



高等院校自动化新编系列教材

# 自动化概论

ZIDONGHUA GAILUN

汪晋宽 于丁文 张健 编著



北京邮电大学出版社  
[www.buptpress.com](http://www.buptpress.com)

# 自 动 化 概 论

编著 汪晋宽 于丁文 张 健

北京邮电大学出版社  
·北京·

## 内 容 简 介

本书适用于高等学校自动化专业本科教材,详细介绍了自动化和自动控制的概念、控制系统的组成和分类、基本控制方法。系统地介绍了自动化学科的发展历史、主要研究内容和研究方法,应用领域及自动化技术的最新发展。引入了绿色控制系统的概念、基本要求及其设计方法。以期读者在阅读本书后,对自动化学科和自动化专业形成整体上的概念和了解,为后续课程的学习提供指导性帮助。

### 图书在版编目(CIP)数据

自动化概论/汪晋宽,于丁文,张健编著. —北京:北京邮电大学出版社,2005  
ISBN 7-5635-1122-9

I. 自... II. ①汪...②于...③张... III. 自动化—技术—高等学校—教材 IV. TP2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 157117 号

---

出 版 者:北京邮电大学出版社(北京市海淀区西土城路 10 号) 邮编:100876

发行部电话:(010)62282185 62283578(传真)

电子信箱:publish@bupt.edu.cn

经 销:各地新华书店

印 刷:北京通州皇家印刷厂

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:11

字 数:258 千字

印 数:1—3 000 册

版 次:2006 年 2 月第 1 版 2006 年 2 月第 1 次印刷

---

ISBN 7-5635-1122-9/TP·206

定价:18.00 元

如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系

# 前 言

自动化技术在人类社会文明建设与发展中起着重要作用,观察周围,我们每一个人几乎每天都在接触或享受自动化技术给我们的惠顾。自动化作为一门科学,需要很多学科和技术支撑,如何掌握自动化这门科学,学习和运用好自动化技术是每一个有志于自动化专业和对自动控制领域感兴趣的人首先关心的问题之一。

作为一门科学,自动化包括自动控制理论和自动控制工程两部分。自动控制理论主要研究系统的建模、系统的分析、系统的稳定性分析方法及系统的控制算法。自动控制工程主要研究控制理论新探讨的方法的工程实现及具体控制对象的特征分析,以便于根据不同的对象特点构建不同类型的控制系统。

无论是从事控制理论的研究者,还是控制系统的工程技术人员,都需要对自动化和自动控制系统的特点及相关技术有相应的了解,只不过了解的目的、内容的侧重点及深度要求不同而已。

作为大学本科自动化专业的入门教材,本书系统地介绍了自动化的概念,自动控制系统的构成要素、关键技术和主要应用领域及其应用形式。以便于读者对自动化专业的性质、特点、服务面向建立清晰的概念,以帮助读者为后续课程的学习,在专业思想和整体概念上建立基础,在专业知识链的构建上起到引入的作用。

全书共分9章,第1章简单介绍了自动化的基本概念、学科分类和历史发展;第2章介绍了自动控制系统的组成及各部分的主要功能,交流分类;第3章介绍了自动控制系统的典型控制方法及系统基本评估指标;第4章介绍了自动化控制系统的主要应用领域及其特征;第5章到第7章介绍了自动化领域的前沿技术和未来发展。全书由于丁文教授和张健副教授提供初稿,汪晋宽教授统稿。

在本书编纂过程中参考了大量相关文献和著作,在此向这些文献的作者致以诚挚的谢意。

期望专家学者及其他读者对书中的错误和不足之处提出宝贵的意见。

编者

2005年12月于秦皇岛

## 编写说明

一本好的教材和一本好的书不同,一本好的书在于其内容的吸引力和情节的魅力,而一本好的教材不仅要对所介绍的科学知识表达清楚、准确,更重要的是在写作手法上能站在读者的立场上,帮助读者对教材的理解,形成知识链条,进而学会举一反三。基于这种考虑在充分理解自动化专业培养目标和人才需求的前提下,我们规划了这套《高等院校自动化新编系列教材》。

本套系列教材共包括21册,在内容取舍划分上,认真分析了各门课程内容的相互关系和衔接,避免了不必要的重复,增加了一些新的内容。在知识结构设计上,保证专业知识完整性的同时,考虑了学生综合能力的培养,并为学生继续学习留有空间。在课程体系规划上,注意了前后知识的贯通,尽可能做到先开的课程为后续的课程提供基础和帮助,后续的课程为先开的课程提供应用的案例,以便于学生对自动化专业的理解。

