

清华大学能源动力系列教材

热工过程自动控制 (第2版)

Automatic Control for Thermal Process (Second Edition)

杨献勇 编著
Yang Xianyong

清华大学出版社



清华大学能源动力系列教材

热工过程自动控制
(第2版)

Automatic Control
for Thermal Process
(Second Edition)

杨献勇 编著
Yang Xianyong

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书以能源动力系统为背景,介绍自动控制的基本原理,详细讨论了在能源动力系统控制中占有统治地位的PID控制的分析、整定方法。介绍了高度自动化的大型火电机组的主要控制系统,简要叙述了现代控制理论和离散控制系统的基本内容,并对目前正在研究发展的主要先进控制策略进行了分析和说明。

本书可作为能源动力类专业大学本科生学习自动控制原理和过程控制的教材,也可供研究生和从事热工过程控制的科研人员和工程技术人员参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

热工过程自动控制/杨献勇编著.—2版.—北京:清华大学出版社,2008.6

(清华大学能源动力系列教材)

ISBN 978-7-302-16597-2

I. 热… II. 杨… III. 热力工程—自动控制—高等学校:技术学校—教材 IV. TK32

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第189527号

责任编辑:曾洁 赵从棉

责任校对:刘玉霞

责任印制:孟凡玉

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦A座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者:北京鑫海金澳胶印有限公司

装 订 者:北京国马印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×230 印 张:27.25 字 数:558千字

版 次:2008年6月第2版 印 次:2008年6月第1次印刷

印 数:1~4000

定 价:39.80元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:023426-01

第2版前言

P
R
E
F
A
C
E

“热工过程自动控制”是清华大学热能工程系为能源动力及其自动化专业本科生高年级开设的一门课程,它包括自动控制原理和能源动力工业过程控制两部分内容。本书是在2000年第1版的基础上,经过几年的教学实践,并考虑课程体系的布局和自动化技术的发展修订而成的。

全书共分8章,第1章作为全书的绪论,介绍了自动控制的基本概念,使学生在开始学习本门课程时,对自动控制及其在能源动力工业应用中的基本问题能有一个总体认识。第2章和第3章介绍了经典控制理论的基本内容,是进一步学习以后各章的基础。这两章的内容主要是针对能源动力领域的应用特点选取和安排的,远不是经典控制理论的全部。在热工控制中,PID(比例、积分、微分)控制策略由于其原理清晰、整定简单、应用经验丰富,目前仍占有统治地位。第4章详细分析了PID单回路调节系统以及串级调节系统、前馈-反馈调节系统、解耦控制、纯滞后补偿等复杂调节系统的原理、性能和整定方法。在能源动力部门,大型火电机组的热力系统复杂,自动化水平高,具有典型性和代表性,第5章针对亚临界煤粉炉机组、超临界机组和循环流化床机组,比较全面地介绍了其主要控制系统的结构和分析整定方法。第6章介绍控制系统的状态空间分析方法和最优控制的基本概念,属于现代控制理论的范畴。虽然由于对模型的高精度要求限制了现代控制理论在热工过程控制中的应用,但是了解和掌握现代控制理论提出的状态空间分析方法和最优控制的基本思想仍然是十分必要的。控制技术的发展使计算机成为控制系统中的核心设备,作为离散设备的计算机不但代替了连续的控制器,实现控制策略,而且可以完成更复杂、更灵活的控制功能,因此掌握离散控制系统的分析工具和方法对于分析实际系统以及进一步学习后续有关课程是必不可少的。第7章结合能源动力工业的应用,介绍了离散控制的基本内容。为了发展对模型精度要求不高而控制性能又优于传统PID控制的控制策略,20多年来,人们进行了大量的研究和探索,提出了许多新的控制思想、策略和算法,它们统称为先进过程控制技术,虽然其理论和技术还在发展和完善中,但它们在包括能源动力工业在内的许多领域已得到了成功的应用。第8章简要介绍了这方面比较成熟的研究成果。本书前7章都附有一定数量的习题,力图反映课程的基本要求。

与第1版相比,第1章和第7章是新加入的。由于后续课程已安排包括集散控制系统在内的综合自动化方面的课程,故删去了第1版的第5章(集散控制系统)。对第2,3,4,5等章的内容和全部习题也根据教学实践和能源动力领域过程控制的发展进行了修改和补充。

