



普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
能源与动力工程系列教材

# 制冷装置自动化

(第2版)

朱瑞琪 编著



西安交通大学出版社  
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

# 制冷装置自动化 (第2版)

朱瑞琪 编著

西安交通大学出版社

## 内 容 提 要

本书内容分三部分。第一部分是有关自动控制理论方法的基本知识。第二部分讲述制冷装置运行中的工况参数控制及调节,安全保护系统以及系统中设备的控制。介绍制冷装置自动调节的原理方法,实施概要和实施过程。对模拟式控制和数字式控制系统均有详细说明,给出典型制冷装置的控制实例。第三部分讲述空调系统中的控制器件特性、选用原则、空调的基本控制回路,并给出 DDC 控制器的应用示例。

本书反映制冷空调控制的当前技术发展水平,为制冷空调专业的学生提供从理论到应用的完整知识,也可供研究生和从事该领域工作的科研及工程技术人员参考。

---

### 图书在版编目(CIP)数据

制冷装置自动化/朱瑞琪编著. —2 版. —西安:西安交通大学出版社,2009.2(2012.6 重印)  
ISBN 978-7-5605-2909-7

I. 制… II. 朱… III. 制冷装置-自动控制 IV. TB65

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 122032 号

---

书 名 制冷装置自动化(第 2 版)  
编 著 朱瑞琪  
责任编辑 邹 林

---

出版发行 西安交通大学出版社  
(西安市兴庆南路 10 号 邮政编码 710049)  
网 址 <http://www.xjtupress.com>  
电 话 (029)82668357 82667874(发行中心)  
(029)82668315 82669096(总编办)  
传 真 (029)82668280  
印 刷 陕西时代支点印务有限公司

---

开 本 727mm×960mm 1/16 印张 23.625 字数 441 千字  
版次印次 2009 年 2 月第 1 版 2012 年 6 月第 2 次印刷  
书 号 ISBN 978-7-5605-2909-7/TB·48  
定 价 35.00 元

---

读者购书、书店添货、如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。

订购热线:(029)82665248 (029)82665249

投稿热线:(029)82664954

读者信箱:jdlgy31@126.com

版权所有 侵权必究

## 第 2 版前言

本书自 1993 年出版以来,曾经 6 次印刷,受到广大师生和业内人士的关注和支持,作者深感欣慰。

为适应新的教学需要,经立项为普通高等教育“十一五”国家级规划教材,对本书再版。此次再版仍本着实用,重基本概念,密切结合制冷技术当前发展实际的宗旨。

十多年来,制冷技术迅速发展,制冷压缩机、热交换器、制冷系统设计等都不断迭新,新制冷剂更替,与之相应的制冷控制系统、器件及控制方法亦不断进步。再版内容因此进行了修改和充实,还增加了空调系统自动控制的内容。本教材基于作者多年从事“制冷装置自动化”和“建筑设备自动控制”课程的教学实践凝炼而成,希望它能够更好地服务于专业课教学。

本教材可以与制冷空调专业领域的以下国家级教材配套使用:《制冷与低温技术原理》(“十五”国家级规划教材,吴业正等编著)、《制冷压缩机》(“九五”国家级重点教材,缪道平 吴业正主编)、《制冷及低温装置》(“十五”国家级规划教材,吴业正 厉彦忠主编)。

香港理工大学王盛卫教授与我们的教学交流丰富本教材的内容,崔景谭、孟建军、殷光文为教材的编写提供了许多翔实的技术资料,在此表示感谢。

吴业正教授对书稿进行了周详的审阅,并提出宝贵的意见,特此致谢。

对本书中存在问题 and 不足之处,敬请读者批评指正。

作 者

2008 年 8 月 18 日

# 目 录

<b>第 1 章 自动控制基础</b> .....	(1)
1.1 自动控制系统概述 .....	(1)
1.2 自动控制系统的控制品质 .....	(5)
1.3 受控过程(对象)的特性 .....	(8)
1.4 控制器特性与控制过程 .....	(13)
1.5 控制系统设计与控制特性分析的要点 .....	(24)
1.6 数字式 PID 和直接数字控制(DDC) .....	(46)
1.7 自适应控制 .....	(54)
1.8 多回路控制系统 .....	(60)
<b>第 2 章 制冷系统的自动调节</b> .....	(72)
2.1 制冷剂流量调节 .....	(72)
2.2 液位控制 .....	(102)
2.3 蒸发压力控制 .....	(114)
2.4 导阀与主阀 .....	(125)
2.5 吸气压力控制 .....	(134)
2.6 冷凝压力控制 .....	(137)
2.7 压缩机能量调节 .....	(151)
2.8 被冷却对象温度控制 .....	(177)
2.9 流动的截止和切换 .....	(182)
<b>第 3 章 制冷装置的自动保护</b> .....	(192)
3.1 压力保护与压力控制器 .....	(192)
3.2 压差保护与压差控制器 .....	(197)
3.3 温度保护与温度控制器 .....	(202)
3.4 压缩机电机保护 .....	(210)
3.5 溢流机构 .....	(210)
3.6 止回阀 .....	(215)
3.7 观察镜 .....	(219)

