

Simulation and Its Practice for
Aircraft Power Control System

航空动力控制系统 仿真与实践

◎ 黄向华 潘慕绚 编著



科学出版社

100%

Conductors and the Prospects for
Automated Power Control Systems

劉國光, 林國光, 林國光
劉國光, 林國光, 林國光

by [Liu Guoguang](#) and [Lin Guoguang](#)

飞行器动力工程专业系列教材

航空动力控制系统仿真与实践

黄向华 潘慕绚 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统地阐述了控制系统数字仿真的经典方法,包括数值仿真法、离散化仿真法、采样控制系统的仿真以及控制系统的优化技术,并以航空动力控制系统为研究对象,给出了具体的仿真程序。然后介绍了航空动力控制系统建模与数字仿真方法,给出了实物在回路仿真和半物理仿真系统的概念、基本组成和仿真方法。为了便于学习,书中给出了用 C 语言和 MATLAB 实现的仿真方法和一些仿真实例。

本书可作为航空宇航推进理论与工程、动力机械与工程专业研究生的参考书,也可作为航空发动机及其控制系统领域广大科研、设计、教学人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

航空动力控制系统仿真与实践/黄向华,潘慕绚编著. —北京:科学出版社, 2018.2

飞行器动力工程专业系列教材

ISBN 978-7-03-033203-5

I. ①航… II. ①黄… ②潘… III. ①航空-动力装置-控制系统-系统仿真-教材 IV. ①V228

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 033012 号

责任编辑:李涪汁 曾佳佳 高慧元/责任校对:彭 涛

责任印制:张克忠/封面设计:许 瑞

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

天津市新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 2 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2018 年 2 月第一次印刷 印张:14 1/2

