



教育部高职高专规划教材
Jiaoyubu Gaozhi Gaozhuan Guihua Jiaocai

自动控制原理与系统

俞眉芳 主编

高等教育出版社

HIGHER EDUCATION PRESS



教育部高职高专规划教材

自动控制原理与系统

俞眉芳 主编

高等教育出版社

内容提要

本书从工程技术应用角度出发,将经典线性控制理论中最基本、最重要的内容与实际生产过程中应用最广泛、最常用的典型自动控制系统相结合编写。

全书主要包括:自动控制的基本知识、控制系统的数学模型、被控对象的动态特性、控制系统的时域分析、频域分析、简单控制系统与复杂控制系统,共七章。取材上注意:基本、重要、必需、实用。编写时力求循序渐进、深入浅出、通俗易懂、便于自学。理论部分着重讲清基本概念、原理、思路和方法,注意总结、归纳对自控实践具有指导意义、应用价值的结论和规律;系统部分着重讲述理论部分未涉及、而工程应用中必须考虑的一些问题,并注意应用理论部分的一些方法或结论分析其特点、优缺点和应用场合等。为帮助读者抓住重点,各章都有小结与要求,并配有一定量的例题、习题与思考题。书后附有各章部分习题的参考答案。

本书适合于高职、高专和成人高校(包括电大、职大)电气信息类专业学生使用,也适用于一般工科高等院校非自控各相关专业学生,作为少学时自动控制教材;并可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理与系统/俞眉芳主编. —北京:高等教育出版社,2001.9
教育部高职高专规划教材
ISBN 7-04-009958-6

I. 自… II. 俞… III. ①自动控制理论—高等学校:技术学校—教材②自动控制系统—高等学校:技术学校—教材 IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 26175 号

自动控制原理与系统

俞眉芳 主编

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市东城区沙滩后街 55 号

邮政编码 100009

电 话 010-64054588

传 真 010-64014048

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

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

经 销 新华书店北京发行所

印 刷 中国科学院印刷厂

开 本 787×1092 1/16

版 次 2001 年 9 月第 1 版

印 张 20.25

印 次 2001 年 9 月第 1 次印刷

字 数 480 000

定 价 17.30 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

出版说明

教材建设工作是整个高职高专教育教学工作中的重要组成部分。改革开放以来,在各级教育行政部门、学校和有关出版社的共同努力下,各地已出版了一批高职高专教育教材。但从整体上看,具有高职高专教育特色的教材极其匮乏,不少院校尚在借用本科或中专教材,教材建设仍落后于高职高专教育的发展需要。为此,1999年教育部组织制定了《高职高专教育基础课程教学基本要求》(以下简称《基本要求》)和《高职高专教育专业人才培养目标及规格》(以下简称《培养规格》),通过推荐、招标及遴选,组织了一批学术水平高、教学经验丰富、实践能力强的教师,成立了“教育部高职高专规划教材”编写队伍,并在有关出版社的积极配合下,推出一批“教育部高职高专规划教材”。

“教育部高职高专规划教材”计划出版500种,用5年左右时间完成。出版后的教材将覆盖高职高专教育的基础课程和主干专业课程。计划先用2~3年的时间,在继承原有高职、高专和成人高等学校教材建设成果的基础上,充分汲取近几年来各类学校在探索培养技术应用型专门人才方面取得的成功经验,解决好新形势下高职高专教育教材的有无问题;然后再用2~3年的时间,在《新世纪高职高专教育人才培养模式和教学内容体系改革与建设项目计划》立项研究的基础上,通过研究、改革和建设,推出一大批教育部高职高专教育教材,从而形成优化配套的高职高专教育教材体系。

“教育部高职高专规划教材”是按照《基本要求》和《培养规格》的要求,充分汲取高职、高专和成人高等学校在探索培养技术应用型专门人才方面取得的成功经验和教学成果编写而成的,适用于高等职业学校、高等专科学校、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院和民办高校使用。

教育部高等教育司

2000年4月3日

前 言

自动控制技术从 20 世纪上半叶形成,迅速发展至今,不仅已广泛应用于工程中众多的部门和领域,而且其中的很多思想、方法已渗透进医学、生物甚至社会、经济等诸多非传统工程性领域,使之成为国家、社会实现现代化的重要标志之一,并同时也使它已成为当今高科技时代各类、各层次科技工作人员必备的技术基础知识之一。

目前我国各类、各层次工科高等院校,包括近年来发展迅猛的工科高等职业、高等专科学校的非自控类专业都已普遍开设自动控制课程。但因学时有限,急需既能适应当前科技发展需要、又适用于少学时教学的少而精教材。因此遵照教育部有关这方面规划教材编写的要求,本书从工程技术应用的角度出发,把最基本、重要的经典线性控制理论与实际生产过程中最常用、典型的自动控制系统相结合起来进行编写。具体安排上,作为分析与综合控制系统的工具,将对自动控制实践具有重要指导意义的控制理论部分编写在前,有关工程应用中的典型自动控制系统内容紧随其后,有机穿插。鉴于有关“运动控制系统”的内容已规划为独立教材、另行撰写,故本书不包括这部分内容。

本书取材上注意:基本、重要、必需、实用,并有一定深度。表述时注意:循序渐进、深入浅出、通俗易懂、便于自学。对控制理论部分,着重讲清基本的概念、原理、思路和方法;注意总结、归纳出对自控实践有指导意义、应用价值的结论和规律;并配有应用的例题示范;从略冗长、严密的数学推导和证明,尽量从物理概念出发,加以论证,个别地方(加“*”号部分)为加深读者对有关重要内容的深入理解、以利于熟练掌握应用,以合适的方式加以推论,这部分内容可以根据读者的实际情况作为参考。对自动控制系统部分,以工程上应用最广泛、最重要、具有典型性的控制系统为主,着重讲述理论部分未涉及、但工程应用中必须考虑的一些问题;并注意应用理论分析中的一些方法或结论对其特点、优缺点、应用场合等加以分析。

