

自动调节系统工程设计

王永初 编著

机械工业出版社

自动调节系统工程设计

王尔初 编著



机械工业出版社

本书是一本控制理论的工程应用书籍，著者应用古典和现代控制理论的基本观点和方法，介绍了连续生产过程典型和特殊规律的调节系统的工程设计方法、仪表参数的设置和仪表选型，深入论述简单调节、配比调节、串级调节、均匀调节、前馈调节、纯滞后补偿调节、自治解耦调节、安全保护系统、非线性及 PID 自适应调节，以及 SPC 调节系统的内在规律，指出模拟与数字调节的各种具体实施方案，以及提高系统精度、稳定性、可靠性的各种方法。

本书可供从事工业自动化系统与工业自动化仪表专业的科研、设计和使用的科技人员和有关大专院校师生参考。

自动调节系统工程设计

王永初 编著

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）
(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092 1/32·印张 20 5/8·插页 2·字数 457 千字

1983 年 8 月北京第一版·1983 年 8 月北京第一次印刷

印数 0,001--8,900·定价 2.60 元

*

统一书号: 15033·5249

前 言

工程自动调节系统的发展趋势,是从定性设计过渡到定量设计,应用古典与现代控制理论的基本原理,解释调节系统的内在规律,因地制宜地选择合理的或最佳的调节方案,正确选用工业自动化仪表,正确设置仪表或调节模型参数。

一个自动化系统设计者,必须学会从关系错综复杂的生产过程中,根据对象特性及工业自动化仪表的特点,把各个自动调节系统,组织在一个有机的统一体中,使生产过程优质、高效和安全。

古典控制理论在 50 年代,现代控制理论在 60 年代都已达到相当成熟的程度。著者认为先进的控制理论必须能经得起自动化系统生产实践的检验,并能完满解释工程实践中所提出的许多问题,指导自动化系统的设计。特别是像连续生产过程这样一类分布参数的对象,研究实用化的工程方法尤其重要。现代自动调节系统与古典的自动调节系统有其相似之处,它们都是以 PID 调节为基础。不同的是现代调节系统为适应现代工业生产过程高速度,大容量发展的需要,增加了许多新的内容和概念,系统包含更多的变量,并叠加了许多逻辑功能。这就要求系统设计者适应时代的进步,掌握更多新的设计方法,为四个现代化服务。

本书是连续生产过程自动调节系统工程设计的一本参考书。著者根据自己从事自控理论研究与实践的总结,并参阅了大量国内外有关文献,于 1976 年编写了本书的初稿,曾在

某些工厂、研究所和设计单位的有关同志中传阅,得到许多同志的鼓励,并希望在此基础上修改出版。机械工业出版社为本书组织了审阅,北京工业大学吕炳仁和鹿树理同志对本书提出了宝贵的修改意见。在修改过程中著者曾得到周春晖、王良楣、马少梅、陆廷杰和唐迪武等同志的亲切关怀和热情帮助,一机部重庆工业自动化仪表研究所张钧惠、江建中、俞济成、程与仁和邬显塘等同志,分别对本书修改稿的有关章节,进行了认真仔细的校阅,尤其是任秀珍和陈锦坚同志,在极其困难的条件下,协助著者进行书稿整理、图表绘制,付出了辛勤的劳动。因此本书的出版,实际上是许多同志共同劳动的结晶。著者借本书出版的机会向上述同志表示衷心的感谢。由于著者水平不高,书中错误与缺点一定不少,恳切希望读者批评指正。

目 录

第一篇 简单 PID 调节系统	1
第一章 调节系统的方案选择	1
一、简单 PID 调节的几个实例	1
二、一个实验的结论	5
三、反馈调节系统的基本关系	11
(一)静态关系	11
(二)动态关系	16
(三)典型对象与典型调节器结合的动态关系	18
第二章 对象模型的识别	34
一、对象模型的一般形式	34
二、最常见的一类对象特性	42
三、求对象模型的闭环试验方法	45
四、阶跃响应曲线法	49
五、频率特性试验法	64
第三章 工业调节器	71
一、调节器的作用	71
二、放大器	74
三、调节动作的实现	84
四、比例积分调节器的无定位特性	95
五、调节器的基本运算公式	98
六、PID 调节器是一种理想的工业调节器	102
七、调节系统的无扰动切换	105
八、调节器参数的校验	110
第四章 可观测性分析与测量仪表的选择	115
一、可观测性分析的工程方法	115

