



普通高等学校“双一流建设”能源与动力专业精品教材

DONGLI JINXIE DIANZI KONGZHII JISHU

动力机械 电子控制技术

李顶根◎主编



 华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>

高等学校“双一流建设”能源与动力专业精品教材

动力机械电子控制技术

李顶根 主 编

华中科技大学出版社

中国·武汉

内 容 简 介

本书为华中科技大学能源与动力工程学院动力机械工程系“动力机械电子控制技术”主讲教材,是顺应目前车辆动力系统电动化、智能化、网联化的发展趋势,以培养适应时代变化、兼具动力机械与电子控制技术的复合型和研究型人才为目标,总结近年来的教学改革与实践,参照当前有关国内外文献资料编写而成的。全书内容共分为6章,分别介绍了动力机械电子控制技术所涉及的控制理论与控制方法,电控系统开发及测试,汽油机电子控制技术,柴油机电子控制技术,电动汽车的电池、电动机与电控技术,智能驾驶与智能网联汽车等。

本书具有鲜明的学科交叉性、时代性和综合性,可作为汽车工程、动力机械及工程、新能源汽车等专业的大学本专科教材,也可供相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

动力机械电子控制技术/李顶根主编. —武汉:华中科技大学出版社, 2021.6
ISBN 978-7-5680-7136-9

I. ①动… II. ①李… III. ①动力机械-电子控制-研究 IV. ①TK05

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2021)第 101300 号

动力机械电子控制技术

李顶根 主 编

Dongli Jixie Dianzi Kongzhi Jishu

策划编辑:余伯仲

责任编辑:刘 飞

封面设计:廖亚萍

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉) 电话:(027)81321913
武汉市东湖新技术开发区华工科技园 邮编:430223

录 排:华中科技大学惠友文印中心

印 刷:武汉开心印印刷有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:21.75

字 数:548千字

版 次:2021年6月第1版第1次印刷

定 价:59.80元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

前 言

为了满足新形势下动力机械电子控制系统复合型、研究型人才的培养要求,编者根据自己近年来在新能源汽车、内燃机电控以及汽车电子等方面的教学和研究实践,在参考和比较当前国内外的相关教材和资料的基础上编写了本书。

本书在内容的选择上力求满足学科、教学和社会三方面的需求,与社会实体企业对人才的需求紧密结合;同时根据本专业的培养目标和学生的就业情况,在广泛调研的基础上,以目前社会上蓬勃发展的电动汽车、高效清洁燃油车、智能驾驶汽车等为教学载体,以分析问题和解决问题为导向,结合现代大学生的认知规律和学习能力,将全书内容分为6章进行介绍。

本书为普通高等学校“双一流建设”能源与动力专业精品教材,具有以下特点:

(1)学科交叉性。本书涉及控制理论、电子技术、计算机技术、车辆工程、内燃机、电池、电机、互联网等多个学科的相关基础知识和基本理论,具有鲜明的交叉性,也折射出当前我国现代企业急需交叉学科背景知识的人才来更好地发展新能源汽车、智能驾驶及先进高效节能减排的新型动力机械系统,满足社会发展的需要。

(2)时代性。当前,社会上新能源汽车、智能驾驶、先进内燃机动力系统等领域的新技术、新系统、新产品日新月异,本书体现了鲜明的时代特征,收集整理了较新的“节能减排”先进动力系统所涉及的电子控制技术及系统。当然,随着时代的发展和技术的进步,本书所涉内容也会因时间的推移而有相应的变化。

(3)综合性。本书较为全面地总结了控制理论、电子技术、计算机网络、半导体芯片、机械结构、液压系统、热力学等基础共性的学科知识内容,又较为全面地介绍了内燃机、电动汽车、智能驾驶、先进动力装置等广泛使用的产品及系统,综合性较强,适合技术开发、基础科学研究等多层次多类型的人才培养需求。

