

自动调节系统的 工程设计方法

The Design Method of Automatic
Regulating System in Engineering

刘 维 著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



自动调节系统的工程设计方法

刘 维 著



机械工业出版社

本书系统介绍了调节控制系统的相位—工作周期设计方法。先后引入了调节系统的小偏差调节概念,静态、动态增益概念,相位移和闭环工作周期概念,以及内、外环路的隔离度概念等。之后给出了控制系统中8类环节的相位、动态增益计算公式,论证了串级调节系统的6项基本性质,研究、确定了控制性能的优化判据和准则。上述工作构成了相位—工作周期方法的理论基础。相位—工作周期设计方法适用于单输入—单输出控制系统,也适用于多输入—多输出系统。本书列举了快速受控过程、具有迟延时间的缓慢受控过程的设计实例,还给出了多变量控制系统的经济结构设计方法。所举设计实例具有启发性,可供工程设计参考。

相位—工作周期设计方法具有理论的创新性、工程方法的实用性,适合控制系统的工程设计、调试人员使用,也可供控制类专业的研究生及高年级学生参考。

图书在版编目(CIP)数据

自动调节系统的工程设计方法/刘维著. —北京:机械工业出版社, 2011.8

ISBN 978-7-111-35496-3

I. ①自… II. ①刘… III. ①自动调节系统—设计 IV. ①TP272

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第154902号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:张俊红 责任编辑:张俊红 版式设计:张世琴

责任校对:樊钟英 封面设计:马精明 责任印制:李妍

北京富生印刷厂印刷

2011年11月第1版第1次印刷

184mm×260mm·18.25印张·452千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-35496-3

定价:58.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

工程中,自动控制任务可分为两类:顺序控制(Sequence Control)任务及参数调节(Parameter Regulate)任务。

受控过程、工艺装备的启动和停止操作,以及事故状态下的保护动作和安全停机操作均属于顺序控制任务。原则上,依照工艺过程和受控装备的需要,采用二进制的开关(On-Off)信号执行的操作。如阀门的开—关,泵机、风机、电动机等的启/停操作,属于顺序控制任务。顺序控制与工艺装备的操作特性密切相关,只有深刻理解工艺装备的要求或约束,才能设计出实用、优良的顺序控制程序。

为稳定、优化生产过程,必须精细控制工艺过程的状态参数,如温度、压力、流量、位置、转速等。工艺状态的连续性,受控参数的精确性是生产过程的普遍要求,由此形成了自动控制中的参数调节任务,并成为控制工程中的重要内容。本书将分析、研究受控过程的动态特性,给出解析、优化的自动调节系统的工程设计方法。

根据现代控制理论的提法,过程控制系统分为单输入—单输出控制系统和多变量控制系统两类。本书首先研究单输入—单输出控制系统的优化设计问题,然后解决多变量控制系统的结构优化问题。单输入—单输出控制系统是多变量控制系统的基础,将调节策略、工作参数的优化确定与多变量系统的结构设计相结合,构成了统一的调节控制系统设计方法。

调节系统的设计主要关心三方面的内容:调节策略和工作参数的确定,多变量系统的结构设计,以及控制装置的配置和开发设计。本书侧重前两个方面的论述,也将研究高性能、高可靠控制器的设计思想。只有深刻理解过程控制对控制计算机的技术需求,才能设计出性能卓越、安全可靠的控制计算机;只有系统地建立正确的总体设计思想,才能使控制装备持续地进步,研发工作不走或少走弯路。

众所周知,串级调节策略是过程控制的基础方法。该方法历经了长期的工程考验,以安全可靠、普遍适用著名,堪称人类工程智慧的结晶。但遗憾的是,虽然人们在工程中普遍地使用它,但是调节策略的设计、工作参数的整定一直采用了实验、试凑、以个人满意为准则的方法。缺乏“优化和量化”是调节系统设计方法的现状。

经过30多年的实践、研究,作者探索形成了一套方法,称为“相位—工作周期设计方法”。该方法建立了实用的控制性能准则,解决了调节系统工作参数的优化计算问题,适用于工程使用,可用于单输入—单输出控制系统,并且推广到了多变量控制系统。该方法的基本思路如下:

将电路系统、控制理论知识结合在一起,引入了如下概念:小偏差调节概念;控制周期、工作周期概念;静态增益、动态增益概念;计算机控制装置的确定性概念;串级调节回路中,内、外回路工作信号的分离、解耦概念等。基于这些概念,可以量化比较

调节参数的优劣, 计算系统的控制性能, 如过渡过程时间、归一化相对误差等, 解决了调节系统的量化分析及优化设计问题。

遵循“从物理概念开始, 得到计算公式、形成优化方法”的思路, 本书重视工程和物理概念的叙述, 将数学说明放在每章之后。希望做到: 易于掌握概念、便于使用, 并使优化方法具有数学论证的支持和坚实的基础。

下面对本书的内容、结构做简单介绍。

第1章: 概述了工程中的受控过程及常用调节策略, 说明了不同调节策略的使用背景、局限性。从而可对常用的调节策略, 如单回路调节、串级调节、预估与预测方法, 以及自适应、自学习方法等, 有一个概略、综合的理解。

第2章: 介绍了闭环系统中的物理现象和基本概念, 引入了调节系统的静态增益与动态增益概念, 相位移及工作周期概念; 将受控过程中的物理环节分为8种类型, 得到它们的动态增益、相移计算公式。这是相位—工作周期设计方法的基础。

第3章: 介绍了调节系统的控制性能判据。控制性能的优劣、调节参数的好坏需要客观标准。本章分析了著名的误差平方积分准则, 介绍了该准则在工程中的误差计算公式, 说明了公式的推导过程, 以及使用中遇到的约束。之后, 本章重点介绍了固定增益下的误差积分准则, 分析了该准则的物理概念, 给出了准则的证明, 并从工程应用的观点对两种准则做了比较。

