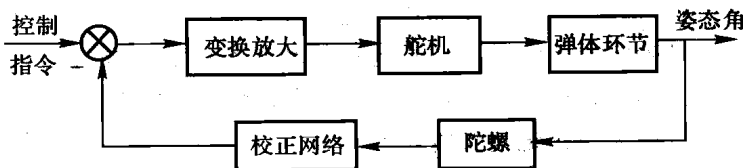


图 1.4 稳定控制系统原理图

2. 制导控制系统的组成

(1) 导弹和目标运动状态探测装置。它包括目标和导弹的空间位置、速度和加速度, 导弹的姿态角、角速度等。对这些物理量的测量, 根据不同的制导控制方式可以在弹上完成, 也可以从弹以外的其他地方(如制导站)完成, 然后再通过数据链路传到弹上。以寻的制导导弹为例: 导引头(红外、雷达等)实现对目标运动量的测量, 用惯性器件(陀螺、加速度计)实现对导弹空间位置和姿态的测量。

(2) 指令生成与传输系统。它是根据导弹和目标之间的相对运动状态, 按照预先设定的导引规律, 生成导弹的控制指令。如果这部分工作是在弹上完成的, 则直接将指令传递给控制系统; 否则, 对遥控指令制导的导弹, 必须通过专用数据链路将生成的指令传递到弹上。

(3) 导弹稳定控制系统。如前所述, 导弹稳定控制系统是制导控制系统的内回路, 是制导指令的执行系统。导弹稳定控制系统通过综合处理稳定信号和控制指令, 生成舵控指令, 控制导弹舵面偏转, 在改变导弹飞行状态的同时稳定导弹姿态。稳定控制系统也称为自动驾驶仪。

(4) 控制对象即导弹本身。要保证导弹能完成预定的任务, 导弹的制导控制系统就必须有很好的性能, 这就要求制导控制系统的各个组成部分如导引头、惯性测量组件、弹载计算机、舵机、弹体环节等必须有良好的设计和极高的可靠性, 才能确保导弹有良好的整体性能。

3. 制导系统的分类

由于攻击对象的物理和运动特性的不同, 因而导弹的制导方法各不相同。归纳起来, 目前导弹的制导系统有以下几种类型。

(1) 预制式制导。预制式制导也称做程序制导、方案制导或自主式制导。在导弹发射前将预定的运动规律装在导弹上, 导弹根据程序指令运动。常见的预制式制导方式有惯性制导、全球卫星定位系统制导(GPS, GLONASS, 北斗卫星等)、天文制导、地形/景象匹配制导等。预制式制导一般用于攻击固定目标, 如军事基地、雷达站等。弹道导弹一般采用预制式制导, 另外, 预制式制导也可用于防空导弹和空空导弹的发射初段, 控制导弹到预定的空间位置。

(2) 遥控制导。遥控制导的制导信息从导弹以外的制导站(地面站、载机或舰船)上获取, 然后发送到导弹, 控制导弹按照预定导引规律飞向目标。在这种制导方式下, 制导站同时测量目标和导弹的运动状态, 计算出导弹偏离预定路线的偏差, 然后将偏差传递到导弹, 纠正导弹飞行路线以命中目标。遥控制导进一步又可以分为波束制导、指令制导和 TVM 制导。

(3) 寻的制导。寻的制导是指导弹能够自主地搜索、识别、跟踪和攻击目标的制导方式。寻的制导是利用导弹导引头探测接收目标辐射或反射的某种特征能量(电磁波、红外、可见光、激光、毫米波等), 从而识别目标并跟踪目标, 弹载信息处理系统根据导弹-目标相对位置生成控制指令, 实现对目标的精确攻击。寻的制导根据能源位置不同可以分为主动寻的、被动寻的、半主动寻的三种。寻的制导可以实现导弹“发射后不管”, 是目前攻击移动目标的主要方式。

(4) 复合制导。所谓复合制导是指在导弹攻击目标的过程中, 用到前述预制式制导、遥控制导和寻的制导中的两种或多种制导方式, 通过相互衔接、协调配合共同完成制导任务。复合制导可以将不同制导方式的优点结合起来, 同时克服其固有缺陷, 扬长避短, 实现导弹的高精度制导。复合制导一般可以划分为初制导、中制导、末制导三个阶段, 以远程空空导弹为例, 初始段为导弹发射后规避载机, 采用程序控制; 中段采用惯性导航+遥控指令修正; 末段采用主动寻的控制。

