



化工自动化及仪表

慎大刚 余国贞 编

浙江大学出版社

0637/27

内 容 简 介

《化工自动化及仪表》一书共分4章。具体内容包括：自动控制系统的组成、工作原理、动态特性及传递函数与方块图变换的基本知识；化工过程控制中常用的检测、变送和显示仪表及控制仪表的组成、工作原理与它们的应用技术，以及数字式显示仪表和单回路可编程程序调节器等新型仪表的构成、工作原理、控制和运算功能；单回路控制系统的设计、投运和整定问题，并结合典型化工操作单元控制方案介绍了串级、均匀、比值、前馈等控制系统的有关概念；还简要介绍了计算机控制等其它控制系统。

本书是高等院校化工工艺类专业学生学习《化工自动化及仪表》课的教材，也可供轻工、冶金、纺织等其它相近专业学生使用。并可作为从事上述专业的工程技术人员的参考书。

化工自动化及仪表

钱大刚 余国贞 编

责任编辑 平津莲

浙江大学出版社出版
浙江良渚印刷厂印刷
浙江省新华书店发行

*

开本850×1168 1/32 印张11.5 字数289千字

1991年7月第1版 1991年7月第1次印刷

印数：0001—2000

ISBN 7-308-00693-X

TP·049 定价：3.75元

前 言

化学工业是我国国民经济的重要组成部分之一，它的发展不仅直接关系到国计民生，而且与国民经济的其它部门都有着密切的联系，它是农业、国防、轻纺和交通运输等工业部门发展中不可缺少基础工业之一。由于现代化工生产向复杂化、大型化、高速化和自动化发展，而且往往又具有高温、高压、易燃、易爆及有毒的特点，为了保证生产稳定、可靠、安全地进行，相应地对化工过程的参数检测和自动控制提出了更严、更高的要求。通常一套完整的化工生产技术应包括检测和自动控制方案在内，自动化水平的高低同样也反映了工艺过程所应达到的技术水平。例如，近年我国引进的、用轻柴油裂解，年产三十万吨乙烯装置，其生产特点是：流程复杂、规模大、压力较高、易燃、易爆，温控范围宽（有 1035°C 的高温，又有一 169°C 的低温）。由于工艺较先进，生产控制要求较高，故其自动化水平也很高。据统计，全流程共有检测点4000多个，其中自动控制回路约有470多套。在这些控制系统中，绝大多数是单参数单回路控制系统，也有串级、比值、前馈、分程和自动选择性控制等复杂系统。全套装置所配用的仪表约6000多台件，包括对温度、压力、流量、液位、成分分析等过程参数实现自动检测、变送和调节等各种工业自动化仪表。类似的乙烯生产装置，在国外还采用了更为先进的控制技术和工具，实现了电子计算机监督和控制生产。

化工生产过程实现自动化，不仅能够正确地把生产过程控制在最佳的工况下运行，从而减少了原料和动力的消耗，降低生产成本，实现优质高产。而且能够保证生产安全，防止事故发生和扩大，达到延长设备使用寿命，提高设备利用率的目的。同时还

能减轻劳动强度，改善劳动条件，节省劳动力。更有意义的是，生产过程自动化的实现，能根本改变劳动方式，提高劳动者文化技术水平，为逐步缩小体力劳动和脑力劳动之间的差别创造了条件。

化工生产过程自动化是一门综合性的技术科学，它与化工工艺和设备类专业一样，都是化学工程技术的组成部分之一，相互有着密切的关系。学习、研究和掌握它们，对于提高化工生产效率和经济效益，加速新技术的开发，提高科研、设计和生产技术水平起着十分重要作用。一个控制工程技术人员，应该通晓工艺、只有在了解工艺的基础上，才能搞好过程控制。同样，对工艺工程技术人员来说，也必须具有必要的过程检测和控制方面的知识，使自己在进行新的工艺技术开发、研究、设计和生产中更好地处理和解决有关技术问题，能与控制工程技术人员配合默契，共同确定满足工艺要求的合理控制方案；能为自控设计正确提供有关工艺条件和参数值；能在工艺开停车和事故处理过程中互相协作，保证了生产过程顺利安全地运行。

