



DONGLI JIXIE JIQI XITONG DIANZI KONGZHI

# 动力机械及其系统电子控制

● 张宗杰 主编



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>



图书在版编目(CIP)数据

动力机械及其系统电子控制/张宗杰 主编. —武汉:华中科技大学出版社, 2009  
年 12 月

ISBN 978-7-5609-4976-5

I. 动… II. 张… III. 动力机械-电子控制 IV. TK05

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 180013 号

**动力机械及其系统电子控制**

**张宗杰 主编**

责任编辑:谢佩玲

封面设计:刘 卉

责任校对:刘 竣

责任监印:熊庆玉

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87545012

录 排:武汉星明图文制作有限公司

印 刷:华中科技大学印刷厂

开本:710mm×1000mm 1/16

印张:23

字数:480 000

版次:2009 年 12 月第 1 版

印次:2009 年 12 月第 1 次印刷

定价:39.50 元

ISBN 978-7-5609-4976-5/TK·48

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

## 内 容 提 要

电子控制是新兴的技术,发展迅速,前景广阔,应用于动力机械已取得一系列开创性成果,有力地推动了能源、交通、环保行业的进步。

本书阐述动力机械控制的演变,控制系统的基本组成、工作原理和品质评价,经典控制、现代控制、智能控制的基本概念和特点。主要内容以柴油机、汽油机、燃气轮机的动力性能、经济性能、排放性能为目标,以电子控制技术为重点,叙述各种动力机械控制系统的结构、控制参数的选择、控制模型的建立,综述理论和实验研究成果。

整体控制、集中控制、综合优化是电控系统发展的重要趋势,书中与动力机械控制内容相衔接,介绍传统车辆、电动汽车、混合动力电动汽车、高性能船舶动力系统的特点,分析其性能,并以典型产品为实例,进行解析或仿真。

本书以动力机械及工程专业的本科生为主要对象,可供能源与动力工程专业的本科生选修,部分内容适用于研究生教学。适合相关企业和科研院所培训使用,也可供发动机、车辆、船舶行业技术人员参考。

# 前 言

能源、交通、环保的快速发展,向动力机械提出了挑战,也提供了新的机遇。计算机的广泛应用,控制理论、电子技术的新成果,使动力机械电控技术不断有所突破、有所前进,成为学科的前沿领域。该专业人才也成为社会相关企业人才需求的热点。为了顺应时代潮流,高校加快了专业和课程改革的步伐,教材建设即为有力措施之一。

编者为本本科生和研究生开设动力机械电子控制课程多年,积累了丰富的资料,2004年出版了《动力机械电子控制》一书,主要用于研究生教学。2006年,编写的讲义《车船动力系统电子控制》,重点叙述系统控制方面的内容,也编入了一些动力机械电控技术的新成果。在此基础上,本着拓宽专业面、深化重点内容、反映领域新动向的原则,编写本书。

第1章简要叙述控制理论、动力机械控制系统的发展历程,电子控制系统基本组成、工作原理、建模和性能分析,经典控制、现代控制、智能控制的概念、特点及其应用,典型动力机械的动力性能、经济性能、排放性能,以及燃料和添加剂的有关知识。

第2章介绍柴油机电子控制,主要内容有柴油机电控喷油系统、增压和排气再循环系统的控制,柴油机电控系统的匹配和控制模型。

第3章介绍汽油机电子控制,叙述电控汽油喷射系统的类型、结构和调控原理,点火系统及其控制,进气道喷射、缸内直接喷射、均质充量压燃发动机的工作过程、特点及控制,发展动向及其关键技术。

第4章介绍车辆动力系统及其控制,主要内容有车辆动力系统构成、动力性能和控制参数,纯电动汽车、混合动力电动汽车、燃料电池电动汽车的动力传输、能量源及特点、控制策略和控制系统。