因为具有物理概念的直观性、工程计算的简便性、择优排序的正确性, 本书使用了固定增益下的误差积分准则。

第4章: 介绍了串级调节系统的6项基本特性。

串级调节系统分为内环路和外环路子系统, 两者串联构成, 系统结构如图0-1所示。

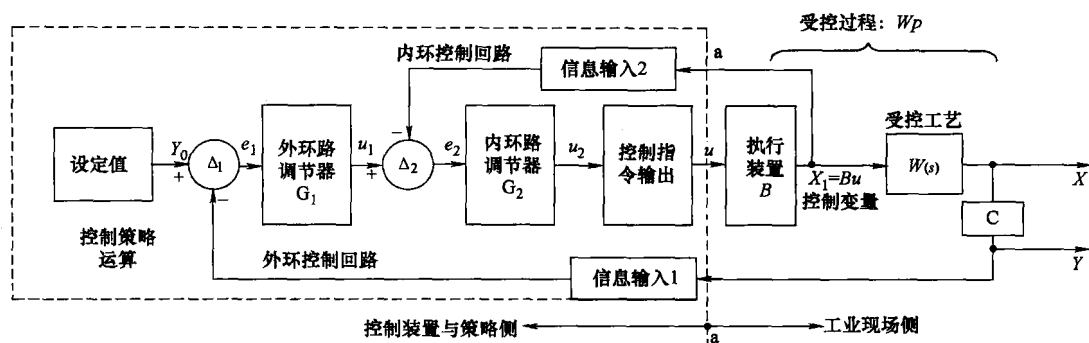


图0-1 调节控制系统的信息流结构

内环路系统由下述环节构成: 偏差求解环节 Δ_2 , 内环路调节器 G_2 , 控制指令输出环节, 执行装置环节 B , 控制变量 X_1 及反馈信息输入2环节。

外环路系统由下述环节构成: 设定值及偏差求解环节 Δ_1 , 外环路调节器 G_1 , 内环路子系统, 受控工艺过程 $W(s)$, 观测装置 C 及反馈信息输入1构成。

内环路系统以稳定控制变量 X_1 为目标; 外环路系统以稳定工艺状态的观测变量 Y ,

使之达到设定值 Y_0 为控制目标。内环路系统是外环路系统的执行控制回路，外环路系统实现了状态变量 Y 的最终调节目的。

在给出 8 类环节的基础公式之后，本章研究、论证了串级调节系统的 6 种特性，阐述了内、外环系统之间的关系，这是分析、设计调节系统的另一基础。

第 5 章：引入调节器装置的重要概念——控制周期 T_0 。本章指出 T_0 是控制系统中的一个不可控环节，分析了能控性与 T_0 参数的关系，给出了工程实例，说明调节系统对 T_0 参数的技术要求。

第 6 章：在前述章节的基础上，给出单输入—单输出调节系统的优化设计方法，并且以工程系统进行了实例计算。

第 7 章：快速受控过程的调节系统设计。

依照受控变量对控制指令的响应速度，受控过程分为快速、中速和慢速三类。本章以高速旋转机械系统为例，分析快速过程调节系统的设计问题及处理方法，可作为快速过程控制系统的设计参考。

第 8 章：大时间常数受控过程控制系统的设计。

大时间常数受控过程是一类常见的重要控制对象，经常成为控制系统设计的难点。时间常数有两种：迟延时间和惯性时间。两种时间常数对控制指令的响应截然不同，本章采用相位—周期方法量化分析了这类系统的特性，给出了实例计算。可作为同类系统工程设计的参考。

大迟延时间过程常用 Smith 预估控制方法。本章分析了工程中的实现技术问题，介绍了采用观测数据的直接预测控制方法，给出了细化的计算过程和仿真结果。

第 9 章：介绍了工程中的多变量控制系统。

首先，分析了线性系统理论模型 (A, B, C) 与工程控制系统结构的异同，给出了工程中多变量调节系统的结构及传递函数。其次，研究了工程中控制误差的构成和分类，给出了“无静差”调节策略的充分必要条件。分析了常规调节策略与优化控制策略，如自适应控制策略、预测控制、管理决策之间的关系以及结合方法。

第 10 章：介绍了多变量控制系统的结构及经济结构的设计方法。

首先，分析了坐标系的选择与 (A, B, C) 模型的关系。正确地选择坐标系，可以改变模型矩阵的表现形式，但不会改变问题的物理性质。不同坐标系下的系统矩阵 A 具有相似等价关系， B 、 C 矩阵具有相抵关系。选择标准化、简单化的 A 矩阵可以简化系统的分析、设计工作。本章介绍了 A 矩阵的 Jordan 型分类结构。基于分类的 Jordan 型矩阵，给出了多变量控制系统的经济结构设计方法。并且指出了工程中的多变量控制系统，采用了递阶分层分解为相对独立的单变量系统，并进行总体协调的控制系统结构。普遍的做法是：

采用串级调节系统实现具体工艺状态参数的调节任务；利用协调策略实现总体性能的优化控制；实现结构上的完全可控、完全可观性；基于成本及可靠性考虑，通常采用经济结构形式；这就是工程中的多变量控制系统。

第 11 章：介绍了数字控制器的确定性概念与确定性控制系统的实现技术。

第12章：相关的系统理论说明及数学基础附录。

本书系统讲述了自动调节系统的工程设计法，既具有工程的实用性，也有理论的创新性。本书分析了串级调节策略，也分析了自适应控制策略、预测控制策略、运行管理的优化决策及其他先进控制策略。它们的功能有别，需要结合使用。经验表明，先进控制策略与串级调节策略应当互为补充、互相协调，不是相互取代的关系。