字数:340 000

定价:59.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《飞行器动力工程专业系列教材》编委会

主 编：宣益民

副主编：宋迎东 张天宏 黄金泉 谭慧俊 崔海涛

编 委：（按姓氏笔画排序）

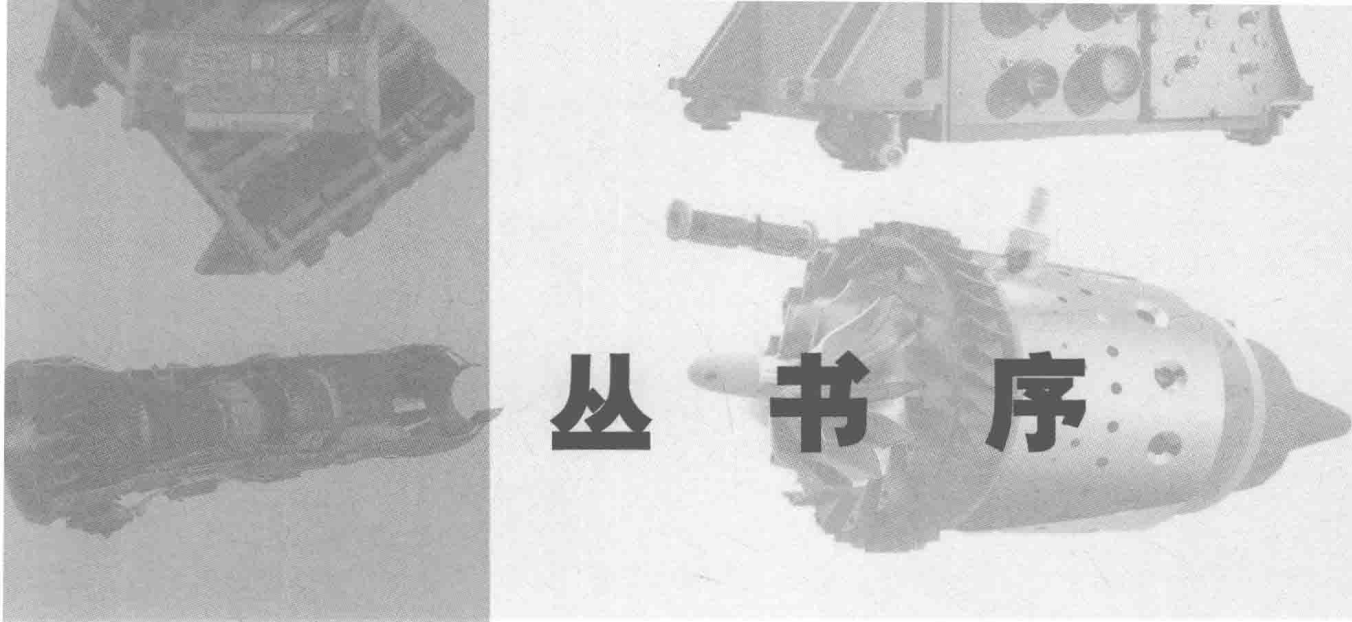
王 彬 毛军逵 方 磊 吉洪湖 刘小刚

何小民 宋迎东 张天宏 陈 伟 陈 杰

陈茉莉 范育新 周正贵 胡忠志 姚 华

郭 文 崔海涛 韩启祥 葛 宁 温 泉

臧朝平 谭晓茗



丛书序

作为飞行器的“心脏”，航空发动机是技术高度集成和高附加值的科技产品，集中体现了一个国家的工业技术水平，被誉为现代工业皇冠上的明珠。经过几代航空人艰苦卓绝的奋斗，我国航空发动机工业取得了一系列令人瞩目的成就，为我国国防事业发展和国民经济建设做出了重要的贡献。2015 年，李克强总理在《政府工作报告》中明确提出了要实施航空发动机和燃气轮机国家重大专项，自主研制和发展高水平的航空发动机已成为国家战略。2016 年，国家《第十三个五年规划纲要》中也明确指出：中国计划实施 100 个重大工程及项目，其中“航空发动机及燃气轮机”位列首位。可以预计，未来相当长的一段时间内，航空发动机技术领域高素质创新人才的培养将是服务国家重大战略需求和国防建设的核心工作之一。

南京航空航天大学是我国航空发动机高层次人才培养和科学研究的重要基地，为国家培养了近万名航空发动机专门人才。在江苏省高校品牌专业一期建设工程的资助下，南京航空航天大学于 2016 年启动了飞行器动力工程专业系列教材的建设工作，旨在使教材内容能够更好地反映当前科学技术水平和适应现代教育教学理念。教材内容涉及航空发动机的学科基础、部件/系统工作原理与设计、整机工作原理与设计、航空发动机工程研制与测试等方面，汇聚了高等院校和航空发动机厂所的理论基础及研发经验，注重设计方法和体系介绍，突出工程应用及能力培养。

希望本系列教材的出版能够起到服务国家重大需求、服务国防、服务行业的积极作用，为我国航空发动机领域的创新性人才培养和技术进步贡献力量。

匡迪民

南京航空航天大学

2017 年 5 月



前言

系统仿真技术是一门多学科综合的应用技术学科，也是一门近年来发展迅速的学科。仿真技术除用于航空、航天和原子能等领域外，还广泛应用于冶金、化工、船舶、电力控制及一般工业过程控制系统中，并在建立新的控制系统、控制系统排故、确定最优控制规律和方案以及人员培训等方面都有着广泛应用。特别是在航空发动机控制系统以及飞行控制系统等的研制、生产和使用的各个阶段，仿真起着重要的作用，无论控制器是机械液压式、气动式、电子式，还是数字控制式，通过仿真均可获得系统的有关特性。

本书力求理论与工程实际相结合，使读者不仅能掌握数字仿真的基本原理，而且能实际应用仿真技术进行控制系统的设计、分析和研究。一方面，系统地介绍控制系统设计与分析过程中所涉及的仿真实论以及仿真方法。首先分析系统理论、系统辨识与系统仿真三者的关系，初步介绍仿真的过程及仿真技术的应用，使读者对仿真有一个全面的认识；然后分别介绍各种仿真实论，包括连续系统的数字仿真、采样控制系统的数字仿真、数字控制器控制规律的实现以及实时仿真、控制系统的参数最优化技术。另一方面，从仿真技术的理论分析入手，以工程应用为目标，通过一些工程实例介绍仿真技术的应用，并提供各种仿真实例和代码，引导学生针对具体对象利用所学理论开展研究工作，培养学生自主创新能力。