第5章介绍高性能船舶动力系统,主要内容有船舶燃气轮机的工作原理、特点及其控制,高性能船舶动力系统性能分析。

本书由张宗杰主编,参加编写的人员还有:刘会猛(第2章),魏明锐(第3章),张捷、李顶根(第4章),张恒良(第5章)。

本书出版得到华中科技大学出版社的有力支持,并提出了许多宝贵意见,在此表示衷心感谢。

由于水平有限,不当之处欢迎同行专家学者及读者批评指正。

编 者

2009年9月

# 目 录

第 1 章 动力机械电控系统	(1)
1.1 控制及控制系统	(1)
1.2 动力机械的排放控制	(44)
1.3 动力机械电控技术	(61)
思考题	(72)
第 2 章 柴油机电控技术	(73)
2.1 柴油机发展动态及电子控制	(73)
2.2 柴油机喷油系统	(77)
2.3 柴油机电控喷油系统	(92)
2.4 柴油机增压及控制	(111)
2.5 柴油机排气再循环	(129)
2.6 柴油机控制模型	(138)
思考题	(149)
第 3 章 汽油机电控技术	(151)
3.1 汽油机电子控制	(151)
3.2 汽油机供油系统	(157)
3.3 汽油机点火系统及其控制	(167)
3.4 缸内直接喷射汽油机	(191)
3.5 均质充量压燃发动机	(215)
思考题	(224)
第 4 章 车辆动力系统及其控制	(225)
4.1 车辆动力系统及其控制	(225)
4.2 电动汽车	(247)
4.3 混合动力电动汽车	(269)
4.4 电动汽车动力系统的主要电力部件的特性及控制	(281)
思考题	(294)
第 5 章 高性能船舶动力系统及其控制	(295)
5.1 燃气轮机	(295)
5.2 高性能船舶动力系统	(329)
思考题	(351)
参考文献	(352)

# 第1章 动力机械电控系统

## 1.1 控制及控制系统

### 1.1.1 控制系统

生产实践和日常工作中存在着大量的控制系统,它们多数采用闭环反馈控制。如从桌上取一本书:人的眼睛看到桌上的一本书,就将书的位置作为输入信号传递给大脑,大脑向手和手臂发出指令,令手去拿书;眼睛将输出信号(手的位置)反馈回大脑,与输入信号(书的位置)进行比较,求出偏差,大脑指挥手和手臂不断移动,减少偏差,直至将书拿到手上为止。

如果桌子上不仅有书,还有杯子、铅笔、文具盒等物件,则控制系统要根据物件的形状、尺寸进行判断和识别。如果桌上的书为字典、设计手册、杂志等数种物件,则控制系统就需要有推理、学习、综合等人工智能功能。

图1-1所示的是电炉温度控制系统原理图。加热器控制装置使电炉内的温度按事先规定的过程变化。计算机不断地从电炉内的温度传感器(TS)中采集信息,根据温度值相对于时间的变化量进行运算,得出最佳加热量,并将算出的信息送给加热器控制装置,改变加热量,完成控制操作。其过程可概括为温度传感器将检测的信号送入计算机进行处理,计算机再把处理结果送给加热器控制装置,以实现电炉的温度控制。由于该系统只能从外部控制电炉的开闭,并输入运转程序,因此需配备输入指令控制台。根据系统的用途不同,有时需要对电炉内的温度进行实时显示或用绘图机记录,这就需配备相应的显示记录装置。

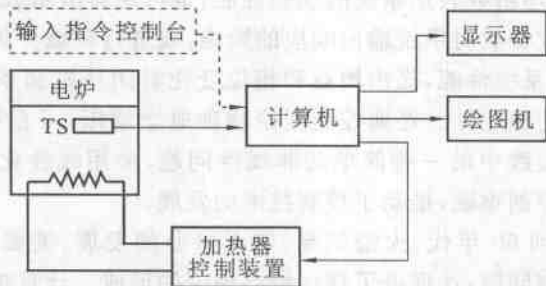


图1-1 电炉温度控制系统原理图

控制理论和控制系统的演变与科学技术的发展、社会实践的需求有着密不可分的联系。以动力机械为例,早期的内燃机在蒸汽机的基础上,改进了飞锤式机械调速器,它与操作员相互配合控制转速和转矩,以保证运行可调、安全。这种调速器可根据经典控制理论,结合实验和测量,建立线性控制模型。该模型用线性常微分方程组来描述单输入、单输出系统。实际上,内燃机的工况变化范围大,有较多的摩擦、阻尼、滞后环节,是复杂的非线性系统。这种线性控制模型忽略了非线性环节,采用小信号法,在各工况平衡点附近的微小范围内,用平衡点切线代替该范围内的曲线,使过程实现线性化,因此分析结果有一定的局限性。

目前,能源供给日益紧张,石油危机给世界带来巨大冲击,环境污染威胁人类的健康和生存。各国政府相继立法,严格控制燃油消耗率、有害气体排放、噪声和振动,动力机械首当其冲,需增加控制参数,即从控制转速、喷油量、进气充量、点火正时,扩大到控制喷油压力、喷油率、进气流量、最高爆发压力、气缸压力升高梯度等,来提高动力机械的性能。运用现代控制论,建立状态空间控制模型,进行多参数、多目标、高精度控制,实现综合优化,能提高控制和分析研究水平,改善动力性能、经济性能和排放性能。