本书适合从事控制工程的技术人员阅读，也可以作为自动化专业的本科生、研究生的教学参考书。

相位—工作周期设计方法是作者长期实践的理论总结，经过了长时间的使用验证。但是由于水平有限，错、漏之处在所难免，希望得到大家的指正，共同促进控制理论与工程实践的结合，共同发展行之有效的控制系统的工程设计方法。

作 者

目 录

前言

第1章 受控过程与调节策略概述 1

- 1.1 小偏差调节状态与静态前馈指令 1
- 1.2 串级调节策略和控制作用 3
- 1.3 迟延环节与预估控制方法 6
- 1.4 采用观测数据的直接预测控制方法 8
- 1.5 自适应、自学习控制策略及其应用 9
 - 1.5.1 管道输油工艺的介绍 9
 - 1.5.2 原油升压控制系统 10
 - 1.5.3 原油升温控制系统 11
 - 1.5.4 出站油温 T_0 、压力 P_0 的优化确定
及环境适应控制策略 12
 - 1.5.5 管道使用直径 D 的变化及经济
运行管理 13
 - 1.5.6 燃烧控制及送风—引风控制
系统 14
- 1.6 附录：流量—液位调节系统的模型
分析 16

第2章 闭环调节系统的基本概念 19

- 2.1 闭环反馈系统中的现象 19
- 2.2 物理环节的分类和动态增益、相移
计算 22
 - 2.2.1 零—极点描述与增益、相位
关系 23
 - 2.2.2 分类的动态增益、相移的计算 24
- 2.3 单回路调节器的工作参数计算 28
 - 2.3.1 比例调节器情况 28
 - 2.3.2 积分调节器情况 29
 - 2.3.3 比例—积分调节器情况 30

第3章 调节系统的控制性能判据 32

- 3.1 误差的平方积分准则 32
- 3.2 固定增益的误差积分准则 36
- 3.3 误差的平方积分的递推公式 38
 - 3.3.1 基本关系 38
 - 3.3.2 系统阶数 $1 \leq k \leq 5$ 的 I_k 的计算
公式 39
 - 3.3.3 公式的降阶验证 44

第4章 串级调节系统的基本特性 46

- 4.1 内环路受控过程 46
- 4.2 典型的外环路系统受控过程 47
 - 4.2.1 外环路工艺对象的分类 47
 - 4.2.2 给水—水位控制系统的描述 48
- 4.3 串级系统的基本特性 50
- 4.4 串级系统的内、外环路的隔离度 60
 - 4.4.1 内—外环路的耦合及隔离概念 60
 - 4.4.2 给水串级系统的分析 61
 - 4.4.3 一般串级系统内、外回路的
隔离度 62
- 4.5 评述 63
- 4.6 控制执行装置的模型描述 64
 - 4.6.1 执行器装置的特性分析 64
 - 4.6.2 线性系统的零点、极点描述和
频率响应 70

第5章 能控性与控制周期 74

- 5.1 控制周期 (T_0) 定义 74
- 5.2 控制周期是不可控环节 75
- 5.3 典型工业过程的实例分析 76
 - 5.3.1 旋转机械系统的控制周期分析 76
 - 5.3.2 给水系统的控制周期分析 78
- 5.4 模拟系统的信号延时与控制
周期 79
 - 5.4.1 模拟系统的信号延时 79
 - 5.4.2 模拟调节器和信号延时估算 81

第6章 调节系统的优化设计方法 82

- 6.1 串级调节系统的内环路设计 82
- 6.2 控制周期 T_0 对内环路调节性能的
影响 85
 - 6.2.1 $T_0 = 200\text{ms}$ 情况 86
 - 6.2.2 $T_0 = 500\text{ms}$ 情况 87
- 6.3 外环路调节系统的设计 88
 - 6.3.1 外环路调节系统的设计方法 88
 - 6.3.2 锅炉给水—水位系统的设计 89
 - 6.3.3 $T_0 = 0$ 情况 91
 - 6.3.4 $T_0 = 200\text{ms}$ 情况 93