全书共分七章。第一章自动控制的基本知识,第二章自动控制系统的数学模型,第三章被控对象的动态特性,第四章自动控制系统的时域分析,第五章自动控制系统的频域分析,第六章简单控制系统,第七章复杂控制系统。对于控制实践中极重要的系统校正问题,为节省篇幅,将反馈校正与复合校正的内容归于第四章时域分析中,而将串联校正的内容放在第五章频域分析中。为帮助读者抓住重点,每章末都有概括其主要内容的小结与要求,并附有一定量的思考题与习题,以帮助巩固、掌握有关内容,训练灵活应用、解决问题的能力。书后附有各章部分习题的参考答案。以上内容适用于一学期的教学量,约需 60 学时左右。

本书是编者在长期教学实践、科研与参加工程实践的基础上,博采、消化了国内有关兄弟院校教材的精华后编写的。全书由俞眉芳教授主编,并编写了第一章、第二章、第三章、第四章、第五章;俞眉芳与清华大学自动化系范全义副教授共同编写了第六章、第七章。

本书承清华大学自动化系徐博文教授、杨家本教授与王雄教授主审,他们在百忙中对本书进行了认真、细致的审阅,并提出了许多宝贵的修改意见,编者在此向他们表示诚挚的谢意。在编写过程中,还得到了清华大学张桂甲教授的大力帮助与支持,编者在此向他深表感谢;张宇宏、于

主要符号表

符号	名称	符号	名称
a	常系数	$A(\omega)$	幅频特性
b		C	电容, 容积系数, 调节阀流通能力
$c(t)$	被控量	C_1, C_2, \dots, C_l	动态误差系数
$c_m(t)$	被控量测量值	$C(s)$	输出量象函数
$c_i(t)$	系统单位斜坡响应	D	微分控制作用、伺服电机
$d(t)$	干扰量、脉冲函数	$D(s)$	干扰量象函数、闭环特征式
dB	分贝	DDZ	电动单元组合仪表
dec	十倍频程	D/Q	电气转换器
e_L	线圈感应电动势	D_n	n 行 n 列的主行列式
$e(t)$	误差 $[r(t) - c_m(t)]$	$E(s)$	误差象函数
e_{ss}	稳态误差	E	电源电压信号
$f(t)$	函数	F	面积
f_d	阻尼振荡的频率	$F(s)$	象函数
$h(t)$	系统单位阶跃响应	$F(j\omega)$	系统频域特性函数
h	幅值裕度	$G(s); G(j\omega)$	环节或系统传递函数; 环节或开环频率特性
i	电流	H	液位、中频段频程
j	虚轴	$H(s)$	反馈环节传递函数
k	常量系数、比例常数	I	积分控制作用
$k(t)$	系统单位脉冲响应	$I(s)$	电流象函数
m	方程或多项式的阶次	K	比例常数、放大系数、开环增益
mA	毫安	K_0	对象控制通道放大系数
n	衰减比, 方程、多项式阶次	K_{od}	对象干扰通道放大系数
O	坐标原点	K_f	静态前馈系数
p	压力、极点	K_p, K_v, K_a	位置、速度、加速度静差系数
q	动态流量	L	电感、距离
$r(t)$	给定值输入量	L_a, L_b	回路增益
s	复数域自变量	$L(\omega)$	对数幅频特性
t	时间	$M(\omega)$	闭环幅频特性
t_d	延迟时间	$M(s)$	s 的多项式
t_r	上升时间	N	线圈匝数, 工作点
t_p	峰值时间	QDZ	气动单元组合仪表
t_s	调节时间	R	电阻、阻力
$u(t)$	控制信号、电压	$R(s)$	给定输入的象函数
$u_i(t)$	干扰补偿器输出信号		
v	速度		

符号	名称
x	输入信号
y	输出信号
$1(t)$	单位阶跃函数
z	系统零点

α	角度;常系数
$\alpha(\omega)$	闭环相频特性
β	常系数
γ	开环相裕度
δ	比例度
δ_K	临界比例度
δ_s, δ'_s	4:1 衰减、10:1 衰减比例度
$\delta(t)$	单位脉冲函数
ϵ	响应速度
$\epsilon(t)$	偏差 $[c_m(t) - r(t)]$
ζ	阻尼比
θ	角度
μ	阀门开度

其它符号含义

\triangle	定义
Π	连乘
Σ	代数和
Δ	增量;误差允许范围
\mathcal{L}	拉氏变换
\mathcal{L}^{-1}	反拉氏变换
小写字母	原函数;以起始稳态或静态工作点为基准的增量或动态值
大写字母	象函数;信号或变量的起始稳态值或静态工作点值;绝对值

符号	名称
Re	实轴
S_{100}	阀阻比
T	温度、时间常数、振荡周期
T_s	响应(或飞升)时间
T_d	系统阻尼振荡响应的振荡周期
T_I	积分时间
T_D	微分时间
$U(s)$	控制量的拉氏变换
V	体积
$W(s)$	传递函数
$X(s)$	输入信号象函数
$Y(s)$	输出信号象函数
ν	系统型别
ρ	自平衡率
σ	超调量;复数实部
τ	迟延时间
τ_c, τ_0	容积迟延;纯迟延
$\Phi; \Phi(s)$	磁通量;闭环传递函数
φ	角度
$\varphi(\omega)$	开环相频特性
ψ	衰减率
ω	角频率
ω_n	无阻尼自然振荡(角)频率
ω_d	阻尼振荡(角)频率