“化工自动化及仪表”课则是为大专院校化工工艺类专业学生学习化工过程检测与自动控制的基本原理、应用技术而设置的一门必修技术基础课。根据形势发展对本课程提出的新要求，在近几年教学实践和改革的基础上编写的这本教材。其内容包括三大部分，即过程控制的基本原理、自动检测和控制装置及化工过程控制系统，分为4章编排。第1章是自动控制概论，主要介绍自动控制有关基本知识，如控制系统的组成、作用；系统的动态与静态；被控对象的特性及其影响；控制作用规律及其参数对过渡过程的影响等。为学习检测、控制仪表及自动化系统知识奠定基础。第2章化工过程控制装置及第3章化工过程参数的测量和变送则是从应用角度出发，扼要介绍实现化工过程检测和控制常用自动化仪表的工作原理、主要特点、适用场合及正确使用要点。

第4章化工过程控制系统包括单回路控制系统的设计、投运和整定。即介绍控制方案的确定依据；测量滞后和信号脉动克服措施；调节器选型原则及单回路控制系统的投运和调节器参数的工程整定方法；化工过程中常见的控制系统，将根据生产过程的特点和控制的难易程度按照流量、压力、液位、温度、成分等化工参数控制的顺序，结合有关控制方案引出分程、串级、比值、前馈等改善控制质量的多回路控制系统概念，简要介绍典型化工操作单元如流体输送机械、换热器、加热炉、精馏塔及反应器的有关控制方案。还将简单介绍化工过程中控制要求或实现方式较为特殊的其它控制系统，如自动选择控制系统、按计算指标控制系统，及计算机控制系统的基本概念，使工艺类专业学生了解化工自动化的发展，适当扩大这方面的知识面。该教材具有三个特点：

(1) 以化工过程自动控制系统为主体，以检测和控制仪表为工具。不仅仪表和系统两者自身密切联系，相互依存，安排紧凑，而且又密切围绕为化工工艺服务。

(2) 在内容选取上仪表和系统并重，突出常用和基本的仪表及控制系统，力求少而精。同时也选编了一些较新、较特殊的仪表和控制系统（记有*号章节），可供自学，以扩大学生视野，开阔思路。

(3) 根据化工工艺专业的特点，增添了动态特性的分析和传递函数、方块图变换的知识，并尽量结合化工实例，意在加强动态概念和学以致用。

本书由慎大刚（第1、2、4章）和余国贞（第3章）编写。在编写过程中得到周春晖教授、黄桢地副教授的热心指导和帮助，在此表示衷心感谢。

由于编者水平所限，书中如有错误或不妥之处，恳请批评指正，以便进一步修改完善。

目 录

1 自动控制概论

1-1 自动控制系统概述	1
1-1-1 控制系统的组成及工作原理	3
1-1-2 系统的静态与动态	6
1-1-3 过渡过程的品质指标	7
1-2 对象特性及其对过渡过程的影响	9
1-2-1 被控对象的阶跃响应特性	10
1-2-2 被控对象特性的数学描述	12
1-2-3 广义对象的特性参数及其对过渡过程的影响	19
1-3 调节器特性及其对过渡过程的影响	22
1-3-1 位式控制	22
1-3-2 比例 (P) 控制	24
1-3-3 比例积分 (PI) 控制	27
1-3-4 比例微分 (PD) 控制	31
1-3-5 比例积分微分 (PID) 控制	34
1-4 传递函数与方块图变换	36
1-4-1 拉氏变换与传递函数	36
1-4-2 基本环节的组合及方块图变换	39
习 题	44