内燃机的起动、加速、变工况运行调控复杂,且经常在瞬态(过渡)过程中运转,其动态特性并不稳定,有些国家已制定了瞬态运行技术规范,对控制系统的响应和精度提出了更高的要求。

柴油机和汽油机主要用做车辆、船舶、工程机械、发电机组的动力,燃气轮机主要用于飞机和高性能船舶的动力。发动机与动力系统的合理匹配及整体优化控制,是改善车船性能的重要措施。控制系统的决策和操作中,人的经验、专家的知识发挥着关键作用。目前人工智能控制理论,如模糊控制、神经网络控制、专家系统等已得到广泛应用,这大大提高了动力机械的控制技术水平。

为了适应生产实践的需要,控制理论和控制系统在不断地由简单到复杂,向高精度、高可靠性、综合优化、高智能化方向发展。20世纪初形成的经典控制理论,以单输入、单输出控制系统为对象,根据控制系统的物理、化学、力学特性,建立以线性常微分方程为基础的数学模型,从时域描述系统的动态性能,在给定外作用和初始条件下应用拉普拉斯变换得到传递函数表达系统的动态性能,也可用典型函数如脉冲、阶跃函数等进行激励,研究结构或参数对系统输出响应的影响,或进行频域分析,用传递函数、波特图和奈奎斯特图表示系统性能,提出增益和相位变化时闭环控制系统增益裕度和相位裕度概念,评判系统的稳定性。经典控制理论物理概念清晰,可直观、定性判断改进系统设计的方向,对实践中的一些简单的非线性问题,采用线性化方法进行近似和修正,解决了不少实际控制难题,推动了控制技术的发展。

20世纪50年代到60年代,火箭制导、航天事业的发展,需要解决复杂多变量系统、高精度系统的控制问题,这促进了现代控制理论的形成。计算机技术的迅速发展和计算机的广泛应用,使得运用计算机设计控制系统成为可能,并可进行实时控制,研究



和解决时变性、非线性、多输入、多输出系统的控制问题。运用状态空间描述、分析、设计控制系统,成为现代控制理论的重要标志。足以完全表征系统运动状态的最小个数的一组变量,称为状态变量。一个用 $n$ 阶微分方程描述的系统,有 $n$ 个独立变量,求得 $n$ 个独立变量的时间响应,就可以完全描述该系统的运动状态。系统的哪些变量可作为独立变量不是固定的,重要的是它们必须相互独立,且个数等于微分方程的阶数,这 $n$ 个独立变量就是该系统的状态变量。 $n$ 个状态变量作为分量构成状态矢量,已知初始时刻 $t_0$ 的状态 $x(t_0)$ ,得到状态空间中一个初始点,随着时间的推移,在 $n$ 维状态空间中描绘出一条状态轨线。由状态变量构成的一阶微分方程组称为状态方程组。指定系统输出后,输出与状态变量之间的函数关系称为输出方程,可用于描述系统的动态特性。它们不仅可求得输入和输出变量之间的关系,而且可以揭示系统内部的过程和性质,便于分析多输入、多输出、非线性、时变系统和随机过程。

现代控制有多种分支,如最优控制、自适应控制、鲁棒控制等,与经典控制相比有以下重要特点:控制系统的结构由单输入、单输出向多输入、多输出转变;研究工具由频率法向状态空间法转变;计算工具由手工估算向计算机模拟计算转变;系统建模由工作机理建模向统计建模转变。采用系统辨识,利用观察到的动态系统输入和输出数据,确定其模型。当模型结构已知时,运用参数估计确定微分方程的参数。

随着科学技术的发展,现代控制理论面临大型、复杂控制系统的挑战,系统的复杂性、不确定性主要体现在以下几方面:系统的运行行为和特性上的复杂性,如空间飞行器、海洋潜水器和各种机器人;不确定性导致的复杂性,即系统或事物本身有明确的含义,只不过发生的条件不充分,条件和事物之间不能出现明确的因果关系,这种不确定性称为随机不确定性,如某些测试结果、机器尺寸链等,这可用概率统计理论来描述;系统或事物本身的概念模糊,即一个对象是否符合这个概念难以确定,称为模糊不确定性,如产品美观或舒适性评判,这可用模糊数学理论来描述;系统为多模式或变模式集成,具有控制策略方面的不确定性,如舰船计算机监控系统。现代控制理论以精确的系统数学模型作为分析设计的基础,而实际的控制对象或控制过程往往只有粗略的模型或无法得到模型,有些复杂的系统包含相当的不确定性,运行过程中需要实现控制模式甚至控制策略上的转变,需要熟练的操作技工或专家进行干预才能有满意的控制效果。将这些技工、专家的经验、知识、判断汇编成计算机可识别的语言,模仿人的思维参与系统控制,就形成了智能控制系统。计算机为人工智能的发展和应用提供了有效工具。计算机在图像处理、逻辑推理、模糊评判、知识获取和表达等方面的功能,使专家知识、操作经验能够参与过程控制,在某些方面能达到或者超过人类参与的水平。概括地讲,控制器有知识库、推理机,可以改变控制模式和控制策略,含有模糊控制和知识控制规则,可以模仿人的思维方式的控制系统称为智能控制系统。