《高等院校自动化新编系列教材》编委会

2005年8月

# 高等院校自动化新编系列教材

## 编委会

主任 汪晋宽

副主任 金海明 罗云林 张美金 崔光照 王宏文

委员 (按姓氏笔划排名)

于丁文 王凤文 王建国 马淑华 石云霞

齐世清 任彦硕 张家生 张健 杨建忠

柳明丽 罗长杰 金伟 赵洪才 赵一丁

顾德英 舒冬梅 藏小杰 郑安平

秘书 顾德英(兼) 马淑华(兼)

# 目 录

## 第 1 章 自动化的概念和发展简史

1.1 自动控制和自动化的概念 .....	1
1.2 自动化发展简史 .....	4
1.3 自动化学科的分类 .....	11
1.4 自动化科学技术的发展趋势 .....	13
习 题 .....	16

## 第 2 章 自动控制系统

2.1 自动控制系统的组成 .....	17
2.2 自动控制系统分类 .....	19
2.3 自动化仪表 .....	21
习 题 .....	26

## 第 3 章 自动控制系统的典型控制方法

3.1 控制系统与数学模型 .....	27
3.2 自动控制系统的过渡过程及其性能指标 .....	30
3.3 自动控制系统设计与实现 .....	34
3.4 反馈控制和扰动控制 .....	36
3.5 比例积分微分控制 .....	37
3.6 非线性系统的控制 .....	39
3.7 最优控制 .....	42
3.8 自适应控制 .....	44
3.9 智能控制 .....	46
习 题 .....	52

## 第 4 章 自动化技术的主要应用

4.1 机械制造自动化 .....	54
4.2 过程工业自动化 .....	58
4.3 电力系统自动化 .....	62

4.4	飞行器控制	65
4.5	智能建筑	69
4.6	智能交通运输系统	74
4.7	生物控制论及信息处理	78
4.8	社会经济控制	83
4.9	大系统控制和系统工程	87
	习 题	89
<b>第 5 章 自动化学科的前沿技术</b>		
5.1	机器人及其应用	90
5.2	导弹和制导武器的控制	93
5.3	虚拟仪器	99
5.4	虚拟现实技术	102
5.5	多代理系统的应用	106
5.6	数控机床及其应用	111
5.7	计算机集散控制系统	115
	习 题	118
<b>第 6 章 工厂自动化和信息管理</b>		
6.1	计算机集成制造系统	120
6.2	计算机柔性制造系统	123
6.3	自动化仓储系统	126
6.4	自动运输设备和中央调度系统	129
6.5	现场总线控制系统介绍	130
6.6	现场总线系统的设计	134
6.7	设备远程监控系统和远程数据采集	136
	习 题	140
<b>第 7 章 电磁辐射污染和绿色生态控制</b>		
7.1	电磁辐射污染	142
7.2	工业生态学	143
7.3	生态工业园区	146
7.4	建设生态工业体系	150
7.5	工业生态设计	154
7.6	发展生态工业才能治理工业污染	156
	习 题	160
<b>附录 国内外自动化研究机构及其网址</b>		161
<b>参考文献</b>		166



# 第 1 章 自动化的概念和发展简史

## 1.1 自动控制和自动化的概念

自 20 世纪 40 年代以来,随着科学技术和生产的迅速发展,自动化技术也随之得到非常广泛的应用,并已渗透到社会生产和人类社会中的许多领域。在宇宙开发利用方面,如,卫星发射、轨道变更、飞船发射、姿势控制、飞船回收及其他操作;在航空方面如机场控制、导航;在国防军事方面,如导弹制导、自动火炮;在交通运输方面,如磁悬浮列车和全天候客机的自动运行;在工业生产方面,如温度、压力、流量、物位及成分等参数的控制,机床、各类大型机械、轧钢机、冶金过程、化工过程、生物及制药工程生产调度;在日常生活方面,如空调器、电梯、自动售货机等等,都离不开自动化技术。自动化几乎遍布人们生活的每一个场所,对人类社会的文明和发展是非常重要的。通过实施自动化,可以极大地提高生产效率和工作效率,保证了产品质量,节约了能源和减少了原材料的消耗,减轻劳动强度、改善劳动条件以及缩小了脑力劳动和体力劳动之间的差别。可以说,它是当前社会发展与进步的重要动力,是推动技术革命的核心技术。自动化程度的高低也是衡量一个国家科学技术和经济发展水平的重要标志。