<b>第 4 章</b>	<b>制冷系统中各设备的控制</b>	(222)
4.1	蒸发器除霜和除霜控制	(222)
4.2	强制循环供液的控制	(229)
4.3	气液分离器的控制	(232)
4.4	冷冻油系统的控制	(236)
4.5	不凝性气体分离器的控制	(242)
<b>第 5 章</b>	<b>典型制冷装置的自控系统</b>	(244)
5.1	小型商用制冷装置	(244)
5.2	多温冷库	(246)
5.3	空调用制冷装置	(250)
5.4	氨冷库制冷装置	(252)
5.5	螺杆式冷水机组	(259)
<b>第 6 章</b>	<b>制冷装置电子控制系统</b>	(262)
6.0	概述	(262)
6.1	传感器	(268)
6.2	执行器(电控阀)	(273)
6.3	电子控制器(EKC)	(289)
6.4	制冷装置电子控制	(310)
6.5	监测、网络化管理及其它	(322)
<b>第 7 章</b>	<b>空调系统的自动控制</b>	(332)
7.1	基本控制器件	(333)
7.2	空调系统中的基本控制	(346)
7.3	定风量空调系统和变风量空调系统的控制	(360)
7.4	DDC 控制器应用例	(364)
<b>参考文献</b>		(370)

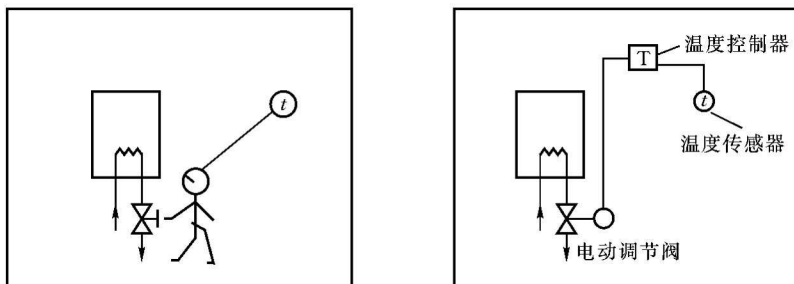
# 第 1 章 自动控制基础

自动控制技术范围很广,控制理论的发展经历了经典控制理论、现代控制理论和智能控制理论,经典控制理论是控制技术的基础理论。制冷空调中遇到的控制问题大多数可以用经典控制理论回答。本书重点在于制冷空调领域中所应用的控制,掌握基本的理论基础是必须的。

## 1.1 自动控制系统概述

自动控制系统的定义:霍尼韦尔(Honeywell)所做的定义是“自动控制系统是这样的一个系统,它对一种变化或不平衡做出反应,通过调整其它参数,使系统回复到所期望的平衡状态。”

自动控制是从人工控制基础上建立和发展起来的。图 1.1(a)是人工控制室温的一个例子。控制目的是保证室温被维持为要求值或在指定的范围变化。室内设有热交换器,热交换盘管中流过冷水(或热水)使房间冷却(或加热)。盘管上设有调节阀。室内温度用温度计测量并显示。让我们来看看操作者是如何控制室温的。操作者观察温度计显示值,将它作为室温的测量值,拿测量值与要求值比较。如果测量值与要求值相同,则不加调节。否则便执行改变阀门开度的操作;如果测



(a)人工控制

(b)自动控制

图 1.1 室温控制

量值比要求值高,调节阀门增大冷水流量;反之,如果测量值低于要求值,则调节阀门减少冷水流量。而调节操作量的大小,则取决于操作者根据测量值与要求值之间偏差大小所做的判断。通过这样不断的调节,使房间温度维持在要求的水准。

人工控制由人眼的观察,大脑的判断和肢体操作完成控制。显然,人工控制不仅耗时费力,而且控制品质难以保证,受太多的不确定因素影响,如:操作者的生理机能、操作者的经验、判断的随机性,等等。用自动化仪表、控制器以及伺服机构替代人的控制行为便构成自动控制。室温自动控制如图 1.1(b)所示。