(一)可观测性分析的意义	115
(二)基本定理	115
(三)最简可测环节	118
(四)若干可观测性判断准则	120
(五)应用举例	129
二、测量元件及变送器的选择	134
(一)变送器的静态增益	134
(二)测量元件的正确选择	135
(三)变送器量程及零点的选择	138
(四)减少测量误差,提高控制精度	140
(五)减少测量迟后的方法	148
(六)非标准变送单元的应用	153
第五章 可控性分析与调节阀门的选择	159
一、可控性分析	159
(一)可控性分析在工程中的意义	159
(二)基本定理	160
(三)可控性准则	163
(四)可控性准则的应用	170
二、调节阀门的选择	175
(一)调节阀门的作用	176
(二)调节阀的计算	178
(三)调节阀特性的选择	185
(四)静态增益与补偿器的设计	189
(五)实验测定阀门的流通能力	195
第六章 简单直接数字调节系统	197
一、信号、采样及采样定理	199
二、保持器	213
三、工业控制机	221
四、PID 的基本算式及调节模型	226

五、计算机调节与模拟仪表调节品质的比较	240
六、系统的构成及调节模型的实现	249
七、数字滤波	260
第七章 调节系统的品质指标与参数整定	264
一、品质指标	264
(一)误差积分面积	264
(二)稳定性指标	266
(三)误差平方积分面积	270
二、模拟调节器的参数整定	276
(一)对象模型已知的场合	276
(二)阶跃响应曲线已知的场合	279
(三)对象特性未知的场合	279
(四)完全微分型 PID 调节器的整定	281
(五)理论计算	282
三、数字调节模型的参数整定	290
(一)调节面积比方法	290
(二)选择控制度方法	291
(三)误差绝对值积分面积方法	292
(四)稳定边界分析法	293
第二篇 典型调节系统	297
第八章 配比调节	297
一、正确选择流量计与变送器	298
二、流量调节的特点	303
三、流量的调节方式	310
四、配比系统仪表系数的设定	314
(一)定值配比调节系统	314
(二)随动配比调节系统	316
(三)直接数字配比调节系统	321
(四)自整配比调节系统	324

VIII

五、提高配比调节系统品质的措施	330
六、质量、热值与成份配比调节系统	344
第九章 串级调节系统	351
一、串级调节系统的组成	351
(一)模拟串级调节系统	351
(二)直接数字串级调节系统	351
二、串级调节系统的设计原则	354
三、串级调节的作用	359
四、副调节器的选择	362
(一)模拟系统	362
(二)数字系统	364
五、改变串级系统结构的方法	370
六、串级调节系统与中间微分、自整配比系统的关系	375
(一)串级调节与中间微分调节的一致性	375
(二)串级调节是自整配比调节系统的进一步完善	378
七、串级调节系统的参数整定和系统的投运	380
八、串级调节系统的应用	382
第十章 均匀调节系统	384
一、均匀调节系统的响应曲线	384
二、简单均匀调节系统的设计计算	392
三、一个共同的现象	394
四、按照状态方程进行设计	396
五、串级均匀调节系统	401
六、利用非线性调节器实现均匀调节	404
七、具有输出滤波的简单均匀调节	407
八、具有不灵敏区的比例调节效果分析	408
第十一章 前馈补偿调节系统	414
一、前馈调节的几个实例	414
二、前馈调节器	420
三、前馈补偿的精度分析	422