智能控制系统的主要特点是:含有以知识表达的非数学的广义模型和数学模型,采用开环和闭环、定量和定性相结合的多模式控制;有分层信息处理和决策机制,能模仿

人类大脑任务分块,采用分散的控制方式;在高层采用智能控制方针,对于环境和过程,可进行组织、决策和规划,实现广义求解,在低层一般采用常规控制方式;是非线性系统,具有变结构的特点,在控制过程中可以调整控制参数,也可以改变控制器结构,优化系统性能。

### 1.1.2 控制系统模型

为了研究各种系统参数的内部联系和变化规律,往往先进行建模,用模型来描述系统,通过系统模型分析、仿真和实验,评估系统的稳定性,预测并改善系统性能,进行决策和优化,以设计出经济、合理、有效的系统。模型是系统特征和变化规律的定量抽象,是认识客观事物的有力工具。

控制系统模型是研究系统控制特性、设计控制器、确定控制策略和方法的基础,对于系统控制效果的优劣有举足轻重的作用。控制工程中的模型与物理学中的模型有所不同,它的关键在于寻求一个健壮的、数学上精练的模型,才能充分发挥控制理论的作用,有效地实现控制目标。

#### 1. 模型的分类

##### 1) 物理模型

建模时,要对实际系统或装置进行简化,忽略次要的影响因素,突出系统的某些特征,使之易于进行分析研究,如机械系统中的比例模型,内燃机中的流动模型、热交换模型等。从实际系统到物理模型,要经过一个抽象过程,需要区分系统和环境,根据研究目的作出必要的取舍。物理模型的质量,对总体研究方案和数学模型有着重要影响。

##### 2) 数学模型

建立数学模型来解决复杂的实际问题是一种十分有效并被广泛使用的方法,整个过程包含数学模型的建立、求解和验证。选择客观世界的某一系统为对象,根据研究目的、客观规律和有关信息,进行必要的简化及假设,用数学语言如数学符号、数字、表格、数学方程式来描述系统用变量表示系统的属性,用变量间的函数关系式描述系统的内在联系和变化规律,就得到其数学模型。数学模型可以被译成算法语言,再编成程序在计算机中运行,对系统进行模拟或仿真。正确地建立某个系统的数学模型,需要合理扬弃和筛选,舍弃次要因素,突出主要特征。模型虽源于现实,但又高于现实,而建模、求解和验证过程的完成,标志着人们对该系统的认识产生了质的飞跃。

数学模型很难有统一的分类标准,可以根据不同的分类原则,分成不同的类型。按照数学方法,数学模型可分为初等模型、微分方程模型、微积分模型、代数模型、概率统计模型等;按照变量的性质,数学模型可分为确定性模型、随机性模型、连续性模型、离散性模型等;按照系统的性质,数学模型可分为微观模型、宏观模型、集中参数模型、分布参数模型、定常模型、时变模型等;按照建模的方法不同,数学模型可分为理论模型和经验模型等。

数学建模过程是一个动态反复的迭代过程,没有固定的模式,它与数学建模工作者自身素质密切相关。这就是说,它直接依赖于人们的直觉、猜想、判断、经验和灵感,在这里,想象力和洞察力是非常重要的。所谓想象力实质上就是一种联系或联想能力,它表现为对不同的事物通过相似、类比、对照等方法找出其本质上共同的规律,或将复杂的问题通过近似、对偶、转换等方式简化为易于处理的等价问题。洞察力则体现在抓主要矛盾或关键,把握全局的能力。由于人们的经历、素质和视野的差异,不同的人所构造的模型水平往往不同,因此数学建模是一种创造性的工作。