6.3.5 $T_0 \approx 500\text{ms}$ 情况	93	预测	138
6.4 闭环工作周期与内、外环路系统的 隔离度	95	8.9.3 预测控制的实现	140
6.5 抗负荷扰动的调节策略设计	96	8.9.4 算法实现及仿真	141
6.6 调节系统优化设计的一般认识	98	8.10 附注: 函数逼近与曲线拟合	143
第7章 快速受控过程的调节系统		8.10.1 正交函数空间及其基本性质	144
设计	100	8.10.2 内积和 Hilbert 空间概念	145
7.1 汽轮机受控过程与控制系统的结构 ..	100	8.10.3 最小二乘曲线拟合的算法	148
7.2 转速测量的技术要求与实现方法	102	第9章 工程中的多变量控制系统	150
7.2.1 转速测量的技术要求	102	9.1 线性化与状态空间模型	150
7.2.2 测量方法分析	102	9.2 工程中的多变量调节策略	152
7.3 内环路控制系统的设计与选择	104	9.2.1 静态工作点与偏差	153
7.3.1 内环路受控过程模型	104	9.2.2 偏差分类与校正策略	153
7.3.2 内环路的工作参数与性能	104	9.3 多变量调节控制系统的结构	156
7.4 外环路调节系统的设计	109	9.3.1 多变量调节策略与控制系统 结构	156
7.4.1 外环路采用模拟控制装置情况 ..	110	9.3.2 常规调节控制系统的传递函数 ..	157
7.4.2 外环路采用数字控制装置情况 ..	111	9.4 优化控制与串级调节策略	158
7.5 评述	114	9.4.1 稳态偏差的发生与自适应控制 策略	158
第8章 大时间常数受控过程的调节		9.4.2 闭环自适应控制策略	160
控制与优化设计	115	9.4.3 设备的工作效率与运行管理	161
8.1 迟延时间过程与串级调节策略	115	9.5 小偏差调节与“无静差”控制的充要 条件	162
8.1.1 迟延过程控制系统的描述	115	9.6 评述	163
8.1.2 常规调节策略的系统特性	116	第10章 工程中多变量控制系统的	
8.2 惯性时间过程与串级调节策略	118	结构设计	164
8.2.1 惯性过程的比例调节	119	10.1 工程中的多变量控制系统结构 与设计工作	164
8.2.2 惯性过程的积分调节	119	10.2 坐标系选择与相似变换	165
8.2.3 惯性过程的比例-积分调节	121	10.3 相似变换的不变性与不变量	170
8.3 惯性过程的单回路调节	122	10.3.1 相似变换及相似等价类	170
8.4 大时间常数过程控制系统的一般 特性	124	10.3.2 相似变换下的传递函数	170
8.5 迟延过程的预估控制思想	125	10.3.3 相似变换下的特征多项式	171
8.5.1 Smith 预估控制	125	10.3.4 能控性、能观性	172
8.5.2 预估器 $G_e(s)$ 的插入方式	126	10.3.5 A 矩阵的元素位置和意义	173
8.6 模型精确的预估控制性能	128	10.4 特征向量及系统矩阵的标准型	174
8.6.1 外环路系统的工作周期	128	10.4.1 特征向量与对角矩阵系统	174
8.6.2 精确模型下的 Smith 预估控制 性能	128	10.4.2 矩阵的 Jordan 标准型	175
8.7 预估模型的参数误差影响	131	10.4.3 结构说明	176
8.8 采用模型预测的控制方法	135	10.5 矩阵化 Jordan 型的变换算法	177
8.9 采用观测值的直接预测控制	137	10.5.1 从实例分析变换过程	177
8.9.1 预估技术与预测控制方法	137	10.5.2 情况 1: 单特征根, $q_0 = 1$ 系统	
8.9.2 测量数据的曲线拟合和变量			

的 J 型变换	180	11.3.1 运算放大器的共模增益、共模抑制比	214
10.5.3 情况 2: 单特征根, $q_0 > 1$ 系统的 J 型变换	181	11.3.2 放大组件的共模扰动抑制原理	215
10.5.4 情况 3: 一般系统的 J 型变换	183	11.3.3 闭环放大系统的共模抑制比	217
10.6 多变量控制系统的结构设计	186	11.4 信号的故障诊断和冗余切换技术	219
10.6.1 系统矩阵的结构分类	186	11.4.1 输入信号的常用冗余方式	219
10.6.2 J_a 型矩阵的控制系统经济结构	187	11.4.2 输入信号的故障诊断	220
10.6.3 J_b 型矩阵的控制系统经济结构	188	11.4.3 双冗余信号的故障切换程序	222
10.6.4 J_c 型矩阵的控制系统经济结构	189	11.4.4 三冗余信号的故障切换程序	225
10.7 完全可控系统的控制变量数	190	11.5 模拟输出通道及执行器的故障诊断	226
10.7.1 情况 1: 互异特征根 λ_i , 且 $q_i = 1$	191	11.5.1 诊断中的子程序	226
10.7.2 情况 2: 单特征根 λ_0 , 且 $q_0 > 1$	192	11.5.2 故障诊断逻辑及程序	227
10.7.3 情况 3: 输出可控、可观系统的控制变量数	193	11.5.3 故障后的安全保护及初始化	228
10.8 工程中多变量控制系统的结构分析	196	11.6 变增益调节器的设计与应用	229
10.8.1 发电机组控制系统的结构	196	11.7 对称的受控过程与平衡调节方法	231
10.8.2 子系统结构分析	197	11.7.1 程序功能与应用背景	231
10.9 评述	202	11.7.2 两侧固有不平衡的校正	232
第 11 章 确定性概念与控制系统的实现技术	204	11.7.3 单侧手动方式下的补偿	233
11.1 确定性概念与控制精度	205	11.7.4 调节器反馈跟踪信号分析	233
11.1.1 控制周期的时间稳定性与运算精度	205	11.7.5 单侧故障时的动态补偿和变增益调节功能	234
11.1.2 微分算法精度与 T_s 的稳定性	206	11.8 控制器的故障诊断与冗余切换技术	234
11.1.3 积分算法精度与 T_s 的稳定性	207	11.8.1 控制器冗余方式及故障概率	235
11.1.4 变化率算法与 T_s 的稳定性	207	11.8.2 控制器的无扰动切换技术要求	236
11.1.5 一阶惯性算法与 T_s 的稳定性	208	11.8.3 控制器系统的结构及故障诊断、切换	237
11.1.6 控制任务的调度方式与无逆序程序	209	11.8.4 切换功能和故障判别准则	239
11.2 信号测量与滤波技术	210	11.8.5 逻辑功能及程序实现	240
11.2.1 Γ 形滤波器的幅频、相移特性	210	第 12 章 数学证明及线性系统的基本理论	244
11.2.2 双 Γ 形及 π 形滤波器的幅频—相移特性	211	12.1 误差平方的积分公式证明	244
11.2.3 单频滤波器的幅频、相移特性	213	12.1.1 降阶系统和稳定性条件	244
11.3 抗共模干扰技术	214	12.1.2 稳定性条件及证明	245
		12.1.3 递推公式及证明	249
		12.1.4 证明中的细节补充	253
		12.2 矩阵的秩及几何意义	255
		12.2.1 矩阵的秩	255
		12.2.2 矩阵的初等变换与秩的确定	258
		12.3 状态变量的微分方程与系统的状态	

