

化工自动化丛书

时间滞后调节系统

沈 平 编著

化 学 工 业 出 版 社

化工自动化丛书

时间滞后调节系统

沈 平 编著

化学工业出版社

本书主要介绍化工生产过程中常见的具有纯滞后工艺过程的控制问题。第一章通过具体工艺过程的分析介绍纯滞后的特性,并概述其对控制过程的影响。第二章介绍一般自控书籍中涉及较少的时间滞后调节系统的理论分析方法,并对常规调节器的参数整定方法作了较详细的阐述。第三章预估补偿调节和第四章采样调节主要介绍了目前较成熟的调节方案,内容包括原理分析、系统结构特点以及系统投运等方面,并有具体实例。本书由庄兴稼同志审阅。

本书可供从事化工自动化和有关专业自动化的技术人员和工人阅读,也可供大专院校有关专业的师生参考。

化工自动化丛书
时间滞后调节系统

沈平 编著

责任编辑:李诵雪

封面设计:许立

化学工业出版社出版

(北京和平里七区十六号楼)

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

开本 787×1092 1/32 印张5 插页1 字数110千字 印数1—3,870

1985年6月北京第1版 1985年6月北京第1次印刷

统一书号15063·3692 定价0.90元

编写说明

近年来，随着化学工业和自动化科学技术的迅速发展，化工自动化技术有了新的进展。以现代控制理论为基础的各种新型控制方法和调节系统相继成功地应用于化工生产；新型的自动控制技术工具以及电子计算机也日益广泛用于化工自动化领域。

为了总结交流我国化工生产应用自动化技术的经验，介绍新的调节理论和控制方法，提高从事化工自动化工作的工人和技术人员的理论和技术水平，促进化工自动化工作的发展，一九七五年，在炼油、化工自动控制设计业务建设会议上，决定由化工部炼油、化工自动控制设计技术中心站负责，组织有关院校、科研设计单位和工厂，编写一套《化工自动化丛书》。

《化工自动化丛书》是在普及的基础上侧重提高的一套读物，主要包括经典和现代控制理论，各类调节系统和化工单元操作控制等方面的题材。“丛书”内容力求密切反映化工应用的特点，做到理论联系实际，既阐明基本概念，作出理论分析，又叙述工程应用方法和应用实例，说明具体实施方案和现场运行经验。

《化工自动化丛书》编委会成员

主任委员	周春晖（浙江大学）
副主任委员	蒋慰孙（华东化工学院）
	万学达（化工部化工设计公司）
	王骥程（浙江大学）
	沈承林（北京化工学院）
委 员	韩建勋（天津大学）
	庄兴稼（抚顺石油学院）
	李乾光（化工部第一设计院）
	林秋鸿（北京燕山石油化学总公司 设计院）
	王 翼（南开大学）
	徐炳华（化工部第三设计院）
	钱积新（化工部自动控制设计技术 中心站）
	俞金寿（华东化工学院）
	孙优贤（浙江大学）
	罗秀来（上海炼油厂）
	蔡鸿雄（兰州化学工业公司石油化 工厂）

目 录

第一章 概述	1
第一节 纯滞后	1
一、几个典型工艺过程	1
二、几个有关的定义	6
三、传递函数和频率特性	9
第二节 纯滞后对系统动态的影响	13
一、闭环系统动态特性	13
二、纯滞后对稳定性的影响	15
三、纯滞后对动态指标的影响	17
四、方案设计时的考虑	19
第三节 具有纯滞后过程的控制	21
第二章 具有纯滞后工艺过程的常规调节	23
第一节 具有纯滞后调节系统的分析计算方法	23
一、近似分析算法	23
二、根轨迹分析法	30
三、频率域分析法	43
第二节 常规调节方案	51
一、概述	51
二、调节器参数整定的工程近似法	52
第三节 改善系统品质的一些措施	62
一、微分先行调节系统	62
二、中间反馈调节方案	67
第四节 过渡过程的近似求作法	70
一、分段法求过渡过程	71