本书在内容上力求密切结合热工对象及其控制的实际,文字上力求简明扼要,体系结构上主要考虑能源动力类专业本科生学习的方便,使他们在修完高等数学、线性代数及部分专业课后即可进入本课程的学习。

由于作者水平有限,书中难免有不当之处,恳请读者批评指正。

编者

2007年7月

第1版前言

P
R
E
F
A
C
E

“热工过程自动控制”是清华大学热能工程系为热能动力类专业高年级学生开设的一门课程,它包括自动控制原理和热能动力工业过程控制两部分内容。本书是在总结多年教学经验的基础上,对历年使用的讲义、讲稿进行反复修改和完善而完成的。

本书共分7章。第1章和第2章介绍了经典控制理论的基本内容,是进一步学习以后各章的基础。这两章内容的选取和安排主要考虑了控制理论在热工过程中的应用情况,它远不是经典控制理论的全部。在热工过程控制中,PID(比例、积分、微分)控制器由于其原理清晰、整定简单、应用经验丰富,目前仍占统治地位。第3章详细分析了采用PID控制器的单回路系统的分析和整定方法,并在此基础上,介绍了在热工过程控制中广泛采用的串级调节系统、前馈-反馈调节系统、解耦控制和纯滞后补偿等几种复杂调节系统。在热能动力部门中,火电机组的热力系统复杂,自动化水平高,具有典型性和代表性,第4章比较详细地介绍了大型火电厂单元机组主要控制系统的结构及分析整定方法。自20世纪70年代以来,过程控制领域的一个主要技术进步是集散控制系统的应用,目前在热工过程控制中,集散控制系统已成为控制系统的主流,第5章概要介绍了集散控制系统的体系结构和发展状况。第6章介绍控制系统的状态空间分析方法和最优控制的基本概念,属于现代控制理论的范畴。由于现代控制理论对对象的模型要求较高,从而限制了它在热工过程控制中的成功应用。但是了解和掌握现代控制理论提出的基本概念和主要思想仍然是十分必要的。为了发展对模型精度要求不高而控制性能又优于传统的PID的控制策略,近20多年来,人们开展了大量的研究和探索,提出了许多新的控制思想、策略和算法,它们统称为先进过程控制技术。虽然其理论和技术还在发展和完善中,但它们在许多工业部门包括热能动力部门已得到了成功的应用,第7章简要介绍了这方面比较成熟的主要研究成果。本书第1,2,3,4,6章附有一定数量的习题,它们力图反映课程的基本要求,是根据多年教学中的使用经验选取和编写的。

本书在内容上力求密切结合热能动力对象的实际,文字上力求简明扼要,体系结构上主要考虑热能动力类专业本科生学习的方便,使他们

在修完高等数学、线性代数及部分专业课后即可进入本课程的学习。

本书第1,2,3章和第6章由杨献勇编写,第4,7章由许立冬、杨献勇编写,第5章由李东海、杨献勇编写。由于作者水平有限,书中难免有不当之处,恳请读者批评指正。

编者

1999年8月

PREPAC

目 录

C O N T E N T S

第 1 章 热工过程自动控制概述	1
1.1 自动控制系统的基本结构	1
1.2 自动控制系统中的基本参数	4
1.3 控制系统的静态特性和动态特性	6
1.4 控制系统的分类	6
1.5 控制系统的质量评定	9
习题	10
第 2 章 自动控制系统的数学描述	12
2.1 拉普拉斯变换	12
2.1.1 拉氏变换的定义	12
2.1.2 拉氏变换的主要性质	12
2.1.3 常用函数的拉氏变换	17
2.1.4 拉氏反变换	20
2.1.5 利用拉氏变换解微分方程	23
2.2 系统的动态特性	24
2.2.1 微分方程	24
2.2.2 传递函数	25
2.2.3 输入响应法	28
2.2.4 频率响应法	28
2.2.5 状态变量表示法	30
2.3 环节的连接方式和典型环节的动态特性	31
2.3.1 环节的基本连接方式	31
2.3.2 典型环节的动态特性	34
2.4 物理系统传递函数的推导	42
2.4.1 系统的方框图表示	42
2.4.2 方框图的等效变换	43
2.4.3 求 RLC 电路传递函数的等效阻抗法	48
2.5 信号流图	48