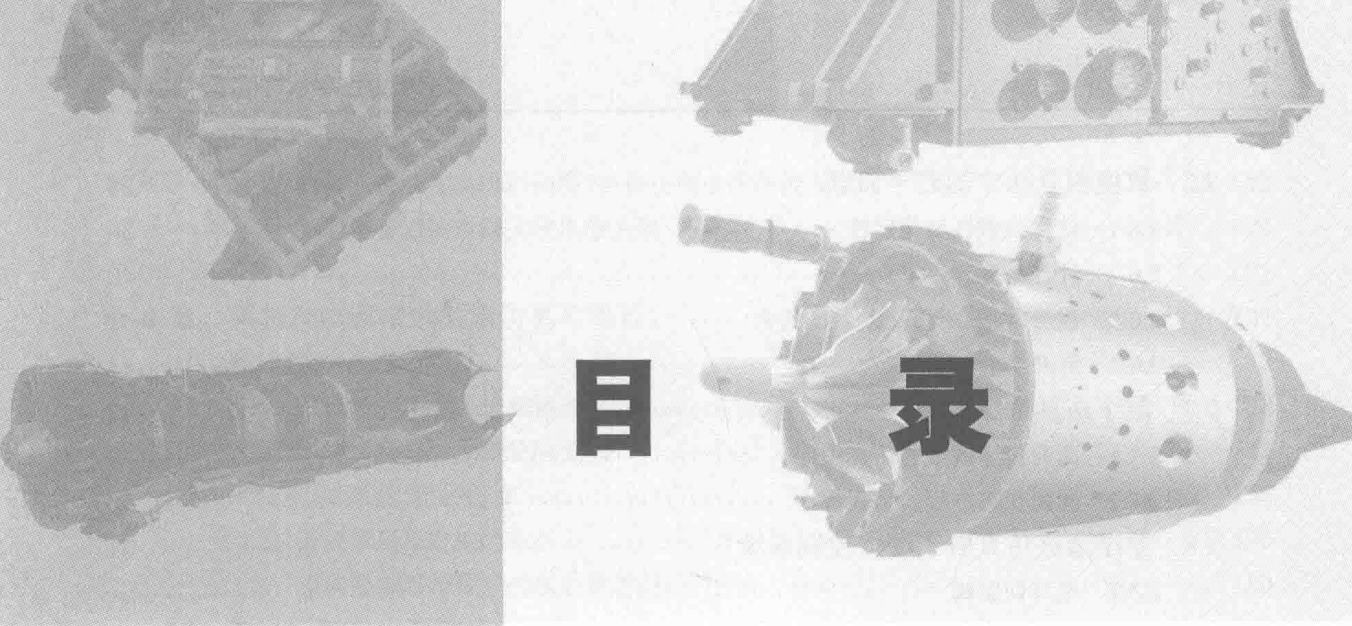
本书力图构建航空发动机控制系统仿真的理论知识体系，为了增强教材的工程实用性，便于学生的学习、掌握与拓展，并可作为航空发动机控制系统仿真实践课程的辅助教材，结合现代航空动力控制技术的发展以及仿真软件的发展，以航空发动机控制系统为研究对象，从航空发动机控制系统最基本的转速控制回路的执行机构出发，循序渐进地采用仿真的方法分析控制系统的基本特性，最后引入航空发动机部件级模型动态特性的仿真，以此为基础提供一个综合实例，采用参数优化技术调整控制系统参数。最后在数字仿真的基础上，介绍半物理仿真的过程以及研制方法。通过本书的学习，读者能加深对航空发动机控制系统理论的理解，并具备利用仿真技术开发控制系统的初步能力。

本书由南京航空航天大学黄向华主编,其中第2章和第3章实例部分由南京航空航天大学潘慕绚编写,其余部分由黄向华编写,黄向华对全书进行了策划、校核和统稿。

由于作者水平和时间有限,书中难免会有不妥之处,恳请广大读者批评指正。

作 者

2017 年 9 月



目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 仿真的基本概念	1
1.1.1 仿真的定义	1
1.1.2 仿真遵循的原则	1
1.1.3 仿真的分类	2
1.1.4 实物回路仿真、半物理仿真和人在回路仿真	6
1.1.5 计算机仿真系统的三要素	7
1.2 数字仿真的基本过程	8
1.3 仿真技术的发展与趋势	10
1.3.1 仿真技术的发展	10
1.3.2 国内外技术现状	11
1.3.3 仿真技术的发展趋势	13
1.4 仿真技术的应用	13
习题	15
第 2 章 数值积分法仿真连续系统	17
2.1 系统和模型	17
2.1.1 系统	17
2.1.2 系统的数学模型	18
2.1.3 数学模型的分类	18
2.2 连续系统的数学模型与仿真模型	20
2.2.1 微分方程与状态方程	20
2.2.2 面向系统结构图的仿真模型	25
2.3 连续系统数值积分法的基本概念	31
2.4 龙格-库塔法	32
2.5 亚当姆斯法	36