常用下标含义

c	控制;电容;输出量、被控量
d	干扰通道;微分
e	误差
ff	前馈
g	给定
i	输入
o	输出;起始稳态;被控对象控制通道
od	被控对象干扰通道
m	测量值
r	给定值输入;前置补偿
ss	稳态
v、v	调节阀门

目 录

第一章 自动控制的基本知识	(1)
1.1 自动控制的应用与任务	(1)
1.2 自动控制系统的组成、控制流程 简图与原理方框图	(2)
1.3 控制系统的负反馈工作原理	(6)
1.4 控制系统的分类	(7)
1.5 对自动控制系统的的基本要求	(11)
小结与要求	(16)
思考题与习题	(17)
第二章 自动控制系统的数学模型	(20)
2.1 标准微分方程的列写	(21)
2.2 拉普拉斯(Laplace)变换、反变换 及其应用	(25)
2.3 传递函数与系统动态结构图	(36)
2.4 系统结构图的等效变换与信号流 图、梅逊(Mason)公式	(41)
2.5 系统的典型传递函数及自动控制 系统的典型环节	(54)
小结与要求	(61)
思考题与习题	(62)
第三章 被控对象的动态特性	(66)
3.1 被控对象的阶跃响应与动态方程	(67)
3.2 对象的特性参数及其对控制质量 的影响	(80)
3.3 时域法测试对象动态特性及确定 其传递函数	(84)
小结与要求	(90)
思考题与习题	(91)
第四章 自动控制系统的时域分析	(93)
4.1 系统输出响应组成的分析	(93)
4.2 线性系统稳定性分析	(96)
4.3 控制系统的稳态误差分析	(106)
4.4 控制系统的动态分析	(120)
4.5 控制系统的校正	(139)
小结与要求	(142)
思考题与习题	(142)
第五章 自动控制系统的频域分析	(146)
5.1 频率特性的概念与求算	(146)
5.2 典型环节的频率特性	(149)
5.3 系统开环频率特性曲线绘制及 应用	(163)
5.4 频域的稳定性判据	(173)
5.5 系统闭环、开环频率特性与时域 阶跃响应的关系	(194)
5.6 频域法分析与设计系统的串联校 正装置	(208)
小结与要求	(225)
思考题与习题	(227)
第六章 简单控制系统	(232)
6.1 概述	(232)
6.2 被控量与操作控制量的选择	(232)
6.3 信号测量与传送中注意的问题	(237)
6.4 基本控制规律对控制质量的影响 及其选择	(239)
6.5 自动调节阀选型	(258)
6.6 简单控制系统的工程整定与投运	(267)
小结与要求	(273)
思考题与习题	(274)
第七章 复杂控制系统	(276)
7.1 串级控制系统及其应用	(276)
7.2 前馈-反馈控制系统及其应用	(283)
7.3 其它常用的过程控制系统	(291)
小结与要求	(305)
思考题	(306)
附录 部分习题参考答案	(308)
参考文献	(312)

第一章

自动控制的基本知识

本章主要叙述自动控制的一些基本知识,并涉及较多常见的专业术语,以及由具体的自动控制系统抽象出系统的原理方框图。这些基本概念和方法是以后学习的基础,大家应对它们有确切的认识并逐渐熟练掌握。

1.1 自动控制的应用与任务

1.1.1 自动控制的应用

自动控制作为现代化先进技术,广泛应用于国民经济与国防工业的各部门。它能确保生产设备与人身的安全、提高产品质量、降低原材料与能源的消耗、提高劳动生产率与经济效益、减少环境污染,因此自动控制不仅是改造、更新传统工业技术的重要手段之一,更是现代化先进大工业不可或缺的重要组成部分。在一些结构复杂、大规模的现代化生产中,若不配置相应合适的自动控制系统,甚至根本无法启动与正常投运各种有关的生产设备、装置。至于在一些高温、高压、易燃、易爆、剧毒、强辐射等的危险场合,以及在现代化的军事技术中,为确保先进武器的高速度、高精度与各种战术技术的高性能指标,应用自动控制技术更是惟一可能的选择。总之,在当今高科技知识经济的时代,各行各业应用自动控制技术的完善程度已是衡量一个国家工业先进发达水平的重要标志之一。自动控制技术也已成为具有一定知识水平、从事现代化生产技术工作者的基本知识之一。

1.1.2 自动控制的任务

在生产过程中为保证技术装置、设备或生产过程本身安全、正常地运行,都必须要求:能表征这些装置、设备或生产过程工况的关键参数,应按工作或生产工艺中的具体要求,维持在一定的数值上或按预定的规律变化。然而由于实际工作或生产中,客观上总存在有各种干扰的作用,使这些关键参数偏离所要求达到的数值。自动控制的任务,就是要借助一些自动化的控制装置来操纵、控制那些设备、装置或生产过程,使之在各种干扰的作用下,表征其工况的关键参数仍能始终稳定在所要求的数值上或在其附近。例如:要锅炉安全地生产出符合质量要求的蒸汽,通常必须对锅炉的水位、输出蒸汽温度等关键参数进行自动控制。否则,由于用户用汽量的波动、进入锅炉的给水温度和流量的波动、炉内燃烧情况的变动、乃至环境温度的变化等干扰因素的影响,都将使锅炉水位、出汽温度等关键参数不能很好地稳定在符合要求的数值上,严重时甚至会造成