本书由华中科技大学能源与动力工程学院李顶根任主编,杨灿任副主编。具体编写分工为:第1、2、5、6章主要由李顶根编写;第3、4章主要由杨灿编写。全书由李顶根统稿。

本书的编写得到了湖北省内燃机学会、中国汽车工程学会牵头组织的电动汽车产业技术创新联盟相关专家、领导及同行的亲切指导,得到了编者所在学校教务处及能源与动力工程学院的领导、多名在校研究生的大力支持,得到了“十三五”华中科技大学教材建设项目的资助,在此一并表示衷心的感谢。

由于编写时间较为紧迫,且编者水平有限,书中定有疏漏和不足之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

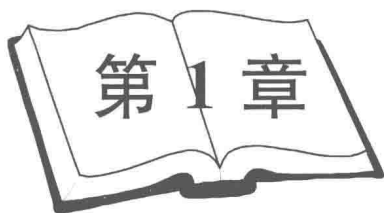
2021年6月

目 录

第 1 章 动力机械电子控制系统	(1)
1.1 控制及控制系统	(1)
1.1.1 控制系统	(1)
1.1.2 控制系统模型	(3)
1.1.3 计算机仿真	(7)
1.2 典型控制策略及理论	(9)
1.2.1 自适应控制	(9)
1.2.2 人工智能	(13)
1.2.3 人工神经网络	(21)
1.2.4 模糊控制	(24)
1.3 动力机械电子控制技术	(28)
1.3.1 检测、信息与控制	(28)
1.3.2 动力机械电子控制系统的原理及组成	(32)
思考题	(37)
第 2 章 汽车动力电控系统开发及测试	(38)
2.1 汽车电子工程化开发思路	(38)
2.2 软件规范开发体系建设	(40)
2.3 汽车动力电控系统核心技术	(41)
2.3.1 电控单元-硬件技术	(41)
2.3.2 电控单元-控制算法和软件技术	(44)
2.3.3 汽车总线系统	(44)
2.3.4 汽车电子操作系统	(46)
2.3.5 电控执行机构	(49)
2.3.6 传感器技术	(49)
思考题	(49)
第 3 章 汽油机电子控制技术	(51)
3.1 汽油机电子控制系统	(51)
3.1.1 概述	(51)
3.1.2 扭矩架构	(57)
3.1.3 电控单元(ECU)	(60)
3.2 汽油机燃油系统及控制	(61)
3.2.1 燃油喷射系统	(61)
3.2.2 燃油供给系统	(63)
3.2.3 喷油器及其计量原理	(65)
3.2.4 喷油持续时间的控制	(68)

3.3 汽油机点火系统及控制	(71)
3.3.1 点火系统的类型	(73)
3.3.2 火花塞	(84)
3.3.3 点火正时控制	(89)
3.3.4 爆震及控制	(94)
3.4 汽油机排放及控制	(97)
3.4.1 汽油机尾气中的主要污染物	(97)
3.4.2 三效催化转化器	(99)
3.4.3 氧传感器	(103)
3.4.4 λ 闭环控制	(106)
思考题	(108)
第4章 柴油机电子控制技术	(109)
4.1 柴油机电子控制系统	(109)
4.1.1 概述	(109)
4.1.2 扭矩架构	(114)
4.2 柴油机燃油系统及控制	(116)
4.2.1 燃油喷射参数	(116)
4.2.2 燃油系统概述	(122)
4.2.3 电控喷油系统	(132)
4.3 柴油机空气系统及控制	(144)
4.3.1 涡轮增压	(144)
4.3.2 排气再循环(EGR)	(151)
4.3.3 VGT/EGR 协调控制	(157)
4.4 柴油机后处理系统及控制	(161)
4.4.1 NO_x 储存-还原(NSR)及控制	(161)
4.4.2 选择性催化还原(SCR)及控制	(164)
4.4.3 碳烟颗粒捕集(DPF)及控制	(170)
4.4.4 氧化型催化转化器(DOC)	(177)
思考题	(178)
第5章 电动汽车及其电子控制技术	(179)
5.1 电动汽车动力源	(179)
5.1.1 电动汽车的主要类型	(181)
5.1.2 电动汽车的动力蓄电池	(190)
5.1.3 燃料电池	(203)
5.1.4 超高速飞轮	(210)
5.1.5 超级电容	(210)
5.2 电动汽车电动机与驱动系统及制动能量回收	(211)
5.2.1 电动机与驱动系统	(211)
5.2.2 制动能量回收	(217)
5.2.3 制动能量回收实车分析案例	(220)

