

PERRY 化学工程手册

第 六 版

下 卷

(美)R.H.Perry 著

江苏工业学院图书馆
藏书章

化学工业出版社

(京)新登字039号

内 容 提 要

本书是根据美国著名的 ROBERT H. PERRY 所著的《PERRY'S CHEMICAL ENGINEERS' HANDBOOK》(第六版)译出。

中译本分上、下两卷出版。全书共分27篇,下卷包括第13至27篇,主要内容有:蒸馏,传质与气体吸收,液液萃取,吸附和离子交换,新的分离过程,液-气系统,固体干燥和气固系统,固-固体系和液-液体系,过程控制,结构材料,过程机器的传动,过程经济,废物管理,生化工程等。

本书为全化工各行业通用的工具书,是指导化工、轻工、冶金等领域的科研人员,生产人员、教学人员进行过程研究开发,生产设备设计计算的必备手册。

ROBERT H. PERRY
PERRY'S CHEMICAL ENGINEER'S HANDBOOK
SIXTH EDITION
McGraw-Hill

1984

PERRY 化学工程手册

第 六 版

下 卷

责任编辑: 郭乃铎
陈 丽

封面设计: 韩 星

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里1号)

化学工业出版社印刷厂印刷

顺义寺上装订厂装订

新华书店北京发行所经销

开本787×1092¹/₁₆印张118¹/₂字数3034千字

1993年8月第1版 1993年8月北京第1次印刷

印 数 1—3000

ISBN 7-5025-1037-0/TQ·604

定 价 150.00元

编辑说明

(1) 《PERRY化学工程手册》是一部在国际，国内具有较大影响的权威性工具书，对指导化工、轻工、冶金等行业的科研、设计和生产具有重要的参考价值。该书自1934年问世以来，经过五次修订再版。现将1984年第六版译成中文，介绍给广大读者。

(2) 由于计算机技术的迅速发展和被广泛采用，以及新的结构材料的开发利用，化学工程的理论和技术日益更新，新的分枝不断形成。为此，作者在第五版的基础上，对手册的内容作了大量修订和补充，不但对第五版的25篇逐一修正增补，并改写了经济、蒸馏、萃取和吸收各篇，还增加了生化工程技术和废物管理两篇新内容。另外，本版新收入的图、表、数据等都以SI单位制表示，并且增加了U. S. 制单位和SI单位的换算。

(3) 天津大学、浙江大学、清华大学、大连理工大学化工学院、石油大学、华南理工大学、成都科技大学、天津化工研究院的有关专家教授参加了翻译和审校工作。

(4) 参加本手册的编辑人员（以姓氏笔划为序）：刘哲、刘小蘋、李迟善、李涌雪、李洪勋、李建斌、朱振东、陈丽、陈逢阳、苗延秀、罗幼松、张红兵、张婉如、施承薇、周国庆、郭乃铎、徐世峰、梁虹、谢丰毅等。

第 六 版 序

在过去的十年中，化学工程学科对推动世界工业进步依然在多方面起着重要的作用，工艺和设备的设计方法已经取得了显著的进步。从某种程度上说，这一进步的取得要归功于计算机的推广应用和更为适宜的结构材料的开发利用。日益重要的能源问题，要求完善废物管理，这些因素也影响了设计的决策。然而，从根本上讲，可靠的化学工程实践仍旧建立在经验和理论这两方面合理结合应用的基础上。而从第五版出版以来，无论是在经验方面，还是在理论方面，都已取得了可喜的成绩。因此，本版对第五版的25篇内容都作了最新修订，而且重新编写了某些领域（如经济、蒸馏、萃取和吸收）的篇章，并增写了新兴的生化工程和废物管理技术两篇新内容。