设备、人身的恶性安全事故。

将那些受到操纵、控制的工作主体设备、装置或生产过程称为被控对象，简称对象。如上例中的锅炉就是被控对象。

将表征被控对象工况的关键参数称为被控量。如上例中的锅炉水位、输出蒸汽温度都分别为被控量。

将工作或生产工艺中要求被控量所要达到的数值称为给定值、设定值或参考指令。

将引起被控量变化的一切因素称为干扰作用或干扰量，简称干扰。在运行或生产中，由系统外界所引入的干扰，称为外干扰；由自动控制系统内部所产生的干扰，称为内干扰。如上例中所分析的一些干扰因素都是外干扰。

运行或工作中，被控量、给定值以及干扰量都是时间的函数，分别以 $c(t)$ 、 $r(t)$ 、 $d(t)$ 表示。自动控制的任务，就是在没有人直接参与的情况下，使被控对象在各种干扰 $d(t)$ 的作用下，始终能保证被控量等于给定值或在给定值附近。以数学式子表示为：

$$c(t) \approx r(t)$$

1.2 自动控制系统的组成、控制流程简图与原理方框图

1.2.1 自动控制系统的组成

从上节的分析中可见，被控对象加自动控制装置就是自动控制系统，简称自控系统或控制系统。

下面用一个完成自动控制任务的实例来进一步分析自动控制系统的必要组成。

如图 1.2-1 所示，化工生产中，为制得某种合格的产品，必须要求把两种原料甲和乙在反应器中保持某个恒定的反应温度 t_g ℃。假设该反应是个吸热反应，则为了得到合格的产品，必须不断地在夹套中用蒸汽加热反应物，以补充反应所需的热量，将反应温度维持在所要求的恒定 t_g ℃ 值。实际上由于来料甲、乙的成分、温度、流量的波动、加热夹套长期运行结垢等引起的传热情况的变动，以及周围环境温度变化等外干扰的影响，使实际的反应温度 t ℃ 很难保持在 t_g ℃ 值上不变，因此必须对反应温度进行自动控制。本例中，反应器就是被控对象，其中反应物的反应温度 t ℃ 就是被控量 $c(t)$ ，工艺上要求保持的 t_g ℃ 就是给定值 $r(t)$ ，并且在此是一个不变的常量值。

为了控制好反应器的反应温度，控制系统需包括以下几个部分：

(1) 首先必须用一个温度计(例如：一个热电偶温度计)来测出实际的反应温度，并进一步由变送器把热电偶的信号转化为某种标准的统一信号，如：计算机控制中转化为 0、1 的数字信号；Ⅲ型电动单元组合仪表(DDZ-Ⅲ型仪表)中转化为 4~20 mA 或 1~5 V 的直流信号等。

将测出被控量实际数值，并进一步转化为某种便于传送、应用、符合规范、标准统一信号的仪器装置称为检测变送装置或传感器。如：本例中的热电偶温度计及其变送器就是检测变送装置，其作用为实时测出被控量的实际数值，并送出一个相应规范的标准统一信号作为被控量的测量值 $c_m(t)$ ，这相当于人工控制中用“眼”感知被控量的测量值。

(2) 必须要一个控制装置,如:计算机或模拟量仪表中的调节器等。其作用为接受检测变送装置送来的被控量的测量信号 $c_m(t)$,并与工艺上要求的给定值信号 $r(t)$ 进行比较,再根据比较的结果——误差信号的极性与大小,按照一定的控制规律或算法,发出相应的控制信号 $u(t)$ 。这相当于人工控制中,大脑在比较、决策、并发出控制命令。可见,控制装置是自动控制系统中最关键、核心的组成部分。

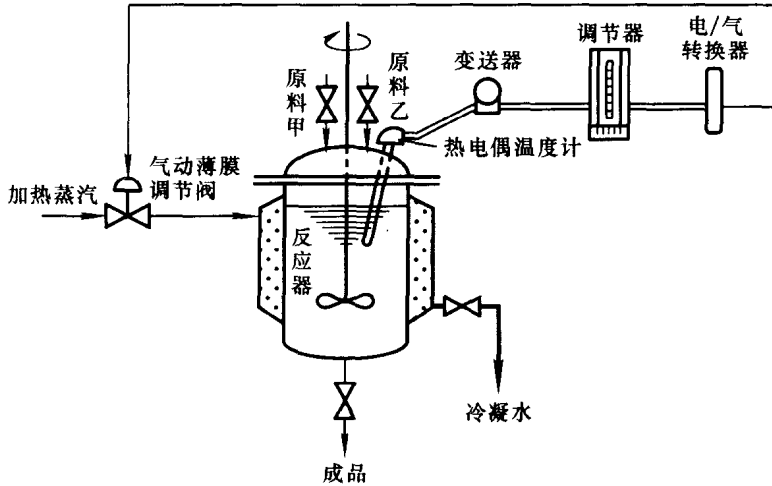


图 1.2-1 反应器反应温度自动控制系统示意图

(3) 执行调节机构(或执行器)。它接受控制装置输出的控制信号 $u(t)$,并将其转变为一个能对被控对象实际施加的控制作用——如:调节阀开度 $\mu(t)$ 的变化、加热电源电压的变化等。这相当于人工控制中的“手”,依据大脑发出的控制命令,来改变调节阀的开度,或加热电源调压器的输出电压等。本例中的气动薄膜调节阀就是执行调节机构,但因它只能接受 0.02~0.1 MPa 的标准气信号,而 DDZ-III 型调节器输出的控制信号为 4~20 mA 的直流电流信号,因此在调节器后需加一个电/气(D/Q)转换器,其作用是把 4~20 mA 的直流电流信号转化为 0.02~0.1 MPa 的气信号,然后才使它被气动执行调节机构所接受,并最终改变加热蒸汽进口管线上的调节阀开度 $\mu(t)$,对反应器施加控制作用。需要指出的是,如果调节器输出的控制信号能直接为执行调节机构所接受,则就不必用电/气(D/Q)转换器或气/电(Q/D)转换器。如:本例中若执行调节机构是电动的,并能直接接受 DDZ-III 型仪表的标准电信号,则就不必用 D/Q 转换器了。