二、Z变换法求过渡过程	72
第三章 预估补偿调节	77
第一节 预估补偿调节的基本原理	77
一、预估补偿调节系统的组成	77
二、预估补偿器数学模型	82
三、预估补偿调节系统的调节器参数整定	86
四、对预估补偿方案的一般评价	89
第二节 预估补偿调节方案的应用	93
一、在一个加热器温度调节上的应用	93
二、在pH自动调节系统中的应用	100
第三节 双环预估补偿调节系统	104
一、基本原理分析	104
二、双环预估补偿调节方案的应用	108
第四节 增益自适应预估补偿调节系统	110
第四章 采样调节方案	117
第一节 采样调节方案基本概念	117
一、采样调节方案的提出	117
二、模拟式采样调节系统	121
三、数字式采样调节系统	126
四、采样调节系统调节规律综合和参数整定	128
第二节 模拟式采样调节方案应用	132
一、高压聚乙烯熔融值指标自动调节系统	132
二、硫回收过程 H_2S/SO_2 比调节系统	136
第三节 模拟式采样调节器	141
一、DTL型电子调节器改装的采样调节器	141
二、DTC型采样调节器	146
三、气动采样调节器	148
第四节 数字计算机应用示例	152

第一章 概 述

“纯滞后”这个名词我们虽常在自动控制的一般书籍中看到，但常对此不作深入系统的介绍。由于在化工生产过程控制系统中常存在着显著的纯滞后因素，因此我们有必要加以深入的分析。本章的内容主要是先介绍什么叫纯滞后，它有什么特点，以及它对调节系统动态质量有什么影响等内容，并在最后对本书后续各章的内容作了概括的介绍。

第一节 纯 滞 后

一、几个典型工艺过程

在工艺过程中，有很多场合是存在纯滞后的，但纯滞后是自动控制工作者的术语，对于工艺人员则往往将其统称为“反应缓慢”或“过程慢”等，并常将其与容量滞后或大惯性混淆起来。实际上，它们是有所区别的。为了从感性上较清楚地了解纯滞后，这里介绍几个纯滞后及具有纯滞后的典型工艺过程的例子。

1. 皮带输送过程

在工业生产中，加工过程的处理物料若是固态块状或粉末状时，常需使用皮带输送机加以运送。如硫酸生产中沸腾焙烧炉的硫铁矿进料、热电厂燃煤锅炉的煤粉进料等就是典型的例子。皮带输送机的简单示意图如图1-1。

由图1-1可知，当挡板的开度变动而引起下料量改变时，

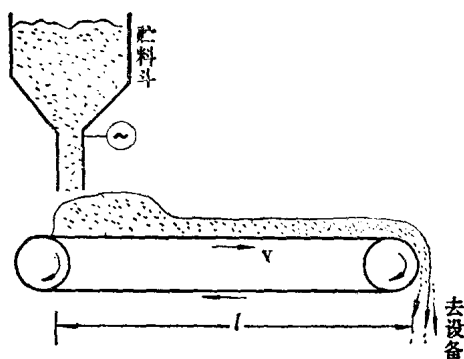


图 1-1 皮带输送机

不会立即影响到工艺设备中的工艺参数。因为这个物料量的改变必须经过皮带输送机的固定输送时间后才能到达工艺设备，这个输送时间由皮带输送机的输送速度 v 米/秒和输送距离 l 米决定。输送时间 $\tau = l/v$ 秒。可以看出，在 τ 这一段时间内虽然挡板的启闭已影响了下料量，但工艺设备没有得到丝毫的信息，直到物料到达工艺设备时才会引起工艺设备的操作发生改变，而这一段时间 τ 就称为纯滞后时间。

2. 管道输送过程

若介质经管道输送，则输送的时间为 $\tau = l/v$ 。 l 为管道长度， v 为介质流速，在这一时间内，介质的物性没有改变，仅是处于中间传输状态，这种材料的流动所需的时间也常常构成纯滞后因素。例如图1-2所示的一个中和槽，酸液和碱液分别送至槽中，经充分搅拌达到中和，中和后的液体经过一根长的管道后排出，在管道出口处装上pH检测仪表。若自中和槽出口处至pH电极安装处的管道长度为 l ，而流体的流速为 v 时，则pH检测的指示要比中和槽中实际值滞