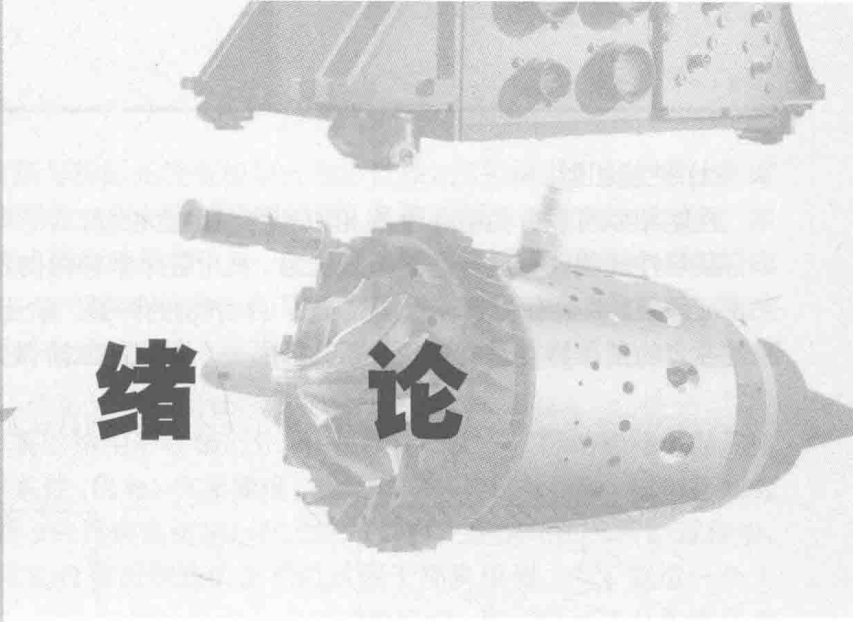
2.6	数值积分法中的若干问题	38
2.6.1	计算收敛性与稳定性	38
2.6.2	计算精度	40
2.6.3	积分方法、步长、阶数的选择	41
2.6.4	Stiff 方程	44
2.7	数字仿真程序	47
2.7.1	面向传递函数的仿真程序	47
2.7.2	面向状态方程的仿真程序	50
2.8	循序渐进仿真航空动力控制系统	51
2.8.1	电液伺服阀	51
2.8.2	燃油计量装置	59
2.8.3	带刚性反馈的滑阀式液压放大器	67
	习题	71
第 3 章	连续系统的离散化仿真	72
3.1	替换法	72
3.1.1	简单替换法	73
3.1.2	双线性变换法	74
3.2	根匹配法	79
3.2.1	根匹配法的步骤	79
3.2.2	根匹配法的稳定性和精度	83
3.3	离散相似法	85
3.3.1	离散相似法的含义和特点	85
3.3.2	连续系统状态方程离散化	86
3.3.3	典型环节的离散系数及差分方程	87
3.3.4	典型非线性环节仿真	93
3.3.5	纯滞后环节仿真	96
3.4	增广矩阵法	98
3.4.1	增广矩阵法的基本思想	98
3.4.2	不同输入信号下的增广状态方程	99
3.5	数字仿真程序设计	103
3.5.1	线性系统的离散相似法仿真程序设计	104
3.5.2	非线性系统离散相似法仿真程序设计	105
3.6	用 z 变换法建立系统的差分方程	107
3.7	离散模型的精度和稳定性	114
3.7.1	采样周期的影响	114
3.7.2	保持器的影响	116
3.8	采用补偿器提高仿真模型的稳定性和精度	119
3.9	循序渐进仿真航空动力控制系统	122

3.9.1 离散相似法仿真电液伺服阀—作动筒小闭环控制回路	122
3.9.2 带柔性反馈的滑阀式液压放大器	126
习题	131
第 4 章 采样控制系统的数字仿真与设计	132
4.1 采样控制系统	133
4.1.1 采样控制系统的工作特点	133
4.1.2 采样周期与计算步长的关系	134
4.2 采样控制系统数字仿真	136
4.2.1 只要求采样时刻的输出	136
4.2.2 采样控制系统数字仿真应用举例	139
4.3 数字控制器控制规律的实现	143
4.3.1 PID 控制规律	143
4.3.2 最少拍控制	145
4.4 含 PID 控制器的实时仿真	151
4.4.1 PID 控制规律的程序实现	151
4.4.2 Windows 方式下的实时仿真程序设计	152
4.5 循序渐进仿真航空动力控制系统	156
习题	162
第 5 章 控制系统优化技术	164
5.1 控制系统最优化问题概述	165
5.1.1 参数最优化	165
5.1.2 函数最优化	165
5.1.3 参数最优化的解法	166
5.2 性能指标	167
5.2.1 性能指标的一般概念	167
5.2.2 性能指标的分类	168
5.2.3 性能指标的选择原则	170
5.3 单参数寻优技术	170
5.3.1 黄金分割法	171
5.3.2 二次插值法	173
5.4 无约束条件下多参数寻优技术	178
5.4.1 多变量函数的极值条件和间接寻优	178
5.4.2 最速下降法	179
5.4.3 共轭梯度法	183
5.4.4 单纯形加速法	188
5.4.5 PID 控制参数优化	192
习题	194

