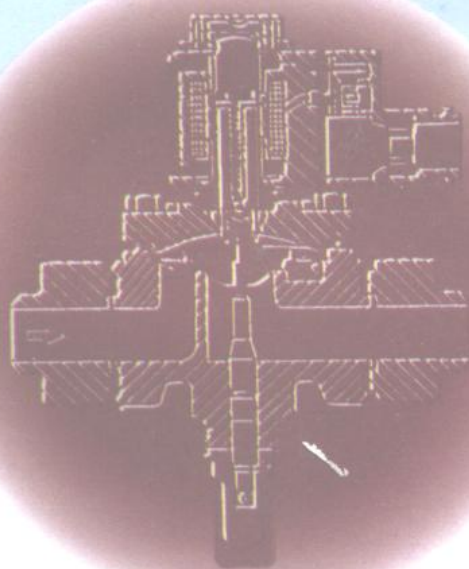


B

普通高等教育机电类规划教材

制冷装置自动化

上海交通大学 陈芝久 等编著



机
械
工
" "

TB657
2000

机械工业出版社

本书主要阐述了制冷装置(含空调系统)自动化的基本原理,调节对象特性,调节器和调节系统的调节过程,各型号制冷装置的自动调节,空调系统的原理、构造和系统设计计算以及调整方法。

在内容选材上,兼顾了自控原理的基础理论,考虑了近年自控理论在现代控制理论上的最新发展,特别注意联系制冷空调自动化的工业实际,并论及其发展方向。

本书是高等学校制冷、空调工程有关专业的统编教材,也可供从事制冷、空调、采暖及通风等专业工程技术人员参考与自学。

制冷装置自动化

上海交通大学 陈芝久 等编著

*

责任编辑:钱飒飒、周保东 版式设计:冉晓华

封面设计:方 芬 责任校对:李汝庚

责任印制:卢子祥

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

邮政编码:100037

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

北京交通印务实业公司印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092_{1/16}·16.5印张·字数 402千字

1997年5月第1版第1次印刷

印数 0 001—2 000 定价:19.50元

ISBN 7-111-05362-1/TB·243(课)

ISBN 7-111-05362-1



9 787111 053620 >

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

前

言

本书是按照我国高等工业学校压缩机、低温技术专业教学指导委员会于1991年9月召开的西安会议决议编写的。

1994年5月,教学指导委员会再次于西安开会确认,“制冷装置机电一体化”是国际制冷界热点之一,全国各高等院校对制冷装置自动化的教学要求加深,提出通过本课程学习,以达到定量计算及设计调节系统的要求。考虑到全国各高等院校制冷空调各有关专业学生过去缺少自控原理预备知识,因此制冷装置自动化教材必须兼顾自控原理、制冷自控元件及系统、空调自控系统等内容,适用学时数为60学时左右。

本书根据上述会议精神拟定了编写大纲,同时也考虑到制冷空调自动控制技术的迅速发展,制冷空调行业有关工厂、企业及研究所广大工程技术人员的需要。本书除可作国内高等院校有关专业的教材外,亦可供广大有关工程技术人员参考与自学。

本书的特点是兼顾了自控原理的基础理论,考虑了近年自控理论在现代控制论上的最新发展,努力联系制冷空调工业实际,由浅入深地分析介绍了制冷空调自动控制典型系统的原理与设计方法,并论及了发展方向。通过全书学习,可初步达到定量地分析、设计制冷空调的自动控制系统,正确地选择调节设备,并有一定的调整知识。

本书的第一、二两章以自动调节经典理论为基础,顾及现代控制论与制冷装置自动化发展的有关部分,结合制冷空调特点,介绍了调节对象。调节器及调节系统的动态特性、微分方程、传递函数、频率特性和状态空间表达式的列写,分析了各种调节系统的组成,介绍了串接控制,补偿调节及自适应控制,模糊控制的概念及其在制冷装置上的应用,叙述了调节系统设计和调节器参数的整定方法,以及调节系统与执行机构、调节阀的计算方法。

第三、四章详细介绍了各种制冷装置与空调系统的自控基本回路与自控元件,并分析了实现制冷、空调系统自动调节的基本方法与近几年国内外流行的典型实例。

对于某些教学时数较少与理论深度要求稍浅的院校专业,讲解时可把第一、二章若干章节降低要求或作部分的精简,因此本书可适用于30~65学时的教学要求。

1986年10月作者曾执笔撰写机械工业出版社1987年11月出版的《制冷装置及其自动化》一书的自动化部分,该书自动化部分只适于20学时以下的教学需要,只从定性叙述要求出发书写,特说明以示区别。

本书大纲经过压缩机及低温技术专业指导委员会讨论审定。西安交通大学、上海交通大学、华中理工大学、浙江大学及华东工业大学(原上海机械学院)等有关院校教授参加,并提了宝贵意见,在此衷心致谢。

本书第一、四章由上海交通大学陈芝久教授执笔,第三章由西安交通大学朱瑞琪副教授执笔,第二章由上海交通大学吴静怡副教授执笔,由陈芝久教授担任主编,负责全书的统稿工作。

本书由华中理工大学林秀诚教授担任主审。

本书内容涉及面较广,选材与撰写上如有不足之处,恳请读者批评指正。

编者 1996年8月

目 录

前 言	
第一章 调节系统的基本原理与调节	
对象特性	1
第一节 调节系统的基本概念	1
第二节 调节过程与质量指标	5
第三节 调节对象特性	8
第四节 调节对象的数学描述	15
第五节 调节对象动态特性的实验测定	22
第六节 拉氏变换与传递函数	27
第二章 调节器和调节系统的调节	
过程	38
第一节 概述	38
第二节 双位调节器及其调节过程	39
第三节 比例调节器及其调节过程	45
第四节 积分调节器及微分调节器	52
第五节 比例积分(PI)调节器及其 调节过程	56
第六节 串级调节和补偿调节的概念及 在制冷装置中的应用	63
第七节 调节系统的微分方程 和传递函数	70
第八节 调节系统的频率特性和对数 频率特性	77
第九节 自适应控制、模糊控制的概念及 在制冷装置中的应用	88
第十节 调节器参数的工程整定	102
第十一节 应用数字计算机求解 调节过程	107
第十二节 执行器及调节阀的流量特性与 选择计算	114
第三章 制冷装置的自动调节	128
第一节 制冷剂流量调节	128
第二节 电磁阀	145
第三节 压缩机能量调节	148
第四节 冷凝压力调节	161
第五节 蒸发压力调节	165
第六节 吸气压力调节	167
第七节 活塞式制冷装置的安全保护 系统及附件	169
第八节 典型制冷装置的自控系统	178
第九节 溴化锂吸收式制冷机的 自控系统	193
第十节 计算机控制制冷装置的 方法及发展	203
第四章 空调系统的自动调节	215
第一节 概述及发展趋向	215
第二节 温度调节系统	217
第三节 湿度调节系统	239
第四节 空调调节系统综合举例	248
参考文献	258