通过此例说明过程控制的基本要素是:检测偏差和纠正偏差。

### 1.1.1 闭环控制系统组成

简单控制系统由受控过程(或受控对象)、发信器、控制器和执行器组成闭环回路。

图 1.2 是一个最简单的冷库温度控制系统。冷风机置于库内,通过制冷剂蒸发提供冷量,用以平衡库内的热负荷(包括贮物的释热、库内有关设备的发热量和由于库内外温差通过建筑围护结构传入库内的热量等)。食品冷藏要求库房温度  $Q$ (受控参数)保持恒定。为此,在蒸发器的供液管上设电磁阀(执行器),用感温包(发信器)感应库房温度  $Q$ ,传递压力信号  $p$  给温度控制器(控制器)。当库房温度上升,超过给定值的上限时,温度控制器控制电磁阀打开,供液,在蒸发器中产生制冷效应,于是库温下降。当库房温度降低到超过给定值的下限时,温度控制器又控制电磁阀关闭,停止供液,中断制冷作用。如此反复,使库房温度维持在给定值的附近做小范围波动。这是一种最简单的双位控制系统。因为电磁阀的动作是间断的,所以对蒸发器的供液量调节不连续。

又如在制冷系统中,有自由液面的设备或容器(满液式蒸发器、中间冷却器、低压循环液桶等)要求其中的液面维持一定。采用浮球调节阀控制液位的自动控制原理如图 1.3 所示。这里,容器是受控对象,液位是受控参数,用浮球感应液位变化(发信)与给定值比较,使杠杆机构动作(控制)带动阀杆移动(执行),使阀开度改变,调节供入容器的液量,使与流出的液量相平衡,从而维持液位恒定。这是典型

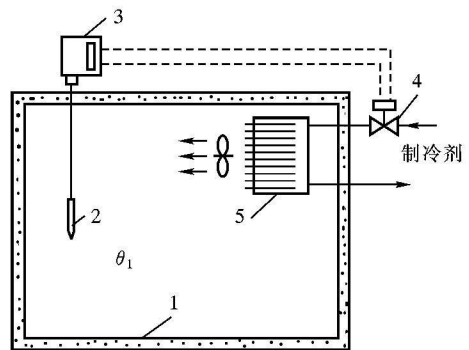


图 1.2 库房温度自动控制系统

1—冷库;2—感温包;3—温度控制器;

4—电磁阀;5—冷风机(蒸发器)



的比例控制系统例。而且,浮球调节阀在结构上是将发信器(浮球)、控制器(杠杆机构)和执行器(阀件)做成一体的调节装置。特点是结构紧凑和保证密封,制冷系统的传统自控器件常取这种形式。

自动控制原理对控制系统的研究方法是将具体系统抽象化、一般化,用方框图表示,并建立数学模型加以研究。

现将上两例加以抽象,抛开它们各自的具体物理内容,可以概括出:自动控制系统是由受控对象(或受控过程)、发信器(传感器)、控制器、执行器这样四个基本环节组成的闭环系统。其中发信器、控制器和执行器属于控制设备(调节装置)。

有时,将发信器、执行器和受控对象合起来叫做广义对象。于是也可以说,自动控制系统是由调节装置和受控对象两部分组成的闭环系统,或者说是由控制器和广义对象两部分组成。

受控参数是工艺过程中的某个需要加以控制的工艺参数,发信器检测受控参数的变化并与给定值相比较,向控制器输入偏差信号。控制器根据偏差信号,按照一定的控制规律(控制算法)运算,给出控制操作指令传递到执行器,执行器按控制器的指令完成调节动作。受控过程受到调节作用而影响受控参数。

用方框图表示闭环控制回路,如图 1.4 所示。方框图完整地表达了自动控制系统的组成环节及环节之间的相互作用与信号传递。图中,每个方框表示一个具体的作用环节,每个环节都有输入信号和输出信号,方框之间的连线和箭头表示环节之间的信号联系和信号的传递方向。