本章主要介绍自动化发展简史和自动化学科的分类,详细论述了自动化的定义及其相关术语。

### 1.1.1 自动化的定义

#### 1. 自动控制

所谓自动控制,就是指机器设备或系统在无人直接参与下,能全部自动地按人预先规定的要求和既定程序运行,完成其承担的任务,并实现预期的目标。其特征是在信息检测、信息处理、分析判断和操纵控制的整个过程,都是由自动化装置完成的。无人直接参与的含义是指人不用直接操作,只需要确定控制要求和程序。

#### 2. 自动化

自动化是指由一个或多个自动控制系统或装置所构成的、没有人直接干预的生产过程。自动化涉及的范围极其广阔,从深度来看,以工业生产为例,小到普通设备,如加热器、电机等设备的自动化,大到企业生产过程的综合自动化;从广度来看,涉及工业自动化和农业自动化、服务自动化和军事自动化。自动化涉及的系统有人造系统(如机械加工系统、电力系统、军事系统等)和自然系统(如生命系统和生态系统)。自动化涉及的过程有生产过程、管理过程和决策过程等。

自动化的研究内容,包括自动控制理论、自动控制方法及工程实现技术、控制软件、控制装置、信号处理、现场总线和以太网等。其中自动控制理论与方法是实现自动化的理论

支柱,计算机技术、电动机、PLC、电力电子、微电子技术和自动化仪表技术等是实现自动化的硬件基础。从应用观点来看,研究内容有生产过程自动化、机械制造自动化、武器及军事自动化、办公室自动化和家庭自动化等等。

### 1.1.2 自动化的一些相关术语

#### 1. 系统

系统是指由若干称为子系统相互依存和相互作用的部分,为达到某些特定目的所组成的完整综合体。系统的性能主要取决于各自系统的配合与协调,还依赖于环境、人与系统的互动关系。缺乏有效的协调与控制,系统甚至无法正常运行,更谈不上有好的性能。由此可知,系统及其复杂性概念在自动化科学与技术中是何等重要。

#### 2. 信息

信息是人类对自然和人类自身能量变换状态的描述。信息可分为两类:自然信息和社会信息。

人类对自然界能量变换状态的描述,称为自然信息。我们祖先把太阳在不同时间向地球输送能量的变化过程分为 24 节气,用它来指导农业生产。我们把 24 节气称为自然信息。地球上万物都是根据自然信息变化(实质上是能量变换),采取相应的求生存行动,以适应环境,于是有候鸟迁移、动物的冬眠和惊蛰等自适应行为。因此,迄今为止,自然信息的流程是开环的:信息源(太阳能)发送信息→传输到地球→生物选择与接收→达到适应环境的目的,可见,自然信息的流程是顺序的,对生物界而言是被动的。

人类对人类自身一切活动所产生的能量变化状态的描述,称它为社会信息。社会信息和自然信息有着本质区别的流程:信息源发送信息→传输和交换→选择和接收→记忆和辨识→处理和加工→达到改造环境的目的。如果达到目的,就说明由信息源原先发出的信息是正确的,反之,则是错误的,应该修改信息源发出的信息。可见,社会信息的流程虽然也有开环的,但总体来说,是闭环的,即社会信息具有主观能动的能力,而不是单纯地接受和传递外来的信息。因此人类才能由猿发展到今天这样的社会文明。

信息需要载体。自然信息的载体是未经过加工的自然物,例如,人类的语言是用声波作为载体的。社会信息载体经历了 4 个发展阶段:自然物、文字、电讯和计算机。在前 3 个阶段,载体在本质上没变,仍然是信息的传递,只是在传播速度上提高了,即由机械运动速度到电磁波传播的速度。计算机的出现使信息载体发生了质的飞跃,它不仅能传递信息,而且还能代替人类处理信息。

信息技术发展离不开计算机技术和通信技术,而自动化技术与信息技术是密切相关的。通信技术的重点是在信息传输上,计算机技术的重点是在信息处理上,自动化技术的重点是在信息的控制应用上。自动化要完成信息的控制应用,离不开信息的获取、传输与处理。因此可以说,自动化技术发展到今天这样的辉煌,应归功于计算机技术和通信技术。

#### 3. 控制

控制是指为某种规定的预期目标,而对过程变化施加的干预。控制和自动化是两个密切相关但不完全相同的概念。从自动化定义可知,自动化与“机器设备、过程或系统等

具体物理对象”的“自动”运行(或操作、控制)密切相关,脱离了具体物理对象谈自动化是毫无意义的。需要指出的是,“具体物理对象”的“自动”运行不一定非要有控制的意图。一般说来,自动化主要研究人造系统的控制问题,应用的范围比较窄。