5.3 锂离子动力电池成组系统技术	(237)
5.3.1 动力电池成组系统	(237)
5.3.2 车用动力电池系统热管理技术	(243)
5.4 锂离子动力电池管理技术	(261)
5.4.1 测量	(261)
5.4.2 保护功能	(262)
5.4.3 管理功能	(263)
5.4.4 警示功能	(267)
5.4.5 BMS 设计实例	(267)
5.5 混合动力电动汽车的控制策略	(300)
5.5.1 动力耦合系统构型分析	(301)
5.5.2 混合动力系统参数匹配优化	(306)
5.5.3 混合动力电动汽车能量管理策略的优化	(308)
5.5.4 混合动力电动汽车“构型-参数匹配-能量管理策略”协同优化	(311)
思考题	(312)
第 6 章 汽车电子控制技术的前瞻及发展	(314)
6.1 汽车智能驾驶技术的信息感知系统	(314)
6.1.1 无人车获取环境信息的传感器	(314)
6.1.2 无人驾驶汽车环境感知关键技术	(317)
6.2 智能网联汽车技术的发展现状及趋势	(321)
6.2.1 智能网联汽车的体系架构	(321)
6.2.2 智能网联汽车发展的四个阶段	(324)
6.2.3 汽车智能化与网联化技术发展现状	(326)
6.2.4 汽车智能化与网联化技术发展趋势分析	(332)
思考题	(334)
参考文献	(335)



动力机械电子控制系统

1.1 控制及控制系统

1.1.1 控制系统

生产实践和日常生活中存在大量的控制系统,多数采用反馈作用的闭环控制。如人的眼睛看到桌上的一本书,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,然后去拿书。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,产生偏差,指挥手和手臂不断移动,减少偏差,直至将书拿到手上。如果桌子上不仅有书,还有杯子、铅笔、文具盒等物件,就需要根据物品的形状、尺寸进行判断和识别;如果桌上的书为字典、设计手册、杂志,还需要控制系统有推理、学习、综合等人工智能功能。

图 1-1 是用于控制电炉温度的加热系统。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 采集信息,根据温度绝对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,再把处理结果送给控制装置,以实现对加热器的温度控制。由于该系统只有从外部控制电炉启停以及输入运转程序的功能,因此需配备输入命令的控制台。根据系统的不同用途,有时需要对电炉内的温度作实时显示或用绘图机记录,还应配备相应的显示记录装置。

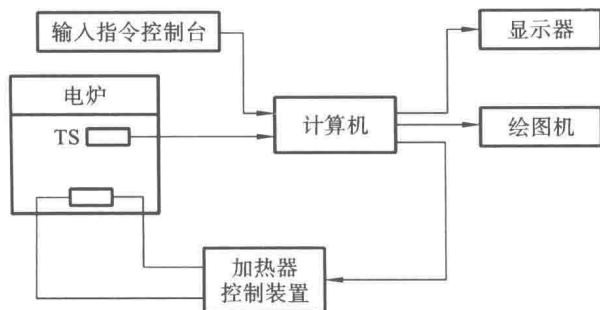


图 1-1 电炉温度控制系统原理

控制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,开发了飞球式机械调速器,与操作员相互配合控制转速和扭矩,保证运行安全。根据经典控制论,结合实验和测量,建立线性控制