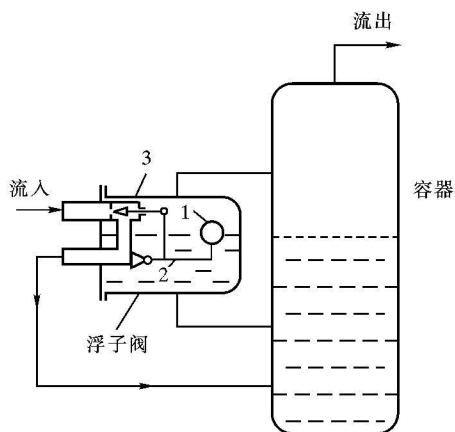


图 1.3 液位的自动控制系统  
1—浮子;2—杠杆机构;3—阀件

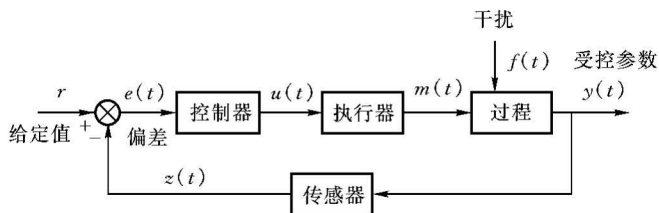



图 1.4 自动控制系统方框图

在方框图中,受控参数是受控过程的输出信号(如前两例中的库温、液位)。凡是引起受控参数波动的外来因素(除调节作用外)统称为干扰作用。如在库温调节中室外温度变化、货物热负荷变化等都是引起库温变化的干扰作用。干扰作用和调节作用对受控参数影响的信号传递通道分别称为干扰通道和调节通道,它们均为受控过程的输入信号。干扰作用破坏调节系统的平衡状态,使受控参数偏离给定值,这是不可避免的客观因素。而控制所给出的调节作用则力图消除干扰对受控参数的影响,使之恢复到给定值。自动调节过程就是调节与干扰这一对矛盾在调节系统中的对立和统一。



图 1.4 中符号  表示比较元件。它往往是控制器的一个组成部分,在图中将它单画出来是为了说明受控参数测量值与给定值的比较作用。比较元件上常常作用着多个输入量和一个输出量,输出量等于输入量的代数和。

从信号传递的角度由方框图可以看出,自动控制系统是一个闭合回路,故为闭环系统。另外,系统的输出是受控参数,但它经过发信器后又返回到控制器的输入端。这种把系统的输出信号又引到系统输入端的作法叫做反馈。如果反馈信号使受控参数的变化减小,称为负反馈;反之,称为正反馈。负反馈信号(即受控参数的测量值) $z$  进入比较元件时取负值,而给定值  $r$  取正值,所以比较元件输出的偏差信号为  $e=r-z$ 。在自动控制系统中一般都采用负反馈,它是按偏差进行控制的,所以,产生偏差是自动调节的必要条件。

### 1.1.2 控制系统分类

按照一个控制系统中用什么信息产生控制作用,可将所有的控制系统分为两大类:开环系统和闭环(反馈)系统。这里只说明闭环控制系统的分类。

(1)按受控参数给定值的变化规律,可以分为:

- ①定值调节系统,给定值为某一确定的数值;
- ②程序调节系统,给定值按指定的规律变化;
- ③随动调节系统,给定值事先不能确定,随机变化。

在分析自动控制系统特性时,不同的给定值形式涉及到不同的分析方法。制冷、空调的自动控制系统中应用最普遍的是定值调节。也有用程序调节和随动调节系统的场合。

(2)按实现调节动作的特征,可以分为:

- ①连续调节系统,系统所有参数在调节过程中连续变化;
- ②断续调节系统,在调节过程中系统中有一个以上的断续变量。

还有一些其它分类方法,如按控制的调节规律可分为:双位控制、三位控制、比

例控制、比例积分控制、比例微分控制和比例积分微分控制。按调节过程结束后受控参数与给定值的偏差可分为：有静差系统和无静差系统。

### 1.1.3 干扰作用

过程所受到的干扰作用大小一般是随时间变化的,其变化没有一定的规律。在分析与设计自动控制系统时,为了方便常根据实际情况将干扰典型化,研究在典型干扰作用下控制系统的响应特性。典型的干扰形式有:阶跃作用、等速作用、周期波动作用等,其中最常用的是阶跃干扰。

所谓阶跃干扰是在  $t_0$  时刻突然作用于系统的扰动量,以后不再消失也不随时间变化。阶跃干扰的函数形式为

$$f(t) = \begin{cases} 0, & t < t_0 \text{ 时} \\ m, & t \geq t_0 \text{ 时} \end{cases} \quad (1.1)$$

式中:  $m$  是扰动量,为常量。

若扰动量等于 1,即当  $m=1$  时,则为单位阶跃干扰,见图 1.5。它的动态方程为

$$f(t) = \begin{cases} 0, & t < t_0 \text{ 时} \\ 1, & t \geq t_0 \text{ 时} \end{cases} \quad (1.1a)$$