2.5.1	信号流图的结构和术语	48
2.5.2	信号流图的画法	49
2.5.3	信号流图的化简	51
2.5.4	梅逊公式	53
	习题	55
第3章	系统分析	59
3.1	系统分析的基本概念	59
3.1.1	系统分析的一般方法	59
3.1.2	系统的传递函数和系统的稳定性	60
3.1.3	传递函数的分子对瞬态响应的影响	61
3.1.4	反馈控制系统对不同扰动的响应特性	63
3.2	劳斯稳定判据	65
3.2.1	系统稳定的必要而不充分条件	65
3.2.2	劳斯判据	65
3.2.3	劳斯判据用于低阶系统	70
3.2.4	劳斯判据的推广	71
3.3	奈奎斯特稳定判据	72
3.3.1	幅角定理	72
3.3.2	奈氏准则	74
3.3.3	广义频率特性	83
3.3.4	对数坐标图——伯德图	85
3.3.5	最小相位系统及其稳定性裕度	87
3.4	一阶系统分析	89
3.4.1	一阶系统的瞬态响应	89
3.4.2	一阶系统的过渡时间	90
3.5	二阶系统分析	90
3.5.1	二阶系统的稳定性分析	91
3.5.2	$0 < \xi < 1$ 时典型二阶系统分析	93
3.5.3	二阶系统的频率特性	98
3.5.4	一般二阶系统分析	100
3.6	高阶系统分析	102
3.6.1	闭环主导极点	102
3.6.2	高阶系统的瞬态响应分析	102

3.7	系统分析的根轨迹法	104
3.7.1	根轨迹的基本概念	104
3.7.2	根轨迹的作图规则	105
3.7.3	含有纯迟延环节系统的根轨迹	110
	习题	113
第4章	热工过程自动调节系统的分析和整定	117
4.1	热工对象的动态特性	117
4.1.1	热工对象动态特性的特点	117
4.1.2	用特征参数近似表示对象的动态特性	118
4.1.3	热工对象的传递函数	120
4.1.4	由飞升曲线求取传递函数中的参数	121
4.1.5	热工对象的频率特性	125
4.2	调节规律和调节器	126
4.2.1	三种基本调节规律	126
4.2.2	工业调节器的动态特性	128
4.3	单回路调节系统的分析	129
4.3.1	稳定性分析	130
4.3.2	调节系统的静态偏差	135
4.3.3	调节系统的动态偏差	136
4.3.4	调节系统的调节时间	139
4.4	单回路调节系统的整定	146
4.4.1	保证稳定性指标的计算整定方法	146
4.4.2	图表整定法	150
4.4.3	实验整定法	150
4.5	利用根轨迹法整定调节系统	153
4.5.1	采用P调节器的系统的根轨迹法整定	153
4.5.2	采用PD调节器的系统的根轨迹法整定	154
4.5.3	采用PI调节器的系统的根轨迹法整定	157
4.5.4	采用PID调节器的系统的根轨迹法整定	158
4.6	复杂调节系统	159
4.6.1	串级调节系统	160
4.6.2	前馈-反馈控制系统	163
4.6.3	解耦控制	164

4.6.4	纯迟延补偿	174
	习题	178
第5章	火力发电厂大型单元机组自动控制系统	181
5.1	火力发电厂大型单元机组的生产过程及其自动控制	181
5.1.1	单元机组的生产过程	181
5.1.2	单元机组自动控制系统的组成	183
5.1.3	单元机组自动控制系统中的协调控制级	183
5.1.4	单元机组自动控制系统中的基础控制级	184
5.2	单元机组负荷控制系统	186
5.2.1	单元机组动态特性	186
5.2.2	锅炉跟随汽轮机的负荷调节系统	188
5.2.3	汽轮机跟随锅炉的负荷调节系统	189
5.2.4	协调控制方式	191
5.2.5	实际负荷控制系统举例	196
5.3	单元机组汽包锅炉燃烧控制系统	198
5.3.1	汽压被控对象的生产过程	199
5.3.2	汽压被控对象的动态特性	200
5.3.3	燃料量控制子系统	202
5.3.4	送风量控制子系统	205
5.3.5	引风量控制子系统	207
5.3.6	燃烧调节系统的整定	207
5.4	给水控制系统	211
5.4.1	汽包水位被控对象的动态特性	211
5.4.2	前馈-反馈给水调节系统	213
5.4.3	串级给水调节系统	217
5.4.4	全程给水调节系统	217
5.5	汽温控制系统	222
5.5.1	过热汽温被控对象的动态特性	222
5.5.2	串级过热汽温控制系统	224
5.5.3	过热汽温控制系统的工程设计实例	225
5.5.4	改善过热汽温调节性能的措施	226
5.6	超临界压力机组控制系统	227
5.6.1	超临界锅炉的特点	228