本版还改变了对单位制的处理方法。大多数工程师都知道，世界上许多国家都采用了SI单位制，而美国仍主要使用U. S. 单位（虽然美国正在向扩大使用SI单位制过渡）。为了满足不同使用者的要求，《手册》作了兼可使用两种单位制的安排。本版中部分图表取自前几版，并进行了修订，但未重新绘制，因为这样并不切合实际。新增的图表一般使用SI单位制，只在某些情况下，兼用两种单位制。本版所有图表均附有换算系数，以便于两种单位制之间的换算。正文中出现的数值均使用SI和U. S. 两种单位，许多经验公式中出现的因次常量也是如此。笔者相信，《手册》对两种单位制的使用者一般都是适用的。

许多人士对本版《手册》的编纂给予了大力支持。要特别感谢Wanda S. Dekat, Georgea L. de Media和Guy L. Green等几位工程领域的前辈完成了繁重的索引编制工作。Jill A. Schoeling和Ruth R. Sleeper承担了本版《手册》的打字和秘书工作。

Raymond Genereaux是第六篇“流体运输和贮存”的分篇主编，也是《手册》先后六个版本全部编纂工作的唯一参加者。谨此对他长期坚持不懈地致力于《手册》的编纂工作和所作出的贡献深表感谢！

Bob Perry对《手册》的再版并保持《手册》优秀质量的传统倾注了全部精力，但在本版《手册》的编纂期间不幸去世，这是我们莫大的损失。他永远值得我们怀念。

Frank L. Evans, Jr. 和Theodore Vermeulen是《手册》的分篇主编，对《手册》的编纂做出了巨大的贡献。对他们的去世，我们一并表示哀悼。

DON W. GREEN

总 目 录

上 卷

单位换算因子和各种数据表	1-1
数学	2-1
物理和化学数据	3-1
反应动力学, 反应器设计, 热力学	4-1
流体与颗粒力学	5-1
流体的输送和贮存	6-1
粉粒体的输送及固体和液体的包装	7-1
粉碎与团聚	8-1
能的利用、转化与储存	9-1
传热	10-1
传热设备	11-1
湿度测定法, 蒸发冷却, 致冷及深冷过程	12-1

下 卷

蒸馏	13-1
传质与气体吸收	14-1
液液萃取	15-1
吸附和离子交换	16-1
新的分离过程	17-1
液-气系统	18-1
液-固系统	19-1
固体干燥和气固系统	20-1
固-固体系和液液体系	21-1
过程控制	22-1
结构材料	23-1
过程机器的传动	24-1
过程经济	25-1
废物管理	26-1
生化工程	27-1
索引	1

第22篇 过程控制

作者:

T.C.Wherry 篇主编

Jerny R.Peebtes 篇副主编

Patrick M.McNeese

Philip o.Teter

Richard E.Worsham

Roy M.Young

译者:

邵惠鹤 计算机过程控制, 单元操作控制

俞金寿 自动控制基础, 自动控制器

章先楼 过程测量, 指示和记录仪表, 终端控制元件

蒋慰孙 遥测和传输, 控制系统分析, 本篇审校人

第22篇 目 录

<p>22.1 自动控制基础22-6</p> <p>22.1.1 控制系统概述.....22-6</p> <p> 一、开环和闭环系统.....22-6</p> <p> 二、反馈控制.....22-6</p> <p> 三、前馈控制.....22-7</p> <p> 四、框图.....22-7</p> <p>22.1.2 使用拉氏变换的传递函数.....22-9</p> <p> 一、定义和限制.....22-9</p> <p> 二、传递函数.....22-9</p> <p> 三、传递函数的组合.....22-10</p> <p>22.1.3 过程特性.....22-11</p> <p> 一、比例元件.....22-11</p> <p> 二、容量元件.....22-12</p> <p> 三、一阶滞后元件(时间常数元件).....22-12</p> <p> 四、二阶滞后元件(二次型或振荡元件).....22-14</p> <p> 五、距离-速度滞后(时滞元件).....22-16</p> <p> 六、高阶滞后.....22-16</p> <p>22.1.4 反馈控制系统的特性.....22-18</p> <p> 一、闭合回路.....22-18</p> <p> 二、通断控制.....22-19</p> <p> 三、比例控制.....22-20</p> <p> 四、比例加积分控制(PI控制).....22-23</p> <p> 五、比例加积分和微分控制(PID控制).....22-25</p> <p> 六、高阶系统.....22-27</p> <p>22.1.5 控制器整定.....22-27</p> <p> 一、控制器性能指标.....22-27</p> <p> 二、基于已知过程模型的整定方法.....22-29</p> <p> 三、过程模型未知时的整定程序.....22-33</p> <p>22.1.6 关于控制的其他专题.....22-36</p> <p> 一、自由度和控制.....22-36</p> <p> 二、串级控制.....22-37</p> <p> 三、前馈控制.....22-38</p> <p> 四、前馈-反馈复合控制系统.....22-39</p> <p> 五、时滞补偿.....22-40</p> <p> 六、通断(Bang-Bang)控制.....22-41</p> <p> 七、非线性控制系统.....22-41</p> <p>22.2 过程测量22-42</p>	<p>22.2.1 温度测量.....22-42</p> <p> 一、国际温标.....22-42</p> <p> 二、热电偶.....22-43</p> <p> 三、电阻温度计.....22-44</p> <p> 四、充灌式温度计.....22-45</p> <p> 五、双金属温度计.....22-46</p> <p> 六、玻璃温度计.....22-46</p> <p> 七、高温计.....22-46</p> <p>22.2.2 压力测量.....22-47</p> <p> 一、标准和校准.....22-47</p> <p> 二、液柱法.....22-48</p> <p> 三、弹性元件法.....22-48</p> <p> 四、电学法.....22-50</p> <p>22.2.3 流量测量.....22-51</p> <p> 一、涡列流量计.....22-52</p> <p> 二、超声波流量计.....22-52</p> <p>22.2.4 物位测量.....22-53</p> <p> 一、视测装置.....22-53</p> <p> 二、浮标装置.....22-54</p> <p> 三、沉筒装置.....22-55</p> <p> 四、静压装置.....22-56</p> <p> 五、其他方法.....22-58</p> <p>22.2.5 物性测量.....22-59</p> <p> 一、密度和比重.....22-59</p> <p> 二、粘度和稠度.....22-61</p> <p> 三、折射率分析仪.....22-61</p> <p> 四、导热系数.....22-62</p> <p> 五、沸点分析器.....22-62</p> <p> 六、闪点分析器.....22-62</p> <p>22.2.6 流程化学成分分析器.....22-62</p> <p> 一、色谱分析仪.....22-63</p> <p> 二、红外分析器.....22-64</p> <p> 三、紫外线和可见光辐射分析器.....22-64</p> <p> 四、比浊法.....22-65</p> <p> 五、顺磁性.....22-65</p> <p> 六、散射测浊法.....22-65</p> <p>22.2.7 电分析仪表.....22-65</p> <p> 一、电导分析仪.....22-65</p>
---	---