模型,用线性常系数微分方程组描述单输入、单输出系统,或将其相加表示调速过程动态特性。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,建模中忽略了非线性环节,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,实现线性化,分析结果有一定的局限性。

能源供给日益紧张,石油危机对世界带来巨大冲击,环境污染威胁人类的健康和生存,各国相继立法,严格控制燃油消耗率、噪声、振动、有害气体排放,节约能源、保护环境。动力机械首当其冲,增加控制参数,从转速、喷油量、进气充量、点火正时,扩大到喷油压力、喷油率、进气流量、最高爆发压力、气缸压力升高梯度,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,改善动力性、经济性、排放性,提高控制和分析研究水平。

内燃机的启动、加速、变工况操作时,经常在瞬态(过渡)过程运行,其动态特性异于稳态,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作车辆、船舶、工程机械、发电机组的动力装置,燃气轮机主要用作飞机和高性能船舶的动力装置。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。在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。正在迅速发展的人工智能控制论,如模糊控制、神经网络控制、专家系统已得到应用,大大提高了动力机械的技术水平。

为适应生产实践的需求,控制理论和控制系统也在不断地由简单变复杂,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、力学特征,建立常系数线性微分方程为基础的数学模型,时域描述系统的动态性能,在给定外作用和初始条件下,通过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;进行频域分析,用传递函数、Bode(伯德)图和Nyquist(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,评判稳定性。物理概念清晰,可直观、定性地判断改进系统设计的方向。对实践中的一些简单的非线性控制系统,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、航天事业的进步需要解决复杂多变量系统,高精度系统的控制问题,由此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,有可能运用计算机分析、设计控制系统,并进行实时控制,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。系统的哪些变量作为独立变量,不是唯一的,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,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,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,描述系统的动态特性,不仅可求得输入和输出变量之间的关系,也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、参数估计等理论。

随着科学技术的发展,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。系统或事物本身有明确的含义,只不过发生的条件不充分,使条件和事物之间不能出现明确的因果关系,所表现的不确定性称之为随机不确定性。如某些测试结果、机器尺寸链,可用概率统计理论来描述。系统或事物的本身概念模糊,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,如产品外观或舒适性评判,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复杂性,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很大的不确定性,运行过程需要实现控制模式甚至控制策略上的转变,要求熟练的操作技工或专家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,模仿人类的思维参与系统控制,就产生了智能控制系统。计算机技术水平的迅速提高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可以让专家知识、操作经验参与过程控制,使其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如下:①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。②有分层信息处理和决策机制,模仿人类大脑任务分块,控制分散的方式;高层采用智能控制,对环境、过程进行组织、决策和规划,实现广义求解,低层一般采用常规控制方式。③系统为非线性系统,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,通过系统模型分析和仿真来评估稳定性,预测并改善系统性能,进行决策和优化,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,关键在于寻求一个健壮的,数学上精炼的模型,能充分发挥控制理论的作用,有效实现控制目标。

1. 模型的分类

1) 物理模型

为了分析研究的需要,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,是一个抽象过程,需要区分系统和环境,根据研究目的做出必要的取舍。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

解决复杂的实际问题时,建立数学模型是一种十分有效并被广泛使用的工具或手段。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作为研究对象,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,采用数学语言如数学符号、数字、表格,数学方程式描述系统,得到其数学模型。用变量表示系统的属性,变量间的函数关系式描述系统的内在联系和变化规律。数学模型可以被译成算法语言,编写程序植入计算机,开展模拟和仿真。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,突出主要因素,虽源于现实,但又高于现实,过程的完成标志着人们对该系统的认识产生了质的飞跃。

数学模型分类很难有统一的标准,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;根据变量的性质可分为确定性模型、随机性模型、连续性模型、离散性模型等;根据系统的性质可分为微观模型、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,可分为理论模型和经验模型。