2 化工过程控制仪表

2-1 单元组合式仪表 概 况	47
2-1-1 气动单元组合仪表	47
2-1-2 电动单元组合仪表	51
2-2 调节器的基本组成和原理	52

2-2-1 基本组成和原理	52
2-2-2 基本阻—容环节特性	53
2-2-3 基本控制规律的实现方法	53
2-3 常用模拟式调节器	65
2-3-1 DDZ—Ⅰ型PID调节器	65
2-3-2 DDZ—Ⅱ型调节器	71
2-3-3 气动膜片式调节器	75
2-3-4 气动波纹管式调节器	83
2-4 单回路可编程数字调节器	87
2-4-1 可编程数字调节器的构成	88
2-4-2 可编程数字调节器的管理程序和工作原理	95
2-4-3 可编程数字调节器的运算和控制功能	97
2-5 气动薄膜调节阀	104
2-5-1 气动薄膜调节阀的结构	105
2-5-2 调节阀的节流原理与特性	106
2-5-3 气动调节阀的选用和安装	111
2-5-4 阀门定位器	120
习 题	123

3 化工过程参数的测量

3-1 测量及测量仪表的基本概念	125
3-1-1 测量的基本概念	125
3-1-2 测量仪表及其品质指标	126
3-2 温度测量	130
3-2-1 热电偶	132
3-2-2 热电阻	141
3-2-3 电动温度变送器	144
3-2-4 温度显示仪表	149
3-2-5 接触式温度计的安装	174
3-3 压力测量	176
3-3-1 基本概念	176

3-3-2 弹性式压力表	178
*3-3-3 电气式压力表	180
3-3-4 压力表的选用和安装	183
3-4 流量测量	186
3-4-1 差压式流量计	188
3-4-2 转子流量计	200
*3-4-3 其他流量计	205
3-5 液位测量	210
3-5-1 静压式液位计	210
3-5-2 浮力式液位计	216
*3-5-3 电容式液位计	217
3-6 自动成分分析	219
3-6-1 热导式气体分析器	220
3-6-2 红外线气体分析器	226
*3-6-3 氧化锆氧分析仪	233
3-6-4 工业气相色谱仪	237
习 题	249

4 化工过程控制系统

4-1 单回路控制系统的设计、投运和整定	252
4-1-1 控制方案的确定	252
4-1-2 测量滞后的影响及克服方法	259
4-1-3 控制规律的影响及调节器选型	263
4-1-4 控制系统的投运和整定	266
4-2 化工过程中常见的控制系统	275
4-2-1 流量控制	275
4-2-2 压力控制	277
4-2-3 液位控制	280
4-2-4 温度控制	283
4-2-5 成分控制	298
*4-3 其它控制系统	306

4-3-1 自动选择性控制系统	307
4-3-2 按计算指标进行控制的系统	311
4-3-3 计算机控制系统	315
习 题	322
附录一 自控系统常用符号	324
附录二 热电偶分度表	326
附录三 热电阻分度表	347
参考文献	357

1 自动控制概论

化工自动化的基本内容包括化工生产过程的自动检测和自动控制。本章首先就自动控制的基本知识,如系统的组成、工作原理;动态及反馈的概念;过渡过程的品质指标;被控对象特性和控制作用规律及它们对过渡过程的影响等基本概念作必要的介绍,可为学习自动检测仪表、自动调节器及过程控制系统提供必要的基础知识。