第 6 章 航空发动机建模与仿真	196
6.1 航空发动机建模	196
6.1.1 概述	196
6.1.2 定义	197
6.1.3 各部件的气动热力计算	198
6.1.4 涡喷发动机部件级数学模型的建立	204
6.2 航空发动机控制系统数字仿真和实物在回路仿真	206
6.2.1 航空发动机 FADEC 控制系统	206
6.2.2 航空发动机控制系统的基本转速控制回路	208
6.2.3 航空发动机控制系统实物在回路仿真试验	208
6.3 航空动力控制系统半物理仿真实验平台	210
6.3.1 发动机控制系统半物理仿真	210
6.3.2 发动机控制系统半物理仿真实验平台	211
6.4 循序渐进仿真航空动力控制系统	215
6.4.1 开环发动机模型仿真	215
6.4.2 基本航空发动机转速闭环控制回路的仿真	215
6.4.3 航空发动机转速闭环 PID 控制参数的优化	216
主要参考文献	217



第1章



绪论

1.1 仿真的基本概念

1.1.1 仿真的定义

在控制系统的分析、设计和使用过程中,控制系统的性能是人们关注的焦点。要想获得系统的性能特点,最直接的手段就是实物实验。可是由于多方面的原因,往往不宜于甚至不可能在实物上进行实验。首先,实物实验花费大、周期长,尤其在新的控制规律实验和故障复现中有时是很危险的;此外,实物实验还必须是在控制系统研制出来以后进行,这就难以事先给设计人员提供信息来指导他们进行正确设计。因此很自然地人们就产生了用模型代替实物进行实验的想法,这种基于模型的实验就是广义上的仿真(simulation)。

仿真形成一门专门的学科虽然为时不长,但人们采用仿真技术却有很长的历史了。早在1872年英国皇家海军就曾采用按比例缩小的舰船模型在水池中进行试验,以确定所设计的船舶的各项性能指标是否达到要求,并据此改进设计。直到现在,这种用按比例缩小的物理模型进行仿真实验的方法仍广泛用于水力学、空气动力学和热力学等技术部门。

随着科学技术的发展,仿真逐渐形成一门专门的技术。它是以相似原理、控制理论、信息技术及其应用领域的专业技术为基础,以计算机和专用物理效应设备(模型再现真实世界环境)为工具,借助系统模型对实际或设想的系统进行动态实验研究的一门综合性技术。它是分析和研究系统运动行为、揭示系统动态过程和运动规律的一种重要手段和方法。

1.1.2 仿真遵循的原则

仿真实质是对一个系统由其他系统(模型)代替或模拟该系统来进行研究和设计,这就要求系统和替代系统(模型)之间要有可替代的条件,也就是说实际系统和仿真系统之间应该满足相似性原理。相似性原理贯穿仿真技术的始终,是仿真技术的基础,也是所遵循的基本原则。在实际的科学研究和工程实践中,由于目的和方法不同,相似性的方式可以包含以下几个方面。

(1) 性能相似。

性能相似可以分为数学性能相似和物理性能相似。

数学性能相似一般是通过原理抽象,利用各个学科内的各类定律和规律,通过数学模型来表征系统,并进行仿真计算研究。图 1-1 所示的弹簧二阶阻尼系统和二阶电路系统都可以通过各自的工作特点进行理论分析,形成一个相似的二阶微分方程模型:

$$a_0 \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dx(t)}{dt} + a_2 x(t) = y(t)$$