二、无电极的电导测量	22-65	一、模拟式	22-86
三、示波分析	22-66	二、数字式	22-88
四、电位分析	22-66	22.3.5 控制中心	22-88
五、pH的测量	22-66	一、信息需求	22-88
六、特种离子电极	22-66	二、设备功能	22-89
七、库仑分析	22-66	三、系统显示	22-89
八、极谱分析	22-67	四、操作器	22-90
22.2.8 湿度测量	22-67	五、新控制中心设计依据	22-91
一、露点法	22-67	22.4 自动控制器	22-92
二、电解法	22-67	22.4.1 自力式控制器	22-92
三、卡尔-费休法(Karl Fisher)	22-68	一、通断控制器	22-92
四、露点法(盐相变法)	22-68	二、比例控制器	22-92
五、通用的分析方法	22-69	22.4.2 电子式控制器	22-92
六、压电法	22-69	一、运算放大器	22-93
七、电容法	22-69	二、电子式控制器的输入和输出	22-94
八、吸附热法	22-69	三、双位(通断)控制作用	22-94
九、干湿计法	22-69	四、比例控制作用(P)	22-94
十、电阻(电导)法	22-70	五、比例-积分控制器(PI)	22-95
22.2.9 流程分析器的采样系统	22-70	六、比例-积分-微分控制器(PID)	22-95
一、采样点的选择	22-70	22.4.3 气动控制器	22-97
二、试样的取出	22-70	一、气动放大器和继电器	22-97
三、试样输送	22-71	二、双位(通断)控制	22-97
四、多路采样	22-71	三、比例控制(P)	22-98
五、试样返回点	22-71	四、比例积分控制(PI)	22-98
六、校准试样	22-72	五、比例加微分控制(PD)	22-99
七、试样处理	22-72	六、比例加积分和微分控制(PID)	22-99
22.3 指示和记录仪表	22-75	七、叠合式控制器	22-99
22.3.1 操作信息显示要求	22-75	22.4.4 微处理器控制器	22-100
一、精确度	22-75	一、一般概念	22-100
二、重复性	22-75	二、算法	22-102
三、可读性	22-76	三、自整定	22-103
四、响应速度	22-76	四、更紧迫响应的控制	22-103
22.3.2 测量至显示仪表的传感器	22-77	五、过阻尼控制	22-103
一、旋转运动或角度位置	22-77	六、基于外部输入的变增益控制	22-104
二、直线位置	22-77	七、非线性过程增益	22-104
三、力或变形	22-78	八、进一步的应用	22-104
四、运动平衡式	22-80	22.4.5 控制系统逻辑简化	22-104
五、零点平衡式	22-81	一、布尔代数	22-104
六、电测量	22-82	二、可编程程序控制	22-106
七、模数转换	22-82	22.5 终端控制元件	22-107
22.3.3 指示仪表	22-84	22.5.1 控制阀	22-107
一、模拟式	22-84	一、阀体	22-107
二、数字式	22-85	二、阀芯	22-109
22.3.4 记录仪表	22-86	三、阀的选择	22-112

- 22.5.2 直行程执行机构.....22-113
- 一、气动执行机构.....22-113
 - 二、波动执行机构.....22-114
 - 三、电动执行机构.....22-115
 - 四、机械执行机构.....22-116
- 22.5.3 定位器和增压器.....22-116
- 一、工作原理.....22-116
 - 二、定位器和增压器的动态特性.....22-117
 - 三、应用准则.....22-117
- 22.5.4 固体颗粒计量阀.....22-118
- 22.5.5 其他终端控制元件.....22-118
- 一、变速驱动装置.....22-118
 - 二、变功率执行机构.....22-119
 - 三、变输出泵.....22-119
- 22.6 遥测和传输22-120
- 22.6.1 模拟信号传输.....22-120
- 一、气动信号传输.....22-120
 - 二、电子式模拟传输方法.....22-121
- 22.6.2 数字信号传输.....22-124
- 一、数字遥测和数据传输.....22-124
 - 二、计算机至计算机的数据传输.....22-124
- 22.6.3 过程控制用设备的组织.....22-125
- 一、模拟控制系统.....22-125
 - 二、数字计算机控制系统.....22-126
 - 三、微处理器分布控制系统.....22-127
- 22.7 计算机过程控制22-130
- 22.7.1 计算机控制的递阶结构.....22-130
- 22.7.2 过程控制.....22-130
- 一、过程控制的范围.....22-130
 - 二、计算机-操作员-过程的构成.....22-130
 - 三、计算机化公司控制系统的递阶结构.....22-131
 - 四、工况变量.....22-132
- 22.7.3 单元操作的计算机控制.....22-132
- 一、自由度的缩减.....22-132
 - 二、控制方程的简化.....22-132
 - 三、控制回路的选择和设计.....22-132
 - 四、计算机-操作员-单元操作的构成.....22-133
 - 五、单元操作优化.....22-134
 - 六、自适应控制.....22-135
 - 七、单元操作计算机控制例子.....22-135
- 22.7.4 单元过程的计算机控制.....22-135
- 一、分馏系统.....22-135
 - 二、聚合过程.....22-137
- 22.7.5 车间的计算机过程控制.....22-138
- 一、控制项目的开发.....22-139
 - 二、大过程联合装置的分解.....22-140
 - 三、过程优化.....22-141
 - 四、乙烯车间实例.....22-142
- 22.7.6 控制方程和模型.....22-142
- 一、计算机化的常规控制器.....22-142
 - 二、多变量输入的计算机化常规控制器.....22-143
 - 三、稳态模型.....22-143
 - 四、动态模型.....22-144
- 22.7.7 过程控制计算机.....22-144
- 一、一般硬件(设备)要求.....22-144
 - 二、模拟式设备.....22-145
 - 三、数字式设备.....22-145
 - 四、软件.....22-146
- 22.8 单元操作控制22-148
- 22.8.1 换热器的控制.....22-148
- 一、蒸汽直接控制.....22-148
 - 二、凝液控制.....22-148
 - 三、蒸汽压力控制.....22-149
 - 四、旁路控制方法.....22-149
 - 五、前馈控制.....22-150
 - 六、热焓的前馈控制.....22-151
- 22.8.2 精馏塔的控制.....22-152
- 一、基本控制.....22-153
 - 二、产品质量控制.....22-154
 - 三、热量输入控制.....22-155
 - 四、预测控制.....22-156
- 22.8.3 化学反应器的产率控制.....22-158
- 一、典型的反应器系统.....22-158
 - 二、反应器热量平衡.....22-158
- 22.8.4 干燥操作的控制.....22-159
- 一、回转干燥器.....22-160
 - 二、滚筒干燥器.....22-161
 - 三、喷雾干燥器.....22-161
- 22.8.5 间歇或开-停车操作的控制22-163
- 一、开-停性能判据22-163
 - 二、连续过程的开车.....22-163
 - 三、间歇反应器的控制.....22-164
- 22.8.6 连续单元操作性能的最大化.....22-167
- 22.9 控制系统分析22-169
- 22.9.1 控制系统的开发.....22-169
- 一、建立过程的操作目标.....22-169