数学建模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的自身素质密切相关。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;而洞察力则体现为抓主要矛盾或关键,并把握全局的能力。由于人们的经历、素质和视野的差异,不同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劳动。

图 1-2 表示对实际问题进行分析、建模、求解、验证的全过程。

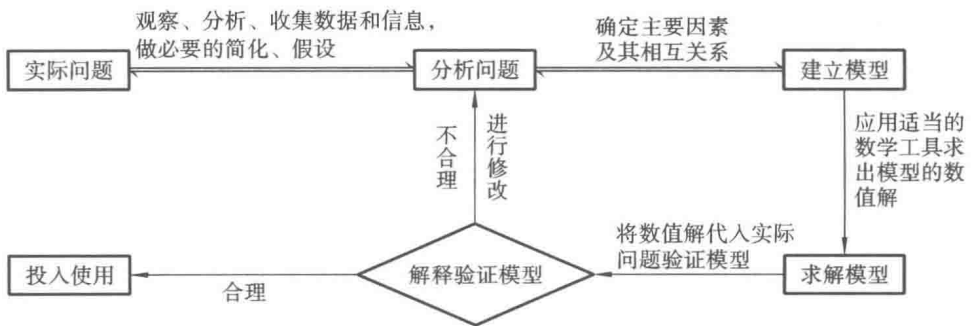


图 1-2 建模和求解过程示意图

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式描述系统输入和输出变量的相互关系,可以建立其数学模型,作为控制系统的设计基础。

系统运行中有动态过程和稳态过程,相应地用动态数学模型和稳态数学模型来描述。所谓动态过程是指系统在输入信号的作用下,输出变量从初始状态到最终状态的响应过程,根据系统的结构和参数,动态过程表现为衰减、发散或等幅振荡等形式。实际运行的控制系统,其动态过程必须是衰减的。其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,系统输出变量的表现方式。在实际控制系统中,与希望的响应速度相比较,如果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,构成稳态数学模型。

图 1-3 为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,从原理上看均通过改变燃油量调节转速和负荷,统称为发动机控制。由输入电位计给定转速 n_r , 相应的给定电压 u_r 输入伺服放大器。发动机以转矩 T 、转速 n_0 传动负载,转速计将 n_0 转换成电压 u_0 反馈到伺服放大器,与 u_r 比较得到电压偏差信号 $u_r - u_0$, 伺服放大器根据该型号输送电流 i 到伺服器,改变驱动器的活塞位置,控制燃油控制阀的流通面积,调节燃油量及发动机的转速和负荷。

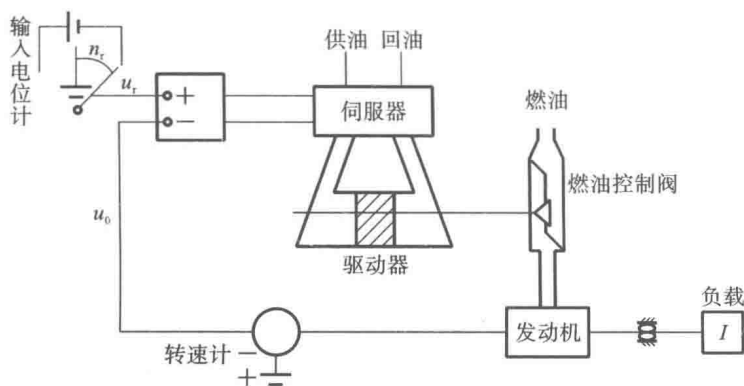


图 1-3 发动机控制系统示意图

发动机控制系统的线性数学模型:

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

式中: c_1 为比例常数。

$$u_0 = c_2 n_0 \quad (1-2)$$

式中: c_2 为比例常数。

$$i = k_a (u_r - u_0) \quad (1-3)$$

式中: k_a 为伺服放大器的增益。

电流 i 对伺服器滑阀位移 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 为常数, ω_n 为伺服器的固有频率, ξ 为阻尼比。