转移矩阵	259	12.3.5 特征向量与系统结构	268
12.3.1 状态向量和微分方程	259	12.3.6 复特征值及状态演化表示	272
12.3.2 微分方程的解和转移矩阵	261	12.3.7 重特征根与系统结构	274
12.3.3 状态转移矩阵	263	参考文献	280
12.3.4 状态转移矩阵的求解	265		

第1章 受控过程与调节策略概述

工业受控过程形式繁多、类型各异，本章从典型工业过程及简单回路开始，叙述控制策略的基本概念，说明受控过程与控制策略的关系。介绍重要的小偏差调节概念，分析串级调节系统中内环、外环调节回路的作用。希望通过典型实例的说明，能够获得解决复杂问题的正确方法。

作为调节策略的概述，这里既分析常规策略的功能，也介绍先进策略产生的背景及解决的问题，说明常规策略、先进策略的关系。它们解决了不同的问题，是相互补充而不是替代关系。这些概念虽然以单输入—单输出控制系统为例引出，但不难相信同样适用于多变量控制系统。

1.1 小偏差调节状态与静态前馈指令

图 1-1 所示为流量—液位受控过程的负反馈控制方法。令容器的等效截面积 S 为常数，进入容器的输入流量为 F_i ，容器的输出流量为 F_o ，实测的液位为 h 。

物理过程分析如下：

(1) 情况 1：出口调节阀的开度不变

如果初始的输入、输出流量不等：因为 $F_i(0) \neq F_o(0)$ ，容器液位 h 将上升或降低。因阀门开度恒定，随着液位 h 的提高或降低，排出流量 F_o 将提高或降低，并使液位 h 的变化率下降，这是受控过程自身的负反馈调节作用。

当容器体积足够大时，存在平衡水位 h^* ，使得 $F_i = F_o$ ，此时液位 h 的变化率为零、 h 保持恒定。这类系统具有自平衡性质，可用一阶惯性模型描述。当然，仅仅依靠过程自身的平衡作用，液位的波动 $\Delta h = h - h^*$ 将很大，常常是工艺标准不能承受的。需采用外部的偏差校正环节，如图 1-1 所示的输出流量 F_o 调节作用，使得液位保持恒定。

(2) 情况 2：输出流量 F_o 不变

由于输入流量 F_i 不做控制、输出流量 F_o 保持恒定，因此只要输入、输出流量不等即 $F_i \neq F_o$ ，液位 h 将连续变化，物理过程不存在平衡点。结果必然为或者液位降低至零，或者液体溢出。显然这是积分作用，可以用积分环节的模式描述。

(3) 大偏差与小偏差调节状态

由于输入流量 F_i 不做控制、输出流量 F_o 保持恒定，因此只要输入、输出流量不等即 $F_i \neq F_o$ ，液位 h 将连续变化，物理过程不存在平衡点。结果必然为或者液位降低至零，或者液体溢出。显然这是积分作用，可以用积分环节的模式描述。

(3) 大偏差与小偏差调节状态

如图 1-1 所示，设理想液位为 h_0 ，当出现偏差 $e = h - h_0 \neq 0$ 时，信号 e 送入偏差校正环节、输出控制指令 C ，微调阀门的输出流量 F_o ，完成校正调节作用：

$e > 0$ 时，表明液位偏高，应增大阀门开度、提高输出流量 F_o ，使液位降低；

$e < 0$ 时，表明液位偏低，应减少阀门开度、降低输出流量 F_o ，使液位增高。

负反馈调节策略似乎是完美的，能够解决液位控制问题。但是，该系统的调节性能不

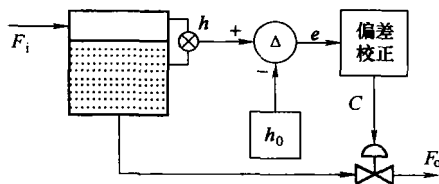


图 1-1 负反馈策略控制方法

好, 总会存在较大的水位偏差 e 。原因如下:

此种状态下, 作为液位控制变量的流量 F_o 或阀门开度, 完全由偏差 e 确定。换言之, 偏差信号 e 的大小决定了阀门开度或流量的 100% 变化。这样的工作状态称为大偏差调节状态, 不是理想的调节系统工作状态, 改进控制的方法如图 1-2 所示。

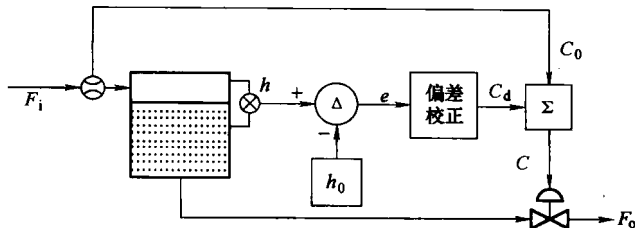


图 1-2 前馈指令与小偏差调节状态

由物理概念可知, 液位平衡的充分必要条件是

$$\text{输出流量 } F_o = \text{输入流量 } F_i$$

满足此式后液位将稳定地保持不变。因此, 合理的调节策略如下:

将输入流量 F_i 转化为对应的控制指令 C_0 , 送入加法器 (Σ), 系统的输出指令为

$$C = C_0 + C_d \quad (1-1)$$

综合指令 C 分为两部分: C_0 为静态前馈指令, 使流量 F_o 跟随 F_i 变化, 表达了静态 (或工作点) 流量, 是指令 C 的主体部分; C_d 为动态校正指令。调节控制的过程如下:

- 1) 当 $e = h - h_0 = 0$ 时动态校正指令 $C_d = 0$, $C = C_0$;
- 2) 当 $e = h - h_0 \neq 0$ 时动态校正指令 $C_d \neq 0$, 其值可正、可负, 随偏差 e 的符号确定;
- 3) 综合控制指令 C 是在 C_0 点上、下的小幅度摆动量, 摆动的幅值由 C_d 决定。这样动态校正指令 C_d 仅校正了偏差流量 $\Delta F = F_o - F_i$, 不再是总流量 F_o 。由于 $|\Delta F| \ll F_o$, 此种工作方式称为小偏差调节状态。