5.6.2	超临界机组的动态特性	230
5.6.3	超临界机组的控制策略	232
5.7	循环流化床控制系统	235
5.7.1	CFB 原理和特点	235
5.7.2	CFB 的动态特性	236
5.7.3	CFB 控制的原则方案	240
	习题	243
第 6 章	控制系统的状态空间分析方法	247
6.1	用状态空间方法描述系统的动态特性	247
6.1.1	基本概念	247
6.1.2	系统特性的状态变量描述方法	248
6.1.3	物理系统状态变量的选取	250
6.1.4	传递函数和状态空间描述	254
6.1.5	状态空间表达式的变换	260
6.2	线性定常系统的运动分析	266
6.2.1	矩阵指数	267
6.2.2	状态方程的求解	270
6.2.3	线性定常系统的状态转移阵	272
6.2.4	线性定常系统的稳定性	275
6.3	系统的可控性和可观性	278
6.3.1	线性定常系统的可控性	278
6.3.2	线性定常系统的可观性	283
6.3.3	线性系统的结构分解	286
6.3.4	可控性可观性和传递函数的关系	291
6.4	线性系统的状态反馈控制	292
6.4.1	状态反馈的基本概念	292
6.4.2	状态反馈控制系统的极点配置	294
6.4.3	稳态性能的改进	297
6.5	最优控制概述	299
6.5.1	最优控制的提法	299
6.5.2	最优控制的基本关系式	301
6.5.3	线性系统的二次型最优控制	302
6.5.4	线性定常系统的无限时间最优控制	305

6.5.5	输出最优调节器	307
	习题	308
第7章	离散控制系统	312
7.1	离散控制系统的基本结构	312
7.1.1	离散控制系统的结构	312
7.1.2	连续信号的采样	312
7.1.3	连续信号的恢复	315
7.2	z 变换	317
7.2.1	z 变换的定义	317
7.2.2	z 变换的性质	318
7.2.3	z 变换的求取方法	321
7.2.4	z 反变换	324
7.3	离散系统的数学描述	326
7.3.1	差分方程	326
7.3.2	脉冲传递函数	326
7.3.3	离散系统的脉冲响应	327
7.3.4	离散系统的方框图表示	327
7.3.5	利用方框图求脉冲传递函数或输出 z 变换	329
7.4	离散系统的稳定性	332
7.4.1	脉冲传递函数极点与系统稳定性	332
7.4.2	代数准则	334
7.4.3	频率准则	336
7.4.4	采样时间 T 对系统稳定性的影响	336
7.5	广义 z 变换及其应用	339
7.5.1	广义 z 变换	339
7.5.2	含有纯迟延的控制系统的分析	341
7.5.3	连续时间环节在非采样时刻的输出	342
7.6	数字控制器的设计	343
7.6.1	离散控制系统设计的一般方法	343
7.6.2	最少拍控制系统	345
7.6.3	无波纹的最少拍控制系统	351
7.6.4	以最少拍系统为基础的最小方差控制	354
7.7	模拟调节器的数字模拟	355

7.7.1	理想 PID 调节规律的实现	355
7.7.2	离散 PID 调节系统的试验整定	357
7.7.3	PID 控制算法的发展	359
7.7.4	PID 调节规律的脉冲传递函数	362
7.8	含有纯滞后对象的控制系统	363
7.8.1	Dahlin 算法	363
7.8.2	振铃现象及其消除	365
7.9	$D(z)$ 在数字计算机上的实现	368
7.9.1	直接程序算法	368
7.9.2	串联程序算法	369
7.9.3	并联程序算法	370
	习题	371
第 8 章	先进过程控制系统简介	374
8.1	预测控制	374
8.1.1	预测控制的基本原理	375
8.1.2	模型算法预测控制	376
8.1.3	动态矩阵控制	380
8.1.4	广义预测控制	384
8.2	自适应控制	389
8.2.1	模型参考自适应控制	389
8.2.2	自校正控制	393
8.2.3	PID 参数的自整定	399
8.3	智能控制概述	401
8.3.1	专家控制系统与专家控制器	402
8.3.2	模糊控制	405
8.3.3	神经网络控制	411
	习题	418
	参考文献	420