二、决定控制系统的目标.....	22-169	二、脉冲测试.....	22-172
三、决定过程的约束条件.....	22-169	三、自由度缩减分析.....	22-174
四、识别扰动的来源与特征.....	22-169	四、数学模型.....	22-177
五、决定过程的动态特性.....	22-169	五、仿真.....	22-178
六、考察技术和经济可行性.....	22-169	22.9.3 仪表化的费用.....	22-183
七、考虑另外解法.....	22-170	一、就地安装的仪表化.....	22-183
八、完成控制系统设计.....	22-170	二、控制室的仪表化.....	22-183
九、完成控制系统开发.....	22-170	三、车间计算机控制.....	22-184
22.9.2 控制系统分析手段.....	22-170	四、流程成分分析.....	22-184
一、频率响应分析.....	22-170		

22.1 自动控制基础

一般参考文献

Caldwell, Coon, and Zoss, *Frequency Response for Process Control*, McGraw-Hill, New York, 1959. Considine, *Process Instruments and Control Handbook*, McGraw-Hill, New York, 1957. Considine and Ross, *Handbook of Applied Instrumentation*, McGraw-Hill, New York, 1964. Coughanouer and Koppel, *Process Systems Analysis and Control*, McGraw-Hill, New York, 1965. Eckman, *Automatic Process Control*, Wiley, New York, 1958. Gibson, *Nonlinear Automatic Control*, McGraw-Hill, New York, 1963. Harriott, *Process Control*, McGraw-Hill, New York, 1964. Liptak, *Instrument Engineers Handbook*, Chilton, Philadelphia, 1969. Murrill, *Automatic Control of Processes*, International Textbook, Scranton, Pa., 1967. Shinsky, *Process Control System*, McGraw-Hill, New York 1967. Williams and Lauber, *Automatic Control of Chemical and Petroleum Processes*, Gulf, Houston, 1961.