四、前馈补偿函数的改进	424
五、直接数字前馈调节系统	428
六、网络综合方法	433
七、前馈调节系统的应用	444
第十二章 纯滞后补偿调节系统	452
一、纯滞后补偿的例子	452
二、纯滞后补偿原理	454
三、干扰位置对纯滞后补偿调节的影响	457
四、直接数字纯滞后补偿调节系统	460
五、纯滞后补偿调节系统与中间微分调节系统的比较	463
六、纯滞后补偿的调节误差与稳定性分析	464
七、纯滞后单元的数学近似原理	468
八、纯滞后仪表	475
九、综合函数器	480
十、纯滞后预测调节	481
(一)离散系统的状态方程	481
(二)卡尔曼滤波	483
(三)卡尔曼滤波器在预测控制中的应用	487
(四)对象纯滞后的预测调节	490
第十三章 自治解耦系统	494
一、基本解耦关系	494
二、多变量自治解耦系统	497
三、相对放大系数的定义及求法	502
四、相对放大系数定理	508
五、目的矩阵的确定	517
六、直接数字自治解耦系统	518
七、解耦与前馈混合系统应用例子	525
第三篇 特殊调节系统	527
第十四章 安全保护系统	527
一、越限报警及位式控制系统	530

二、超驰调节系统	539
三、选择性调节系统	546
四、抗积分饱和调节系统	557
五、提高工业调节系统运行可靠性的措施	574
第十五章 非线性与自适应 PID 调节系统	579
一、非线性 PID 调节	579
(一)第一类对象	580
(二)第二类对象	584
二、开关及 PID 双模调节系统	588
三、PID 调节的自适应系统	597
(一)参考模型方法	597
(二)按照负荷预先设置整定参数方法	605
(三)被动型的 PID 自适应调节系统	606
(四)外加试验信号的自适应系统	608
(五)调节偏差高低频部分校正的自适应系统	611
第十六章 SPC 调节系统	614
一、程序给定调节系统	614
(一)时间程序给定器	614
(二)直接数字时间程序调节系统	616
二、SPC 调节器	619
三、周期性变化的给定值预估	623
四、用回归分析方法确定给定值模型	627
(一)回归分析	627
(二)高斯消去法	631
(三)非线性模型的线性化方法	633
五、经验模型及模型修改方法	636
附录	642
参考资料	645

第一篇 简单 PID 调节系统

在生产过程控制系统中,简单 PID 调节占相当大的比重。这说明简单 PID 调节系统是最基本的一种控制方式。它是复杂调节和计算机直接数字控制的基础。简单 PID 调节系统是指仅包含有一个比例调节器,或一个比例积分调节器,或一个比例积分微分调节器的系统。控制系统设计的关键在于正确选择控制方案,包括正确选择控制线路、正确选择工业自动化仪表(如调节器、变送器及调节阀门等)。只有把这些问题解决好,才可能期望通过调节器的参数整定,达到良好的调节效果。为此,本篇着重讨论这些问题。

第一章 调节系统的方案选择

一、简单 PID 调节的几个实例

例一 合成氨工业水洗塔液位控制系统:

从变换炉来的气体,其主要成分为 N_2 与 H_2 , 在进入压缩机及合成塔之前,必须除去其中的杂质成分。这里是用水洗塔除去气体中 CO_2 及 CO 的成分,为了不使水洗塔的液位太高,以致造成液泛现象,或使液位太低,造成串气现象,需要实现液位自动调节。本例选用气动差压变送器作为液位测量的变送器。液位经检测后得到的气压信号,送至气动比例积分调节器的测量室,由定值器引出给定信号至给定室,给定信号

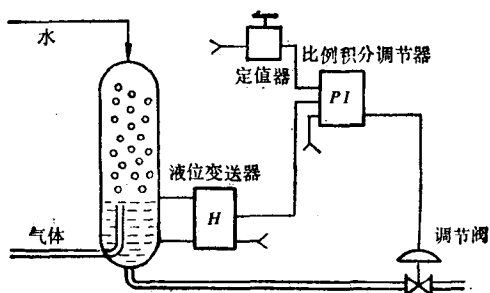


图 1-1 水洗塔液位调节系统

与测量信号的偏差，经 PI 运算后发出操作指令，命令调节阀动作。当液位高于给定值时，命令调节阀开大，使流出的液体增加，液位下降，从而使液位返回到给定值上；当液位低于给定值时，命令调节阀关小，使流出液体减少，液位上升，于是液位又返回到给定值上。