图 1-2 所示的是建模和求解过程示意图,是对实际问题进行分析、建模、求解、验证的全过程。

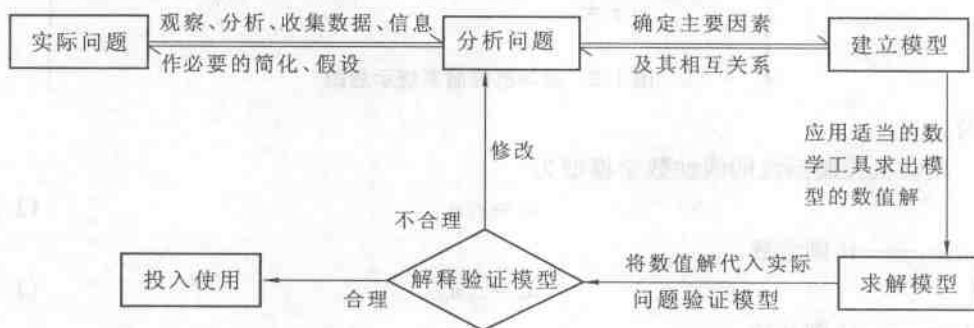


图 1-2 建模和求解过程示意图

对于动力机械系统,以控制为目的,应用机械学、热力学、流体力学的相关物理定理,通过代数方程或微分方程来描述系统输入、输出变量的相互关系,就可建立其数学模型。

系统运行中有动态过程和稳态过程,相应的要用动态数学模型和稳态数学模型来描述。动态过程是指系统在输入信号作用下,输出变量根据系统的结构和参数,表现为衰减、发散或等幅振荡等形式的响应过程。实际运行的控制系统中,其动态过程必须是衰减的,动态数学模型通常以微分方程或差分方程组来表示。稳态过程是指系统在输入信号的作用下,当时间趋于无穷大时,系统输出变量表现为相对稳定的响应过程。实际的控制系统中,如果与希望的响应速度相比较,研究的过程变化缓慢或参数相对稳定,可以用一组代数方程来描述,就构成稳态数学模型。

图 1-3 所示的是发动机控制系统示意图。汽油机、柴油机、燃气轮机的工作过程存在差异,但从原理上看,均是通过改变燃油量来调节转速和负荷,统称为发动机控制。由输入电位计给定转速  $n_r$ ,相应的,将给定的电压  $u_r$  输入到伺服放大器中。发动机以转矩  $T$ 、转速  $n$ 。带动负荷,转速计将  $n$ 。转换成电压  $u$ 。反馈到伺服放大器中,与  $u_r$  比较得到电压偏差信号  $u_r - u$ ,伺服放大器根据该电压偏差信号,输送电流  $i$  到伺服阀,改变驱动器活塞位置,控制燃油控制阀的通流面积,调节燃油量,控制发动机的转速和

