

石 景 作 编 译

玻璃工业仪表 和自动化

• 轻 工 业 出 版 社 •

TQ171.6

4

玻璃工业仪表和自动化

石景作 编译

轻工业出版社

内 容 提 要

本书分五章分别介绍了原料和配合料生产过程自动化、窑炉热工参数的自动检测、自动调节、玻璃熔化工艺过程的自动控制系统以及计算机控制系统。

本书主要供瓶罐、器皿、仪器、药用等玻璃厂从事自动化工作的科技人员及有关院校师生参考。

玻璃工业仪表和自动化

石景作 编译

•
轻工业出版社出版

(北京阜成路8号)

轻工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

•
850×1168毫米1/32印张，12²⁰/32插页，4字数，322千字

1986年7月 第一版第一次印刷

印数：1-4,000 定价：3.10元

统一书号：15042·1768

序 言

七十年代以来，我国玻璃工业自动化水平有了显著提高，大部分玻璃厂已经建立了窑炉的自动检测和调节系统，有些工厂还建立了自动化配料系统，成型机自动控制系统。近年来少数工厂开始采用微型计算机控制玻璃窑炉热工过程和配料生产过程。尽管如此，和石油、化工、冶金、电力等工业部门相比，和发达国家相比，我国玻璃工业仪表和自动化仍然比较落后。

为了加速实现玻璃工业现代化，应尽快提高本行业自动化水平。本书编译了国内外玻璃工业仪表和自动化资料。以供从事玻璃工业仪表和自动化的工人和技术人员参考。

在编译中，参阅了苏联轻工业出版社1977年出版的《玻璃生产工艺过程自动检测与调节》和苏联建筑工业出版社列宁格勒分社1975年出版的《玻璃生产过程自动控制》，以及大量英、美、日的文献资料，此外收集了国内玻璃行业采用自动化仪表和系统的先进经验。

限于编译者的外语水平和专业水平，编译中谬误在所难免，敬希读者批评指正。

本书承蒙轻工业部设计院金效先总工程师审阅，提出了许多宝贵意见，在此表示诚挚地感谢。编译过程中还得到许多同志的帮助，恕不一一列名，一并表示衷心地感谢。

目 录

绪论	(1)
第一节 工业控制系统的基本原理.....	(1)
第二节 国产自动化仪表概况.....	(11)
第一章 原料和配合料生产过程自动化	(18)
第一节 原料加工过程的自动化系统.....	(18)
第二节 配合料生产过程自动化.....	(19)
第三节 原料重量的自动检测——自动配料秤.....	(32)
第四节 料仓料位的检测.....	(55)
第五节 原料和配合料湿度的检测.....	(65)
第六节 化学成分和配合料均匀度的检测.....	(74)
第二章 玻璃窑炉热工参数的自动检测	(76)
第一节 温度测量.....	(76)
第二节 压力和流量的测量.....	(108)
第三节 玻璃液面的测量.....	(142)
第四节 废气的成分分析.....	(180)
第三章 玻璃窑炉热工参数的自动调节	(193)
第一节 玻璃窑炉的控制任务及其动特性.....	(193)
第二节 玻璃液面的自动调节.....	(196)
第三节 炉压的自动调节.....	(209)
第四节 炉温的自动调节.....	(220)
第五节 燃料-助燃空气比值的自动调节.....	(236)
第六节 玻璃液理化参数的检测与调节.....	(247)
第七节 蓄热式玻璃窑炉火焰换向的自动控制.....	(270)

第四章 玻璃熔化工艺过程的自动控制系统	(290)
第一节 窑炉热工制度的一般控制系统	(290)
第二节 分区供热的玻璃窑炉热工制度控制系统	(293)
第三节 每对小炉燃烧状态的控制系统	(302)
第四节 生产瓶罐玻璃、优质玻璃及仪器玻璃的 蓄热式窑炉热工制度的控制系统	(311)
第五节 料道燃烧系统及其控制	(327)
第六节 玻璃窑炉自动控制的技术经济效果	(336)
第五章 玻璃熔化过程计算机控制系统	(340)
第一节 配料-混料-输送计算机分级控制系统	(341)
第二节 玻璃窑炉分散型综合控制系统	(345)
第三节 玻璃窑炉计算机控制算法	(360)
第四节 采用微型计算机的窑炉燃烧控制系统	(373)
第五节 玻璃窑炉的计算机最佳控制	(379)
第六节 计算机控制窑炉的经济性	(382)
参考文献	(385)