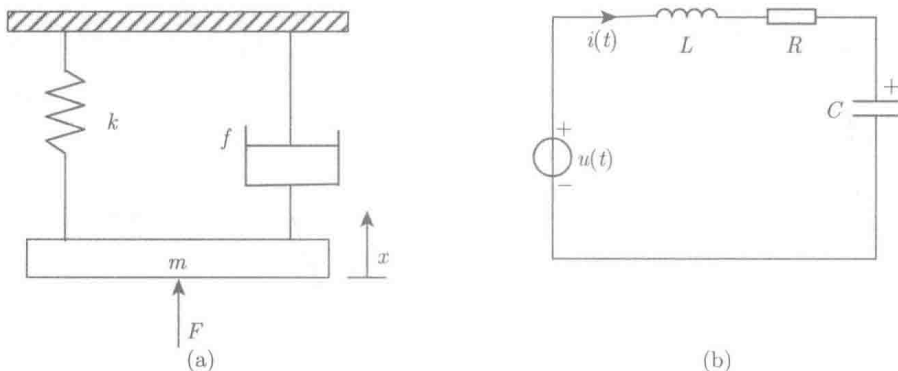


图 1-1 弹簧二阶阻尼系统和二阶电路系统

物理性能相似是指构成模型的元素和原系统的不同,但其性能相似。例如,可用一个电气系统来模拟热传导系统。在这个电气系统中电容代表热容量,电阻代表热阻,电压代表温差,电流代表热流,即图 1-1 所示的用二阶电路代替弹簧二阶阻尼系统对由弹簧及液压装置组成的机械悬挂系统进行仿真分析。

(2) 几何相似。

根据相似性原理把原来的实际系统放大或缩小。例如,12000t 水压机可用 1200t 或 120t 水压机作为其模型进行形变等仿真实验;大型飞机也可用缩小的模型来进行液体力学方面的仿真研究。

(3) 环境相似。

环境相似包括以下两类:一类是指通过模拟系统的运行环境,使人或设备能够及时感知当前环境的适应度,如驾驶员培训模拟器,它可以从视觉、听觉或触觉等方面使驾驶员具有一种身临其境的感觉;另一类模拟环境就是研究对象本身,从而研究环境的运行情况,如天气模拟系统。

1.1.3 仿真的分类

1. 按模型的性质分类

按模型的性质分类有物理仿真、数学仿真、数学-物理混合仿真。

1) 物理仿真

所谓物理仿真,就是采用一个与实际对象相似的实体作为模型所进行的仿真。这种模型是满足某些相似条件下的实物模型,有时也称为实物相似模型。物理仿真或实物仿真就是利用物理模型进行实验研究的过程。由于有实物参与,因此物理仿真是实时仿真。

相对数学模型而言,物理模型与实际系统有相似的物理性质,这些模型可以是按比例缩小的实物外形,可以是与原系统性能完全一致的样机模型。几何相似条件下的比例模型(即把对象几何尺寸按比例放大或缩小的物理模型)是一类重要的物理模型,如水池中的舰船模型和风洞中的飞机模型等。此外,在医学中药物进行某些疾病的控制作用的动物实验,以决定药物对人类的适用性,这也是一种物理仿真。在这种情况下,人就是真实系统,动物就是系统模型。

例如,为了确定新型飞机机翼的结构形状和尺寸,往往制作一个与实际结构相似但几何尺寸较小的模型,在气流场相似条件(压力、气流速度)的风洞中对其进行试验,根据得到的空气动力学的参数进行结果分析,从而确定结构形状及尺寸。而在新型飞机的研制过程中,为了获取真实系统飞行数据和气动参数而制造的原型机就属于样机模型。为了制造一个大型的发电机组,也是在同类型的、较小的发电机组上进行试验研究,用试验结果分析指导大型发电机组的设计和生产。所以物理仿真以物理性能相似、几何相似以及环境相似为基础的仿真。

物理仿真能观测到无法用数学模型来描述的系统特性,它将系统的实际参数、非线性因素和干扰因素等引入仿真回路。因此,物理仿真更能反映系统的实际情况。物理仿真是设计复杂系统必不可少的试验手段,它的作用是数学仿真不能替代的,因为建立一个复杂系统完备的数学模型往往是不可能的。例如,新型飞机在空中试飞以前,必须在铁鸟台上进行严格的仿真试验,铁鸟台和飞机组成了一个物理仿真环境,它是设计新型飞机不可缺少的试验手段,世界各大飞机制造公司如波音/麦道、洛克希德·马丁、空中客车等,都有各自种类繁多的铁鸟台系统。