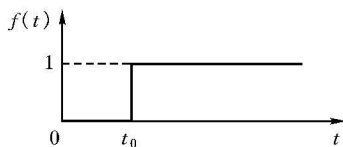


图 1.5 单位阶跃干扰

对于调节来说,阶跃干扰是最不利的干扰形式,但它又最容易实现。控制系统若能很好地克服阶跃干扰,则其它形式的干扰也就不难克服了。

## 1.2 自动控制系统的控制品质

设计一个控制系统,希望它能够很好地实现控制目的。希望它受到扰动后所作出的调节能够保证很快地平息受控参数的波动,使之重新稳定下来,而且尽可能准确地稳定在受控参数的期望值上。也就是说,对于控制品质的要求概括为:稳定、准确、快速。

### 1.2.1 过渡过程

原来处于稳定平衡态的自动控制系统,当对象受到干扰时,受控参数开始变化,但通过调节作用可以克服干扰,使系统在一个新的平衡态重新稳定下来。系统的稳定态为“静态”。从干扰发生、经历调节再到新的平衡这段过程中,系统的各环节和各参数都在不断变化,这种状态为“动态”。受控参数在动态过程中随时间的变化叫做过渡过程。可见,过渡过程是自动控制系统对干扰的动态反应,故又称之为系统的响应特性。考察系统的过渡过程特性,可以获得控制系统的控制品质。

一般来说,对象受阶跃干扰后,系统可能出现的过渡响应过程有如图 1.6 所示的四种典型类型。

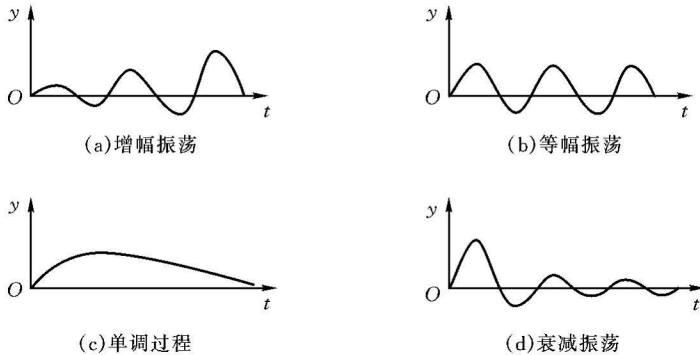


图 1.6 各种典型的过渡过程

图 1.6(a)为增幅振荡,控制的结果是受控参数越来越偏离给定值,系统不能稳定,这种情况无法实现调节。因而,自动控制不能够接受这样的过渡响应。

图 1.6(b)为等幅振荡,受控参数呈既不发散、也不衰减的等幅振荡,它也是不稳定过程,双位调节中就呈现这样的过程。但在连续调节系统中,这种情况也不允许。

图 1.6(c)为单调过程,受控参数偏离给定值后,逐渐缓慢地趋近给定值。它属于非周期调节,系统能够回到稳定。因此,这种情况在自动调节中是允许的,但由于调节过程时间较长,效果并不理想。

图 1.6(d)为衰减振荡,受控参数偏离给定值后,经过两三个周期的振荡能够很快趋于平衡值,这种过渡过程比较理想。在连续调节中希望得到如图 1.6(d)所示的衰减振荡。

### 1.2.2 控制品质指标

对照衰减振荡的过渡过程曲线图 1.7,定量地给出控制系统的下述品质指标。

(1) 衰减比  $n$  衰减比是反映受控参数振荡衰减程度的指标,它等于过渡响应的衰减振荡曲线上,第一个波峰与第二个波峰之比,即

$$n = \frac{M}{M'} \quad (1.2)$$

衰减比是反映控制响应稳定性的指标,用  $n$  判断振荡是否衰减和衰减程度: $n > 1$  时,系统稳定; $n = 1$  时,等幅振荡; $n < 1$  时,增幅振荡。 $n > 1$ ,但接近 1 时,衰减很慢,相当于单调过程。通常,以  $n = 4 \sim 10$  为宜。表明调节作用能够很快克服

干扰,将受控参数的波动恢复到允许的范围之内。

(2)静态偏差  $C$  过渡过程终了时,受控参数稳定在给定值附近,稳定值与给定值之差叫做静态偏差,简称“静差”。 $|C|=0$  时,为无静差; $|C|\neq 0$  为有静差。生产工艺要求静差限制在一个允许的范围之内。