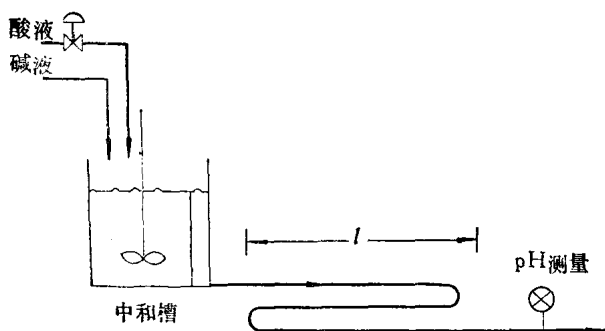


图 1-2 传输滞后过程

后一个时间 τ ，而 $\tau = l/v$ ，这也就是纯滞后时间。

3. 管道反应和管道混合过程

在化工、医药等工业中经常应用管道反应器，它是使两种或两种以上的物料在长的工艺管道中流过，并在其中进行化学反应。管道反应的优点是使生产连续化，适合于高温高压，并且可以节约设备占地面积，减少设备投资。在炼油工业中的多种油品的调合经常采用管道混合的方法，管道调合省去了调合罐，使生产连续化。对于这些工艺过程的动态特性加以分析后，可知也存在着纯滞后因素，下面举例加以说明。

某药厂以管道反应器制备乙二胺的生产流程如图1-3所示。氨水和二氯乙烷分别自贮罐由定量泵打出，经混合器混合后进入蒸汽夹套加热器，加热段长25米，然后经过长度约106米的管道反应器逐步达到完全反应。生成的乙二胺进入中间贮槽。产品的质量以反应器出口的温度作为间接指标，此温度与加热器温度、氨水和二氯乙烷的量及配比等因素有关。但是可以看出，无论是氨水和二氯乙烷的配比或蒸汽加

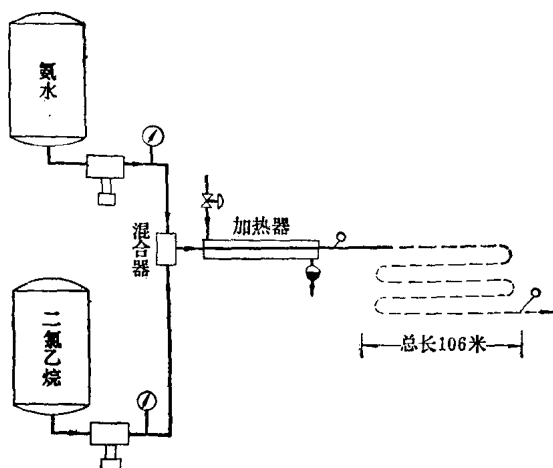


图 1-3 乙二醇管道反应器及生产流程

热器的温度改变要影响到出口温度的改变都必须经过一个物料流过管道的传输时间，这个时间与管道长度和流速有关，同样可以算出为 $\tau = l/v$ 。

又例如某炼油厂需将油品 A 和油品 B 经一定配比进行调

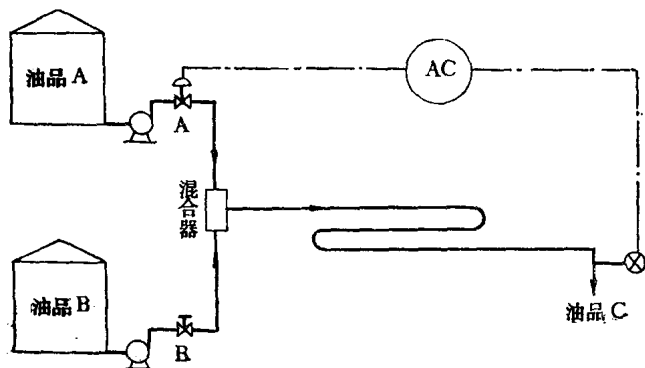


图 1-4 油品管道调合图

合而得新的油品 C，采用的工艺流程如图1-4所示。

方案是通过一个长管道后保证油品 A 和 B 的均匀调合，以油品 C 的比重作为调合质量指标，而通过调节油品 A 的流量来达到此目的。从图中可以看出，阀 A 开度改变后引起 A、B 物料的配比改变，但此改变要经过物料流过长管道的输送时间后才能被检测出来，这一段时间同样可以用 $\tau = l/v$ 算出。

必须指出以上这两种场合中，物料一方面在管道中传输，而另一方面又在管道中逐步完成反应和混合，所以不是单纯的传输过程。

4. 多个设备串联所引起的纯滞后

在生产过程中常有这样的操作情况，一个流水作业线或物料加工过程终端产品的质量指标，是用改变作业线起始端的输入物料量来调节的，中间往往要经过很多道加工工序，或是要经过很多个工艺设备。这时起始端物料的改变量要引起终端产品的质量指标发生改变，必然要经过一个较长的时间间隔，这个时间间隔一方面包括物料由起始端到终端的传输时间，另一方面包括物料在中间设备中的停留和处理时间，这两个时间有时甚至可达数十分钟。显然这给自动调节带来了很大的困难，下面举一个例子来加以说明。