绪 论

第一节 工业控制系统的基本原理

一、工业控制系统的分类

工业控制系统按照控制原理可以分成两大类，即开环控制系统和闭环控制系统。

开环控制系统由控制器、执行器和控制对象组成。控制器按照事先规定的要求发出命令，使执行器按一定规律动作，为控制对象服务。命令执行的结果，控制器既无从知道，也无法改变。玻璃工业中，自动配料系统、混料系统、输送系统、以及窑炉上的自动火焰换向系统，均属于开环控制系统。

闭环控制系统又称反馈控制系统。在这种系统中，利用检测元件和变送器，将控制对象在执行器动作后的结果，即被控量的变化测量出来，并回输，亦即反馈到控制器，进行分析比较，判断下一步应如何动作，并继续向执行器发出命令，直到动作的结果——被控量变化，与预先规定的相符为止。这种系统通常称作自动调节系统。

按照调节系统输入信号性质可分为三种

1. 恒值调节系统

这种系统的输入信号为定值，它用于要求被调量保持恒定的场合。由于玻璃熔化过程为连续生产过程，炉温、炉压，液面等调节系统均属此类。

2. 随动调节系统

这种系统的输入信号是随机变化的，系统能使被调量迅速而

准确地跟随输入量变化。

3. 程序调节系统

这种系统的输入信号是按一定程序变化的，是一个给定的时间函数。光学玻璃的精密退火控制系统即属此类。

除上述分类外，自动调节系统还可分为单回路和多回路调节系统：单变量和多变量调节系统：线性和非线性调节系统：连续和断续调节系统等等。

二、自动调节系统的基本构成

任何调节系统基本上包括五个部分，即调节对象、检测、变送单元，调节器（包括比较环节和定值器），执行器以及调节机构。调节系统各组成部分之间的信号传递及相互影响，如图1所示。

图中比较器的功能是完成 $e = R - Z$ 的运算， R 为定值器输出的参比值，即给定值， Z 为被调量的测量值，即反馈量。这种系统结构框图简单明确地表示出系统中各组成部分之间的相互关系和信号传递。因此它是分析调节系统的基本工具和方法。图中各部分意义如下：

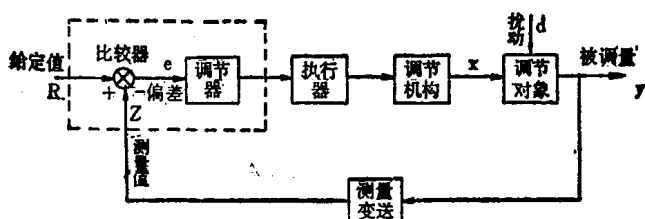


图1 自动调节系统结构框图

调节对象 系指被控制的工艺设备或装置。对于特定的某个工艺参数，调节对象只是工艺设备的某个通道。例如玻璃窑炉炉

温调节对象是指窑炉的燃料流量-炉温通道。

被调量 y 根据工艺规程,某些工艺参数必须维持在规定的变化范围内,如果对他们进行检测和调节,这些参数就叫被调量。

检测变送单元 包括检测元件和变送器。例如热电偶、节流装置——孔板、喷嘴等就是检测元件。检测元件输出信号如果适合调节器要求就无须变送器,直接将信号送至调节器即可;如果不适合调节器要求,则经过变送器转换成一定的信号输出,与调节器输入要求一致。如气动单元组合仪表的标准信号为 $0.2 \sim 1.0$ 公斤/厘米²,电动单元组合仪表中,DDZ-Ⅰ型标准信号为 $0 \sim 10$ 毫安,DDZ-Ⅱ则为 $4 \sim 20$ 毫安或 $1 \sim 5$ 伏。