(3)超调量(动态偏差)  $M$  过渡过程中,受控参数相对于新稳态值的最大波动量。

(4)最大偏差  $A=M+C$  它是受控参数相对于给定值的最大偏差。若  $A$  过大,且偏离时间过长,系统离开指定的工艺状态越远,调节品质越差。

(5)振荡周期  $T_p$  和振荡频率  $f$  相邻两个波峰所经历的时间为振荡周期。其倒数为振荡频率,即  $f=1/T_p$ 。

(6)调节过程时间  $t_s$  它指控制系统受到干扰作用后,从受控参数开始波动至达到新稳态值所经历的时间间隔。 $t_s$  小,表示控制过程进行得快,系统能够较迅速地抵抗干扰恢复到稳态,即使干扰频繁,系统也能适应,因而调节质量好。一般希望  $t_s=3T_p$ 。

以上指标定量地描述了控制品质的稳定性、准确性和快速性。对控制系统的稳定性要求是首要的,其它品质指标应满足制冷工艺的要求,例如在食品冷藏中,为了保证食品的质量,要求库温的瞬时偏差不超过  $5^{\circ}\text{C}$ ,波动不超过  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。这就要求库温自动控制系统须保证最大偏差不超过  $5^{\circ}\text{C}$ 、静差不超过  $1^{\circ}\text{C}$  的控制品质。要根据实际要求设计控制系统,没有必要高于制冷工艺要求片面追求控制品质而使控制系统过于复杂和昂贵。一般食品冷藏中往往对库温的动差要求可以放宽,对控制时间的要求也不太高,而对静差的要求要严格一些,因为它关系到冷藏食品的质量。

控制品质由控制系统的过渡过程曲线来描述。过渡过程是整个控制系统的输出对已知输入的反应,又叫响应过程。系统输出对输入的反应叫做系统的响应特性;对系统中的某个环节而言,某环节的输出对输入的反应叫做该环节的特性(环节的响应特性)。整个系统既然是由诸环节所组成的,显然,系统特性将由各组成

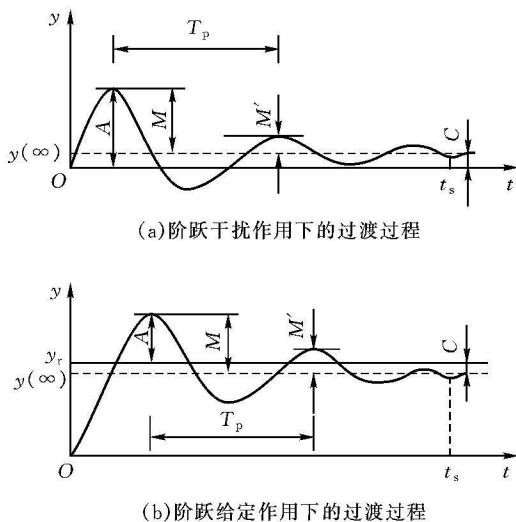


图 1.7 控制品质指标示意图

环节的特性所决定,其中最主要的是受控过程特性和控制器特性,下面将详细讨论。

## 1.3 受控过程(对象)的特性

### 1.3.1 对象特性

#### 1. 对象的负荷特性

自动控制过程处于稳定态时,单位时间流入或流出对象的物量或能量叫做对象的负荷。比如库温控制系统中,库温一定时,单位时间流入或流出库房的热量是冷库对象的热负荷;液位控制系统中,液位恒定时,单位时间流入或流出容器的制冷剂流量是容器对象的负荷。

如前所前述,库温受干扰影响要发生变化。为保持其恒定,必须施加控制作用。不同时期库房的负荷是变化的。如果对象的负荷变化剧烈,要求自动控制装置具有较高的灵敏度和动作速度,能够在受控参数出现很小偏差时即开始控制动作,并能迅速控制以恢复参数的稳定,因而对控制装置的要求较高。如果负荷变化较慢,则对控制装置的要求可适当放宽。可见负荷的变化情况对控制系统的工作有重要意义。

#### 2. 对象的容量及容量系数

容量是指受控参数为给定值时,对象中能够蓄存的能量或者物量。容量系数是指受控参数改变一个单位量时,对象容量的变化。

仍以前两例而言:库房对象的容量是库温为给定值时,库房的蓄热量即内能 $U$ ;它的容量系数为 $\Delta U/\Delta\theta_1$ ,即库房的热容量。容器对象的容量是给定液位 $H$ 时它容纳的液体量 $V=SH$ ( $S$ 为截面积),而它的容量系数为 $\Delta V/\Delta H=S$ 。

应指出,只有在对象的流出口上存在某种阻力时,对象才具有容量。例如,热阻为零的库房没有容量,无底的容器也没有容量,因为它们流出口上没有阻力。

容量系数反映同样干扰下受控参数偏离给定值的程度。容量系数越大,偏离程度越小,系统越容易稳定;反之,越不容易稳定。例如,围护结构良好的大型冷库停止供冷后库温不会迅速升高,而对于小型冷柜,停机后箱内温度会很快回升。