小偏差调节状态具有如下特点:

- 1) 如果静态前馈指令 C_0 使得流量 $F_o = F_i$, 则液位不变、偏差为零: $e = h - h_0 = 0$;
- 2) 对于稳定系统, 小偏差调节状态下的误差远小于大偏差状态下的偏差量。

无论何种原因, 只要 $F_o \neq F_i$, 调节系统必然产生稳态偏差 $e = h - h_0 \neq 0$, 并发生动态校正动作, 即 $C_d \neq 0$ 。对于调节控制系统, 此种认识可推广为更强的结论:

只要静态前馈指令 C_0 不精确, 则必然产生稳态偏差 $e \neq 0$ 。因此, 调节系统无稳态误差 (或无静差) 的必要条件是静态前馈指令 C_0 精确, 后面还将分析此问题。精确的静态控制指令使得闭环系统进入了小偏差调节状态, 这是提高控制性能的正确工作方式。

【评述】

1) 调节控制指令 C 分为静态前馈指令 C_0 、动态校正指令 C_d 两部分。指令 C_0 确定了工作点, 决定了系统的基本负荷。当系统状态偏离工作点时产生误差及动态指令 C_d , 其值可正、可负, 发挥了快速纠偏、动态校正作用。正常工作的系统, 总有关系 $|C_d| \ll C_0$ 。

2) 准确的静态前馈指令 C_0 , 是系统进入小偏差调节状态、实现无静差控制的必要条件。

3) 任何受控过程总有非线性, 调节系统的回路设计至少包含了两方面的工作:

其一，确定静态前馈指令 C_0 。 C_0 发挥了使受控变量达到理想工作点的稳态控制作用。

其二，偏差校正策略的设计。根据偏差信号 e ，得到准确的动态校正指令 C_d ，快速校正工作点邻域内的动态偏差，此校正动作属邻域内的线性调节行为。

1.2 串级调节策略和控制作用

图 1-3 所示为工程中常见的换热器控制系统。温度为 T_1 的被加热物料，以流量 F_i 自左侧进入换热器；在换热器内，经过温度 T_2 、流量为 F_s 的加热工质，自右至左、对物料逆向加热；换热器出口得到温度为 T 的物料；高温流体是提高物料温度的工作介质，调节工质流量可将物料加热至理想温度 $T = T_0$ ；换热器冷端排出的工质温度为 T_3 、流量为 F_w ；加热工质无损耗时 $F_w = F_s$ 。工质温度、物料的输出、输入温度具有关系： $T_2 > T \approx T_0 > T_1$ 。

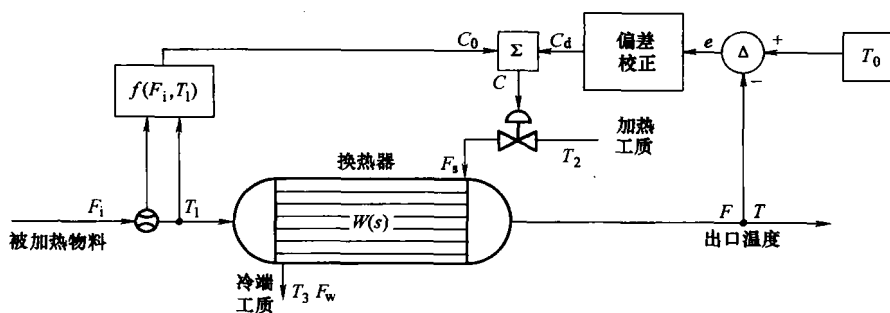


图 1-3 具有前馈控制指令的换热器控制系统

如图 1-3 所示，设换热器的效率为 $0 < k < 1$ ，过程的热量平衡关系为

工质的有效散热量 (kQ_s) = 物料的吸热量 (Q_{in})

采用前述的小偏差调节策略，对于静态控制指令的分析如下。记单位质量的工质流量自 T_2 降至 T_3 的平均散热量为 q_s ，则流量 F_s 的工质总散热量为 $Q_s = q_s F_s$ ；单位质量流量、每升温 1°C 的物料吸收热量为 q_i ，物料 F_i 的总吸收热量为 $Q_{in} = q_i F_i$ ；换热效率为 k ，则加热工质的稳态需求流量可表示为

$$F_{s0} = \frac{q_i F_i}{q_s k} (T_0 - T_1) \quad (1-2)$$

令 F_{s0} 对应了前述的静态前馈指令 C_0 ， F_{s0} 正比于被加热物料的输入流量 F_i 、升温的温差 ($T_0 - T_1$)。静态前馈指令 C_0 送入图 1-3 所示的加法器 (Σ) 环节；测量得到物料的实际温度为 T ，偏差为

$$e = T_0 - T$$

信号 e 进入偏差校正环节得到动态校正指令 C_d ，并输入加法器 (Σ) 环节，阀门控制指令为

$$C = C_0 + C_d$$

动态校正指令 C_d 满足关系：

1) $e = 0$ 时，出口物料温度偏差为 0，动态校正指令 $C_d = 0$ ， $C = C_0$ ，加热工质的流量不变；

4 自动调节系统的工程设计方法

2) $e = T_0 - T < 0$, 出口物料温度偏高, 动态校正指令 $C_d < 0$, $C < C_0$, 阀门微关、减小工质流量;

3) $e = T_0 - T > 0$, 出口物料温度偏低, 动态校正指令 $C_d > 0$, $C > C_0$, 阀门微开、微增工质流量。

依照前述, 闭环系统进入了小偏差调节状态, 阀门开度处于 C_0 值邻域内, 控制作用似乎完美。但是图 1-3 所示的调节策略并不理想, 难于获得良好效果。原因是, 在此系统中, 存在两类性质的控制误差:

1) 阀门装置的执行误差。平衡状态下的静态前馈指令为 C_0 , 对应的工质流量应为 F_{s0} , 但是由于存在执行偏差, 实际工质流量只能满足近似关系 $F_s \approx F_{s0}$, 经常为 $e_2 = F_{s0} - F_s \neq 0$ 。

2) 即使蒸汽流量 $F_s = F_{s0}$, 由于换热过程的动态原因, 物料出口的温度 T 不一定等于 T_0 , 经常为 $T \approx T_0$, 即 $e_1 = T_0 - T \neq 0$ 。

偏差 e_2 属于控制装置的执行偏差, 随阀门的开度偏差快速产生、快速改变。与此不同, 偏差 $e_1 = T_0 - T \neq 0$ 是换热过程的受控变量偏差, 不随阀门开度的改变立即出现。阀门开度变化之后, 需要经过换热、升温过程才能表现出来, 具有缓慢显现的性质。

e_1 、 e_2 的综合作用造成了受控物料温度的偏差及波动。由于偏差的动态性质不同, 采用一个动态校正指令 C_d , 不区分偏差的快速、缓慢特性, 不会取得良好的控制效果。这是图 1-3 所示控制方案的缺点。改进的方法如图 1-4 所示。

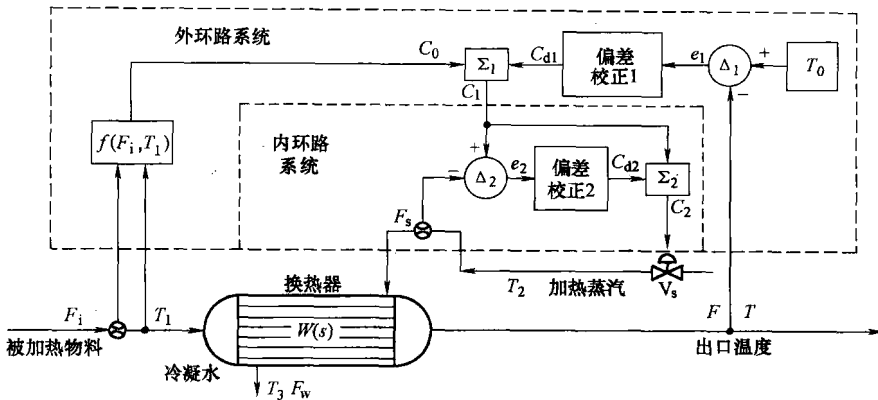


图 1-4 换热器控制系统的串级调节策略

图 1-4 设置了两个调节回路：内回路为工质流量控制系统，外回路为物料温度控制系统。它们串级连接，分别执行了工质流量偏差、输出温度偏差的校正动作。这就是串级调节策略。

内回路系统由工质流量 F_s 的测量环节、 Δ_2 偏差计算环节、偏差校正 2 环节、加法器 Σ_2 环节组成。 Σ_2 输出了控制指令 C_2 , 内回路系统执行了加热工质流量 F_s 的控制作用。

外回路系统由输入物料的流量 F_i 、温度 T_i 测量环节、静态控制指令 C_0 的形成函数 $f(F_i, T_i)$ 、加热后物料温度 T 的测量环节、设定值 T_0 环节、偏差计算 Δ_1 环节、偏差校正 1 环节、加法器 Σ_1 环节和内回路系统组成。

外回路的输出为内回路设定值指令 C_1 , 由两部分构成, 即 $C_1 = C_0 + C_{d1}$ 。生成方法如下:

1) 根据测量得到的物料流量 F_i 、温度 T_i ，由式 (1-2) 得到需要的静态工质流量 F_{s0} ，并产生对应的静态控制指令 C_0 。

2) 由换热器出口物料的温差 $e_1 = T_0 - T$ ，经偏差校正 1 环节生成了动态校正指令 C_{d1} 。

3) 两者比较 $|C_{d1}| \ll C_0$ ，外环路系统进入了小偏差工作状态。

外环路系统输出的控制指令 C_1 为内环路系统的设定值。内环路系统的控制目标为将工质流量稳定在设定值 C_1 对应的流量 F_s 。 C_1 指令经 Σ_2 环节，成为阀门 V_s 开度指令 C_2 的主要部分，确定了阀门的静态开度以及加热工质的静态流量 F_{s0} 。

如果工质流量 F_{s0} 能够使换热器输出物料的温度 $T = T_0$ ，则外环路系统处于无偏差状态，即 $e_1 = T_0 - T = 0$ ，此时 $C_{d1} = 0$ 。工程中难于达到此状态，经常处于有差状态。动态的校正过程如下：

(1) 内环路阀门 V_s 的执行偏差校正作用

阀门 V_s 的控制指令由三部分组成，即 $C_2 = C_0 + C_{d1} + C_{d2}$ 。其中， C_0 为静态前馈指令； C_{d1} 为出口物料温度校正指令； C_{d2} 为工质流量偏差的校正指令。 C_1 为内环路设定值， $C_1 = C_0 + C_{d1}$ ， C_0 对应了静态工质流量 F_{s0} 。

指令 C_2 经阀门得到实际工质流量 F_s ，如果存在阀门执行偏差，则 F_s 不等于 C_1 对应的工质流量 F_s^* ，使 $e_2 = F_s^* - F_s \neq 0$ 。偏差信号 e_2 进入偏差校正 2 环节，产生工质流量的动态校正指令 C_{d2} 。 C_{d2} 与 C_1 相加，校正工质流量 F_s ，将其稳定在 C_1 对应的工质流量值。