某高压聚乙烯装置的工艺过程原理如图1-5所示。

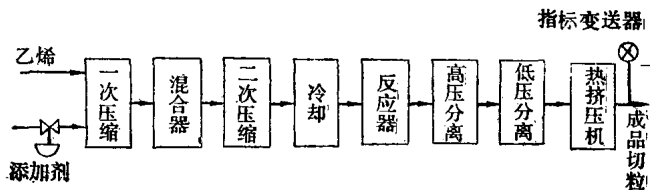


图 1-5 高压聚乙烯生产工艺原理图

原料乙烯加入添加剂后先经过一次压缩，然后进入混合器、二次压缩……等一系列工艺操作，最后成品经热挤压机后切粒包装，产品的质量用安装在热挤压机出口的熔融值变送器加以测量。当该指标与给定值之间有偏差时，通过调节添加剂的输入量来加以消除。可以看出，由添加剂物料量的改变到影响熔融值指标发生改变之间要经过很长的加工工序，所以必然存在较长的纯滞后时间，它可达半个小时以上。在化工生产中类似这种情况是很多的，对于这种场合的调节系统常得不到满意的调节质量。

5. 测量装置的纯滞后

在一些工艺过程的自动调节中，测量装置会存在较大的纯滞后，这在成分分析仪表及质量仪表中较常见。这种纯滞后常可分两大类，一类是取样脉冲导管较长而引起的纯滞后，这和上述传输滞后相类似，另一类是测量系统中取样后进行处理分析和切换等待的时间所造成的纯滞后时间，后者时间有时也可达数分钟以上。在测量系统中存在纯滞后时同样会使调节系统的动作不及时而造成调节质量恶化。

二、几个有关的定义

1. 纯滞后和“具有”纯滞后

自动调节系统按其动态特性常可划分成各种环节，纯滞后环节的动态特性是这样的，当给环节输入一个信号后输出不立即有所反应，而要经过一个固定的时间后才会反应出来。而且输入和输出在数值上并无不同，仅是在时间上有一定的滞后，而这一段时间则定义为纯滞后时间，常以 τ 或 L 表示。纯滞后环节的动态性质可由图1-6看出，图1-6(a)表示输入为阶跃扰动时的输出响应，图1-6(b)为输入是任一

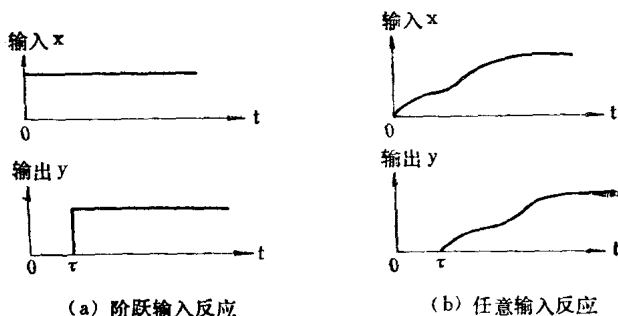


图 1-6 纯滞后环节的时间特性

时间函数时的输出响应。

在化工生产中，纯滞后经常是由于物料的传输时间造成的，此时纯滞后可以用 $\tau = l/v$ 算得。 τ 的实验测定也是较方便的，给环节一个阶跃输入信号，并开始计算时间，观察环节的输出情况，当输出刚开始有变化时为止的这段时间间隔即为纯滞后时间。必须指出，在工业生产过程中，如皮带输送机这样完全只用纯滞后特性表示的情况是较少的，极大部分工艺过程的动态特性常常是既包含一部分纯滞后特性又包含一部分惯性特性的情况，对于这种工艺过程我们就称之为具有纯滞后的工艺过程。如上面所述的管道反应和管道混合过程，粗看起来似乎只与管道中的传输时间有关，但也不是一个单纯的纯滞后过程，因为它们不仅有传输，而且还包括了反应或混合等过程，所以严格地说是属于具有纯滞后的工艺过程。若纯滞后时间与惯性时间常数相比很大时，我们可近似忽略时间常数而将其看成单纯的纯滞后过程。在很多文献中将过程的纯滞后 τ 和惯性时间常数之比值 τ/T 作为一个衡量纯滞后大小的指标，若 $\tau/T < 0.3$ 则称为一般具有