应用自动控制，可以更精确地对过程进行控制，并得到更为均一和质量更高的产品，从而常常带来更高的收益。此外，人工难于控制的极快响应过程，可以被自动地控制。对某些远距离的，危险的或日常性的操作，自动控制亦是有益的。经过了一段实验时期之后，计算机正用来操作和自动控制加工系统，而这些系统要有效地直接由人工控制，是过于巨大和复杂的。

应用自动控制得到的收益中，过程利润通常是最主要的，控制质量和它的费用应与预期的经济回收和过程技术目标相比较。经济回收包括减少生产费用、维护、不合格产品以及改进过程可操作性和增加产量。

如果控制结果会影响到操作设备的选择，亦就影响到投资费用，这需要过程设计人员和控制系统设计人员之间很好配合。忽视这种相互配合会导致控制系统被加入过程设计而使其切实可行的控制系统设计原则“吊起来”。

22.1.1 控制系统概述

自动控制的各种概念可以用一个例子来很好说明。研究如图22-1所示的过程，液体由流经加热盘管的蒸汽加热到预定的温度。液体出口温度受到如液体入口温度、液体流量、蒸汽温度、蒸汽流量、流体热容、容器的热损失以及搅拌器转速等过程变量的影响。

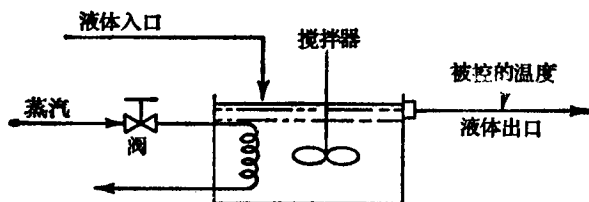


图 22-1 简单换热过程

一、开环和闭环系统

图22-1所示系统通常划为“开环”。开环控制系统没有使用被控变量（在此是温度）信息来调整系统的任何输入以补偿过程变量的变化。在讨论控制系统中，说明要研讨未控过程的动态学时，常会遇到

开环这一术语。

闭环控制系统则指测量被控变量，且用这个测量结果来操纵某一过程变量（如蒸汽流量）的情况。

二、反馈控制

在闭环控制系统中，关于被控变量的信息反馈回来，作为控制过程变量的依据，因此命

名为“闭环反馈控制”。反馈可以由操作员(手动控制)或使用仪表(自动控制)来完成。

在手动控制情况下,对照图22-1,操作员定期测量温度,如果说这个温度低于预期值,操作员就稍为开大阀门以增加蒸汽流量。在自动控制情况下,使用温度传感装置产生一个正比于温度的信号(电的、气的等),这个信号输送到控制器,控制器将它与预期值即设定值作比较,如果存在偏差,控制器改变蒸汽控制阀的开度,以校正温度,如图22-2所示。

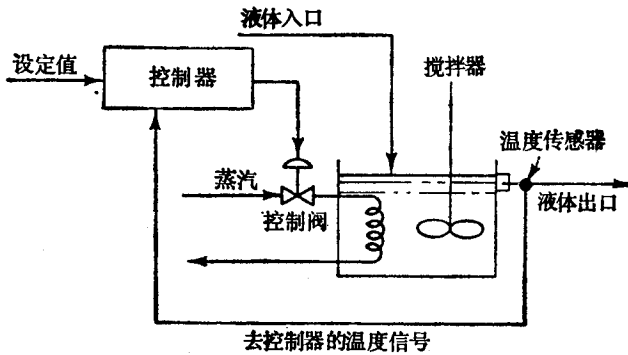


图 22-2 换热过程的自动控制

三、前馈控制

前馈控制正在得到广泛的应用。把过程扰动测量出来,并进行补偿,这样就不需要等到由被控变量变化来反映已经发生了的扰动。在最终的被控变量不能测量时,也可以使用前馈控制。在图22-3所示例子中,前馈控制器具有计算能力,使用测得的入口液体流量和温度,计算需要的蒸汽流量,以保持出口液体的温度在预期值。