(5)多模制导。多模制导是近年来发展起来的一种新的制导方式。现代战争攻防对抗激烈,导弹作战环境不断恶化,没有干扰的净空作战几乎已经不可能。为提高导弹的抗干扰能力,最有效的方式就是采用所谓多模制导,即同时采用多种传感器探测目标信息,然后经过弹载计算机综合处理,实现干扰环境下对目标的正确识别和跟踪。例如,目前已经在空空导弹上使用的红外/紫外双模导引头,可以实现对目标红外/紫外两个波段信息的探测,有效提高抗人工红外诱饵弹的能力。另外,红外、雷达、可见光、毫米波等多模探测导引头也在研制中。多模制导是提高导弹抗干扰能力的主要技术途径之一,是导弹制导系统的发展趋势。

4. 导弹控制系统

导弹控制系统的主要任务是稳定导弹姿态并执行制导指令。导弹在空间的姿态在直角坐标系下的描述可以分为俯仰、偏航和滚转三个自由度。相应的控制系统也可以采用三通道控制,分别控制导弹的俯仰、偏航和滚转姿态角,当然,也可以根据不同需要采用两通道甚至单通道控制。不管导弹采用哪种控制方式,基本上其组成均包括控制器、执行机构、姿态敏感器(某些寻的导弹没有)。另外,近年来为了提高导弹的机动性,实现精确制导,推力矢量控制和直接力控制系统也得到了广泛的应用。

1.2.2 系统仿真的应用

系统仿真在制导控制系统设计中的应用非常广泛,尤其是近年来,随着仿真技术的不断进步,仿真精度逐步提高,已经成为各类精确制导导弹系统设计过程中不可或缺的重要手段。具体归纳起来有以下几个方面:

1. 系统仿真在制导控制系统设计过程中的应用

制导控制系统是在复杂的目标、环境和干扰背景作用下的时变的非线性控制系统。为了简化设计,一般采用的是经典的设计理论和方法,即将制导控制系统线性化,然后进行设计。这样设计的优点是可以简化设计过程,便于采用经典控制理论的方法进行分析,缺点是必须对系统进行假设和简化,而且其设计结果的正确性还必须通过试验或仿真的方法进行检验。

目前,检验设计结果正确性的一个主要手段是采用系统仿真的方法,可以这样说,在制导控制系统设计的全过程中,都必须依赖系统仿真来对系统设计结果进行分析。比如:在武器系统设计的方案论证阶段,可以通过数字仿真,来检验仿真设计的正确性,并对比、评估不同方案的优越性。在制导控制系统设计阶段,通过系统仿真可以优化控制系统结构和参数,在部分关键实物部件研制成功后,可以将其引入仿真回路,组成半实物仿真系统,检验其性能是否达到设计要求。在制导控制系统的全部实物研制完成后,可以通过半实物仿真检验其最终性能,为设计定型提供依据。

2. 系统仿真在复杂条件下导弹性能研究中的应用

受经费、试验周期等条件的限制,飞行试验往往只能选取典型设计条件进行,而对于目标的各种不同机动方式、人工干扰条件、背景干扰条件下的导弹性能,就只能依靠系统仿真的方法进行评价。另外,受飞行条件的限制,导弹的边界性能参数的确定也必须通过系统仿真的方法获取,比如导弹攻击区的远界和近界,是无法通过飞行试验完整获取的,这时,就必须通过系统仿真的方法进行研究。

3. 系统仿真在武器系统性能统计分析、确认中的应用

在导弹武器系统设计定型的时候,用户一般非常关心的一些性能参数有脱靶量、杀伤概率

等。而这些参数的确定,就必须通过大量的试验获取相关数据,然后采用统计分析的方法获取相关参数。在导弹研制的初期,这些数据主要通过实弹飞行试验的方法获取,耗费大,周期长。现在借助系统仿真技术,只须进行少量的飞行试验用于校验系统的数学模型,然后利用校准了的仿真模型按蒙特卡洛法进行大量的重复试验,就能以较高的置信度获得所需要的统计数据。

4. 系统仿真在精确制导武器使用操作培训中的应用

当导弹武器用来装备部队时,由于操作人员不熟悉武器的性能和操作流程,必须进行培训。这时可以通过系统仿真的手段,建立逼真的仿真操作环境,如视景、音响、振动等,来让操作人员在试验室就可以全面熟悉武器系统的性能和操作流程。

第 2 章 仿真建模与模型变换

从第 1 章的介绍可知,仿真是基于模型的试验活动,系统模型的正确与否,直接影响着仿真结果的正确性与可信度,所以说建模是仿真的基础与核心。本章主要介绍仿真建模以及模型变换的方法。