调节器 它将检测变送单元的输出量 Z 和参比值 R ,即给定值,进行比较,并将比较后的偏差信号 e 放大,按照一定的规律输出调节信号。它是调节系统的神经中枢。

执行器和调节机构 调节机构是改变调节对象输入量的器具,如阀门、闸板之类。使调节机构动作的动力装置就叫执行器,有电动执行器,气动执行器和液动执行器三种。在很多情况下,执行器和调节机构组成一体,如气动薄膜调节阀,电动调节阀等。

控制作用(或调节作用) x 克服扰动,使被调量恢复到给定值的手段就叫控制作用或调节作用。控制作用所凭借的介质称为调节介质,燃料是炉温的调节介质,配合料是玻璃液面的调节介质。实际上控制作用就是调节机构的结果,就是调节对象的输入量。

扰动 d 在生产过程中凡是影响被调量的各种作用都称为扰动,或称为干扰。自动调节的任务就在于克服扰动,维持被调量的稳定,或依一定规律变化。

三、工业调节器的特性

工业调节器的特性指的是它输出信号的规律，称之为调节规律。基本调节规律有如下几种：

1. 位置式调节

位置式调节包括两位和三位调节，其动作特性是，当被调量偏离参比值达到一定数值时，调节器输出两种或三种固定的信号，使调节机构处于两种或三种位置上。

图2是理想的两位和三位式调节器特性。

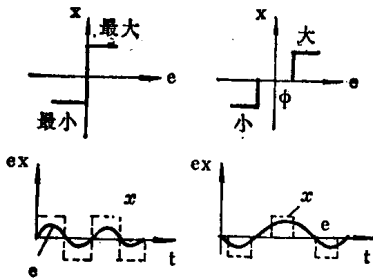


图2 两位和三位式调节器特性

由图可知，两位式调节系统的调节机构的位置 x 只有两个，即最大和最小，或全开和全关。而三位式调节系统的调节机构有大、中、小三个位置。当 x 为最大时，被调量增加，偏差 e 减小，然后调节器又使调节机构处于最小位置，被调量减小，偏

差 e 增大。这样周而复始，两位调节系统必然产生无衰减振荡，被调量不可能稳定在固定的数值上。三位调节由于存在中间位置，可减少被调量振荡的幅度和频率，调节质量有所提高。

实际的调节器不可避免地存在滞环。所谓滞环，就是指当偏差增大时，输出发生状态变化所对应的偏差量不等于偏差减小时，输出改变状态所对应的偏差量。滞环越大，被调量的振幅越大，振荡频率越低。

衡量位置式调节系统的优劣，即品质指标主要是振幅和频率。

调节对象的滞后越大，被调量的振幅也越大，振荡频率也越

低。

在下列场合下可选用位置式调节器：

- (1) 调节对象滞后小，容量大。
- (2) 被调量的允许波动范围大。
- (3) 调节器的惰性小，调节机构运动速度快。

玻璃工业中，位置式调节常用于液面调节。

2. 比例调节

比例调节是一种最基本的调节规律，其动作特性就是调节器的输出变化量与偏差成正比。它的微分方程和传递函数*可写成：

$$\Delta X = K_c e \quad (1)$$

$$G(S) = \frac{X(S)}{E(S)} = K_c \quad (2)$$

式中 ΔX ——调节器输出变化量，其拉氏变换为 $X(S)$ ；

e ——调节器输入，即检测值 Z 与参比值 r 之偏差， $e = R - z$ ，其拉氏变换为 $E(S)$ ；

K_c ——比例常数，即调节器放大倍数。

工业调节器一般不用比例常数 K_c 刻度，而用比例带或比例度 δ 来刻度。比例带定义为：

$$\delta = \left(\frac{\Delta e}{Z_{\max} - Z_{\min}} / \frac{\Delta X}{X_{\max} - X_{\min}} \right) \times 100\% \quad (3)$$