1-1 自动控制系统概述

化工生产过程总是要求按合适的工艺参数稳定地操作,才能保质保量的完成生产任务。但在生产过程中,被控工艺过程或设备的温度、压力、流量、液位、成分等工艺参数由于自然或人为的原因,往往会发生波动,要达到稳定操作,必须对它们及时进行检测和控制。例如,对乙烯生产中的主要设备裂解炉的操作控制来说,保证乙烯的收率是最基本的操作要求,要达到预定的乙烯收率,就需在裂解过程中达到一定的裂解深度。当裂解原料的组成和进料量一定时,影响裂解深度或乙烯回收率的主要因素为:裂解炉的出口温度,原料在炉内停留时间及烃分压。为了实现对裂解炉的自动控制,目前还无法用成分分析器测定裂解气中乙烯含量作为直接质量指标进行控制。而是根据进料组分和流量、停留时间及烃分压恒定时,一定的裂解气出口温度能间接地反映出裂解深度(或乙烯收率),故可以此温度作为裂解反应的控制指标。由于影响裂解质量指标的因素很多,诸如进料(轻柴油)组成、温度的变化,稀释蒸汽量的变化,进料总压力的变化,燃料气、燃料油压力的变化等等,因此裂解炉的自动控制系统就不止

一个。在此仅以裂解炉出口温度控制系统为例介绍之，其组成原理如图 1-1 所示。当裂解炉出口温度偏离工艺要求值时，通过热电偶测量出该温度的变化，经温度变送器转换成相应的测量信号(统一的标准信号)，由显示仪表指示、记录其变化。同时又通过调节器的作用，根据出口温度的变化，按照一定的控制规律，输出一个控制信号，自动地改变气动调节阀(执行器)开度，改变作为主要调节手段的燃料油流量。当出口温度过高时，减少燃料油流量，使温度下降；反之，则增加燃料油流量，使温度上升，如此反复调节，直至温度回复到工艺规定的值时，才停止动作，达到稳定操作。

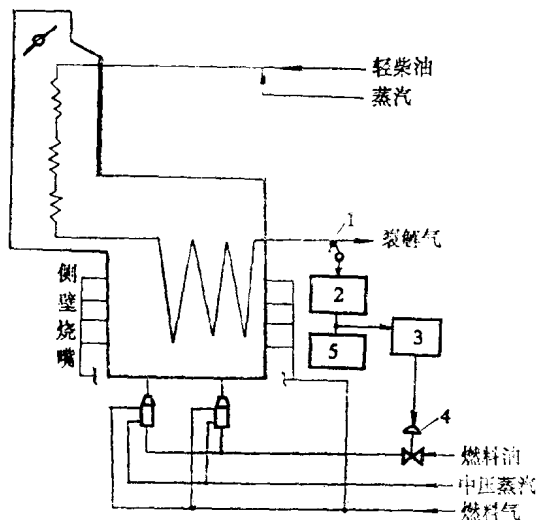


图1-1 裂解气出口温度控制系统

1—热电偶；2—温度变送器；3—调节器；4—执行器；5—显示仪表

显然，要实现自动控制，首先必须通过各种检测仪表(测量元件、变送器、显示仪表等)连续地对各工艺参数进行测量、变送，并将结果自动地指示或记录下来，以代替操作人员对各参数

不断地观察与记录。然后利用自动控制装置（调节器、执行器、如气动调节阀等）组成控制系统，对生产过程中某些重要参数进行自动控制，使其按控制要求保持某一定值或按一定的程序而改变。

在具体介绍自动控制系统的组成和工作原理以前，为了叙述方便，先结合上例介绍几个常用术语：

(1) 被控对象（调节对象） 需要实现控制的设备、机械或生产过程称为被控对象（或调节对象），简称对象。例如裂解炉。

(2) 被控变量（被调参数） 对象内要求保持设定数值（接近定值或按预定规律变化）的物理量称为被控变量（被调参数）。例如裂解炉出口温度。

(3) 操作变量（调节参数） 受调节装置控制，用以使被控变量保持设定数值的物料或能量称为操作变量（调节参数）。例如燃料油流量。

(4) 干扰（扰动） 除操作变量以外，作用于对象并引起被控变量变化的一切因素称为干扰（或扰动）。负荷（处理量）变化是一种典型的干扰，其它像环境温度和压力的变化等也是较常见的干扰。