第一章 调节系统的基本原理与调节对象特性

第一节 调节系统的基本概念

现代科学技术发展迅速,各学科相互渗透,自动控制与计算机技术已普遍应用在各领域中,现代控制论的发展又使自动化技术有了新的突破。

制冷(含空调)装置自动化是热工对象自动化的一个特例,实现计算机控制,其基础仍是引用经典自动调节理论及对各热工参数实现自动调节,因此掌握自动调节系统的基本原理是实现制冷装置自动化所必需的基本知识。

现代制冷空调技术向自动化、智能化和机组化发展。计算机控制的制冷装置、冷库、小型家用空调器、高层建筑群空调系统及高精度的恒温恒湿装置等不断地对自动调节技术提出新的要求,也为制冷空调自动化技术提供了发展动力。

一、自动调节系统及其组成

在制冷装置与空调系统中,为了使整个装置和系统能正常运行,并达到所要求的指标,有许多热工参数要进行控制,如温度、湿度、压力、流量和液位等。其中除湿度外,都是一般热工自动调节技术中常遇到的被调参数。湿度参数的调节,则是制冷空调自动调节中特有的情况。

一个能够稳定工作的自动调节系统,都是在无人直接参与下,能使被调参数达到给定值或预先给定的规律变化的系统。它一般是由调节对象、发信器、调节器和执行器组成的闭环系统。为了说明问题,先看下面二个简例。

例 1-1 房间温度调节系统(见图 1-1)。

室外冷空气与一部分回风混合,由风机送(吸)入空调器,经热水加热盘管加热,使空气温度升高,送至房间,使房间内温度保持采暖工况要求。在这个系统中,必须使热水加热量 Q_A 与房间散失的热量 $Q_{\text{出}}$ 随时相协调,否则房间空气温度将会波动。

加热量 Q_A 通过改变热水调节阀的开度 ΔL 来实现。若由人工来完成,需先观察房间内温度,再根据它和给定值的偏差,人工调节热水阀开度,这将十分费事,但仍很难使房间内温度稳定。如果装上一台温度调节器,它的发信器感受房间内的温度,根据调节器的调节规律,操纵热水调节阀的开度,调节热水流量以改变加热量 Q_A ,使被调参数保持在给定值范围内。完成这一工作就叫自动调节。若自动调节系统设计得当,系统将准确而稳定地工作。在调节系统中,温度发信器将测到的房间温度送到调节器并和给定的温度值进行比较,按偏差的大小,调节器发出信号指挥执行器(执行机构与调节阀)动作,调节热水流量以改变送风温度,使房间温度保持恒定。

在本例中,被调参数是房间温度,调节对象是空调器及房间(包括送风管),它和发信器、温度调节器组成一个闭环系统。

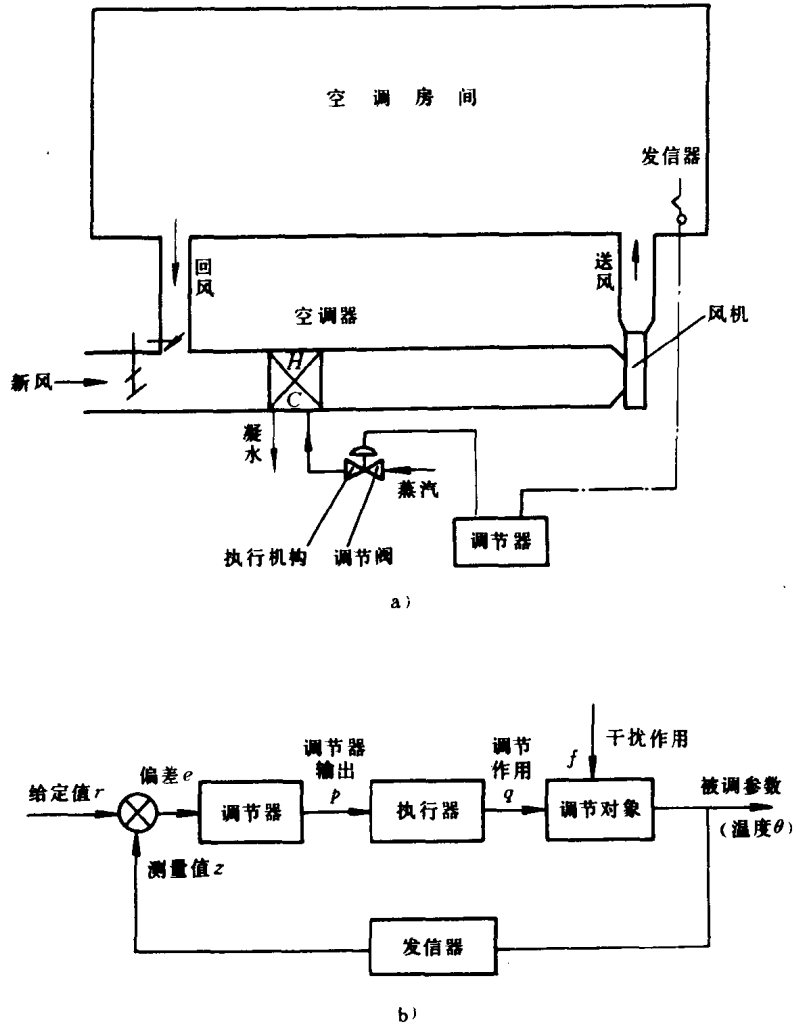


图 1-1 房间温度调节系统原理图

a) 系统图 b) 框图

例 1-2 溴化锂吸收式制冷机产冷量调节系统

图 1-2 所示为该调节系统的原理图与框图。溴化锂吸收式制冷机的产冷量要与耗冷量相匹配, 它们之间的不平衡反映在冷媒水的出水温度上, 因此可检测冷媒水的出口温度 θ 作为测量值, 把该测量值以 z 表示, 它和给定值 r 比较后, 把偏差信号 e 送给温度调节器, 调节器按其调节规律, 发出指挥信号 p 去控制执行机构与调节阀, 调节凝水(或蒸汽)的流量, 使产冷量满足耗冷量(负荷)的需要。本例中被调参数是冷媒水温度, 调节对象是溴化锂制冷机。