热工过程自动控制概述

在生产过程和科学实验中,自动控制起着越来越重要的作用。它通常包括如下两方面的内容。

(1) 自动调节。为了保证产品的数量和质量以及设备的安全经济运行,必须要求生产过程在预期的工况下进行。但是,由于不可避免的各种干扰因素的存在,使得运行工况发生偏离。自动调节系统的任务就是在干扰发生时,能避免或减小这种偏离,使生产过程维持在希望的状态。

(2) 顺序控制。它通常是在生产过程的启动或停止时,按照预先拟定的条件和程序,完成多个设备的启停操作。另外,在事故发生时,也自动采取保护措施,按顺序启动或停止相应的设备。

本书仅讨论自动调节的理论和方法。由于自动调节一直伴随着生产过程进行,对于生产过程具有特别重要的意义。现代化的生产系统如果没有自动调节系统的配合,将根本无法运行。同许多文献一样,本书也将自动调节称为自动控制,不再对二者加以区别。

1.1 自动控制系统的的基本结构

在工业生产中,有许多参数需要维持常数或按人们希望的规律变化,从而提出了控制的要求。下面通过两个例子说明自动控制系统的基本组成。

例 1-1 加热器温度控制。

如图 1-1 所示。加热器通过电加热将进入其中的冷水(流量为 W , 温度为 t_1)加热成热水(流量为 W , 温度为 t_2)提供给用户,根据用户的需求,热水的温度 t_2 需维持某一常数,但是由于干扰的存在(例如水流量 W 、冷水温度 t_1 的变化以及电源电压的波动等), t_2 会偏离希望的数值,于是就产生了控制的要求。

为了实现热水温度的控制,首先要对 t_2 进行测量,在图 1-1 中,用温度传感器测量温度 t_2 。通常温度传感器输出的信号很小,需要用相应的变送器将其放大,这样图 1-1 中温度变送器的输出 I_2 就代表实际温度 t_2 。

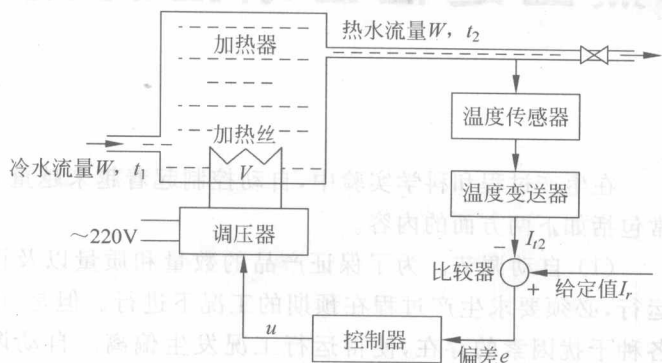


图 1-1 加热器温度控制系统

为了考察 t_2 是否满足要求,使 I_{t2} 通过一个比较器和从外部加入的给定值 I_r 进行比较(作减法), I_r 反映了对 t_2 的期望值,于是比较器的输出为

$$e = I_r - I_{t2}$$

式中, e 称为偏差信号。当反映实际温度的 I_{t2} 和代表期望温度的 I_r 相等时, $e=0$, 即偏差为零, 不需要进行调节。反之, 如果 $I_r \neq I_{t2}$, 则偏差 e 将不为零, 需要进行调节。调节的方法是通过调压器改变加热丝的电压 V , 若 $I_r < I_{t2}$, 说明实际温度高于期望温度, 需减小 V ; 反之, 若 $I_r > I_{t2}$, 说明实际温度低于期望温度, 需增大 V 。

偏差 e 和电压 V 的关系是由图 1-1 中的控制器(或称调节器)决定的。控制器接收偏差信号 e , 输出决定加热电压 V 的信号 u 。 u 和偏差 e 的关系决定了控制系统的调节规律, 即当偏差发生后, 按照适当的规律改变加热电压 V , 以尽快地、平稳地消除偏差。