(5) 设（给）定值 工艺规定的被控变量所要保持的数值称为设定值（或给定值）。

(6) 偏差 偏差本应是设定值与被控变量的实际值之差。但是我们能够直接获取的信息是被控变量的测量值而非实际值，因此在控制系统中通常把设定值与测量值之差作为偏差。

1-1-1 控制系统的组成及工作原理

任何一个自动控制系统总是由被控对象和自动控制装置所组成。自动控制装置可以很简单，例如用浮球带动阀门的液位调节器；也可以相当复杂，例如采用工业控制机及其外围设备和接口。不论其结构如何，作为生产过程自动控制装置必须具备能实

现“测量、比较、决策、执行操作”的功能。目前在化工自动化系统中应用最广的是电动和气动的工业自动化仪表(常规仪表)。下面就以它们为例,说明自动控制系统的组成及工作原理。一个简单控制系统可用图1-2所示典型方块图来描述。

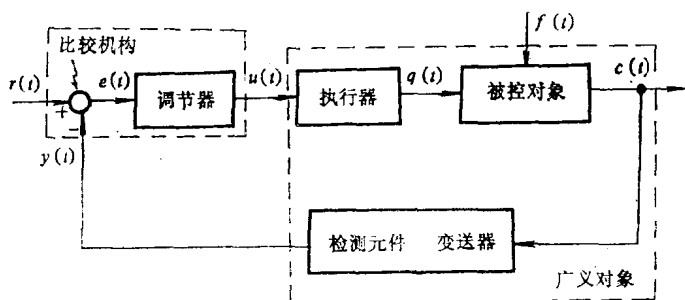


图1-2 自动控制系统组成方块图

图中, $r(t)$ 为设定值; $y(t)$ 为测量值; $e(t)$ 为偏差, $e(t) = r(t) - y(t)$; $c(t)$ 为被控变量; $u(t)$ 为调节器输出, 即控制作用; $q(t)$ 为操作变量; $f(t)$ 为干扰。

测量元件和变送器的作用是把被控变量 $c(t)$ 转换为测量值 $y(t)$ 。例如用热电偶或热电阻测量温度, 并用温度变送器转换为统一标准信号, 如 20—100kPa 的气压信号或 0—10mA (及 4—20mA) 直流电流信号。

比较机构的作用是得到设定值 $r(t)$ 与测量值 $y(t)$ 的差值。在自动控制系统的分析中把偏差 $e(t)$ 定义为设定值 $r(t)$ 与测量值 $y(t)$ 之差, 即 $e(t) = r(t) - y(t)$; 然而, 在仪表制造行业中却把偏差定义为测量值与设定值之差, 即 $e(t) = y(t) - r(t)$; 它们的正负符号刚好相反。

调节器的作用是根据偏差的大小和方向 (用 $\pm$ 符号表示) 的变化情况, 按某种预定的控制规律, 给出控制作用 $u(t)$, 它往往

也是统一的气压或电流信号。

比较机构和调节器实际上是装在一起的，统称为调节器。

执行器的作用是接受调节器送来的控制作用 $u(t)$ ，相应地去改变操作变量 $q(t)$ ，最终实现控制作用。最常用的执行器是气动调节阀，在用电动调节器时则需经过电/气转换器，将控制作用转换成统一的气压信号后再去操作气动调节阀。