二、自动调节系统框图

从上面自动调节系统的两例中可看出, 制冷、空调自动调节系统是由调节对象和自动调节设备组成的闭环系统。

自动调节设备一般由发信器、调节器和执行器三部分组成。现以图 1-1 为例说明。

第一部分是发信器(或称感受元件), 如热电阻、热电偶及双金属温度发信器等。它是把被

调参数(房间内空气温度)成比例地转变为其他物理量信号(如电阻、电压、电流及位移等)的元件或仪表。

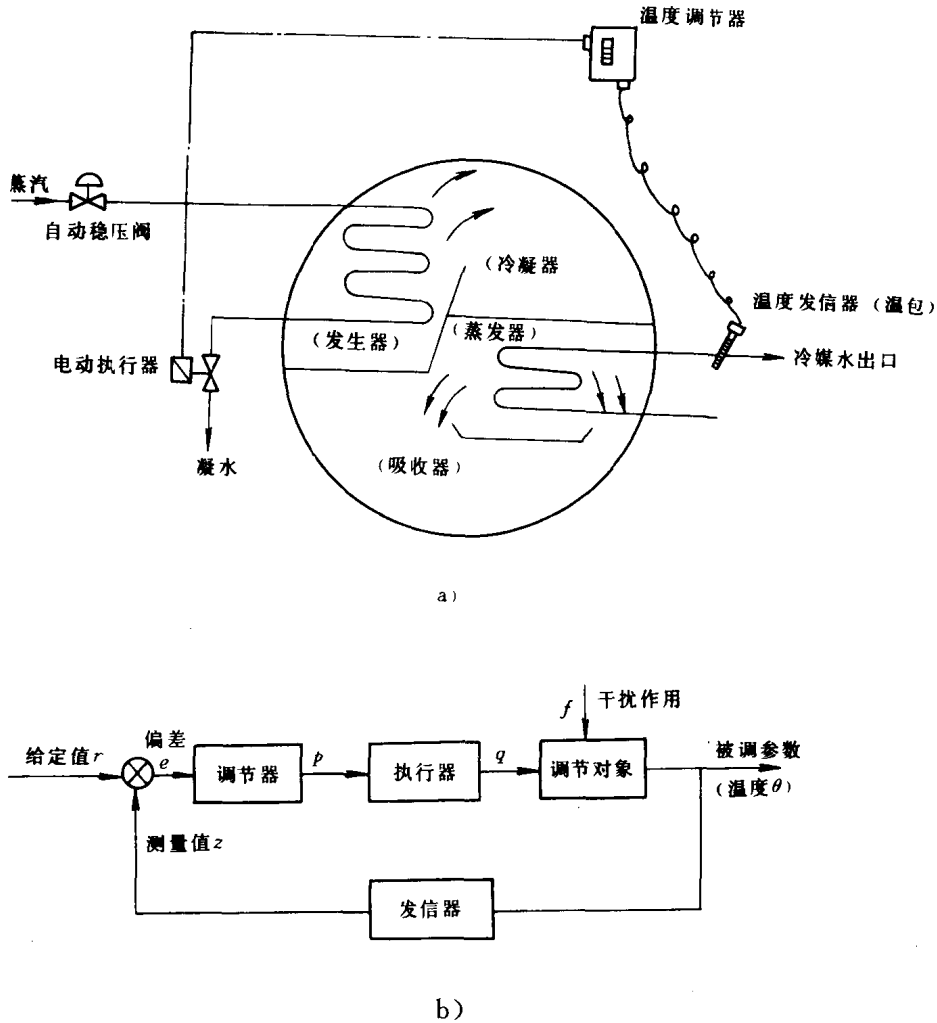


图 1-2 溴化锂吸收式制冷机产冷量自动调节原理图

a)原理图 b)框图

第二部分是调节器。它将发信器送来的信号与给定值进行比较,根据偏差大小,按照调节器预定的调节规律输出调节信号。

第三部分是执行器。它是由执行机构和调节机关组成的。在图 1-1a 中,调节机关为调节阀,它根据调节器送来的调节信号大小改变调节阀的开度,调节热水流量,对调节对象施加调节作用,使被调参数(房间空气温度)保持在给定值。在制冷空调自动调节中,常遇到发信器与调节器组合成一体调节设备,也有把发信器、调节器和执行器做成一体的调节设备。人们熟悉的热力膨胀阀就是一例。这时该组合调节设备亦称“调节器”。

研究自动调节系统时,为了更简洁地表示自动调节系统各组成环节间相互影响和信号联系,一般用框图来表示调节系统的各组成部分。图 1-1a 及图 1-2a 均可以分别用相应的框图 1-1b 及 1-2b 来表示,每一个框表示一个具体作用的环节。框之间用箭头表示信号联系及其传递方向。

框中可用文字注明环节的内容,也可以用传递函数代替文字表示环节的性质。

在框图 1-1b 中,空调室和送风管就是“调节对象”。在图 1-2b 中溴化锂吸收式制冷机是“调节对象”。

干扰作用可定义为:凡是可能引起被调参数波动的外来因素(除调节作用外)。它会使调节系统平衡状态遭到破坏,使被调参数偏离给定值。在例 1-1 中,空调房间的热负荷变化,室外空气温度变化等均属于干扰作用。

调节作用则是力图消除干扰作用对被调参数的影响,恢复调节对象的流入量与流出量的平衡,使被调参数恢复到给定值。自动调节过程是调节作用与干扰作用这一对矛盾在调节系统中对立和统一的过程。

干扰作用与调节作用影响被调参数信号的传递通道,称为干扰通道和调节通道。

被调参数(房间空气温度)是发信器的输入信号。发信器的输出信号进入调节器,在调节器内附的比较元件上与给定值比较,得到偏差信号 e 。给定值有两种,即由调节器本身产生的内给定值和由调节器外部送来的外给定值。

“执行器”由执行机构和调节阀组成,“执行器”的输出信号为热水流量 q , q 又是调节对象的输入信号。加热热水流量变化就是使房间温度恢复到给定值的调节作用。从框图上可以看到,自动调节系统的信号传递是单向作用的,框图上带箭头的联接线,仅表示框间的信号作用方向,并不像空调、制冷工艺流程图上的线,它还表示工质、能量的联系。从图 1-1b 和图 1-2b 可看出,自动调节系统中信号沿箭头方向前进,形成一个闭合回路,叫做闭环系统。从这二个图还可看出,被调参数是调节系统的输出信号,通过发信器把此输出信号引回调节系统输入端的比较元件。这种方式称为反馈。

如果反馈信号使被调参数变化减小,称为负反馈;如果反馈信号使被调参数变化增大,则称正反馈。在自动调节系统中都采用负反馈。其标法符号如下:在图 1-1b 中,负反馈信号 z 旁有一个负号,给定值信号 r 为正号,故偏差信号是

$$e=r-z$$

调节系统实现负反馈的意义为:若被调参数 y 受到干扰上升时,反馈信号 z 与给定值 r 经过比较,得偏差信号 e ,调节器输出信号将指挥调节阀动作,使被调参数 y 向相反方向变化,并回降至给定值。在自动调节系统中,不采用正反馈,因为正反馈系统中,只要被调参数与给定值有一微小偏差,正反馈将使偏差放大,超出安全范围。