伺服器滑阀位移 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,燃油流量 q 与阀的开度(即驱动器活塞位移 y)成线性关系。

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

式中: $c_3 > 0$, 为常数。

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

$$n_0 = c_4 q - c_5 \Delta T \quad (1-7)$$

式中: $c_4 > 0$, $c_5 > 0$, 均为常数; ΔT 为转矩的变化量。从式(1-7)可以看出,燃油流量增大,转速提高;负载转矩增大,转速下降。

转矩平衡方程:

$$\Delta T = I \frac{dn_0}{dt} + Cn_0 + T_d \quad (1-8)$$

式中: I 为负载惯量; C 为轴承的黏性摩擦系数; T_d 为干扰转矩。

经整理后,得

$$n_0(\tau D + 1)/k_2 = c_4 q - c_5 T_d \quad (1-9)$$

其中, $\tau = c_5 I / (1 + c_5 C)$ 为时间常数, 于是有

$$1/k_2 = 1 + c_5 C$$

这是一个四阶系统。如果伺服器的固有频率 ω_n 高, $\frac{1}{\omega_n}$ 与发动机的时间常数 τ 相比很小, 电流 i 和伺服滑阀位移 x 的关系可用简单的增益表示, 即 $x = k_1 i$, 系统可降为二阶。

电路网络是机电控制系统重要的组成部分。图 1-4 所示为无源电路网络系统, 其中, R 为电阻, C 为电容, $u_i(t)$ 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

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

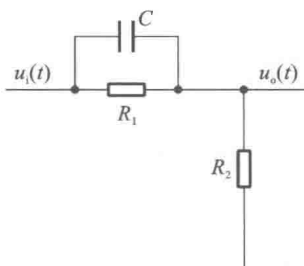


图 1-4 电路网络

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, 主要特点是: 人们对有些领域和现象知识有限, 认识不连贯, 需要借助于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。

描述模型和数学模型的主要区别: 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, 在求解的过程中不断探索和完善, 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, 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) 分析建模法

经适当的简化和假设, 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, 运用物理、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, 得到系统数学模型。

2) 实验建模法

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,只能通过实验,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,分析处理后建立系统模型。

系统辨识就是通过对已知输入信号的输出响应观测,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。规定一类输入信号,在某一特定输入信号下进行辨识。规定等价的含义,只有两个系统所有可能的输入值,它们的输入-输出信号特性完全相同时,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,系统辨识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

计算机仿真是用计算机程序建立真实系统的模型,通过计算,了解系统随时间变化的行为或特性,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。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。

计算机仿真迅速发展、有效应用的主要原因:

(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;有时在真实系统中直接做实验会影响系统的正常运行,此时应用计算机仿真更为合理有效。

(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,有助于减少人为不确定性。

(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,计算机仿真更经济、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,计算机仿真简单可行。

(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。

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。为了限制所研究问题涉及的范围,一般用系统边界把所研究的系统与影响系统的环境区分开来。系统的对象和组成元素都可以称为实体。属性反映实体的某些性质,它可以是文字型、数字型或逻辑型。

系统的状态是指在某一时刻实体及其属性值的集合。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,即在一段时间内发生的情况。事件是指某一时刻的情况,系统发生变化的瞬间就产生了事件。

研究系统一般是为了认识其状态随时间变化的规律,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。而离散系统仿真时,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,所以,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。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。

仿真研究的步骤如图 1-5 所示,大致可以分为四个部分:

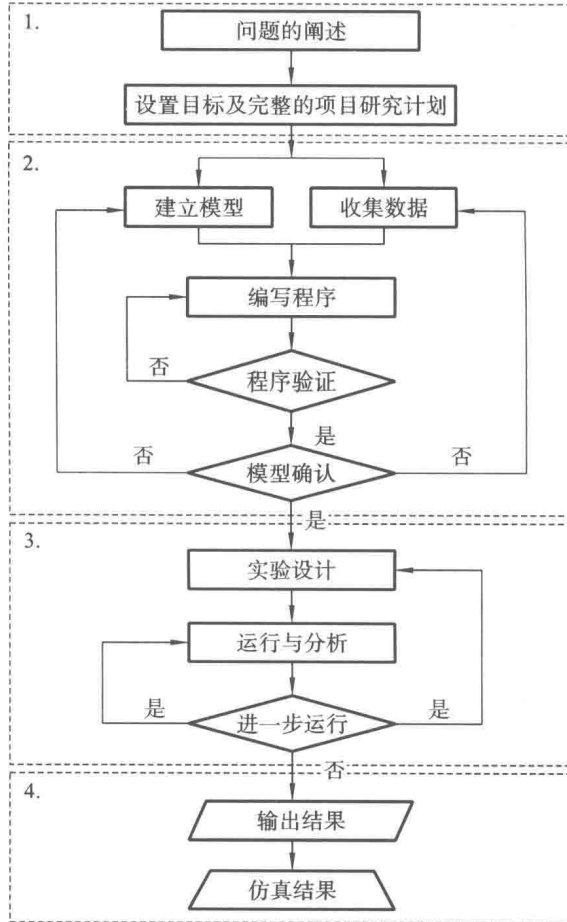


图 1-5 计算机仿真研究步骤

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、目的和系统边界,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

建立模型、收集数据、编写程序、程序验证和模型确认等。建立模型就是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,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,然后输入数据,运行程序,将得出的仿真结果与实际系统比较,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

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。

1.2 典型控制策略及理论

1.2.1 自适应控制

控制系统在设计和实现中普遍存在着不确定性,主要表现在:

- ①系统数学模型与实际系统间总是存在着差别;
- ②系统本身结构和参数可能是未知的或时变的;
- ③作用在系统上的扰动往往是随机的,外界条件(原料品种、设备工作状况和环境条件等)可能发生变化,且不可量测;

④在系统运行中,控制对象的特性随时间而变化,其变化规律往往难以事先知晓。这种变化若在小范围内,还可采用反馈控制、最优控制或校正方法来消除或减少参数变化对控制性能的有害影响。但是,若被控对象参数变化范围很大,为使系统仍能保持某种意义下的最优状态,采用随参数变化而自动改变控制策略的自适应控制就成为必要。控制对象参数在大范围变化时,参照日常生活中生物(包括人类)能够通过自觉调整本身参数(如增益、滞后时间、超前因素等),改变自己的习性,以适应新环境的特性,提出自适应控制系统的设想。

自适应控制系统必须能提供被控对象当前状态的连续信息,也就是要辨识对象,并用当前系统的特性与期望的(或最优的)性能指标相比较,做出使系统趋向期望的(或最优的)性能的决策,必须对控制器特性进行及时修正,以适应对象和扰动的动态特性变化,使系统始终自动地在最优或次优的状态下运行。

较完善的自适应控制系统应该具有以下功能:

- ①不断检测和处理信息,了解系统当前状态。辨识被控对象的结构、参数或性能的变化,建立被控对象精确的数学模型,或确定当前实际的性能指标;
- ②进行性能准则优化,产生自适应控制规律,确保被控系统达到期望的性能指标;
- ③自动修正控制器的参数,调整可调环节,使整个系统始终自动运行在最优或次优工作状态。

自适应控制是现代控制的重要组成部分,它同反馈控制相比较有如下特点:

①一般反馈控制主要适用于确定性对象或事先可确知的对象,而自适应控制主要研究不确定性对象或事先难以确知的对象;

②一般反馈控制具有强烈的抗干扰能力,即它能够消除状态扰动引起的系统误差,而自适应控制因为有辨识对象和在线修改参数的能力,因而不仅能消除状态扰动引起的系统误差,而且还能消除系统结构扰动引起的系统误差;