例二 制药厂恒温室调节系统：

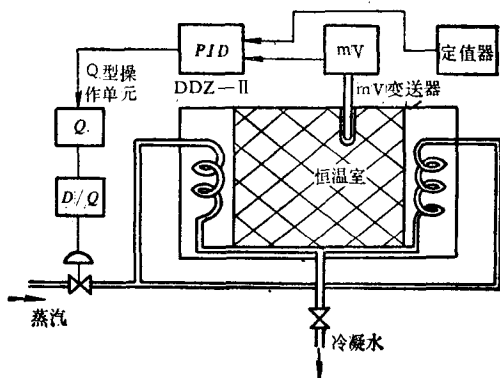


图 1-2 恒温调节系统

PID—比例积分微分调节器 mV—毫伏变送器

D/Q—电气转换器

凡是制造抗生素的工厂,几乎都需要实现恒温控制。因为许多抗生素都是在一定的温度下培育出来的,这种恒温控制如图 1-2 所示。利用改变蒸汽量的大小,达到调节温度的目的。用铜电阻温度计检测药物的温度,温度的变化使铜电阻的阻值发生变化,再用毫伏变送器把阻值变化转换成 $0\sim 10\text{ mA}$ 的标准信号,送至 DDZ-II 型 PID 调节器,同规定的温度值进行比较,然后按比例积分微分的规律发出操作指令,其指令通过电-气转换器变为 $0.2\sim 1\text{ 公斤/厘米}^2$ 的气压信号,去推动气动阀门,实现蒸汽量的增减,以达到恒温控制的目的。

例三 炼油厂蒸馏塔进料流量控制系统:

在蒸馏塔的操作中,进料量的恒定具有重要意义,进料的波动会影响到塔的生产能力和塔的产品分离效果。因此,流量操作不稳会严重影响产品的质量。改变送料离心泵出口阻力的大小,可达到调节流量的目的。本例应用气动单元组合仪表组成流量调节系统。在进料管道上安装一个孔板节流装

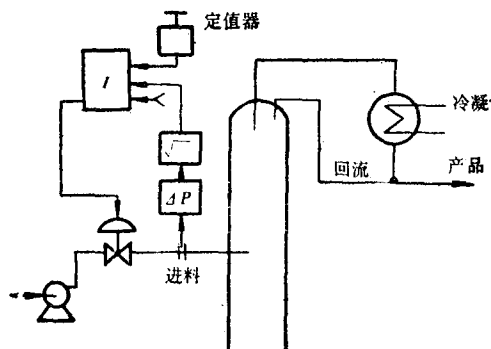


图 1-3 蒸馏塔进料流量调节系统

I —积分调节器 $\sqrt{\quad}$ —开方器 ΔP —差压变送器

置。由于进料量的大小与孔板前后差压的平方根成正比，故在线路中接入一个开方器，以获得流量信号。流量信号及其给定值在调节器里进行比较，差值按积分规律运算，发出指令开闭调节阀，使进料流量维持在给定值上。因目前没有纯积分的调节器，故用比例积分调节器代替，使用时比例带放在最大的刻度上。

例四 小型发电厂过热蒸汽温度控制系统：

过热蒸汽温度控制是保证汽轮机组正常运行的一个重要条件。从锅炉出来的蒸汽，经过过热器形成过热蒸汽。为了便于操作和控制，在过热器之前或中间部分串接一个减温器，用注入热水的形式改变蒸汽温度。本系统采用 DDZ-III 型单元组合仪表*，用热电偶检测过热蒸汽的温度，经毫伏变送