调节系统带反馈后,信号传递形成闭合回路,这种闭环系统称为反馈调节系统;没有反馈回路的系统称为开环系统。自动调节系统大多数是利用反馈构成的。反馈调节是按偏差进行控制的,故产生偏差是反馈调节系统进行自动调节的必要条件。

三、调节系统的基本概念

(一)调节系统分类

反馈调节系统按给定值的变化规律不同,可以分为:

1. 定值调节系统 给定值为一确定的数值。
2. 程序控制系统 给定值事先不确定,取决于系统以外的某一进行着的过程,并要求系统的输出量跟着给定值变化。
3. 自适应控制 它能连续自动地测量对象的动态特性,把它们和希望的动态特性比较,并利用差值以改变系统的可调参数,或产生一个控制信号,从而保证不论环境如何变化,被控

参数性能都是最佳的。

在制冷空调自动调节系统中,定值调节系统较为普遍。近年计算机技术发展迅速,自适应控制、程序控制及模糊控制亦开始被应用。

(二) 干扰作用问题

调节系统中干扰作用(亦叫扰动作用)的大小一般是随时间而变化的,它没有固定的形式和规律,但在分析和设计自动调节系统时,为方便分析,常以阶跃干扰作为典型干扰作用来讨论。如图 1-3a 所示,阶跃干扰在 t_0 时刻作用于系统,干扰量不随时间而变化,也不消失。当干扰作用 $f(t)=[1]$ 时,则称为单位阶跃干扰,其动态方程为

$$f(t) = \begin{cases} 1 & t > t_0 \\ 0 & t < t_0 \end{cases} \quad (1-1)$$

阶跃干扰对于调节系统是最不利的干扰形式,也是最便于计算而又易于实现的干扰形式。它是自动控制工程中常用的干扰作用形式。今后分析系统特性时,就以阶跃干扰为输入来进行分析。

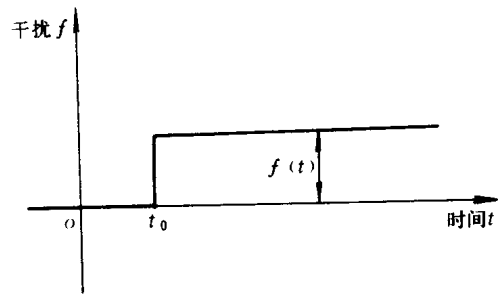
(三) 过渡过程

过渡过程是指调节系统在阶跃干扰作用下,被调参数随时间 t 变化的规律。它是系统从一个稳态过渡到另一个稳态的过程,这是一个动态过程,故称之为过渡过程。

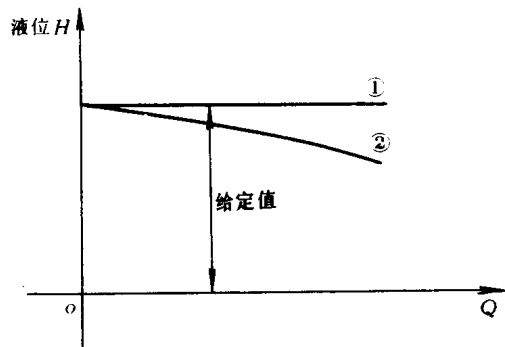
自动调节系统中的稳态(或称静态)是一种动态平衡。对于定值调节系统,对象处于静态,意味着对象的流入量与流出量相等,被调参数处于相对平衡状态,这时被调参数不随时间而变化,故称为静态。

系统的静态特性是指平衡状态下被调参数与负荷的关系,例如图 1-1 所示温度调节系统。其静态特性是温度与热流量 $q_{出}$ 的关系。图 1-3b 为定值调节系统的静态特性图。对于定值调节系统,被调参数不随负荷变化而改变,其静态特性是一条水平线,如图 1-3b 曲线①所示,这类系统称为无静差系统。

图 1-3b 中曲线②为有静差系统,它表示在不同负荷时被调参数将稳定在不同的数值上。



a)



b)

图 1-3 阶跃干扰作用及定值调节系统静态特性

a) 阶跃干扰 b) 定值调节系统的静态特性

① 无静差系统 ② 有静差系统

第二节 调节过程与质量指标

调节系统的过渡过程可以用被调参数与时间坐标曲线描述,也可以用微分方程来描述。

在单位阶跃干扰作用下,分析过渡过程中被调参数的变化规律,并以此来评价调节系统的调节质量,因此过渡过程曲线是调节系统的调节质量好坏的写照。仍以图 1-1a 所示的系统为

例分析。该空调温度调节系统原处于平衡状态,如干扰为新风,温度升高,则调节对象的热平衡受到破坏,被调参数(房间温度 θ) y 升高。由于调节器的动作,相应地关小了蒸汽调节阀,又会使房间温度 θ 重新稳定。把房间温度因受干扰而波动、通过调节作用又重新稳定的过程记录下来,这就是房间温度的过渡过程曲线,如图1-4所示。由于它是以前时间为横坐标、以房间温度为纵坐标,就可以得出该调节系统的过渡过程曲线,它是被调参数随时间而变化的曲线,故是一条动态特性曲线。它也可以用微分方程式表示,一般是一个高阶微分方程式。

评价调节过程质量的好坏,可以从分析调节过程的微分方程入手,也可从分析过渡过程曲线入手。但是调节质量指标分析大都按过渡过程曲线形状来讨论,通过对过渡过程分析建立调节质量指标。

调节质量指标是设计和实际运行中要求调节系统能够满足的性能指标,它是衡量调节性能好坏的标准。调节质量指标有许多个,但有一个最基本的指标,即要求调节系统稳定。

对于调节过程曲线来说,首先

要求是衰减的,即被调参数经过几次波动能达到新的稳定状态。调节系统稳定是调节系统能正常工作的必要条件,只有在保证系统稳定的前提下,讨论其他调节质量指标才有意义。

通常要求调节系统在阶跃干扰作用下,其调节过程的衰减率、动态偏差(超调量)、静态偏差及调节过程时间等均满足预定的要求,下面分别进行讨论。

一、稳定性和衰减率 ψ

稳定性是指调节系统在外干扰作用下,被调参数能达到新的稳定状态的性能。

讨论调节系统的稳定程度,常用过渡过程的衰减率 ψ 来衡量,即

$$\psi = \frac{M_p - M_p'}{M_p} = 1 - \frac{M_p'}{M_p} \quad (1-2)$$

式中 M_p' ——过渡过程的第三个波幅值;