式中 $X_{\max} - X_{\min}$ ——输出信号的变化范围；

$Z_{\max} - Z_{\min}$ ——测量信号的变化范围；

Δe 和 Δx ——分别是偏差和输出量的变化量。

比例带的意义是，要使输出信号作全范围的变化，输入信号需要改变全量程的百分数。例如 $XWC-400$ 型温度调节记录仪，输出范围 $0 \sim 10$ 毫安，输入测量信号 $0 \sim 1600^\circ\text{C}$ ，如果温度

* 传递函数——系统或系统某个环节的输出的拉普拉斯变换与输入量的拉普拉斯变换之比。

变化 20°C ，输出电流变化 2.5 毫安，则比例带为：

$$\delta = \left(\frac{20}{1600} / \frac{2.5}{10} \right) \times 100\% = 5\% \quad (4)$$

在单元组合仪表中，输入和输出采用统一标准信号，则比例带可简化为：

$$\delta = \frac{\Delta \theta}{\Delta X} \times 100\% \quad (5)$$

由上可知，比例带是调节器比例系数的倒数，

即： $K_c = 1/\delta$ (6)

比例带越大，比例系数越小，亦即比例调节作用越弱。反之，比例作用越强。工业调节器的比例带一般可在 $2 \sim 250\%$ 范围内调整。

比例带的大小对调节过程有很大影响，随着比例带的减小，比例调节作用增强，将导致：

(1) 静差减小。

(2) 稳定性变差，有振荡的趋势。

(3) 工作频率增加，工作周期缩短，调节频繁。

(4) 在扰动作用下，超调量减小；在给定作用下， δ 越小时超调量却增大。

单纯比例调节系统的主要缺点是，无论比例带减小到何种程度，系统总是存在静差。这是因为没有静差就没有调节器的输出，调节机构将处于全关的位置，被调量必然下降，从而不可能维持静态平衡。换言之，要达到某个平衡状态，调节器必须有一定的输出，即偏差不能为零，故总是存在静差。因此，只有在调节精度要求不高，允许有静差的场合以及对对象滞后不大的场合才可以考虑采用比例调节。例如流量和压力的调节，以及在工艺参数变化较快的设备上比较常用。

3. 比例积分调节

比例积分调节，常用英文缩写字母PI表示。它是在比例作

用的基础上, 加上与偏差随时间的累积量成比例的积分作用, 调节器的方程是:

$$\begin{aligned}\Delta X &= \Delta X_p + \Delta x_i = K_c \left(e + \frac{1}{T_i} \int_0^t e dt \right) \\ &= \frac{1}{\delta} \left(e + \frac{1}{T_i} \int_0^t e dt \right) \quad (7)\end{aligned}$$

传递函数为:

$$G_c(S) = \frac{x(S)}{E(S)} = K_c \left(1 + \frac{1}{T_i S} \right) \quad (8)$$

式中 T_i —— 积分时间。

图 3 是偏差 e 从 0 开始作阶跃变化, PI 调节器输出的时间特性, 输出信号 ΔX 先按比例系数 K_c 由 0 飞跃至 $K_c e$, 这是比例分量 ΔX_p 。对于理想 PI 特性, 这个分量是瞬时完成的, 然后随着时间的推移, Δx 以积分速度 $\frac{K_c}{T_i}$ 持续增长, 如一直保持偏差, ΔX 将趋于仪表上限或下限值。

积分时间 T_i 的物理意义可以这样来描述, 积分时间是积分作用 Δx_i 达到和比例作用 Δx_p 相等的那段时间。 T_i 短, 说明积分作用很快就达到和比例作用相等 (积分速度快), 换言之, 积分作用很强。工业调节器的积分时间一般可以在 6 秒到 20 分范围内调整。

积分作用还可以理解为比例系数不断增加的 P 作用。对调节作用而言, 可以看成是细调, 而 P 作用则可看成是粗调: 粗调先行克服扰动, 细调用来逐渐消除静差。因此 PI 调节可以实现无差调节, 而单纯比例调节必为有差调节。