物理仿真的缺点是构造物理模型所需费用高、周期长、技术复杂,其次是在物理模型上进行试验,修改模型的结构及参数困难,实验限制条件多,容易受到环境条件的干扰。

图 1-2 所示为一个全物理仿真的简单实例。为了设计高质量的轧钢机主传动系统,可以按该系统的比例,用一台小功率的直流电动机来代替大功率的主传动直流电动机,用一个小容量的可控硅调速装置来代替大容量的可控硅调速装置。为了模拟轧钢主传动系统在突然加载时的情况,可以在小功率直流电动机轴上连接一台直流发电机,当开关 K 突然合上时,轴上就会产生一个突加的负载力矩 M_f ,这样就组成了一个轧钢机主传动全物理仿真系统。

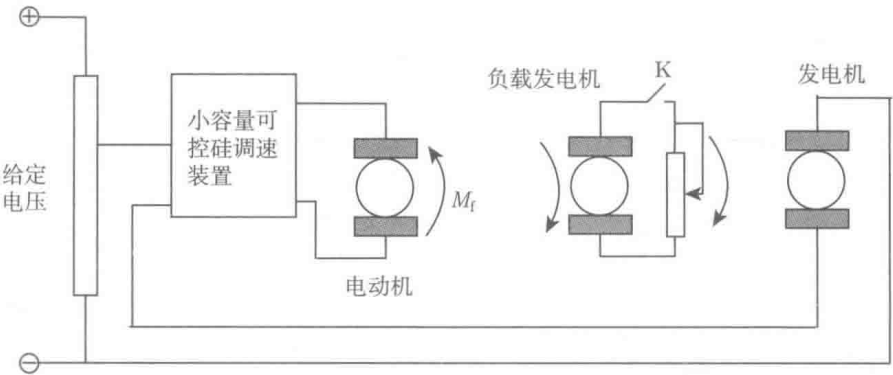


图 1-2 全物理仿真系统实例

2) 数学仿真

一个实际的物理系统可以用数学模型来描述,如单转子发动机的转子特性可以用一阶微分方程描述:

$$T_e \frac{dn}{dt} + n = K_e W_f$$

式中, T_e 为发动机时间常数; K_e 为发动机燃油-转速放大系数; n 为发动机转子转速; W_f 为燃油供油量。

对于这个能近似描述实际物理系统的一阶微分方程,可以借助计算机求解,这就称为数学仿真。所以数学仿真就是系统的数学模型在计算机上运行的过程。

数学仿真应用性能相似、环境相似的原理,按照真实系统的数学关系构造系统的数学模型,并在数学模型上进行试验。数学仿真的特点是制作比较经济,修改参数方便,周期短,但形式抽象,直观性差,在数学模型的构造过程中对系统进行了一定程度的简化和理想化,因而其精度受到了影响。

显然,由于物理模型与数学模型的性质不同,它们的应用前提和范围是不同的。物理模型和数学模型都要求对过程的物理机理有所了解,数学模型则更要求用数学方程式将过程的物理规律表示出来。而发生在比例模型中的过程和真实系统中的过程,其物理性质是一样的,差别只是比例尺不同而已。因此,比例模型可以提供过程中还不十分清楚的物理机理的有用信息,而这正是数学模型所不能解决的。然而,采用物理模型一般花费大而且费时费力,当通过理论分析和已有的经验对过程的物理规律积累了足够多的知识后,就可以通过数学仿真的方法进行实验研究,而不必再诉之于物理仿真。

数学仿真最突出的一个优点是它可以通用计算机对不同领域中的各种问题进行仿真研究,而无需制作昂贵的系统和各种专用的物理效应设备,并利用计算机来再现评价实际系统的特性,可以在实时、欠实时或超实时条件下运行,尤其适用于研究开发、方案论证和系统设计阶段。

随着科学的发展和技术的进步,自动控制系统日益复杂,采用物理仿真制作的物理模型结构的难度、复杂度、精度都提高了,因而也增加了成本。与此同时,数学的数值分析逐步推广和发展、自动控制理论中现代控制理论分支的崛起以及计算机技术的发展,使用计算机进行数学模型实验的能力增强,使计算机在数学仿真中的应用日益普遍。数学仿真就是在计算机上对系统的数学模型进行实验,数学仿真离不开计算机,因此也称为计算机仿真。