控制是人们为实现所要达到的目标而采用的方法与手段。控制可以与具体物理对象相联系,如设备的运动控制、生产过程控制等;也可以和非物理对象相联系,如人口控制、经济控制、社会控制、生物控制等。很显然,控制的概念应用范围更广。可以说。“所有技术都包括控制”。

人造系统的控制概念,则是指为了改善系统的性能或达到特定的目的,通过信息的采集和加工而施加到系统的作用。人造系统由控制部分(即自动化装置部分)和被控制对象组成,两者往往形成双向的信息流联系。控制部分一般由传感器、控制器和执行器组成。传感器用来采集被控量的信息,并把它变换到控制器所需的形式,传送到控制器。控制器用来处理信息、产生控制信号,这是控制系统的核心。执行器则将控制器产生的控制信号进行放大和变换,以此产生控制作用,最终施加到被控对象上。通常把进入可控系统的信息加工成控制信息的规则,称为控制算法。设计和实现控制算法是设计控制系统中最重要的任务。在可控系统中实现控制算法的部件称为控制器。它可以是数字计算机,也可以是模拟仪表。

控制的应用范围虽比自动化要广得多,但控制概念本身的含义却要比自动化窄得多。就工程控制范围而言,自动化是与整个物理对象密切相关的具体实现,形成了自动化设备、系统等,而控制只是自动化实现中的核心部分之一。自动化的核心概念是信息、控制与系统,控制是核心的核心。自动化是多个概念交叉、融合的产物,而控制却不是。

#### 4. 反馈

反馈是指将系统的实际输出和期望输出进行比较,产生偏差,从而为控制器确定下一步的控制行为提供依据。若反馈信号(系统实际输出)与系统输入信号(期望输出)相减,则称为负反馈;若相加,称为正反馈。一般情况下,控制系统采用的是负反馈。实际上,反馈是一切自然系统、生物系统、社会系统的普遍属性,反馈的过程是信息传递的过程。反馈控制是一种最基本的控制方式

#### 5. 调节

调节是指通过系统的反馈信息自动校正系统的误差,使一些参数如温度、速度、压力或位置等,在一定的精度范围内按照要求的规律变化。调节须以反馈为基础,而控制则包括以反馈为基础的闭环控制和无反馈的开环控制。

#### 6. 管理

管理是指为了充分利用各种资源来达到一定的目标,而对社会或其组成部分施加的一种控制。

#### 7. 决策

决策是指为了获得最优方案,对若干准备行动的方案进行选择。随着工业生产过程规模的扩大和综合管理与要求的提高,使得自动化不但完成控制任务,而且还具有生产管理和经营决策的任务,即综合自动化。它所要解决的不是局部最优化问题,而是一个工厂、一个公司乃至一个区域的总目标或总任务的最优化问题。最优化的目标函数包括产

量最高、质量最好、原料和能耗最小、成本最低、可靠性最高、环境污染最小等指标,它反映了技术、经济、环境等多方面的综合性要求。

## 1.2 自动化发展简史

自动化发展史基本上是这样—个过程:自动化装置→自动化技术→自动化理论→自动化科学,是一个需求驱动型的发展过程。

### 1.2.1 自动装置的出现和应用

自动化的概念起源于最早的自动控制,而最早实行自动控制的自动装置可以追溯到公元前,如我国古代发明的指南车、漏壶、候风地动仪;古埃及和希腊发明的教堂庙门自动开启、投币式圣水箱等自动装置。17世纪以来的近代自动装置有荷兰机械师 C. 惠更斯(Huygens)发明的钟表、俄国机械师 И. 波尔祖诺夫(Ползунов)发明的保持蒸汽锅炉水位恒定的浮子式阀门水位调节器。

### 1.2.2 自动化技术形成时期

18世纪末到20世纪30年代,是自动化技术形成时期,应用自动控制的方法来代替人工控制各种机械设备,是人类发展史的一大创举。随着社会发展,自动控制引入到各种机械设备逐渐增加,但对自动化的大量需求是始于工业革命时期。

英国机械师 J. 瓦特(Watt)于1788年发明蒸汽机,同时又发明了离心式调速器,并把它与蒸汽机的阀门连接起来,构成蒸汽机转速的闭环自动调速系统,如图1.1所示,当负载或蒸汽供给量发生变化时,离心式调速器能够自动调节进汽阀门的开度,从而控制蒸汽机的转速。使用这种机械式自动调速装置进行调速是自动化应用的第一个里程碑。这项发明对工业革命和控制理论后来的发展均有重要的影响。