2.1 数学建模方法

一般来讲,建立系统数学模型的方法主要有三种:演绎法、归纳法和综合法。现在分别对其进行详细介绍。

2.1.1 演绎法

演绎法又称分析法、理论建模、机理建模。这是最早的一种建模方法,这种方法适用于内部结构和特性都很明确的系统,可以运用已知的定理、定律和原理(如能量守恒定理、动量守恒定理、牛顿定理、热力学原理、各种电路定理等)来推导得到系统的数学模型。大多数的工程系统都属于这一类。

演绎法建模属于一般到特殊的建模方法,将模型看成是在一定前提下经过演绎而得到的结果。此时,试验数据只被用来进一步证实或否定原始的原理。

应用演绎法建模时必须注意模型的存在性问题。一组完整的公理和一些给定的前提假设将产生一个唯一的模型,必须对模型的有效性进行检验。而实质不同的一组公理可能产生一组非常类似的模型。如相对论和牛顿定律,二者是有区别的,但在大多数情况下,二者的建模结果几乎是一致的。

现举例说明用演绎法建立系统数学模型的过程。

例 2.1 建立如图 2.1 所示 RLC 无源网络的数学模型。

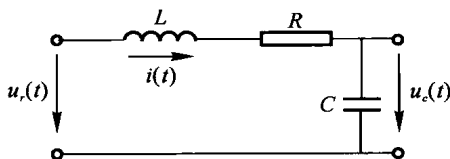


图 2.1 RLC 无源网络

解 由克希霍夫定律可得

$$L \frac{di(t)}{dt} + u_c(t) + Ri(t) = u_r(t)$$

$$i(t) = C \frac{du_c(t)}{dt}$$

消去中间变量 $i(t)$, 即可得 RLC 无源网络的时域数学模型为

$$LC \frac{d^2 u_c(t)}{dt^2} + RC \frac{du_c(t)}{dt} + u_c(t) = u_r(t) \quad (2.1)$$

这是一个二阶线性微分方程。

例 2.2 建立如图 2.2 所示的直流力矩电机输入电压 $U_m(t)$ 和输出转矩 $T_m(t)$ 的数学模型。图中, $U_m(t)$ 为电机输入电压, $I_m(t)$ 为电机电流, R_m 为电机等效电阻, L_m 为电机等效电感, $\Omega_m(t)$ 为电机旋转角速度, J_m 为电机转动惯量。

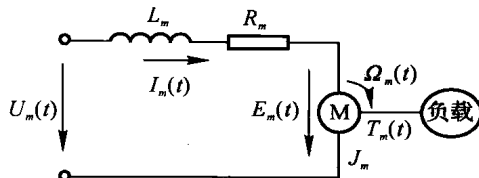


图 2.2 直流力矩电机原理图

解 根据直流力矩电机电压平衡关系, 有

$$U_m(t) - I_m(t)R_m - L_m \frac{dI_m(t)}{dt} - K_e \Omega_m(t) = 0 \quad (2.2)$$

式中, K_e 为电机反电动势常数。

再由直流力矩电机转矩平衡方程, 有

$$K_T I_m(t) - J_m \frac{d\Omega_m(t)}{dt} - B_m \Omega_m(t) - T_m(t) = 0 \quad (2.3)$$

式中 K_T ——电机转矩系数, 由电机的物理特性决定;

B_m ——电机的阻尼系数。

对式(2.2)和式(2.3)作拉氏变换, 有

$$U_m(s) - R_m I_m(s) - L_m s I_m(s) - K_e \Omega(s) = 0 \quad (2.4)$$

$$K_T I_m(s) - J_m s \Omega(s) - B_m \Omega(s) - T_m(s) = 0 \quad (2.5)$$

对式(2.4)和式(2.5)进行整理, 消去中间变量 $I_m(s)$, 可得

$$T_m(s) = \frac{U_m(s)K_T - K_T K_e \Omega_m(s) - (L_m s + R_m)(J_m s + B_m)\Omega_m(s)}{L_m s + R_m} \quad (2.6)$$

对式(2.6)作拉氏反变换即可得输出转矩的时域数学模型 $T_m(t)$ 。

例 2.3 建立理想比例导引法的导弹-目标运动数学模型(见图 2.3)。其中, r 为导弹和目标相对距离; q 为目标方位角; σ, σ_M 分别表示导弹速度矢量、目标速度矢量与基准线之间的夹角。

解 根据理想比例导引关系, 有

$$\frac{d\sigma}{dt} = K \frac{dq}{dt} \quad (2.7)$$

根据相对运动投影关系, 有

$$\begin{aligned} \frac{dr}{dt} &= V_M \cos \eta_m - V \cos \eta \\ r \frac{dq}{dt} &= V \sin \eta - V_M \sin \eta_m \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$q = \sigma + \eta$$

$$q = \sigma_M + \eta_M$$