(4) 被控对象。正是它的某个关键参数作为被控量需要控制,才配置了该自动控制系统。因此,被控对象成为自动控制系统的重要组成部分。本例中的反应器就是被控对象。

可见,一个自动控制系统按照其各组成部分在系统中所起的作用看,必然由被控对象、检测变送装置、控制装置与执行调节机构(或执行器)四大部分所组成。在工业生产的过程控制系统中,除被控对象千差万别外,其它部分几乎都有通用、定型的仪表、装置等成品可供选用。

1.2.2 自动控制系统的控制流程简图与原理方框图

图 1.2-1 所示的自控系统图比较直观,各组成部分及其间的联系也一目了然,但不够规范、绘制也较麻烦。

按照用途的不同,表示一个自控系统概貌的最常用的简图有以下两类:

一、自动控制系统控制流程图

这是由控制专业工程师所绘制的反映自动控制系统设计方案的总体概貌图,并据此再作进一步的详细设计与施工设计。它主要应用于工程中,如在生产车间、过程控制现场等处使用。图 1.2-2 就是本节例子的一个简化了的反应器反应温度控制流程图。这种图由工艺流程图上加画一些国内外控制专业所统一规定的图例、文字符号所组成。图中:

(1) 用“·”示意被控量的测量点,本例被控量反应温度在反应器内的反应物中。

(2) TC 中的圆圈表示了广义上的仪表(即可以是不止一种类型的仪表),称之为仪表圈。

仪表圈内的第一个文字是英文单词首字母,表示测点处的被控量是何种参数。本例中“T”表示温度。

生产过程控制中常用的几种被控量符号见表 1.2-1。

表 1.2-1 表示常用被控量参数的文字符号

仪表圈内第一个文字	T	P	F	L	A
被控量参数具体名称	Temperature 温度	Pressure 压力	Flow 流量	Level 液面	Analysis 成分(分析)

仪表圈内的第二个文字,也以英文单词首字母表示该广义仪表所具有的功能。生产过程控制中常用的仪表功能符号如表 1.2-2。

表 1.2-2 表示常用过程控制仪表功能的文字符号

仪表圈内第二个文字	C	R	A	I
仪表功能	Control 控制	Record 记录	Alarm 报警	Indicate 显示

本例中要控制反应温度,当然要用有控制功能的仪表——调节器。若同时还要对被控量进行记录、报警,则应为 TCRA,表示选用了同时具有控制、记录、报警功能的仪表(可以由不止一类仪表实现这些功能)。一般显示功能符号“I”不必写出,是默认的。除非只选用了显示或显示加报警功能的仪表,则分别用 TI 和 TIA 表示。

(3) 用“—⊗—”表示生产过程控制中最常用的一种执行调节机构——气动薄膜调节阀。

(4) 用细实线表示连接各部分的信号线。

因此,图 1.2-2 表示了对反应器内的反应温度要加以控制,执行调节机构设置在加热蒸汽

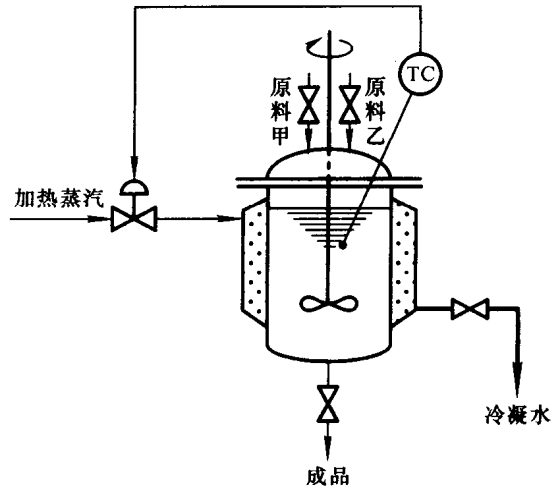


图 1.2-2 反应器反应温度自动控制系统(简化)控制流程图

的进口管线上、选用了气动薄膜调节阀。至于广义仪表中所包含的热电偶温度计、变送器、调节器和 D/Q 转换器等的具体型号、详细情况,若要了解,可查阅有关自动控制设计的其它详细设计资料,此处不再赘述。

二、自动控制系统原理方框图

为了在理论上对一个自动控制系统的工作原理及其控制过程中的一些共性规律进行分析研究,在控制理论中常用自动控制系统原理方框图,简称系统方框图或系统结构图。这种图把控制方案已定的自动控制系统中的各个组成部分都用一个方框表示,称之为“环节”,并且着重注意分析各环节之间信号的相互作用和传递关系,而不再考虑每个环节的具体结构及其动作原理等。图 1.2-3 就是所举例子的自动控制系统原理方框图,图中把各组成部分在例子中的具体对应实物名称都标注在每个方框外的括号内。方框间带箭头的直线表示了各环节间信号的相互作用与传递方向。