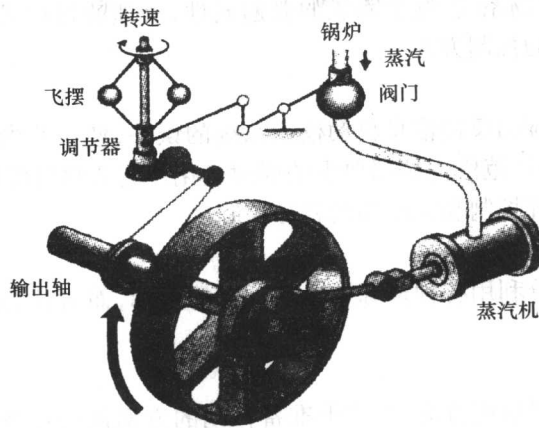


图 1.1 构成蒸汽机转速的闭环自动调整系统

### 1. 自动调节的广泛应用

由于工业革命的需要,人们开始采用自动调节器或装置,使一些物理量保持在给定值附近。法国工程师J.法尔科(Farcot)于1868年发明了反馈调节器,应用于操作蒸汽船的舵,并称之为伺服机构。到了20世纪20~30年代,美国开始采用常规PID调节器。这是一种模拟式调节器,现在还在许多工厂中采用。

### 2. 自动调节系统的稳定性问题

从1788~1868年,在英国75 000台装有离心式调速器的蒸汽机在工作,这给当时社会带来了极大财富。但在这期间,人们发现蒸汽机转速会忽高忽低,即系统会发生振荡(不稳定)。这种现象引起了很多著名的工程师、物理学家和数学家的兴趣。1868年英国物理学家J.C.麦克斯韦(Maxwell)把蒸汽机转速调节系统不稳定现象变成用线性微分方程来研究,他指出只有线性微分方程的根都是负实根,或具有负实部的复数根,这个方程所描述的系统才是稳定的。这是人类第一次把自动化技术出现的不稳定的问题变成数学问题来研究。但是怎样求解高阶代数方程?仍然是个难题。英国数学家E.劳斯(Routh)和德国数学家A.霍尔维茨(Hurwitz)两人各自独立研究,分别于1877年、1895年提出代数稳定判据(Stability Criteria),解决了这个难题。为了纪念这两位数学家作出的贡献,人们常常把代数稳定判据叫做劳斯-霍尔维茨稳定判据。1892年俄国数学家A.李雅普诺夫(Ляпунов)提出稳定性的严格数学定义,并发表了专著。他的稳定性理论至今还是研究分析线性 and 非线性系统稳定性的重要方法。

### 3. 反馈控制原理和奈奎斯特频率法

1927~1932年期间,在贝尔实验室工作的美国电气工程师H.布莱克(Black)和他的同事们,应用负反馈原理设计一个具有线性负反馈电子管放大器,解决了电子管放大器失真问题。人们把这个概念引入了自动调节系统。这就是现在控制系统中所使用的闭环控制。

采用线性负反馈的电子管放大器,虽然解决了电子管放大器失真问题,但又产生了另一个问题——放大器振荡。这次出现的振荡和1868年瓦特调速中出现的不稳定情况不同,而是放大系数太大、太小,系统都会不稳定,用代数稳定判据无法解析这个现象。1932年,同在贝尔实验室工作的H.奈奎斯特(Nyquist)成功地解决了这一技术难题,建立了奈奎斯特的稳定判据,人们称它为奈奎斯特频率法。

频率法的出现是和电力工业的发展分不开的。这是因为电力工业需要对正弦函数的电压和电流信号组成的交流网络进行计算,于是建立了复数运算和复变函数论,这就为奈奎斯特的频率法的建立准备了数学依据。

奈奎斯特频率法的重要贡献在于,它可以利用物理上能够测量的开环系统频率特性来判别闭环系统的稳定性、静态误差和过渡过程某些品质指标等一系列问题。不用直接去解微分方程,只要画出开环系统的频率特性,就会知道系统稳定性如何,就可以估计出系统的品质指标,而且还能知道应该采取什么措施,可以使系统稳定下来,进一步提高系统的品质指标等等。因此就出现了至今仍在工业上获得极为广泛应用的PID调节器,P,I,D的不同组合,可以让大多数系统获得相当满意的性能指标。由于奈奎斯特频率法的优点,使得其应用在通讯、机械、化工和冶金等许多工业系统中,极大地推动了人类社会经