M_p ——过渡过程的第一个波幅值,见图1-5。

一般调节过程为了保证稳定性,总要求 $\psi > 0$ 。通常认为 $\psi = 0.75$ 比较理想,即过渡过程的第一波峰与第三波峰之比 $n = 4$ 时($n = \frac{M_p}{M_p'} = 4, \psi = 1 - \frac{M_p'}{M_p} = 0.75$),调节过程收敛得快慢适中,常为人们所选用。调节过程不允许 $\psi < 0$ 即不允许扩散增幅振荡,因为它无法使被调参数稳定,调节系统工作亦遭到破坏。对于 $\psi = 0$ 的等幅振荡,只要其振幅在给定范围内,也能采用。制冷空调中常用的双位调节(如电冰箱温控)过程就属于这种情况。

调节系统保证了稳定性后,还有一系列调节质量指标,对照图1-4,分别叙述这些质量指标的定义。

二、衰减比 n

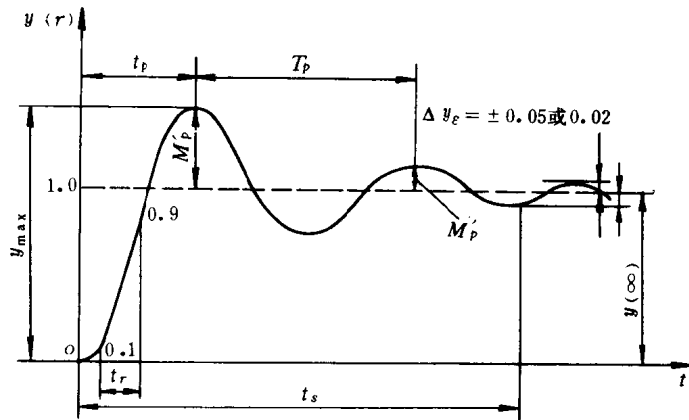


图1-4 调节系统过渡过程与调节质量指标图

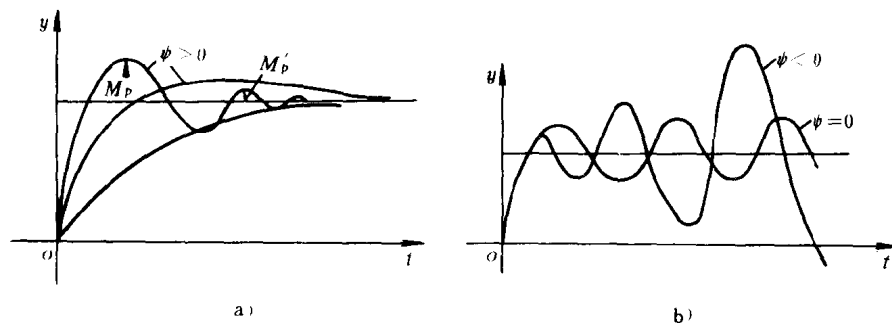


图 1-5 调节过程稳定性分析图

a) 稳定 ($\psi > 0$) b) 不稳定 ($\psi < 0$)

衰减比为被调参数在过渡过程中第一个波峰值与第三个波峰值之比,即

$$n = \frac{M_p}{M_p'}, \psi = 1 - \frac{1}{n} \quad (1-3)$$

三、动态偏差(最大超调量) M_p

被调参数在过渡过程中,第一个最大峰值超出新稳态 $y(\infty)$ 的量,称为最大超调量 M_p ,常称动态偏差。设计调节系统时,必须对此作出限制性规定, M_p 大,则品质差。

四、静态偏差 $y(\infty)$

也称残余偏差或稳态偏差,它表示调节系统受干扰后,达到新的平衡时,被调参数的新稳态值与给定值之差。

若 $y(\infty) = 0$,表示调节系统受干扰后,被调参数能回到给定值,这种系统为无差系统;若 $y(\infty) > 0$,则为有差系统。一般舒适空调系统允许有一定的静态偏差,例如某空调室设计温度为 $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$,则该系统的给定值为 23°C ,要求静态偏差 $y(\infty) \leq 2^\circ\text{C}$ 。又如某冷藏库设计温度为 $-18^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$,即静态偏差 $y(\infty) \leq 1^\circ\text{C}$ (对于随动系统, $y(\infty)$ 应理解为误差 $e(t), t \rightarrow \infty$)。

五、最大偏差 y_{\max}

由图 1-4 可知,最大偏差 $y_{\max} = M_p + y(\infty)$ 。例如要求某温度调节系统最大偏差不超过 5°C ,即 $y_{\max} \leq 5^\circ\text{C}$ 。

对于无静差系统,显然 $y_{\max} = M_p$,此时最大偏差就是动态偏差值。

六、振荡周期 T_p

调节系统过渡过程中,相邻两个波峰所经历的时间,或振荡一周所需时间,叫作振荡周期 T_p 。

七、调节过程时间 t_s

调节过程时间亦称过渡过程时间,它是指调节系统受到干扰作用,被调参数开始波动到进入新稳态值上下 $\pm 5\%$ (或 $\pm 2\%$) 范围内所需时间。令这个范围为 Δy_s , Δy_s 的选取根据调节系统任务而定。对有差调节系统 $\Delta y_s \leq 5\% y(\infty)$;对于无差调节系统,一般取 $\Delta y_s \leq 2\%$ 给定值或更小。

调节过程一旦进入 Δy_s 范围,就认为处于新的稳定状态,但并不是指处于绝对的稳定状态。一般希望调节过程时间 t_s 短些好。通常期望值为

$$t_s = 3T_p \quad (1-4)$$

八、峰值时间 t_p

过渡过程达到第一峰值所需的时间,即达到最大偏差值所经历的时间。

各种不同用途的调节系统,除了系统都要求稳定外,对调节过程其他质量指标要求各有不同。一般调节系统都希望 M_p 、 $y(\infty)$ 及 t_s 值小些好。

制冷空调对象属慢速热工对象,有些参数(如温度)的调节目的是为了改善工作和生活条件,故对动态偏差要求可以放宽一些,调节过程时间要求也不严,往往只对静态偏差要求严格。如此可以给调节系统设计带来方便,突出了稳定性和静态偏差两个指标,而把其他质量指标放到次要地位。

第三节 调节对象特性

调节对象是调节系统中最基本的环节,一切调节设备都服务于它,并根据调节对象特性来设计和调整调节系统。调节系统质量的好坏,不但与调节器的动态特性有关,更和调节对象的动态特性有关。调节对象动态特性一定程度上决定了调节过程和调节质量。调节器只是根据调节对象特性将调节过程的质量指标加以改善。研究清楚调节对象特性是设计好调节系统的基础。

对象特性包括静态特性和动态特性两部分,常用迟延 τ , 时间常数 T 和放大系数(传递系数) K 来综合表示对象特性。对象的动态特性取决于对象的结构,即对象所组成环节的性质、环节的数目以及连接方式等。

当对象受阶跃作用输入信号,对象的输出信号——被调参数随时间而变化的曲线称为反应曲线。

干扰形式往往是多种多样的。针对某一具体对象,需找出其主要干扰形式。常用的典型干扰形式有阶跃变化、等速变化、脉冲与周期性波动等。

研究调节对象特性,基本方法是向对象输入一个单位阶跃干扰,然后分析下列两点:

- (1) 从新稳态数值求取对象的静态特性,如放大系数。
- (2) 从过渡过程曲线求取对象动态特性参数,如时间常数 T 和迟延 τ 等。

下面分别讨论调节对象的一些基本性能参数。

一、容量与容量系数

任何一个调节对象,都贮存一定的能量或工质。对象贮存能量或工质的能力称为对象的容量。

例如 某空调室的室内温度为 θ , 这时室内所蓄的热量为对象的容量 U , 则

$$U = \sum_{i=1}^n m_i c_i \theta \quad (1-5)$$

式中 m_i ——空调室及室内物品设备等各部分的质量;
 c_i ——空调室壁及室内物品设备等各部分的比热容;
 θ ——室内温度。

例如某调节对象容器的液位(见图 1-6), 其截面积为 A , 液位高度为 H , 则容量为 $V = AH$ 。

显然,被调参数(温度 θ 、液位 H)增大,容量也增大,故容量是一个随着工况变化的参数。

容量系数 C 表示被调参数变化一个单位值时,对象容量的改变量,也就是容量对被调参数的一阶导数。

空调室的容量系数

$$C = \frac{dU}{d\theta} = \sum_{i=1}^n m_i c_i \quad (1-6)$$

房间温度的变化速度 $\frac{d\theta}{dt}$

将取决于房间的容量系数。

空调房间蓄热量的变化为

$$\frac{dU}{dt} = Q_{\lambda} - Q_{\text{出}} \quad (1-7)$$

式中, Q_{λ} , $Q_{\text{出}}$ 分别为加入与离开空调室的热量。

则

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n m_i c_i \frac{d\theta}{dt} &= Q_{\lambda} - Q_{\text{出}} \\ \frac{d\theta}{dt} &= \frac{1}{C} (Q_{\lambda} - Q_{\text{出}}) \end{aligned} \quad (1-8)$$

对于液位对象,其容量系数 C 为

$$C = \frac{dV}{dH} = \frac{d(AH)}{dH} = A \text{ (截面面积)} \quad (1-9)$$

则

$$\frac{dH}{dt} = \frac{1}{A} (m_{\lambda} - m_{\text{出}}) = \frac{1}{C} (m_{\lambda} - m_{\text{出}}) \quad (1-10)$$

对于液位对象,容量系数 C 表示液位变化一单位值时容器蓄液量的变化,它就是容器的截面积。又如图 1-6b 所示,相同几何尺寸的容器,但卧式安装,其容量系数 C 就是变数,是随液位高度而变化的。此时常以额定工况时的容量系数作为计算值。

从这两例可以看到,在干扰作用下,被调系数的变化速度取决于容量系数 C ,而不取决于容量。按容量系数的定义,可写出为

$$dU = Cd\theta, dV = CdH$$

一般地说,容量系数大的对象,其调节性也较好。若对象蓄存量变化相同的 dU 或 dV 时,容量系数 C 大的对象,被调参数变化小; C 小的对象,其被调参数变化大。容量系数 C 大的对象具有较大的储蓄(能)能力,或称有较大的惯性,受扰动作用后,被调参数反应比较缓慢。例如同样 10 个人,若走进一小房间,则房间温升大;若走进一大房间,则房间内温升小。

二、放大系数(传递系数)

为说明放大系数的概念,先看图 1-7。有一空调房间,原稳态温度为 θ_0 ,若送风温度与风量均不变,在 t_0 时,开亮 500W 电灯,并进入 5 人工作。显然这 500W 电灯及 5 人的人体热,对空调对象是阶跃扰动(ΔQ_{λ})。由于加入热量增加室内温度逐渐升高,同时渗出热亦相应增加,故室内温度升高,速度逐渐减小,最后趋于新的稳态值 θ_{∞} 。由于干扰 ΔQ_{λ} 加入,被调参数的稳态值变化了

$$\Delta\theta = \theta_{\infty} - \theta_0$$

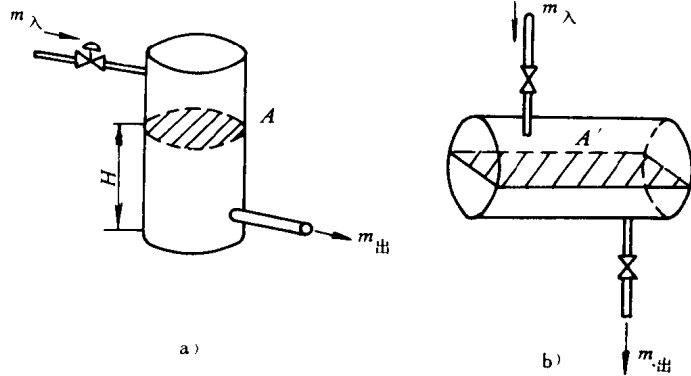


图 1-6 液位调节对象

a)立式 b)卧式

令

$$K = \frac{\Delta\theta}{\Delta Q_\lambda} = \frac{\theta_\infty - \theta_0}{\Delta Q_\lambda} \quad (1-11)$$

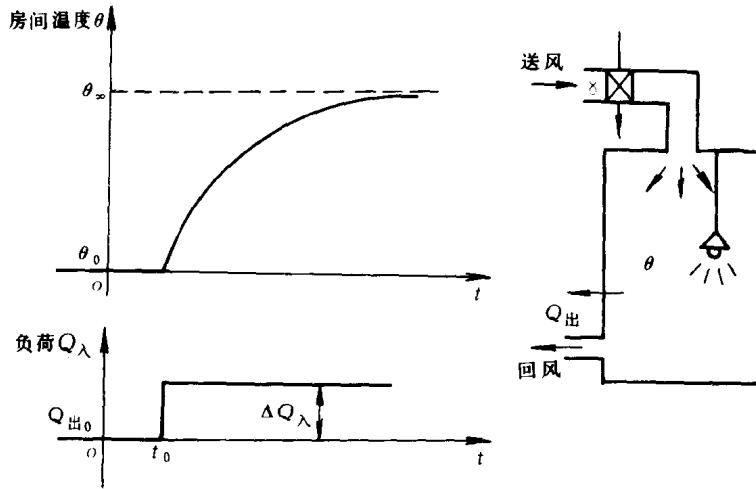


图 1-7 放大系数说明图

K 就称对象的放大系数,单位为 $^{\circ}\text{C}/\text{kJ}$,也叫传递系数。它表示对象受到干扰,又重新达到新平衡的性能。其数值等于被调参数新旧稳态值之差与干扰幅度之比。放大系数 K 表征静态特性,它与被调参数的变化过程无关,而只和过程的始态与终态值有关。对象的放大系数 K 值愈大,表示输入信号对输出信号(被调参数)的稳态影响愈大; K 值小,影响小。