③一般反馈控制系统的设计必须先掌握描述系统特性的数学模型,及其环境变化状况,而自适应控制系统的设计则很少全部依赖数学模型,仅需要较少验前知识,但必须设计出合理的自适应算法,因而将更多地依靠计算机技术来实现;

④自适应控制是更复杂的反馈控制，它在一般反馈控制的基础上增加了自适应控制机构或辨识器，还附加了可调环节。

自适应控制系统可从不同视角进行分类。

按被控对象的性质可以分为：确定性自适应控制系统；随机自适应控制系统。

按照功能可以分为：参数或非参数自适应控制系统；性能自适应控制系统；结构自适应控制系统。

按照结构特点可分为前馈自适应控制系统和反馈自适应控制系统。

值得指出的是，人们的习惯多按结构特点进行分类，而且主要指反馈自适应控制系统的详细分类(见图 1-6)。

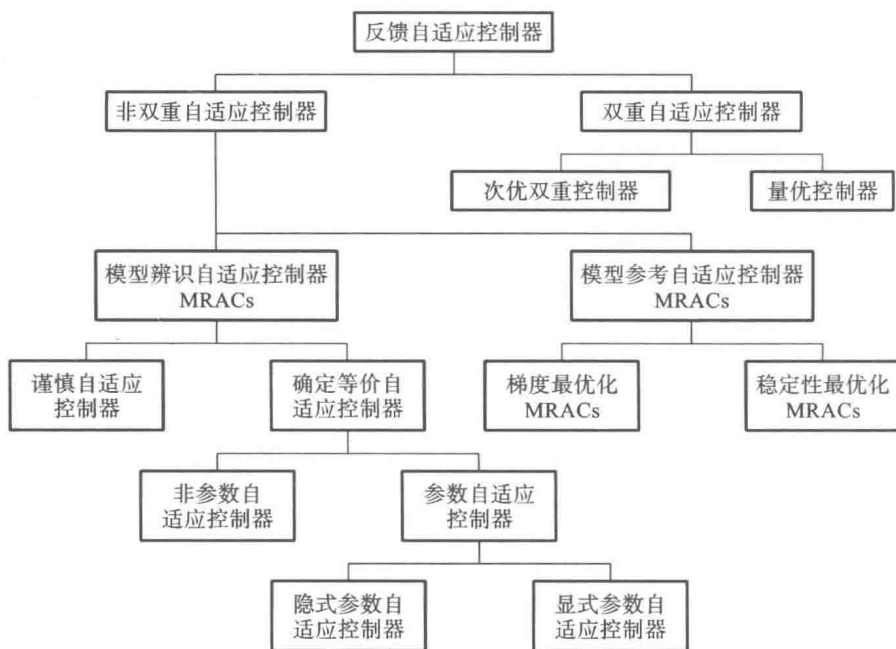


图 1-6 反馈自适应控制系统分类

1. 自适应控制系统的基本结构

自适应控制系统的基本结构有两种形式，即前馈自适应控制和反馈自适应控制系统。

1) 前馈自适应控制系统

前馈自适应控制系统又称开环自适应控制系统。它测量过程信号，并通过自适应机构按照这些测量信号改变可控制器的状态，从而达到改变系统特性的目的。没有“内”闭环反馈信号而实现控制器参数调整是前馈自适应控制系统的突出特点(见图 1-7)。

这种结构类似于一般扰动的复合控制，所不同的是增添了自适应机构和可控制器。

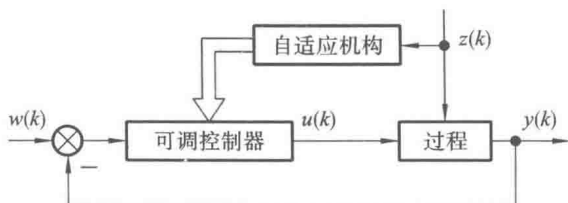


图 1-7 前馈自适应控制系统