纯滞后的过程，而当 $\tau/T > 0.3$ 则称为具有较大纯滞后的工艺过程。

2. 等效纯滞后

我们知道，一个工艺过程的动态特性常包含有很多非线性因素，而且工艺参数也常呈分布状态，很难用简单的线性集中参数来推导其动态特性，所以常常借用实验方法来测取其动态特性。对于大多数工艺过程，所测得的反应曲线常如图1-7所示。

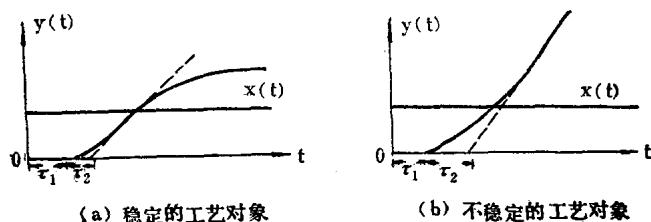


图 1-7 一般工艺对象的反应曲线

图中两种情况反应曲线的起始部分为纯滞后 τ_1 和过渡滞后 τ_2 。对于这种情况，在处理其反应曲线求取传递函数时，可分精确和近似两种方法。精确的方法是先在反应曲线上定出纯滞后 τ_1 ，然后再将被扣除 τ_1 后的反应曲线处理求取传递函数，而近似的方法是将 τ_1 和 τ_2 相加作为纯滞后时间，即 $\tau = \tau_1 + \tau_2$ ，然后将余下的反应曲线当作一阶惯性环节来处理，此时 τ 称为等效纯滞后时间。

3. 变纯滞后

深入研究工艺过程的特性后，我们知道纯滞后时间 τ 在一些工艺过程中是一个变数而非常数，如当工艺过程的负荷

改变时会引起管道中物料流速的改变, 所以纯滞后时间也相应改变, 负荷减小使流速变慢, 则纯滞后时间增大, 反之则减小。但因考虑到变参数系统分析的复杂性, 所以一般都考虑定纯滞后系统。但我们必须注意, 由于纯滞后增加会导致系统不稳定, 所以在分析设计一个系统时应加以适当的事先考虑。由于上述情况, 本书主要讨论定纯滞后工艺过程的控制问题。

三、传递函数和频率特性

1. 传递函数

由纯滞后环节的定义可知, 环节的输 出 $y(t)$ 和 输入 $x(t)$ 之间有如下关系式:

$$y(t) = x(t - \tau) \quad (1-1)$$

将上式进行拉氏变换后可得:

$$Y(s) = e^{-\tau s} X(s)$$

所以纯滞后环节的传递函数为:

$$W(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = e^{-\tau s} \quad (1-2)$$

在工业自动调节系统中常将调节系统概括为广义对象和工业调节器两个部分, 广义对象除工艺对象外还包括测量变送器、调节阀等。此时广义对象动态特性通常用具有纯滞后的标准近似型式:

$$W(s) = \frac{K e^{-\tau s}}{T_1 s + 1}, \quad (1-3)$$

$$W(s) = \frac{K e^{-\tau s}}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}, \quad (1-4)$$

$$W(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{Ts} \quad (1-5)$$

对于一般工业应用和研究, 以上近似型式已具有足够的精确性。

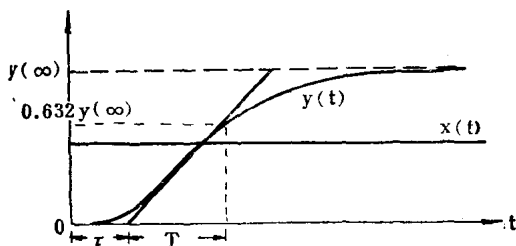


图 1-8 反应曲线的近似处理

这里还必须说明的是, 在工业应用中, 实验测取对象动态特性的最简单和常用的近似型式为如式 (1-3) 所示的一阶惯性环节加纯滞后表达式, 如图 1-8 所示, 输入 $x(t)$ 为阶跃式干扰, 输出为反应曲线 $y(t)$ 。可在曲线的拐点处作切线, 等效纯滞后 τ 的取值如图中所示。量出稳态输出 $y(\infty)$, 作 $0.632 y(\infty)$ 平行线与 $y(t)$ 相交, 由交点可以求得时间常数 T 如图中所示。环节的放大倍数 $K = \frac{y(\infty)}{x(\infty)}$, 而环节的近似传递函数为:

$$W(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{Ts + 1}$$

2. 频率特性

纯滞后环节的幅相特性和对数频率特性可如下求出, 由传递函数:

$$W(s) = e^{-\tau s}$$