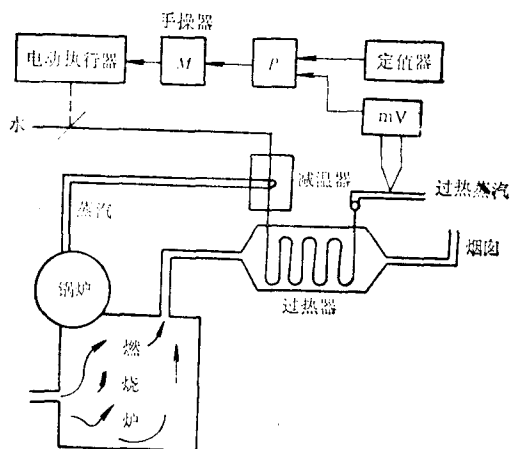


图 1-4 发电厂过热蒸汽温度控制系统

P—比例调节器 M—手动操作器

* DDZ-III 型电动单元组合仪表主要用于防爆场合，但也用于非防爆场合。

器变成 $4\sim 20\text{ mA}$ 的标准信号, 与代表蒸汽温度的给定信号, 在比例调节器进行比较, 然后按比例动作发出指令, 操作电动执行器, 从而改变热水的注入量, 使蒸汽温度返回到给定值附近。

从上述四个例子可以看出:

1. 一个简单的 PID 调节系统包括两大部分: 一个是控制对象; 另一个是工业自动化仪表 (包括测量元件及变送器、调节器、执行机构和调节阀)。
2. 简单 PID 调节系统是单回路调节系统。
3. 不同的控制对象所采用的工业自动化仪表亦不同。

二、一个实验的结论

上述四个系统均采用了不同类型的调节器, 这是什么道理呢? 有没有内在的规律可循? 为说明这一规律, 可以进行如下一个实验: 在一个水力模拟装置上进行各种调节规律的试验, 如图 1-5 所示。图中进料管道有一段是连接可改变长度的胶皮管, 在进料管道上装有一个调节阀。这个控制对

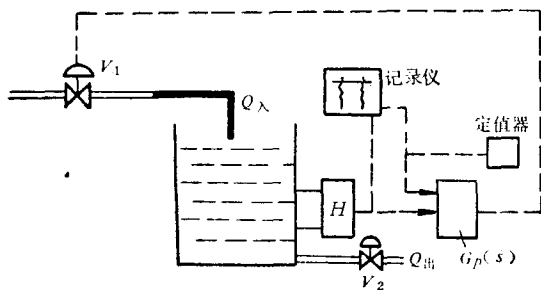


图 1-5 液位调节试验系统

Q_{λ} —进料流量 $Q_{出}$ —出料流量 H —液位变送器
 $G_p(s)$ —调节器 V_1, V_2 —调节阀

象的特性可以用外加试验信号加以测定。

(一) 贮槽的阶跃响应曲线

贮槽稳定操作时, 由于进、出贮槽的液体流量相等, 即 $Q_{\lambda 0} = Q_{\text{出}0}$ 。因此, 贮槽液位维持在原给定值 h_0 上。此时用人工操作进料管上的调节阀, 使进料流量 Q_{λ} 阶跃变化为

$$Q_{\lambda} = Q_{\lambda 0} + \Delta Q_{\lambda} \quad (1-1)$$

利用记录仪表记下贮槽液位的响应曲线, 如图 1-6 所示, 由图可见, 在 Q_{λ} 变化以后, 经过时间 τ 后, 液位才逐渐上升, τ 的大小由式(1-2)的计算结果决定

$$\tau = \frac{LA}{Q_{\lambda}} \quad (\text{秒}) \quad (1-2)$$

式中 τ ——纯滞后时间(秒);

L ——由调节阀 V_1 至贮槽入口的管道长度(米);

Q_{λ} ——进料管道的体积流量(米³/秒);

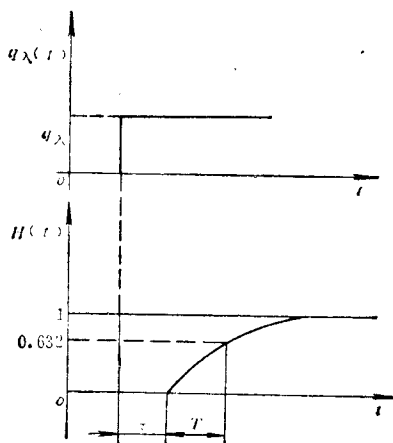


图 1-6 液位扰动试验曲线

$$H(t) = \frac{h(t) - h_0}{h_0} \quad q_{\lambda}(t) = \frac{\Delta Q_{\lambda}(t)}{Q}$$