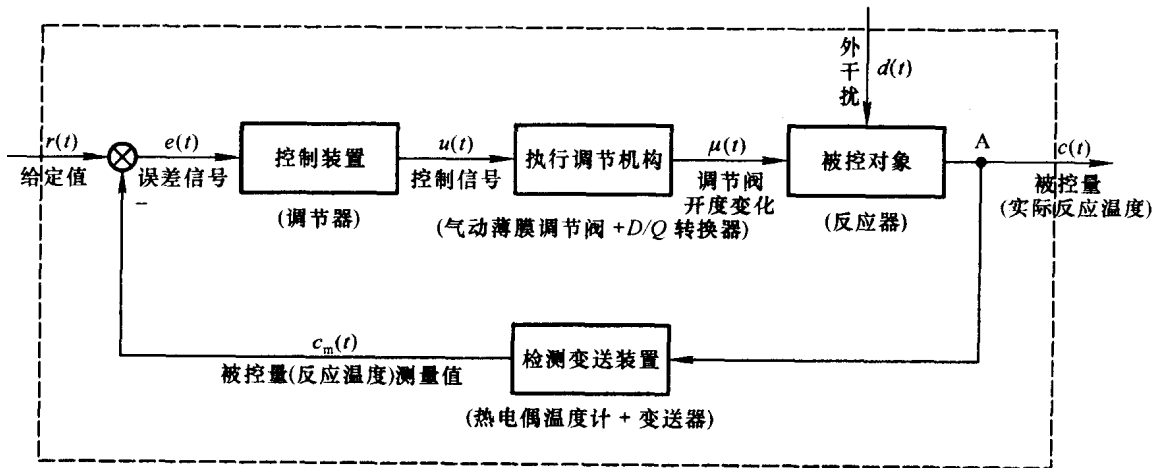


图 1.2-3 反应器反应温度自动控制系统原理方框图

对于这类图,必须明确以下概念:

(1) 图中每条朝向方框的箭头线,称为该环节的输入量(或输入信号),它是引起该环节运动的原因;而背向方框的箭头线,称为该环节的输出量(或输出信号),它是该环节在输入量作用下,所引起的运动结果。对每个环节而言,输入量与输出量一定而且只能是前因后果的关系,即信号在每个环节中只能由前向后地单向传递。

在整个系统中,前一个环节的输出量是后一个环节的输入量,一环扣一环。

(2) 被控对象的输出量(即实际被控量) $c(t)$,通过检测变送装置变成被控量的测量值 $c_m(t)$ 后,要送到控制装置中与给定值 $r(t)$ 进行比较。在自动控制系统理论分析中,规定了误差信号 $e(t)$ 的定义: $e(t) \triangleq r(t) - c_m(t)$ 。为了突出控制装置的这种比较作用,图中用“ \otimes ”符号表示,且画在控制装置环节的外面(尽管在计算机控制中,比较功能是由计算机内的控制程序所完成的,而在模拟量仪表中,实际上比较机构本身就是控制装置的一部分)。在 $c_m(t)$ 信号线旁一定要加“-”号,表示比较时测量信号 $c_m(t)$ 是“负”的或“减”的。通常把图中的“ \otimes ”称为(信号的)比较点或综合点、汇交点。而图中的 $r(t)$ 信号在比较时为“正”信号,则可在其信号线旁不

画任何符号,默认为“+”信号。

图中,被控量(即工程上工艺人员所要密切关注、研究的关键参数) $c(t)$ 一方面作为被控对象环节的输出量往外输出,同时又被送入检测变送装置,供后面自动控制用,这里用符号“ $\xrightarrow{A} c(t)$ ”表示把一个信号(此处为 $c(t)$),大小不变地同时送到不同的地方,并把A点称为信号的分叉点或引出点。

(3) 整个自动控制系统也可看成是一个大的复杂环节,如图1.2-3中所画的大虚框。可见对于这个环节(即自动控制系统),其输入量为给定值 $r(t)$ 与干扰量 $d(t)$,输出量为被控量 $c(t)$ 。

(4) 自动控制系统原理方框图的画法不是惟一的。这是因为,按照研究目的不同、使用方便与否,可以对环节任意划分。当然这时各环节间的相互作用联系及信号的传递关系必须符合实际情况。例如:实际生产中,考虑到检测变送装置及执行调节机构常与被控对象密不可分,通常就装在对象的设备与附近管线上,而且工程中被控量的实际值,只能通过经标定、校验后的检测变送装置所送出的实测值来得知,所以就常把执行调节机构、被控对象和检测变送装置综合在一起,画成一个环节,叫“广义被控对象”。如图1.2-4所示,这时自动控制系统由控制装置加广义被控对象两部分组成,系统的输出量变成了被控量的测量值 $c_m(t)$ 。

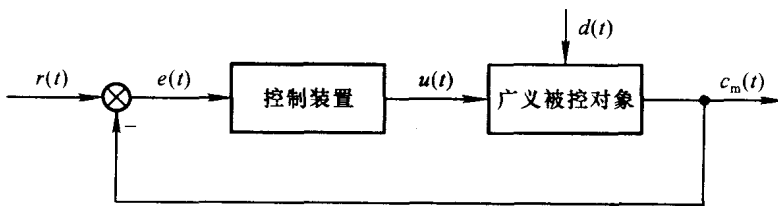


图 1.2-4 自动控制系统原理方框图的另一种画法

综上所述,系统原理方框图上的每个环节不一定与具体的装置一一对应。它可以是一个完整的装置,也可以是几个装置的组合,或者是某个装置中的一部分等等,因此,完全可按实际需要及研究目的来加以划分。

1.3 控制系统的负反馈工作原理

(1) 一个自动控制系统,如图1.2-3所示,在实际投运以前,首先要求建立初始稳态。即先用“手动”操作的方式,使调节阀开度在某个初始位置,这时工艺上进出系统的物料量或能量处于某种动态平衡,系统被控量的实测值 $c_m(t)$ 也正好等于所要求的给定值 $r(t)$ (这时系统误差 $e(t)$ 必为零),然后才能将自控系统由“手动”操作切换到“自动”控制,在工程上称这一步骤为无扰动切换。因这时调节阀的初始位置不会发生任何变动,系统所建的初始稳态也未被破坏。