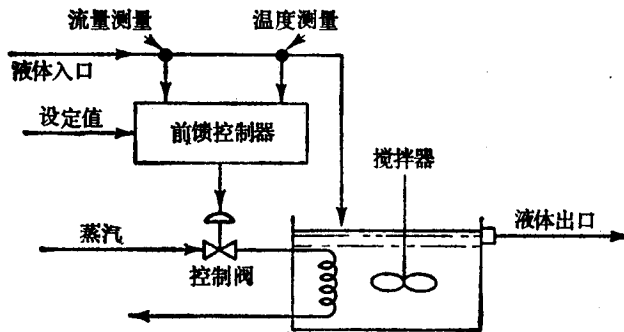


图 22-3 换热过程的前馈控制

由控制器解出的输入液体流量、蒸汽流量以及液体出口温度间关系的方程通常称为过程模型。完美的模型和控制器是罕见的,因此反馈和前馈控制相结合更为适用(见图22-4)。一个控制器决定另一个控制器设定值的控制方案称为串级控制,常用于反馈控制。

四、框图

框图表明系统变量之间的关系,是用于分析和讨论系统的标准表示方法,框图结构的图例已经确立。线条代表信息流、物流和能量流的信号。圆圈求和点表示到这一点的输入信号的代数相加。代数符号+或-标在指向求和点的箭号边上,表示相加或相减。分支点或来自另一线的分支线,表示把一个信号分成一个以上的通路,但信号不变。方框表示进入信号

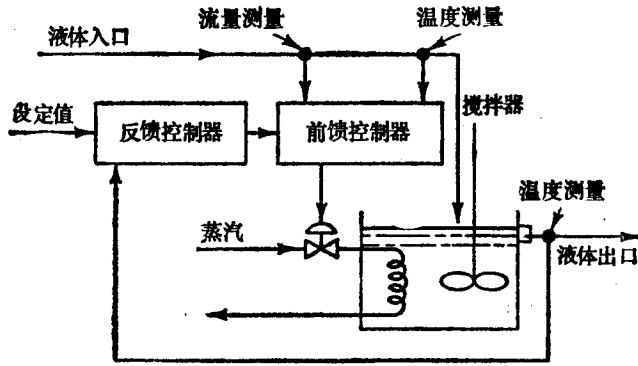


图 22-4 换热过程的前馈和反馈相结合控制

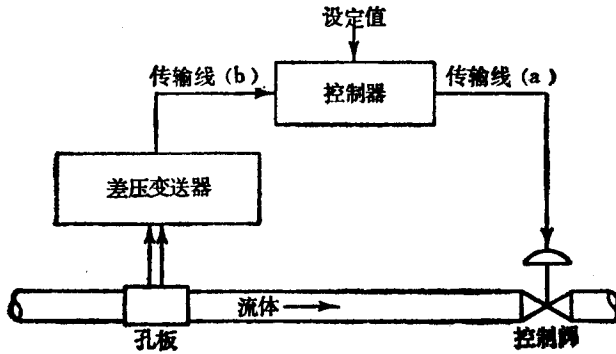


图 22-5 过程流量控制回路

起变化，并用来表示系统的元件。各方框通常包含有描述它们所代表系统的动态特性标志，这些标志可以包括微分方程、单位转换常数或表示元件输入与输出间关系的传递函数。

框图可直接由物理系统得到，是把它分成输入和输出易于辨识的独立功能块，方框按它们在物理系统中出现的次序连接。

图22-5所示的气动流量控制回路具有六个主要部分：控制器、传输线 a、阀、孔板、差压变送器以及传输线 b。在此，阀的特性代表了被控的过程，通过阀的流量是过程输出 C。这个系统的框图如图22-6所示。

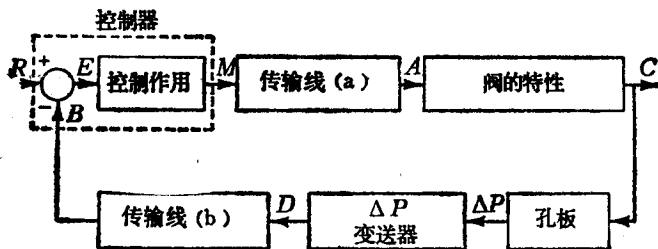


图 22-6 依据设备表示的流量控制回路的框图

控制器有参比输入或设定值 R，它是传送到控制器的过程测量信号要求值。控制器测出设定值和测量信号之差亦即偏差。控制器对偏差 E 进行处理，得出控制器输出 M。输出 M 校