(2) 外环路的物料温度偏差校正作用

如果模型参数精确、指令的执行无偏差，由式 (1-2) 得到的静态前馈指令 C_0 对应了工质流量 F_{s0} ，并将换热器输出物料的温度稳定在 T_0 值。无论何种原因，只要输出物料温度出现偏差 $e_1 = T_0 - T \neq 0$ ，外环路将产生动态校正作用：偏差 e_1 输入偏差校正 1 环节，得到动态的校正指令 C_{d1} 。校正作用如下：

1) $e_1 = T_0 - T > 0$ 时，物料温度偏低，校正指令 $C_{d1} > 0$ ， $C_1 = C_0 + C_{d1} > C_0$ 。在 C_0 值上，微增设定值 C_1 ，使内环路执行“微增”工质流量的动作。

2) $e_1 = T_0 - T < 0$ 时，物料温度偏高，校正指令 $C_{d1} < 0$ ， $C_1 = C_0 + C_{d1} < C_0$ 。在 C_0 值上，微减设定值 C_1 ，使内环路执行“微减”工质流量的动作。

3) $e_1 = T_0 - T = 0$ 时，物料温度准确，校正指令 $C_{d1} = 0$ ， $C_1 = C_0 + C_{d1} = C_0$ ；指令 C_1 不变。

由于换热器的热传导过程具有“迟延 + 惯性”特性，属于缓慢变化的受控过程，偏差 e_1 的校正是个“慢纠偏”过程；与此不同，阀门开度改变、工质流量变化属于快速响应过程，因此偏差 e_2 的校正是快速纠偏过程。

不同的偏差校正动作，由不同的调节回路执行。外环路修正内环路的设定值，内环路快速校正执行偏差，从而改善了控制性能。这是串级调节策略能够普遍、持久获得应用的原因。

【评述】

1) 内环路受控对象是控制执行装置，它输出的是控制变量，这里为工质流量 F_s 。使控制变量快速跟踪设定值指令 C_1 、实现快速响应，是提高控制性能的一个重要手段。

2) 与内环路系统相比，外环路受控对象是工艺过程，具有相对缓慢变化的性质。设定值指令 C_1 的改变至受控变量（这里是 T ）的变化，往往是“迟延 + 惯性”过程。相对缓慢

的响应是外环路系统的基本特征。实现受控变量的“无静差”调节、扰动作用下的小偏差调节是外环路系统的设计目标。

3) 因为控制装置的执行偏差、受控过程的变量偏差, 两者的快、慢特性不同, 采用内、外环路的串级调节策略, 很好地解决了不同性质偏差的纠偏问题。

以图 1-4 为例, 记内环路阀门装置的传递函数为 $W_2(s)$; 内、外环路动态偏差校正策略分别为 $G_2(s)$ 、 $G_1(s)$; 外环路受控对象的传递函数为 $W_1(s)$ 。图 1-4 所示的串级调节策略如图 1-5 所示。

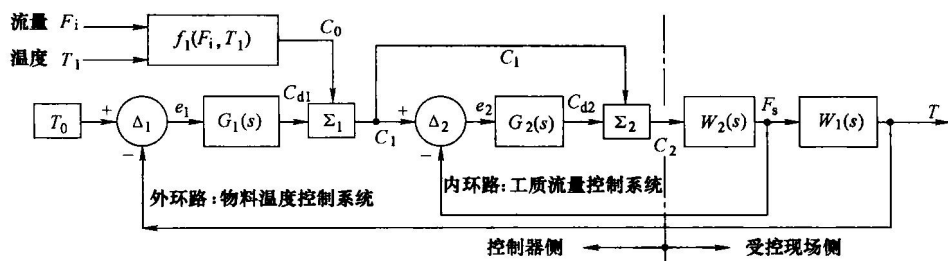


图 1-5 换热器的常规串级调节策略

静态前馈指令 C_0 决定了闭环控制系统的工作点, 并成为内环路前馈指令的主要部分。 C_0 越准确, 控制的效果越好。准确的 C_0 值是提高控制精度、减小调节误差的一个关键因素。

1.3 迟延环节与预估控制方法

由于执行偏差 e_2 、受控过程的变量偏差 e_1 具有不同的动态特性, 采用串级调节策略通常可以取得良好的控制效果。但是当受控过程具有纯时延、特别是大时延环节时, 必然降低串级调节策略的效果。分析如下:

取一段换热器管道, 如图 1-6a 所示。高温流体流经内管道, 被加热物料流经管道外侧; 流动的高温流体首先提高内管道的金属壁温度, 升高的管道金属壁温加热了外部物料。这类受控对象经常是“迟延 + 惯性”过程, 传递函数为

$$W_1(s) = e^{-\tau s} W_D(s) \quad (1-3)$$

式中, s 为拉普拉斯算子; τ 为纯迟延时间; $W_D(s)$ 为惯性过程。

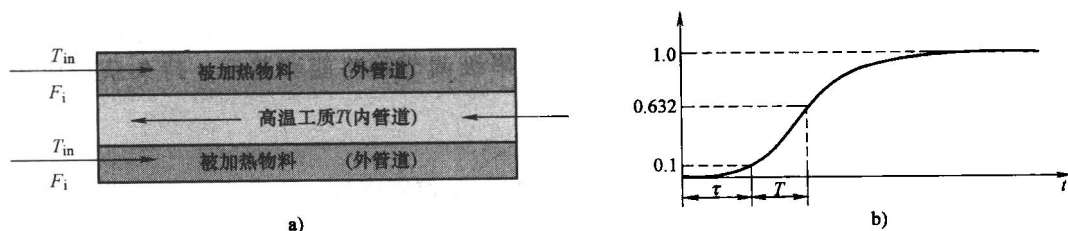


图 1-6 换热器加温对象的迟延现象

a) 换热器管道示意 b) 迟延及惯性环节的阶跃响应