由上述可知，方块图中的 $r(t)$ 、 $y(t)$ 、 $e(t)$ 、 $u(t)$ 、 $q(t)$ 、 $c(t)$ 尽管它们本身都是实际的物理量，然而在控制系统中是作为信号来转换和作用的，方块图中的箭头就表示信号的流向，每个方块都代表一个具体实物，称为一个环节。作用于它的信号称为输入信号，它送出的信号称为输出信号。大部分环节是单向作用的，也就是环节的输入信号会影响输出信号，但输出信号不会反过来影响输入信号，如检测元件、变送器、调节器、调节阀等都具有这种性质。应该指出：一个自动控制系统中，只要有一个环节是单向作用的，那么整个系统都具有单向作用性，所以自动控制系统是不能逆向动作的。还需注意的是，方块与方块之间的联结线只是代表它们之间的信号连接，并不代表实物之间的物料联系。方块之间联结线的箭头也只反映信号的作用方向，与工艺流程图上设备间的连线不同，后者则是表示物料流动的管线。执行器所控制的介质流量，可以是流入对象的物料或能量，也可以是从对象中流出的物料或能量，但在方块图中都用箭头指向对象的直线表示其间联系。如果被控制的这个物料确实是流入对象的，则两者方向碰巧一致；反之，则相反。

由方块图还可以看出，从信号传送的角度来说，控制系统各信号的作用形成了一个闭合回路，称为控制回路或闭环系统。系统的输出信号是被控变量，但它经过检测元件和变送器后，又返回到系统的输入端，与设定值相比较。这种把系统（或方块）的输出信号引回到输入端的做法叫做反馈，控制回路就是通过反馈

作用形成的。若反馈信号（即测量值）的作用方向与设定信号相反，即两者比较结果，送到调节器去的偏差信号为两者之差，则把这种反馈叫做“负反馈”。反之，测量信号与设定信号同向，比较结果是两者之和，则把这种反馈称为“正反馈”。在自动控制系统中是采用负反馈，因为当被控变量 $c(t)$ 受到干扰 $f(t)$ 作用后，若使其升高时，反馈信号 $y(t)$ 将高于设定值 $r(t)$ ，经过比较，偏差 $e(t)$ 为负值 [$e(t) = r(t) - y(t)$]，此时调节器将发出信号而使调节阀动作，施加控制作用，其作用方向与干扰作用相反，即使被控变量下降，这样就达到了控制的目的。如果采用了正反馈的形式，当被控变量 $c(t)$ 增大，偏差 $e(t)$ 也增大 [$e(t) = r(t) + y(t)$]，控制作用与干扰作用方向一致，使被控变量更增大，因此只要有一点偏差，控制作用反而会使偏差愈来愈大，直至被控变量超过了安全范围而破坏生产。因此，自动控制系统的工作原理是利用负反馈，根据偏差进行控制。

自动控制除了利用上述闭环系统根据偏差进行控制以外，还可采用开环系统，按干扰进行控制（即所谓前馈控制）。但在实际应用中前者要比后者广泛得多。这是因为闭环控制能适应设定值和干扰的不同变化，使被控变量总能趋向于设定值，从而达到稳定。可是，开环控制却不能自动地觉察被控变量的变化情况，也不能判断操作变量的校正作用是否切合实际需要，无法消除偏差。当然，闭环控制也有缺点，因为它是按偏差控制的，在干扰刚出现时，不能立即引起控制作用，所以有些情况下控制会不及时，难以满足控制要求。

1-1-2 系统的静态与动态

自动控制系统的任务就是在某些干扰作用的情况下，使被控变量保持在设定值上（或某个允许的偏离值内），即干扰作用使被控变量偏离设定值，控制作用又驱使它回到设定值。这样，干扰与控制构成一对主要矛盾，使系统中的有关参数 $y(t)$ 、 $e(t)$ 、