放大系数 K 值可以由计算或实验求得,其依据就是 K 值的定义及式(1-11)。

三、自平衡的概念

从图 1-7 例中我们可发现,工程中亦有不少对象能在没有调节器的帮助下,受到干扰后,自己也能恢复新的平衡,但其静态偏差可能较大。在这些对象中,流入量和流出量的变化会影响被调参数的变化,同时,被调参数的变化亦会影响流入量和流出量的变化,即被调参数与流入量和流出量是相互影响的,我们称这种对象具有自平衡能力。若被调参数的变化对流入量和流出量没有影响,这种对象就没有自平衡能力。

一般温度、压力及液位对象大多具有自平衡能力。

四、反应曲线与时间常数

图 1-8a 所示为液位对象。在初始平衡状态时,流入量 $q_{\lambda 0}$ 与流出量 $q_{\text{出}0}$ 相等,液位稳定在 H_0 处。流入量 q_λ 由阀 A 控制,流出量依靠液位静压头从阀 B 自行流出,流出量与压头有关, $q_{\text{出}} = f(H)$ 。流出侧是有自平衡能力的。水箱截面积为 A ,容积为 V ,被调参数液位 H 为对象输出信号。

水箱蓄存量变化方程为

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} &= q_\lambda - q_{\text{出}} \\ A \frac{dH}{dt} &= q_\lambda - q_{\text{出}} \end{aligned} \quad (1-12)$$

流出量与液位高度有关,即

$$q_{\text{出}} = C_v \sqrt{H}$$

式中 C_v ——B 阀的流量系数。

故

$$A \frac{dH}{dt} + C_v \sqrt{H} = q_{\lambda} \quad (1-13)$$

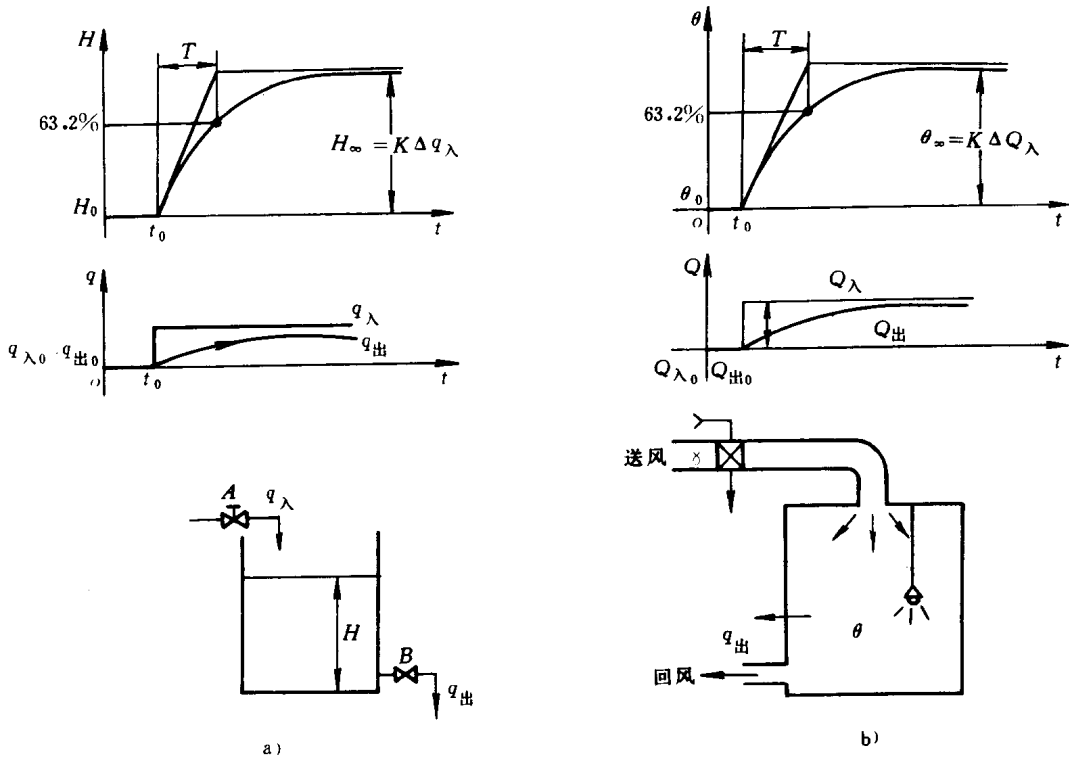


图 1-8 飞升曲线与时间常数

式(1-13)为液位动态方程,是一非线性微分方程。为建立增量方程,必须先把式(1-13)线性化。为避免调节系统方程的非线性,亦需事先线性化。

非线性方程的线性化就是在对象的输入信号与输出信号的工作范围内,把它的非线性关系用近似方法改为线性关系。

把变量的非线性函数用泰勒级数展开成这个变量额定值附近的增量表达式,然后略去高于一次的增量项,就可得近似的线性函数。据此,可把非线性函数 \sqrt{H} 写成

$$\begin{aligned} \sqrt{H} &= \sqrt{H_0} + \left(\frac{d\sqrt{H}}{dH} \right)_{H_0} \frac{\Delta H}{1!} + \left(\frac{d^2\sqrt{H}}{dH^2} \right)_{H_0} \frac{\Delta H^2}{2!} + \dots \\ &\approx \sqrt{H_0} + \left(\frac{d\sqrt{H}}{dH} \right)_{H_0} \Delta H = \sqrt{H_0} + \frac{1}{2\sqrt{H_0}} \Delta H \end{aligned} \quad (1-14)$$

初始稳态时,有

$$q_{\lambda 0} = q_{\text{出}0} = C \sqrt{H_0} \quad (1-15)$$

现将式(1-13)用初始值和微增量之和来表示,即

$$A \frac{d(H_0 + \Delta H)}{dt} + C_v \left[\sqrt{H_0} + \frac{\Delta H}{2\sqrt{H_0}} \right] = q_{\lambda 0} + \Delta q_{\lambda} \quad (1-16)$$

将式(1-16)减去初始稳态方程(1-15),有

$$A \frac{d\Delta H}{dt} + \frac{C_v}{2\sqrt{H_0}} \Delta H = \Delta q_\lambda \quad (1-17)$$

或

$$A \frac{2\sqrt{H_0}}{C_v} \frac{d\Delta H}{dt} + \Delta H = \frac{2\sqrt{H_0}}{C_v} \Delta q_\lambda \quad (1-18)$$