对象可能只有一个容量(单容对象),也可能有多个容量(多容对象)。理论上,单容对象在各点上受控参数具有同一数值,可视为集中参数对象。多容对象可以看成是由多个集中容量通过某些阻力联系在一起的对象,每个容量有各自的特性。

#### 3. 对象的自平衡性

自平衡是对象的一个重要特性。当干扰不大时,即使没有调节作用,受控参数

变化到使对象流入与流出间建立起新的平衡时,也将稳定下来。对象在受干扰时,靠自身参数调整自动恢复平衡的能力叫做自平衡能力。对象达到自平衡所经历的过程叫自平衡过程,自平衡过程可以用对象的反应曲线描述。反应曲线是对象受阶跃干扰后受控参数随时间的变化曲线,又叫“飞升曲线”。它表示对象的动态特性,可以通过实验测量得出,也可通过建立对象的动态数学模型求解得出。

### 1.3.2 对象的动特性微分方程及反应特性

理论分析受控过程特性的方法是:根据支配对象的物理规律(例如能量平衡、质量平衡、力平衡……等),找出对象输出量与输入量的关系,建立起对象的动态特性微分方程。用数学方法求解,得出反应曲线,从而定量求出对象的各特性参数。

下面以图 1.2 所示的冷库为例说明建立对象数学模型和求解特性参数的方法。为简化起见,将它作为集中参数的单容对象。

以库温  $\theta_1$  为受控参数。忽略库内实际存在的各种非线性因素和温度分布的不均匀性。根据能量守恒,单位时间流入与流出库房的热量之差应等于库房内能的变化率,即

$$C_1 \frac{d\theta_1}{dt} = Q_1 + Q_2 - rq_m \quad (1.3)$$

式中: $C_1$  为库房热容量(kJ/°C); $t$  为时间(s); $rq_m$  表示制冷剂蒸发带出的热量(kW); $r$  和  $q_m$  分别是制冷剂的潜热(kJ/kg)和质流量(kg/s); $Q_1$  为库内各种发热量(kW); $Q_2$  为通过围护结构环境向库内的传热量(kW)。

$$Q_2 = KF(\theta_a - \theta_1) \quad (1.4)$$

式中: $\theta_a$  为库外环境温度(°C); $K$ 、 $F$  分别为围护结构的平均传热系数(kW/(m<sup>2</sup>·°C))和传热表面积(m<sup>2</sup>)。

$$\text{库房总热阻} \quad R_1 = \frac{1}{KF} \quad (1.5)$$

将式(1.4)和式(1.5)代入式(1.3),并经过整理,得

$$R_1 C_1 \frac{d\theta_1}{dt} + \theta_1 = (\theta_a + R_1 Q_1) - R_1 r q_m = R_1 r \left[ \left( \frac{\theta_a}{r R_1} + \frac{Q_1}{r} \right) - q_m \right] \quad (1.6)$$

利用以下代换

$$T_1 = C_1 R_1 \quad \text{时间常数} \quad (1.7)$$

$$K_1 = R_1 r \quad \text{放大系数} \quad (1.8)$$

$$\theta_f = \frac{\theta_a}{R_1 r} + \frac{\theta_1}{r} \quad \text{干扰量折算成供液量的变化} \quad (1.9)$$

$$\theta_m = -q \quad \text{控制量(供液量)} \quad (1.10)$$

得

$$T_1 \frac{d\theta_1}{dt} + \theta_1 = K_1(\theta_f + \theta_{q_m}) \quad (1.11)$$

上式就是库房单容对象的简化数学模型。其中,等号左边含对象的输出参数  $\theta_1$ ,等号右边含对象的输入参数  $\theta_f$  和  $\theta_{q_m}$ 。

自动控制中研究的是给定平衡受到破坏时,对象输出和输入参数的波动过程。因此,需要以相对于平衡态的参数增量形式建立对象的动态特性方程。可以看出,式(1.11)是线性常系数微分方程。不难证明,线性环节的微分方程与其增量微分方程具有相同的形式。为了简化表达,省略增量符号,式(1.11)也就是要建立的对象的增量微分方程,只不过将式中的各参数  $\theta_1, \theta_f, \theta_{q_m}$  分别看作是它们相对于平衡态时值( $\theta_{10}, \theta_{f0}, \theta_{q_m0}$ )的增量( $\Delta\theta_1, \Delta\theta_f, \Delta\theta_{q_m}$ )。