(2) 在系统处于“自动”控制的运行方式后,若因某种干扰的作用,使被控量偏离了给定值。如:上节所举例子中,因加热蒸汽压力波动升高了,在其它所有条件都不变的情况下,会使在同样的调节阀开度下,进入反应器夹套的加热蒸汽量更多,导致实际的反应温度 $c(t)$ 升高,并使检测变送后的 $c_m(t)$ 值亦升高,偏离给定值 $r(t)$ 。这样在控制装置的比较作用下,将产生误差信号 $e(t)$,在所举例子中 $e(t)$ 将为“负”。通过控制装置、执行调节机构的作用,对被控对象施加正确

的控制作用,例中应关小加热蒸汽调节阀的开度。结果使偏离了给定值的被控量重新向给定值靠近,直至最终被控量回到给定值。在这个工作过程中,把系统的输出量送回系统的输入端,并最终对输出量本身又能产生影响的过程叫反馈。在这里,反馈对输出量的最终影响总是与干扰量对被控量的影响方向相反,并使系统的误差 $e(t)$ 变得越来越小的,就称为负反馈。反之,称为正反馈。

显然,一个正确的自控系统,总是要求实现负反馈控制,因为只有这样才能最终使被控量回到给定值,而正反馈是绝不允许的,它只能使被控量越来越偏离给定值,甚至造成恶性事故。

(3) 从以上分析可见,负反馈控制系统的优点是:①通过检测变送装置能不断对控制的效果——被控量的变化情况,进行实时检测,并不断调整所施加的正确的控制作用,直到最终误差 $e(t)$ 为零,只有被控量回到了给定值,控制作用才停止。②负反馈控制系统对一切的外界或系统内部的干扰作用都有抑制、克服作用。这种负反馈控制作用的缺点是控制不及时,因为它必须在被控量偏离了给定值、产生了误差后,才能施加影响、起作用,并最终又使系统误差不断变小,直至为零。因此,自动控制系统的负反馈工作原理可概括为:基于误差,又消除误差。

1.4 控制系统的分类

对系统的分类方法很多,常用的有以下几种:

一、按系统的结构分类

1. 开环控制 其特点为从系统的输入量沿着箭头方向到系统的输出量,信号只能单向传递,称该信号通道为前向通道。这时系统的结构框图上只有信号的前向通道,没有反馈通道。按照系统所测输入量的不同,它又可分为:

(1) 按给定值操纵的开环控制 如图 1.4-1(1)所示,系统根据给定值的大小去直接控制被控对象。由于无反馈,不能对控制的效果随时进行检查和调整,其控制精度不高,尤其对外界干扰及系统中某些环节的特性参数发生变化直接影响被控量时,它却无能为力。因此它只能用在控制精度要求不高,或系统各环节特性相当稳定、干扰因素很少的场合。该系统的优点是结构简单。日常生活中的洗衣机、交通红绿灯等的控制系统都属于按给定值操纵的开环控制的例子。

(2) 按干扰补偿操纵的开环控制(过程控制中也叫“前馈控制”) 如图 1.4-1(2)所示,系统根据所测得干扰量的大小,经干扰补偿器(或叫前馈调节器)去控制被控量。这种系统与图 1.4-1(1)系统同样无反馈,其控制精度一般也不高。但若所测到的干扰量是工艺上某种对被控量影响极大,出现频繁且幅值又大的主干扰,则在干扰补偿器设计合理的情况下,有可能在主干扰还没来得及对被控量产生大的影响之前,就能及时把它抑制住、克服掉,则控制效果会相当好。这种控制方法在工程上主要用来克服主干扰。但如果干扰量无法测量,以及对那些未测量和设置干扰补偿器的干扰因素,则该系统也是无能为力的。因干扰补偿器的设计与被控对象的具体特性有关,是一种专用的控制装置。

2. 闭环控制(或负反馈控制) 如图 1.2-3 所示,系统不仅有从输入量到输出量的前向通道,还有反馈通道,结构框图中有明显的闭合回路(或闭环),其特点、优缺点见 1.3 节,此处不再赘述。需要指出的是,工程上几乎 85% 以上的自控系统属于这种闭环控制系统。它是一种最基本又最重要的典型控制方案。即使一些较为复杂的控制系统也往往以它为基础,再加以改进、完善的。

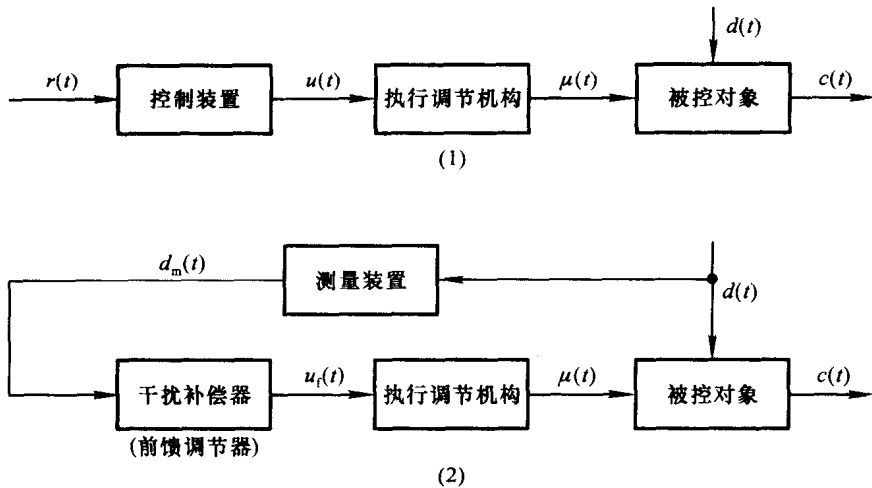


图 1.4-1 开环控制
(1) 按给定值操纵; (2) 按干扰补偿操纵

3. 复合控制 这是集开环控制与闭环控制两者优点于一身的一种较完善的控制系统, 具体又分两种:

(1) 按干扰补偿的复合控制 见图 1.4-2, 它是在闭环控制的基础上又加了对主干扰补偿的开环控制, 在过程控制中又叫前馈-反馈控制系统。它利用快速的前馈控制来及时抑制主干扰的影响, 又利用反馈控制克服工艺上的其它各种干扰影响。这种控制能大大提高系统的控制精度, 是过程控制中应用很多的复杂控制方案之一。

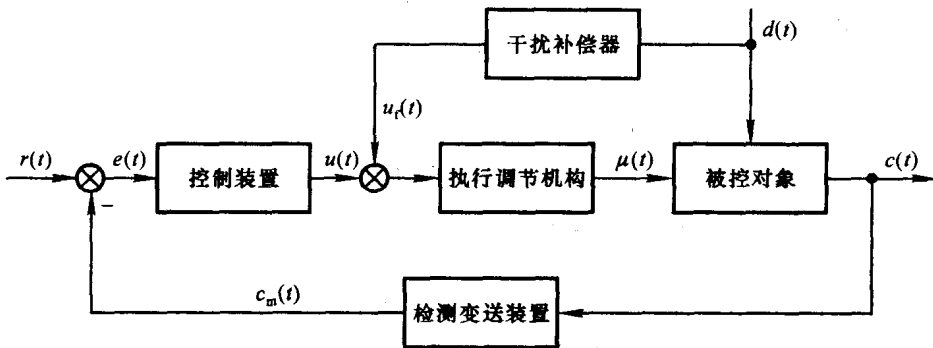


图 1.4-2 按干扰补偿的复合控制(前馈-反馈控制)

(2) 按输入给定补偿的复合控制 见图 1.4-3, 它是在闭环控制的基础上, 通过给定值的补偿装置(一般是具有微分特性的), 为系统多提供一个给定信号的微分作用信号——一种与给定值的变化速度成正比的信号, 因此能加速被控量跟踪给定值的变化, 是随动控制系统中提高跟踪速度和精度的很常用的一种控制方案。

二、按系统给定值 $r(t)$ 变化的规律分类

1. 定值控制 指系统中 $r(t) \equiv \text{常量}$ 。这种系统主要应用于过程控制中, 其主要的任务是

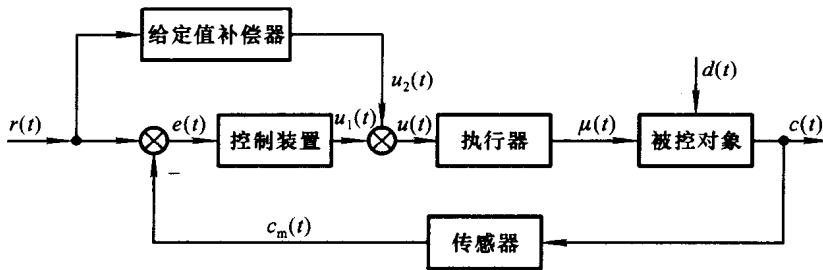


图 1.4-3 按输入给定补偿的复合控制

克服各种干扰因素的不利影响,确保被控量等于恒定的给定值。如前面所举的反应器反应温度控制系统的例子就是定值控制。

2. 程序控制 系统的给定值是一个变化规律预知的时间函数。例如:制造工业中,常要求对工件进行一定的热处理。图 1.4-4 就是某工件进行热处理时所要求的温度给定值变化规律。其它如仿型铣床,数控机床的刀具位置控制系统都属于程序控制系统。

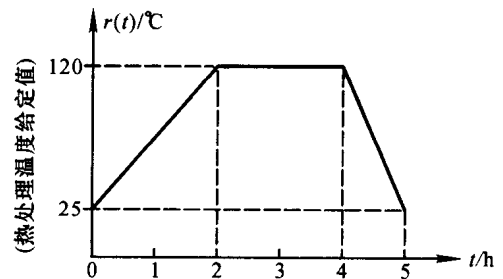


图 1.4-4 温度给定值变化规律

3. 随动(或跟踪)控制 系统的给定值是一个不能预知的随机变量。这种系统的主要任务是克服被控对象的惯性,以确保被控量能快速准确地跟随输入的随机变化的给定值变化。主要应用于运动(或拖动)控制系统中。

图 1.4-5 就是一个位置随动系统的例子。该系统的任务:要求工作机械的转角 θ_c 能自动跟踪随机变化的给定手柄的转角 θ_r 。

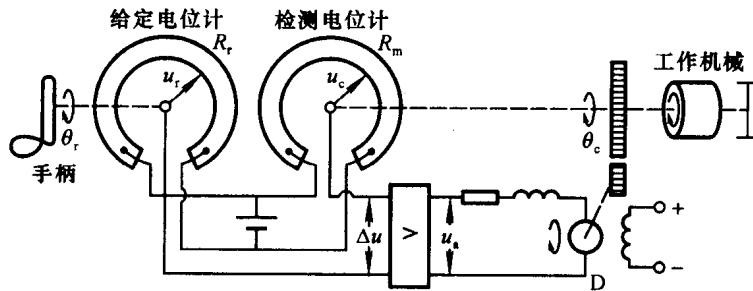


图 1.4-5 位置随动系统的原理示意图

在本例中:被控对象——工作机械;

被控量——工作机械的转角 θ_c ;

给定值——给定手柄的转角 θ_r (随机变化量)

工作原理如图 1.4-5 所示。经检测电位计 R_m , 把被控量 θ_c 测出, 并转换成相应的测量电压 u_c ; 经给定电位计 R_r , 把给定值 θ_r 转换为相应的给定电压 u_r 。这里, R_m 与 R_r 在电器的结构