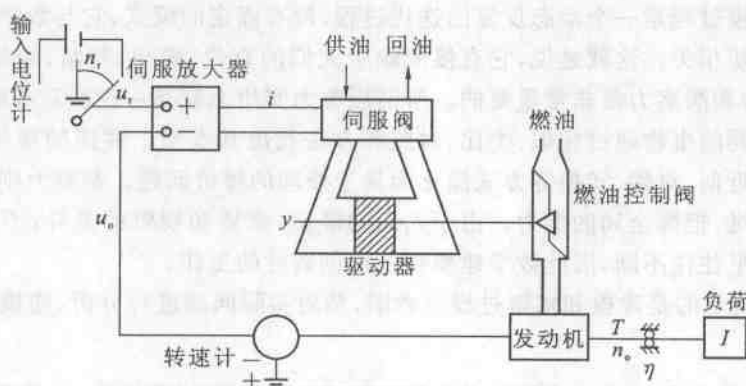


图 1-3 发动机控制系统示意图

负荷。

发动机控制系统的线性数学模型为

$$u_r = c_1 n_r \quad (1-1)$$

式中： $c_1$ ——比例常数。

$$u_o = c_2 n_o \quad (1-2)$$

式中： $c_2$ ——比例常数。

$$i = k_a (u_r - u_o) \quad (1-3)$$

式中： $k_a$ ——伺服放大器的增益。

电流  $i$  对伺服阀位移  $x$  的传递函数为

$$x = i [k_1 / (D^2 / \omega_n^2 + 2 \xi D / \omega_n + 1)] \quad (1-4)$$

式中： $k_1$ ——常数；

$\omega_n$ ——伺服阀系统的固有频率；

$\xi$ ——阻尼比。

伺服阀位移  $x$  对于驱动器活塞位移  $y$  的传递函数为

$$y = k x / D \quad (1-5)$$

燃油控制阀在平衡位置发生小的偏移时，燃油流量  $q$  与阀的开度（即驱动器活塞位移  $y$ ）呈线性关系，即

$$q = c_3 y \quad (1-6)$$

式中： $c_3$ ——常数， $c_3 > 0$ 。

发动机的转矩随燃油流量和转速的变化曲线，可以通过实验或模拟计算求得。选择平衡工况点，采用小信号线性化技术，可得

$$n_o = c_4 q - c_5 \Delta T \quad (1-7)$$

式中： $c_4, c_5$ ——常数， $c_4 > 0$ ， $c_5 > 0$ ；

$\Delta T$ ——转矩的变化量。

从式(1-7)可以看出:燃油流量增大,转速提高;负荷转矩增大,转速下降。

转矩平衡方程为

$$\Delta T = I \frac{dn_o}{dt} + \eta n_o + T_d \quad (1-8)$$

式中: $I$ ——负荷惯量;

$\eta$ ——轴承的黏性摩擦因数;

$T_d$ ——干扰转矩。

经整理后,有

$$n_o(\tau D + 1)/k_2 = c_4 q - c_5 T_d \quad (1-9)$$

$$\tau = c_5 I / (1 + c_5 \eta)$$

$$1/k_2 = 1 + c_5 \eta$$

式中: $\tau$ ——时间常数。

这是一个高阶系统。如果伺服阀的固有频率 $\omega_n$ 高, $1/\omega_n$ 与发动机时间常数 $\tau$ 相比很小,则电流 $i$ 和伺服阀位移 $x$ 的关系可用简单的增益表示,即 $x = k_1 i$ ,系统可降阶。

电路网络是机电控制系统重要的组成部分。图1-4所示的为无源电路网络系统,其中, $u_i(t)$ 为输入电压, $u_o(t)$ 为输出电压。

根据基尔霍夫定律和欧姆定律,经过整理,可得到其数学模型为

$$R_1 C \dot{u}_o(t) + u_o(t)(R_1 + R_2)/R_2 = R_1 C \dot{u}_i(t) + u_i(t) \quad (1-10)$$

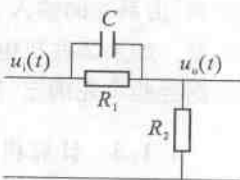


图1-4 电路网络

### 3) 描述模型

描述模型是抽象的(没有物理实体),很难或者无法用数学方程式表达的系统模型,一般用自然语言或程序语言来叙述,有待于进一步数学化。

描述模型是计算机科学与社会科学、人工智能相互渗透的产物,它借助大量的数据和人类思维的认识模式来描述和研究所面对的系统,以弥补人们对有些领域和现象的知识有限、认识不连贯。

描述模型和数学模型的主要区别在于:数学模型是定量的,用计算的方法来求解;描述模型将定量和定性相结合,用推理、判断、学习的方法来求解,在求解的过程中经不断探索而得以完善,专家的知识、经验和智能模式在模型中发挥着重要的作用。

### 2. 建模方法

控制系统的规模、复杂程度、控制目标千差万别,因此其建模方法各异。自然科学、工程领域的建模方法有分析法和实验法两种。

### 1) 分析法

经适当简化和假设,建立系统的物理模型,对系统及组成部分的工作原理、运行机制、相互联系进行分析,运用机械学、流体力学、热力学等自然科学定律,建立描述系统能量转换、运动状态的方程式,就得到系统的数学模型。

### 2) 实验法

有的系统十分复杂,限于认识水平,人们对系统的构成、运行机理、信息传递途径还了解不多或根本不了解,无法用分析法建模,这时,可以通过实验来建模,用脉冲、阶跃、正弦等典型输入信号对系统进行激励,或者对系统的运行过程进行测量,记录系统的输出响应,再经过分析处理,就可建立系统模型。

系统辨识就是对已知输入信号的输出响应进行观测,在指定一类系统的范围内,确定一个与被辨识系统等价的系统。首先,根据事先掌握的知识,判断被辨识系统的类型,如动态或稳态、线性或非线性、确定性或统计性等;然后,规定一类输入信号,在某一特定输入信号下进行辨识。所谓等价,是指只有两个系统在所有可能的输入值下,它们的输入、输出信号特性完全相同,这两个系统才等价。

系统辨识、参数估计理论和方法在实验建模中有重要作用。系统辨识的目的,是通过实验,由系统的输入、输出信号求系统数学模型方程的阶次、参数值和结构特征,确定系统模型。如果某些机电控制系统的结构较易了解,系统辨识前可将系统数学方程式的阶次根据经验事先确定,则系统辨识的问题就变为对方程参数进行估计的参数估计问题。