济的发展,它的理论本身也在实际应用中得到极大的发展和充实。

1940年,H. W. 伯德(Bode)引入了半对数坐标系,把复数运算变成代数运算,大大地简化了频率特性的绘制。1942年,H. 哈利斯(Harris)引入了传递函数的概念,用方框图、环节、输入和输出等信息传输的概念来描述系统的性能和关系。这样就把原来由研究反馈放大器稳定性而建立起来的频率法,更加抽象化了,因而也更有普遍意义了,从而可以对具体的物理系统,如力学、电学和化学等系统的描述,统一用传递函数、频率响应等抽象的概念来描述。

### 1.2.3 局部自动化时期

20世纪40~50年代,是局部自动化时期。在第二次世界大战期间,针对防空火力控制系统和飞机自动导航系统等军事技术问题,各国科学家设计出各种自动调节装置、控制装置用于解决局部问题,开创了防空火力系统和控制这一新的科学领域。这个时期主要是经典控制理论的形成和发展时期。

#### 1. 经典控制理论的形成和发展

从提出频率法开始到20世纪60年代,形成了现在人们所说的经典控制理论——单变量控制理论。经典控制理论的研究对象是具有单输入、单输出的单变量系统,而且多数是线性定常系统;使用的数学工具是微分方程、拉氏变换等;研究方法有传递函数法、频率响应分析法(Bode图)、直观简便的图解法(根轨迹法)和描述函数法;主要代表人物有美籍瑞典科学家H. 奈奎斯特、美国科学家H. W. 伯德及W. R. 埃文斯。1945年,美国数学家N. 维纳把反馈的概念推广到生物等一切控制系统。1948年,他出版了名著《控制论》一书,为控制论奠定了基础。钱学森于1954年在美国出版了《工程控制论》一书,书中所阐明的基本理论和观点,奠定了工程控制论的基础。

第二次世界大战后工业迅速发展,被控对象越来越复杂,这时又提出新的控制问题:非线性系统、时滞系统、脉冲及采样控制系统、时变系统、分布参数系统和有随机信号输入的系统的控制问题等,促使经典控制理论在20世纪50年代又有新的发展。

#### 2. 局部自动化的广泛应用

由于第二次世界大战期间军事技术的发展,以及战后把这些技术向机械、航空和化工等领域推广,例如,在工业上已广泛应用PID调节器,并用电子模拟计算机(Electronic Analog Computer)来设计自动控制系统。当时在工业上实现局部自动化,即单个过程或单个机器的自动化。一方面应用着PID调节器或其他自动调节装置,另一方面又用继电器来实现启动、停车、连锁和保护等功能。当时的PID调节器是电动的、气动的或液压的。生产自动化促进了自动化仪表的进步。在20世纪30~40年代出现了统一信号的、通用的、标准的气动单元组合仪表。20世纪50年代研制出了电动单元组合仪表。这些为工业自动化提供了必不可少的技术工具,并使得构成和设计自动控制系统更简便、更工程化了。我国也能生产系列化的国产气动单元组合仪表,QDZ型和电动单元组合仪表DDZ型,在国内使用很广。智能化的仪表和控制器是当前流行的产品。电子式控制器的应用是自动化应用的第二个里程碑。

### 3. 电子数字计算机的发明

1943~1946年,美国电气工程师J. 埃克脱(Eckert)和物理学家J. 莫奇利(Mauchly)为美国陆军研制成功世界上第一台基于电子管的电子数字计算机(Electronic Digit Computer)——电子数字积分和自动计数器(ENIAC)。1950年,美国宾夕法尼亚大学莫尔(Moore)小组研制成功世界上第二台存储程序式电子数字计算机——离散变量电子自动计算机(EDVAC)。电子数字计算机内部元件和结构,经历了电子管、晶体管、集成电路和大规模集成电路的4个发展阶段。

电子数字计算机的发明,不但为现代控制理论的发展提供了强有力的工具,而且为复杂控制系统实现先进的控制和算法奠定了基础。

#### 1.2.4 综合自动化时期

20世纪50年代末起至今,是综合自动化时期,主要包括2个方面内容:一是现代控制理论形成;二是现代控制理论的发展和应用。

20世纪50年代中期,世界进入了一个和平发展时期,工业生产过程朝着大型化、连续化和自动化方向发展,特别是空间技术和各类高速飞行器的发展,要求控制高速度、高精度的受控对象,使得控制系统更加复杂,要求控制理论解决多变量、非线性和时变系统的设计问题。此外,对控制性能的要求也在逐步提高,很多情况下要求系统的某种性能是最优的,而且对环境的变化有一定的适应能力等。这些新的控制要求用经典控制理论难以解决,因此迫切需要建立新的控制理论和方法。