由于调节器的输出 u 通常为弱电信号, 不能直接控制加热电压, 因此用图 1-1 中的调压器实现 u 到 V 的转换。

例 1-2 锅炉汽包水位控制。

汽包是锅炉的一个重要部件, 如图 1-2 所示。冷水通过省煤器进入汽包, 在汽包中加热成饱和状态, 从汽包流出的饱和蒸汽经过热器加热成过热蒸汽后, 进入汽轮机做功。在锅炉运行过程中, 汽包水位是一个很重要的参数, 必须严格维持在固定的范围, 过高过低都会引起严重事故, 因此汽包水位控制系统是一切汽包锅炉的一个重要控制系统。

为了实现汽包水位的自动控制, 用水位测量设备实时测量实际水位 H , 水位测量设备的输出 I_H 通过比较器与给定值 I_r 进行比较, 产生偏差信号 e 。当偏差不为零时, 借助于给水管道上的调节阀改变进入汽包的给水流量 W , 达到使水位恢复到给定值的目的。由于调节器的输出信号 u 无法直接驱动调节阀, 在控制系统中, 设置一电动执行器, 它对 u 进行功率放大, 带动调节阀的开大或关小。

从上面的两个例子可以看出, 要构建一个自动控制系统, 需有如下几种设备。

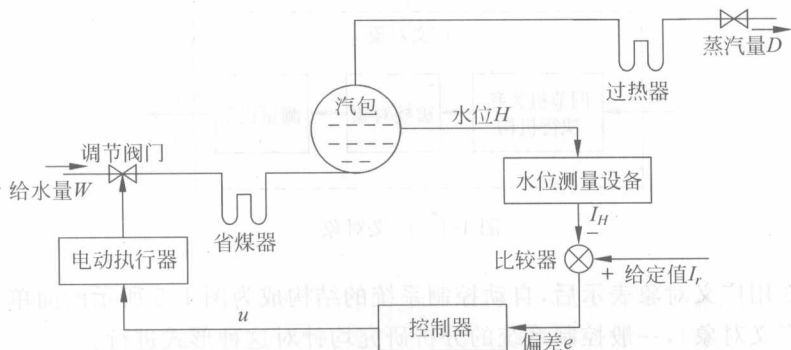


图 1-2 锅炉汽包水位控制系统

(1) 参数测量设备：它用来实时监测被控制的参数(如例 1-1 中的热水温度和例 1-2 中的汽包水位)，这是实现该参数控制的前提。

(2) 比较和控制设备：它将实际测得的被控制参数和期望值进行比较，产生偏差信号，送往控制器，由控制器根据偏差的情况决定如何进行控制。

(3) 调节机关和执行机构：当出现偏差时，需要通过调节机关(如例 1-1 中的调压器和例 1-2 中的调节阀)来调节系统中的某一个量(如例 1-1 中的加热电压和例 1-2 中的给水流量)，如果调节器的输出无法直接驱动调节机关，还需要借助于适当的执行机构来实现(如例 1-2 中的电动执行器)。

实际上，自动控制是在手动控制的基础上发展起来的。设想一个操作员来控制某一参数的情况，他首先要用眼睛观察这个参数的大小，然后利用大脑将观察到的参数与期望值进行比较，并根据偏差的大小、方向、变化速度以及他积累的经验决定如何进行实际控制操作，最后通过手来执行。所以，自动控制系统中的参数测量设备、比较和控制设备以及调节执行机构分别实现手动控制中人的眼、脑和手的功能。

因此，对于任何一个自动控制系统，尽管被控制的物理对象完全不同，但控制系统却有大致相同的结构，如方框图 1-3 所示。

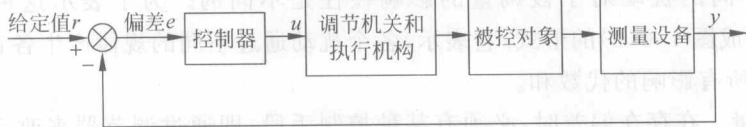


图 1-3 自动控制系统的基本结构

因为参数测量设备、调节机关和执行机构一旦确定就不再改变，故可以将它们视为被控对象的一部分，与原对象一起，称为广义对象，如图 1-4 所示。