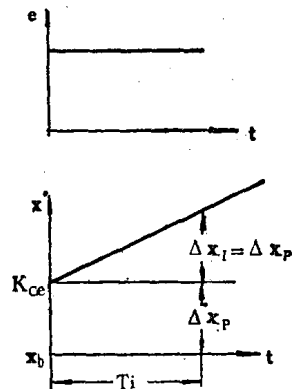


图3 PI调节器时间特性

积分作用虽有消除静差的优点，但是它又有滞后性的缺点。它的滞后性表现在这儿方面：当偏差极性未变时，I作用的变化趋势保持不变，不能反映偏差的变化趋势。例如当偏差为正时， ΔX_i 增加；但正偏差减小而未过零时， ΔX_i 仍然随时间累积，继续增加，直到偏差过零变负以后， ΔX_i 才开始因反向积分而减小。

积分的滞后性使系统易于振荡，这是引入I作用的主要问题。所以 T_i 小时，消除静差快，稳定程度下降，振荡倾向加强，工作频率、周期、扰动作用下的最大偏差可能向有利的方向变动。可见必须慎重选择积分时间，以尽量发挥积分作用消除静差的能力，又适当限制它加强振荡的不利影响。

PI调节器适用于调节精度要求高的场合，特别适于负荷变化较大而不允许有静差的场合。对于负荷变化较小的对象，PI调节器优越性不明显，甚至使调节质量下降。当对象的滞后较大，I作用易引起较大的超调量，甚至出现振荡。

4. 比例微分调节

比例微分调节，常以PD表示。其调节规律是：当被调量发生偏差时，调节器的输出信号增量与偏差大小及偏差对时间的微分——偏差变化速度成正比。理想PD的微分方程为：

$$\Delta X = K_c \left(e + T_d \frac{de}{dt} \right) \quad (9)$$

传递函数为：

$$G_c(S) = \frac{X(S)}{E(S)} = K_c (1 + T_d S) \quad (10)$$

式中 T_d ——微分时间。

理想PD实际上很难实现，实际中PD调节器的特性为下列微分方程和传递函数：

$$\frac{T_d}{K_a} \frac{dX}{dt} + \Delta X = K_c \left(e + T_d \frac{de}{dt} \right) \quad (11)$$

$$G_c(S) = \frac{X(S)}{E(S)} = K_c \frac{1 + T_d S}{1 + \frac{T_d}{K_d} S} \quad (12)$$

当偏差作阶跃变化时，调节器输出变化为：

$$\Delta X = K_c e \left[1 + (K_d - 1) e^{-\frac{K_d}{T_d} t} \right]$$

式中方括弧外的 e 为偏差，方括弧内第二项的 e 为自然对数的底。当 $t = 0$ ， $\Delta X = K_c K_d e$ ，所以 K_d 称为微分增益。当 $t \rightarrow \infty$ 时 $\Delta X = K_c e$ ，比初始值下降 $K_c (K_d - 1) e$ 。当 $t = \frac{T_d}{K_d}$ 时，

$$\Delta X = K_c e [1 + 0.368(K_d - 1)] \quad (13)$$

这时的输出比初始值下降63.2%，输出量的变化曲线如图4所示。输入偏差信号作阶跃变化，输出一开始飞跃到单纯比例作用的 K_d 倍，然后逐渐回降，到最后只剩下比例作用，利用这条曲线和(13)式，来校验调节器的微分时间 T_d 和微分增益 K_d ，工业调节器的微分时间一般可在3秒至10分范围内调整。 T_d 越大，微分作用越强； K_d 越大，首跳越高。当 K_d 足够大时， $\frac{T_d}{K_d}$ 小到可以忽略，则(11)与(12)式就变成理想PD方程。

微分作用相对比例作用而言可视为超前作用。例如，当偏差作阶跃变化时，调节器飞跃到 $K_c K_d e$ ，比纯比例加大了调节作用，因此，如果与比例作用起到同样的调节效果，则PD调节所需时间就短。

从另一方面看，微分作用与偏差的变化率成比例。偏差变化速度越大，微分作用也越大，偏差变化速度为正，即偏差是增加的，则微分作用为正值。相反，偏差减小时，微分作用也为负值。其方向总是阻止被调量变化。当对象受到扰动时，微分作用将根据偏差变化的趋势产生调节作用。因而有“预先调节”的性质，即超前调节。微分时间和增益(T_d 和 K_d)选得合理，即