对于控制系统的描述和求解问题,现代数学、物理和力学等学科的发展成果已为此奠定了基础;20世纪50年代后期,迅速发展的计算机技术,使人们摆脱了计算量大、计算复杂的束缚,有可能对复杂控制系统作深入研究。20世纪70年代,微型计算机的发展及显示技术和通讯技术的发展,实现了计算机直接参与控制,从根本上改变了现代控制系统面貌,极大地促进了现代控制理论的发展和自动化技术发展。

##### 1. 现代控制理论的形成

20世纪50年代,苏联学者对包含非线性特性、饱和作用和受到限制的控制等因素的控制系统的最优瞬态的研究,表现出很大的兴趣。他们的研究又促进了前苏联科学院院士、数学家Л. С. 庞特里亚金(Л. С. понтрягин)于1956年提出了控制系统最优轨迹的“极大值原理”。这个原理系统地研究受到状态与控制两方面的约束,而使用不连续控制函数的最优轨迹,是一种综合控制系统的新方法。它与变分法密切相联,这又促使人们进一步研究与非线性函数分析相关的、更抽象的优化问题。极大值原理的贡献是50年代和60年代对于大量轨迹优化数值计算方法的研究。这种研究为成功地设计许多航天运载器提供了理论和方法,其中包括阿波罗计划和宇航飞行计划。1956年美国科学院院士、数学家R. 贝尔曼(R. Bellman)提出了寻求最优控制的动态规划法。1960~1964年,美国数学家、电气工程师R. E. 卡尔曼(R. E. Kalman)和数学家R. S. 布西考虑到控制问题中所存在的随机噪声影响,建立了卡尔曼-布西滤波器理论,进一步丰富了控制理论的研究内容,扩大了所能处理控制问题的范围。同时,卡尔曼等人把状态空间法(State Space Method)系统地引入控制理论中,为揭示和认识控制系统的特性起到关键作用。其中关于系统状态

的能控性和能观性,已成为控制理论中揭示系统的、内在属性的两个基本概念。卡尔曼还提出具有二次型性能指标的线性状态反馈律,为线性自动控制系统给出了最优调节器的概念。1960年在美国自动控制联合会第一年会上,以状态空间法为基础,极大值原理,动态规划,卡尔曼滤波器为核心的分析、设计控制系统的一套原理和方法被定名为现代控制理论(Modern Control Theory),这标志着控制理论进入了一个新的发展阶段。

20世纪70年代,在状态空间法发展的同时,不少学者对复(频)域研究感兴趣,如英国学者H. 罗森布劳克(H. Rosenbrock),他系统地、开创性地将单变量频率法推广到多变量系统的设计中,即把一个多变量系统的设计转化为多个单变量系统的设计。后来相继出现了D. 梅奈(D. Mayne)的序列回差法、A. 麦克法兰(A. Macfarlane)的特征轨迹法和欧文斯(Owens)的并矢展开法等,使频域法日臻完善,这些方法被称为频域法。它们的共同特点是把一个相关联的多输入-多输出系统的设计,转化为多个单输入-单输出系统的设计问题,尽而可以用任何一种经典控制理论中的方法完成系统的设计。这对于熟悉单输入-单输出系统设计方法的工程技术人员来说,具有很强的吸引力。随着问题范围的扩大和研究的深入,多种方法相互交融,极大地丰富了现代控制理论的内涵,使其不断地向前发展。

## 2. 现代控制理论发展及其应用

随着生产的发展和科学技术的进步,现代控制理论迅速发展,并形成了多个重要分支。

### (1) 建模和系统辨识

建模(Modelling)就是指建立系统数学模型,使其能正确反映系统输入、输出之间的基本关系。它是对系统进行分析和控制的首要工作,直接决定着控制的成败。由于系统比较复杂,往往不能通过解析的方法直接建模,而主要是在系统输入、输出的实验数据或运行数据的基础上,从一类给定的模型中,确定一个被研究系统本质特征等价的模型。如果模型的结构已经确定,只需确定参数,就是参数估计问题。若模型的结构和参数需同时确定,就是系统辨识(System Identification)问题。系统辨识已经应用在自适应控制、优化控制、预测控制、故障诊断等。