式(1.11)中,输入侧  $\theta_1$  是受控参数的波动量, $\theta_f$  和  $\theta_{q_m}$  都是引起  $\theta_1$  变化的因素。 $\theta_f$  起干扰作用, $\theta_{q_m}$  起调节作用。

当只有干扰作用时

$$T_1 \frac{d\theta_1}{dt} + \theta_1 = K_1\theta_f \quad (1.12)$$

当只有调节作用时

$$T_1 \frac{d\theta_1}{dt} + \theta_1 = K_1\theta_{q_m} \quad (1.13)$$

下面考察在阶跃干扰作用下对象的动态响应。

若干扰为幅值  $m$  的阶跃作用,即

$$\theta_f = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ m, & t \geq 0 \end{cases} \quad (1.14)$$

则由式(1.12),对象的微分方程为

$$T_1 \frac{d\theta_1}{dt} + \theta_1 = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ K_1 m, & t \geq 0 \end{cases} \quad (1.15)$$

初始条件

$$\theta_1(0) = 0 \quad (1.16)$$

从而得出式(1.15)的解为

$$\theta_1 = K_1 m(1 - e^{-\frac{t}{T_1}}) \quad (1.17)$$

所以,新稳态值为

$$\theta_1(\infty) = K_1 m \quad (1.18)$$

受干扰后, $\theta_1$  的初始变化速度为

$$\left. \frac{d\theta_1}{dt} \right|_{t=0} = \frac{K_1 m}{T_1} \quad (1.19)$$



图 1.8(a)是按反应式(1.17)作出的对象对阶跃作用即式(1.14)的反应曲线。又称之为飞升曲线。

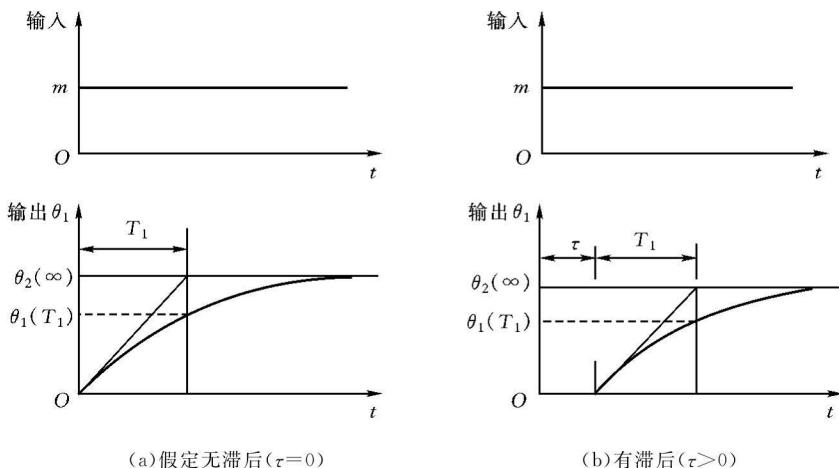


图 1.8 单容对象的反应曲线

该反应曲线说明:当库房受阶跃扰动时,比如新进入一批货物,由于突然加入了热负荷,库温 $\theta_1$ 上升,起始时上升速度最大。随着 $\theta_1$ 的升高,库内外传热温差( $\theta_a - \theta_1$ )减小,环境传入库房的热量减小,总负荷与制冷量的差逐渐减小,于是使 $\theta_1$ 的上升逐渐变慢,直至总负荷与制冷量达到新的平衡, $\theta_1$ 稳定在一个新的较高温度上,即 $\theta_1(\infty)$ 。

图 1.8(a)是假定对象受到阶跃输入作用后,受控参数立即变化的反应过程。实际测量对象的飞升曲线表明:事实上,对象的输入变化后,受控参数并非立即开始改变,而总是要滞后一段时间才开始变化,有滞后的对象反应曲线如图 1.8(b)所示。

参照飞升曲线,用以下特性参数定量描述对象对于阶跃作用的响应特性。

(1)放大系数  $K_1$  放大系数又叫传递系数,它等于飞升过程中受控参数新、旧稳定值的差与干扰幅之比。 $K_1$ 只与干扰前后的两个稳态值有关,而与变化过程无关,所以它代表对象的静特性,反映了对象的自平衡性。 $K_1$ 越大,自平衡能力越差; $K_1$ 越小,自平衡能力越强。

(2)时间常数  $T_1$  它是对象受干扰后,若受控参数以初始最大变化速度恒速变化到新稳态值所需的时间。在反应曲线开始上升的点处作切线,该切线与新稳态值线的交点所对应的时间间隔即是  $T_1$ ,见图 1.8(a)。

利用式(1.17)还可以求出,被调参开始变化后经过时间  $T_1$ ,其变化量为