令

$$R = \frac{2\sqrt{H_0}}{C_v} \text{ (液阻系数)}$$

则液位对象时间常数为

$$T = RC = \frac{2\sqrt{H_0}}{C_v} A$$

所以

$$T \frac{d\Delta H}{dt} + \Delta H = R\Delta q_\lambda \quad (1-19)$$

略去增量符号“ Δ ”,写成

$$T \frac{dH}{dt} + H = R \cdot q_\lambda \quad (1-20)$$

这就是水箱液位对象的动态方程(对于流入侧干扰),是一阶微分方程式。这样的对象为单容对象,它只包含一个时间常数(对应于一个容量系数 C 与一个液阻系数 R)。如果将上述受阶跃干扰后的液位变化过程再记录下来,就可得到液位对象的反应曲线,亦称“飞升曲线”(图1-8a)。很明显,这一过程亦是自平衡的结果,方程式(1-20)的解,也就是图1-8a的反应曲线。

图1-8b是空调室例子,若空调室内负荷突然增加,此时送风量与温度不变,散热量 $Q_{出}$ 不是马上增加,故 t_0 加入扰动时刻, $(Q_\lambda - Q_{出0})$ 最大,故室温 θ 在 t_0 时刻上升速度最大。此后 $Q_{出}$ 亦逐渐增加,经一段时间后, $Q_\lambda = Q_{出}$,室温又重新稳于 θ_∞ ,亦可画出其反应曲线,如图1-8b所示。分析以上两例的被调参数变化过程可看到,液位与室温变化速度在 t_0 时刻最大,以后逐渐减小,最后变化速度等于零。该反应曲线是一指数曲线,即

$$H(t) = H_\infty (1 - e^{-\frac{t}{T}}) \quad (1-21)$$

$$\theta(t) = \theta_\infty (1 - e^{-\frac{t}{T}}) \quad (1-22)$$

其一般形式为

$$y(t) = y_\infty (1 - e^{-\frac{t}{T}}) \quad (1-23)$$

式中 $H(t)$ 、 $\theta(t)$ 、 $y(t)$ ——被调参数;

t ——时间变数;

e ——常数, $e=2.718$ 。

该指数曲线形状只取决于 T 值的大小。

T 为调节对象的时间常数,数值上等于对象的容量系数 C 和阻力系数 R 的乘积, $T=RC$ 。从式(1-23)可知: $t=0$ 时, $y=0$; $t=T$ 时, $y=63.2\%y_\infty$; $t=3T$ 时, $y=95\%y_\infty$; $t \rightarrow \infty$ 时, $y \rightarrow y_\infty$ 。

这表明,时间常数 T 在数值上等于对象受阶跃干扰后被调参数到达63.2%新稳态值所需的时间。时间常数 T 还可以这样描述:当阶跃干扰加入后,被调参数若保持初始最大速度变化,达到新稳态值 y_∞ 时所需时间就是时间常数 T 。按这一意义,如已从实验测得飞升曲线,只

要从飞升曲线的初始点作切线并和新稳态值相交,交点所对应时间就是时间常数 T (见图 1-8b)。

因从 t_0 点作切线不易作准确,故时间常数在实验测取时,可用 $y(t) = 63.2\%y_\infty$ 时所经历时间 t 等于 T 的方法来求取 T 值。

从图 1-8 还可看出,液位对象具有自平衡能力。被调参数新的稳态值 $H(\infty)$ 取决于干扰作用幅度 q_λ 的大小及对象传递系数 K 的大小,即

$$H(\infty) = Kq_\lambda$$

一般自调节过程时间 T , 可近似地认为 $T_s = 3T$, 因为加入干扰作用并经 T_s 时间后, 被调参数已达到

$$H(T_s) = Kq_\lambda(1 - e^{-3}) = 0.95Kq_\lambda = 0.95H(\infty)$$

$0.95H(\infty)$ 已经十分接近新平衡值 $H(\infty)$, 此时可以近似地认为自调节过程(反应曲线)已经结束。

图 1-9 中示出了对象时间常数分别为 T_1, T_2, T_3 容积数 $n=1, 2, \dots, 8$ 时, 在阶跃作用下被调参数的反应曲线。可以清楚地看到, 时间常数愈大, 反应曲线愈平坦, 受到干扰作用后, 恢复到新稳态的时间也愈长。时间常数小, 则情况相反。

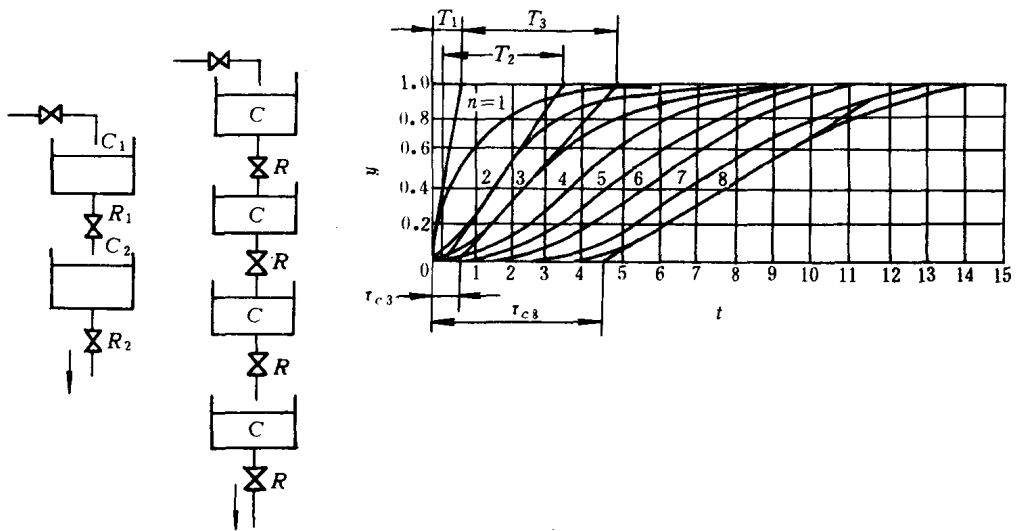


图 1-9 单容对象与多容对象反应曲线比较
 n —容积数 T_1, T_2, T_3 —时间常数

同样把多容对象和单容对象相比, 亦可推出与上面相同的结论。设该多容对象为 n 个时间常数均由 T 的单容对象串联组成。可以看出, 若组成的单容对象阻力系数 R 不变、传递系数 K 不变而仅增加容积数, 则稳态值 $H(\infty)$ 不会改变。但增加容积数会延长自调节过程时间, 若 $n > 2$, 则 $T_s \gg 3T$ (T 为单容对象时间常数)。

事实上对于多容对象, 若加入干扰作用后, 开始时被调参数上升速度很小, 甚至趋近于零, 以后才逐渐加速。容积数愈多, 总时间常数也愈大, 故自调节过程时间延长。其实质是容积数增加, 容量系数增大, 被调系数 H 的初始变化速度减小。

因为
$$\left(\frac{dH}{dt}\right)_{t=0} = Kq_\lambda(1 - e^{-t/T})\left(-\frac{1}{T}\right)$$