## 1.1.3 计算机仿真

计算机仿真是用程序语言描述真实系统,通过计算,了解系统随时间变化而变化的行为或特性,对系统的结构和行为进行动态演示,以评价或预测该系统的行为效果,为决策提供信息的技术。计算机仿真是解决复杂实际问题的一条有效途径,在航空、机电、冶金等工业部门以及社会经济、交通运输、生态系统等方面有着广泛的应用,已成为分析、研究和设计各种系统的重要技术手段。

计算机仿真分为连续系统仿真和离散系统仿真两大类。

### 1. 计算机仿真的作用

(1) 实际系统未建立之前,需对系统的行为或结果进行分析研究;有些真实系统直接做实验会影响系统的正常运行,此时应用计算机仿真实行之有效。

(2) 当人是系统的组成部分时,其行为往往会影响实验的效果,这时对系统进行计算机模拟,有助于减少人为的不确定性的影响。

(3) 有时实验时间太长,费用过高,或者有危险性,难以在实际环境中进行实验和观察,采用计算机仿真则既经济又安全。

(4) 有些系统或过程用数学公式难以表达,数学模型不易求解,或者数学分析与计算过于复杂,采用计算机仿真则经济可行。



(5) 希望能在较短的时间内观察系统发展的全过程,以估计某些参数对系统行为的影响,需要对系统或过程进行长期运行比较,从大量方案中寻找最优方案,可用计算机仿真技术完成,其效率高、经济便利。

## 2. 常用术语

(1) 系统是指一些具有特定功能,相互之间以一定的规律联系着的物体所组成的总体。

(2) 系统边界是为了限制所研究问题涉及的范围,把所研究的系统与影响系统的环境区分开来的界线。

(3) 系统的对象和组成元素都可以称为实体。

(4) 属性反映实体的某些性质,它可以是文字型的、数字型的或逻辑型的。

(5) 系统的状态是指在某一时刻,实体及其属性值的集合。

(6) 导致系统状态变化的过程称为活动,活动反映系统变化的规律。活动是指一段过程,即在一定时间范围内发生的情况。

(7) 事件是指系统发生变化的瞬间状态。

(8) 事件表一般是一个有序的记录列,每个记录包括事件发生时间、事件类型等内容。

研究系统一般是为了认识其状态随时间变化而变化的规律,所以需要仿真时间变量。由于计算机仿真是一种数值方法,它不提供解析解,所以对连续系统仿真时,常在均匀时间点上展现其状态值,这样,仿真时钟的步进是一个常数。而离散系统仿真只有在事件发生时,系统的状态才会发生变化并有必要展现出来,这时取决于事件间隔的仿真时钟的步进往往是非等距的。为了使仿真程序能如实地模拟实际系统的变化,在某些离散事件的仿真中,采用事件表的形式进行调度。

## 3. 仿真研究的步骤

计算机仿真研究的步骤如图 1-5 所示,大致可以分为四个部分。

### 1) 系统分析

明确问题,提出总体方案;清晰表达被仿真系统的内容、目的和边界,确定目标函数及可控变量,并加以数量化;确定系统的实体、属性和活动,描述子系统与总系统的关系。

### 2) 模型构造

模型构造包括建立模型、收集数据、编写程序、程序验证和模型确认等。在这个阶段,要建立模型、选择合适的仿真方法,如时间步长法、事件表法等,确定系统的初始状态,设计整个系统的仿真流程图,然后根据需要收集、整理数据,用通用语言或仿真语言编写并调试程序。