### (2) 最优控制理论

最优控制理论是设计最优控制系统的理论基础,也是现代控制理论的核心内容之一。主要研究被控系统在给定性能指标时,实现最优的控制规律和方法。用于综合最优控制系统的主要方法是极大值原理和动态规划。目前,集中参数最优控制理论和方法已趋成熟,而分布参数最优控制、随机最优控制、大系统的最优控制仍在研究和发展之中。最优控制应用在许多地方,如多台电机协调运转的最优控制、玻璃窑炉燃烧过程自寻最优控制、自动焊接装置的最优控制及城市道路交叉口交通的最优控制等。

### (3) 自适应控制理论

随着被控对象动态特性变化(不确定性)而改变其控制器自身特性的控制系统,称为自适应控制系统;而关于自适应控制系统的分析与设计的理论,则称为自适应控制理论(Self-adaptive Control Theory)。它主要研究的基本问题是

- ① 认识被控对象的动态特性(辨识);
- ② 构造适应这种特性的控制器;
- ③ 用算法实现这种控制器。



自适应控制是控制理论应用于实际的关键问题,它正朝着自学习、自组织及智能控制等方向发展。它已在船舶驾驶、过程控制中得到成功的应用。

#### (4) 遥感、遥测和遥控

20世纪20年代,遥测(Telemetry)和遥控(Remote Control)开始在铁路信号和道岔控制上实际应用。到了20世纪40年代,对大电力系统,石油、天然气管道输送系统等应用了遥测和遥控。

遥测就是对被测对象的某些参数进行远距离测量,如对大电力网上某点电压或频率的测量。遥控就是对被控对象进行远距离控制,例如,从调度中心端对大电力网上某个电站机组的启动控制。

最初的遥测、遥控系统采用有线(通)信道。第二次世界大战期间无线电遥控、遥测得到迅速发展,特别是航天技术的需要,而使它得到迅速的发展。例如,宇宙飞船航天员的生理情况(体温、血压及心率等),由传感器测量后,通过遥测(无线电)(通)信道传至地面监控站。而监控站也可对飞船中的设备通过(无线电)(通)信道进行操纵或控制。

20世纪60年代以后,遥感(Remote Sensing)技术得到了迅速发展。遥感就是利用装载在飞机或人造卫星等运载工具上的传感器,收集由地面目标物反射或发射出来的电磁波,再根据这些数据来获得关于目标物(如矿藏、森林、作物产量等)的信息。现已应用在农业、林业、地质、地理、海洋、水文、气象、环境保护和军事侦察等领域。

#### (5) 综合自动化

20世纪50年代末到60年代初,开始出现电子数字计算机控制的化工厂,如1962年英国帝国化学工业公司利用计算机完全代替了原来的模拟控制。计算机直接测量224个参数和控制129个阀门。20世纪60年代末在制造工业中出现了许多自动生产线,工业生产开始由局部自动化向综合自动化(Integrated Automation)方向发展。从20世纪70年代开始,随着计算机技术的不断发展,以计算机为代表的自动化技术与工业机器人被广泛应用,并逐步形成柔性自动化、计算机集成制造系统(CIMS)及计算机集成过程控制系统(CIPS)等。如20世纪70年代出现用专用机床组成的无人工厂,80年代初出现用柔性制造系统组成的自动化无人工厂,80年代中期的CIMS得到重视并大规模实施等。综合自动化系统的理论基础是大系统理论和智能控制理论。

#### (6) 大系统理论

随着工业生产过程规模的扩大和综合管理与要求的提高,以及微机技术、通信技术和CRT显示技术的巨大进展,使得计算机控制系统不但完成控制功能,而且还具有生产管理和指挥调度的功能。除了直接数字控制和监督控制以外,还包含了工厂级集中监督微机和企业级经营管理微机。在企业经营管理中,除了管理生产过程的控制,还具有生产管理、收集经济信息、计划调度、产品订货和运输等功能。在这样的背景下,人们开始对出现的大系统,如大电力系统、化工联合企业、钢铁联合企业及社会经济大系统等进行研究。20世纪60~70年代,I.莱夫科维茨(Lefkowitz)和M.梅萨罗维茨(Mesarovic)分别提出了大系统(Large-scale System)的多层结构和多级结构,并分解成子系统的概念。20世纪60年代,还提出了大系统分散控制的次优性控制方法。大系统理论是传统控制理论在广度方面的发展。