预调适当, 调节质量可获得改善。由于引入微分作用, 比例带进一步减小也不会引起振荡, 所以静差可以小一些。当然 T_d 太大也会引起振荡, 故应取适当的数值。

工业调节系统中PD调节器使用不多, 常用的是PID调节器。上述微分作用的阐述完全适合于PID调节器。

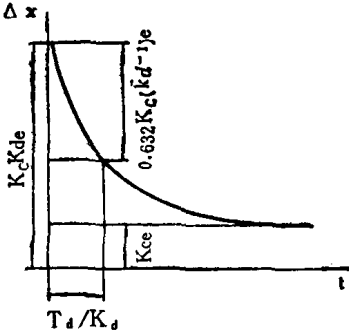


图4 PD调节器时间特性

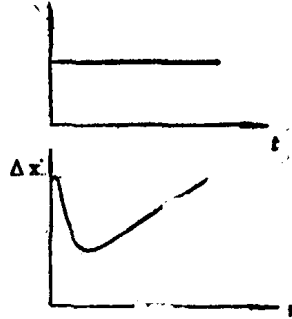


图5 PID时间特性

5. 比例积分微分调节

在一般工业调节系统中, 常常将比例、积分、微分三种作用结合起来, 可以得到最满意的调节效果, 这种三作用调节器称为比例积分微分调节器, 简称PID调节器。PID的微分方程为:

$$\Delta X = K_c \left(e + \frac{1}{T_i} \int e dt + T_d \frac{de}{dt} \right) \quad (14)$$

它的传递函数为:

$$G_c(S) = \frac{X(S)}{E(S)} = K_c \left(1 + \frac{1}{T_i S} + T_d S \right) \quad (15)$$

令偏差 e 作阶跃变化, PID的输出特性如图5所示。输出一开始先作飞跃, 这是微分作用, 然后逐渐下降, 下降速度越来越小, 经过速度为零的一点以后, 又开始回升, 这就是积分作用, 而比例作用则体现在曲线回升点的幅度上。

当对象受到扰动以后, 微分作用先行动作, 同时比例作用也起作用, 调节器输出较大的信号, 使调节机构以较大的幅度动作,

以便偏差迅速减小,随后慢慢减小输出信号,如果偏差仍未复零,再由积分作用克服静差。只要PID参数 δ 、 T_i 、 T_d 选择得合适,便可充分发挥三种调节作用的优点,从而得到一种理想的调节效果。根据近代控制理论的分析,PID调节满足最优控制的要求。

在采用PID调节器时,微分的引入尤须慎重。微分时间适当,由于超前作用,能减小超调量和调节过程时间。但微分过强,也易引起振荡,特别是当对象有纯滞后时,因为在纯滞后阶段,偏差速度为零,微分不起作用,所以不会对调节质量有何改善。只有当对象的时间常数远大于纯滞后时,引入微分才有较好的效果。当纯滞后大于1/2倍时间常数时,不宜引入微分。此外,当对象被调量变化很快,扰动多又频繁出现时,因为微分作用对高频脉动信号很敏感,引入微分非但无益,反而有害。

第二节 国产自动化仪表概况

我国从50年代中期开始建立仪表工业,到60年代已经初步建立了以上海、西安等城市为中心的仪表工业基地。卅年来,用于过程控制和检测的自动化仪表工业获得了巨大的发展,北京、天津、重庆、大连、昆明、武汉及其他省市也都建立了自动化仪表工业及其相应研究机构。各类检测仪表和控制仪表均已有了完整的系列型谱。

热工参数的检测仪表发展较早,规格品种也较齐全。目前温度、压力、流量、物位和成分分析仪表基本上能满足冶金、化工、电力、轻纺等国民经济部门的需要,当然也还有一些需要填平补齐的仪表尚待开发。玻璃工业所需要的自动化检测仪表配套率可以达到90%以上。本书第二章将予详细介绍。

力学参数的检测仪表发展较迟,各参数的仪表发展也不平衡,其中以称重仪表发展最快,70年代开始,建立于荷重传感器基础上的电子秤,以及建立于编码器基础上的数字秤获得了迅速