$u(t)$ 、 $q(t)$ 、 $f(t)$ 和 $c(t)$ 皆随时间而变化，都是时间的函数。

在自动化领域内，把被控变量不随时间而变化的平衡状态称为系统的静态。对化工对象来说，一般从物料平衡，能量平衡，传热、传质及化学反应速度与平衡等规律计算所得的结果都是静态特性的一部分。所以静态的概念对从事工艺的人并不陌生，它对于设备的设计是很有用的，根据静态计算可以得到适当大小的换热设备，一个塔的塔板数目及最经济适用的管道直径等等。但是要解决生产操作控制中的一些问题，例如一个塔的进料量或其组分改变了，回流及采出量应当改变多少，并且用一种什么方式改变才能适应进料的干扰？又如一个换热器的冷却水温度改变了，冷却水的流量应该改变多少？如何改变才能使被冷却物料的出口温度保持不变？依靠“静态”概念，应用作为设计各种设备的理论已经不能简单地直接回答这些问题。因为这些问题都与时间有关，在操作生产时，不仅要掌握各种量的变化，还应掌握这些量变化的速度是快一点还是慢一点，这就相当于完成改变任务所需时间的长或短。生产过程中，被控变量随时间而变化的不平衡状态则称为系统的动态。假若一个系统原来处于相对平衡状态即静态，由于干扰的改变而破坏了这种平衡状态，被控变量就会变化，从而调节器等自动化装置就会改变操作变量，克服干扰影响，力图恢复平衡状态。从干扰发生，经过控制，直到系统重新建立平衡，在这一段时间中整个系统的各个环节和参数都处于变动状态之中。所以在自动化工作中，了解系统的动态比静态更为重要，因为在干扰引起系统变动后，只有很好地知道系统的动态情况，并搞清系统究竟能否建立新的平衡和怎样去建立新的平衡，才能有的放矢地搞好系统的设计和运行，满足过程控制要求，否则，难以达到预期的目的。

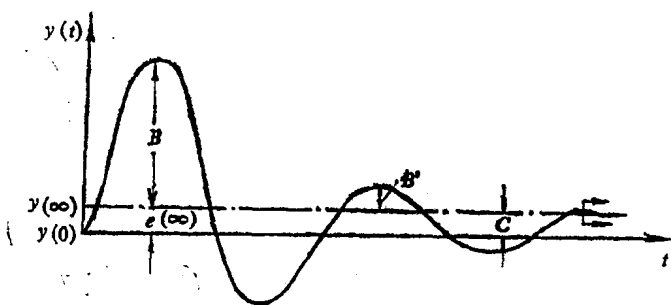
1-1-3 过渡过程的品质指标

过渡过程就是控制系统在受到干扰作用后，在调节器的控制

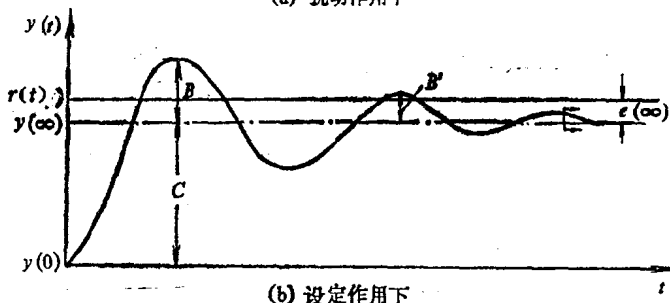
下,被控变量回复到设定值的过程,通常也称为调节过程。了解系统的过渡过程对我们设计、分析、整定和改进系统起着指导作用。

衡量自动控制系统过渡过程的品质时,时间域品质指标具有直接意义。品质指标的出发点是以控制系统原先所处的平衡状态时刻的被控变量作为基准值,取 $y(0)=0$ [或 $c(0)=0$]。从 $t=0$ 的时刻开始,系统受到单位阶跃输入作用,即 $\Delta f=1$,或 $\Delta r=1$ 。于是被控变量开始变化。经过一段时间后,最终达到新的平衡状态 $y(\infty)$ [或 $c(\infty)$]。当干扰或设定值分别作单位阶跃变化时的典型过渡过程曲线如图1-3所示。通常用以下几个特征参数作为衡量过渡过程的品质指标:

(1) 余差(静差) $e(\infty)$ 在阶跃输入作用下过渡过程的最终偏差叫做余差,或称静差。在图1-3(a)所示的情况下,余差



(a) 扰动作用下



(b) 设定作用下

图1-3 典型的过渡过程曲线