3) 数学-物理混合仿真

在对某些系统的研究中,把数学模型与物理模型或实物连接在一起进行实验,即将系统的一部分建立数学模型,并运用到计算机中,而另一部分构造其物理模型或直接采用实物,然后将它们连接成系统进行实验,这种形式的仿真就称为数学-物理混合仿真或半实物仿真(或实物在回路仿真)。这种仿真具有数学与物理仿真的共同优点,当然其费用必将大大增加。

在航空仿真技术中,除了采用物理仿真、数学仿真外,还采用所谓的含实物仿真(又称半物理仿真),即在仿真系统中,一部分是实物,另一部分是物理模型或数学模型。例如,在航空发动机控制系统的半物理仿真实验中,控制器、执行机构及传感器一般采用实物,而发动机采用数学模型或物理模型,这样可以检验控制器的控制规律是否满足要求,预调整控制

器参数，减少台架试车次数，减少费用等。至于风险性试车及故障复现，更是可以将危险降至最小程度。操作人员或飞行员在系统回路中进行操作的仿真实验称为人在回路仿真，它主要有相应的形成人感觉环境的多种物理效应设备，在飞行器飞行动力学仿真实验中，被控对象的动态特性仍通过建立的数学模型在计算机上进行，这种仿真试验能对飞行器性能、回路中的操作人员的素质和技能或整个人-机系统作出评价。以上两种仿真必须实现实时运行。

在航空领域，仿真技术已成为继理论分析和实物实验后认识客观世界强有力的手段，可以把航空系统研制的某些过程放在实验中进行，它具有良好的可控性（时间比例尺和模型实验条件），无破坏性，安全且不受气候条件限制，具有经济性和可做多次重复实验等特点，近年来不仅广泛应用于概念研究、方案论证、分析、设计、制造、试飞、诊断、训练、维护等各个阶段，还应用于制定规划、作战预演以及管理等方面。

图 1-3 所示为一个半物理仿真的例子，这是一个飞机自动驾驶仪仿真系统，用于测试自动驾驶仪的性能。其中，飞机模型用计算机实现，回路中驾驶仪采用实物，飞行模拟转台模拟飞机的横滚、俯仰和偏航运动，气压高度模拟器模拟不同高度的大气静压，舵面角变换器将飞机自动驾驶仪的舵机转角变成相应的电压信号加载到飞机模型中。

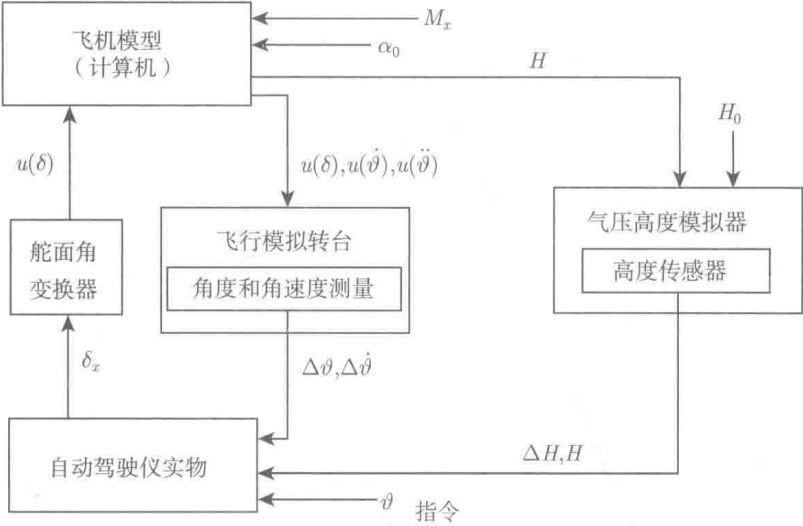


图 1-3 半物理仿真系统实例

2. 实时仿真与非实时仿真

按照仿真实验时间标尺 τ 与实际系统的时间标尺 t 比例来分类，将 $\tau/t = 1$ 的仿真称为实时仿真，将 $\tau/t \neq 1$ 的仿真称为非实时仿真。对于实时仿真，其运行速度与真实对象的运行速度是一致的。非实时仿真可能比真实对象的运行速度快（称为超实时），也可能慢（称为欠实时）。一般有实物介入的半实物仿真必须保证仿真是实时的，而无实物介入的纯计算机仿真可以为非实时仿真。

3. 按仿真系统所采用的计算机分类

根据仿真系统所采用的计算机分类，可将计算机仿真分为模拟计算机仿真、数字计算机仿真、数字-模拟混合计算机仿真。