### 3) 模型的运行与改造

首先确定一些具体的运行方案,如初始条件、参数、步长、重复次数等;然后输入数

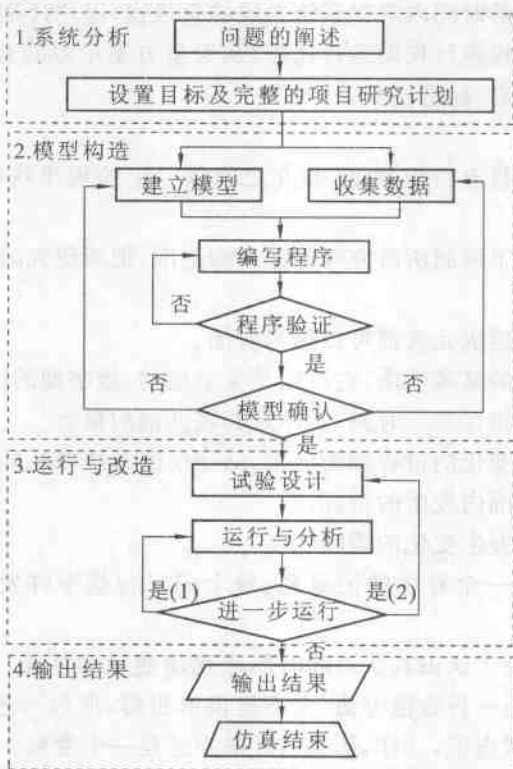


图 1-5 计算机仿真研究的步骤

据,运行程序,将得出的仿真结果与实际系统进行比较,进一步分析和改进模型,直到符合实际系统的要求及精度为止。

#### 4) 设计输出仿真结果格式

这一步骤包括提供文件清单,记录重要的中间结果等。输出格式要有利于用户了解整个仿真过程,分析、使用仿真结果。

### 1.1.4 PID 控制与复合控制

#### 1. PID 控制

PID 控制是比例、积分、微分控制的简称,其基础是比例控制。比例(P)表示当前的信息,起纠正偏差的作用,使控制过程反应迅速;积分(I)代表过去积累的信息,有助于消除稳态误差,改善系统的稳态特性;微分(D)表示未来的信息,有超前控制作用,在控制开始时强迫过程进行,在控制过程结束时,能减少超调、克服振荡现象、提高系统的稳定性、加快系统的过渡过程。这三种控制作用合理配合,可以使控制系统的过程快速、平稳、准确。



PID控制不需要被控对象的数学模型,只需根据经验进行控制器参数的在线整定,即可得到满意的控制效果,特别适用于一、二阶系统。工程整定法根据经验,并通过简单的实验,可快速获得控制器的最佳整定参数,常用的方法有动态特性参数法、稳定边界法、衰减曲线法等。PID对系统参数变化敏感,不适用于有大的时间滞后、系统结构变化、环境复杂、控制性能要求高的系统。

目前已推出可变增益PID、模糊PID、专家PID等控制系统,这些系统改善了PID控制的性能,扩大了其适用范围。

比例控制器中,控制器的输出信号 $u$ 与偏差 $e$ 成比例,其方程为

$$u = K_P e \quad (1-11)$$

式中: $K_P$ ——比例增益。

如果使用拉普拉斯方程表示,也即描述成 $G_c(s)$ 形式,则有

$$G_c(s) = K_P$$

比例控制器的显著特点是有差调节,即设定值和被调量的偏差 $e$ 不等于0。比例控制器的系统输出 $u$ 与偏差 $e$ 和 $K_P$ 成正比,如果偏差 $e$ 为0,则 $u=0$ ,系统没有输出,这是不可能的。由此可以看出,要减小 $e$ ,就必须增加 $K_P$ ,这样就可以用更小的偏差 $e$ 来产生相同大小的输出 $u$ 。但是, $K_P$ 还影响系统的稳定性,对于闭环系统而言,控制器首先要满足系统稳定的条件,并保持一定的稳定裕量,而 $K_P$ 增加将导致系统的稳定性下降,过大的 $K_P$ 会使系统产生激烈的振荡和不稳定。因此,设计时必须合理优化 $K_P$ ,在满足控制精度的要求下不要过分增大 $K_P$ 。

在积分控制器中,偏差 $e$ 经过积分控制器的积分作用得到输出信号 $u$ ,换言之,控制器输出信号的变化速率 $du/dt$ 与偏差信号 $e$ 成正比。其方程为

$$u = K_I \int e dt \quad (1-12)$$

或

$$du/dt = K_I e \quad (1-13)$$

式中: $K_I$ ——积分增益。

如果使用拉普拉斯方程表示,也即描述成 $G_c(s)$ 形式,则有

$$G_c(s) = K_I/s$$

积分控制器的显著特点是无差调节,也就是说,当系统达到平衡后,设定值和被调量相等,即偏差 $e$ 等于0。可以这样来理解,积分的作用实际上是将偏差 $e$ 累积起来得到 $u$ ,如果偏差 $e$ 不为0,积分作用将使积分控制器的输出 $u$ 不断增加或减小,系统将无法平衡,因而只有 $e$ 为0,积分控制器的输出 $u$ 才不发生变化。

使用积分控制器的系统比使用比例控制器的系统稳定性要差。对于同一个控制对象,由于积分控制的是时间上的累积效果,其调节过程总比采用比例控制要慢,表现为振荡频率比较低。增加 $K_I$ 会使系统的稳定性下降,直到最后出现发散的振荡过程。