正阀位以使偏差趋向于零。在框图中，控制器由求和点和控制作用方框表示。

控制器输出送给传输线 a 。表示传输线 a 的方框以操纵变量 M 作为输入，而以 A 作为输出。传输线可以是非常快的，例如在电子仪表的情况下，此时 $A = M$ ；也可以是缓慢的，例如在某些气动仪表装置， A 在时间上滞后于 M 。信号 A 转而控制阀位，阀位和阀的特性确定了阀的流量。以类似方式，添上孔板、差压变送器以及传输线 b 的方框，闭环反馈系统的框图给出了以框图表示的闭合回路。

22.1.2 使用拉氏变换的传递函数

一、定义和限制

一个系统的稳态和动态行为可通过求解表示该系统的微分方程来确定。如果系统有许多元件，这个方法相当繁琐。求解这些微分方程的一种方法是使用拉氏变换。此时把问题改用第二变量来表述，使得可用代数方法求解。然后，反变换到原来的自变量，就可得到原始微分方程的解（见22.2）。

拉氏变换是有用的，但仅适用于线性微分方程。这些方程描述线性系统，对它们可以应用叠加规则。即当输入函数 $x_1(t)$ 加入而系统的输出响应是 $y_1(t)$ ，而当输入函数 $x_2(t)$ 加入输出响应是 $y_2(t)$ 时，那么如果 $x_1(t) + x_2(t)$ 加入时，响应是 $y_1(t) + y_2(t)$ 。这种类型的线性微分方程是

$$p_n(t) \frac{d^n y(t)}{dt^n} + p_{n-1}(t) \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + p_0(t) y(t) = x(t) \quad (22-1)$$

式中系数 $p_i(t)$ 不是因变量 $y(t)$ 或它的任何阶导数的函数。一般来说求解时变系数的方程是困难的。大多数化工操作，在大范围内是非线性，但在接近操作点的一个小区域内，线性化假设常常是合适的（线性化）。这种线性化微分方程的系数常常与时间无关。因此过程控制中基本过程微分方程的通常形式是

$$m_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + m_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + m_0 y(t) = x(t)$$

上式用拉氏变换可以常规求解。

二、传递函数

为了说明拉氏变换的方便性，研究如下微分方程

$$T \frac{dc(t)}{dt} + c(t) = RMu(t) \quad c(0) = 0 \quad (22-2)$$

T 表示系统的时间常数， $Mu(t)$ 描述幅值为 M 的阶跃输入。希望解得输出 $c(t)$ 的响应。所需的拉氏变换查表得出

$$\mathcal{L}\left[\frac{dc(t)}{dt}\right] = sC(s) - c(0^+)$$

$c(0^+) = 0$ ，因为初始条件为零

$$\mathcal{L}[c(t)] = C(s)$$

$$\mathcal{L}[Mu(t)] = M(1/s)$$

式 (22-2) 的拉氏变换是

$$TsC(s) + C(s) = R(M/s)$$

$$C(s) = \frac{RM}{s(Ts+1)} \quad (22-3)$$

为了把这个方程变换到时间域, 取反变换 \mathcal{L}^{-1} , 解是

$$c(t) = \mathcal{L}^{-1}[C(s)] = RM(1 - e^{-t/T})$$

在很多元件组成的系统中, 相应于式(22-3)的变换方程可能十分复杂。然而, 通常可以分解成能从表格中找到的反变换式。

在过程控制中, 拉氏变换用来确定对于扰动的响应, 微分方程的解通常不包括稳态和常数项, 因为初始条件常被假设为零。

传递函数定义为响应变量(输出)的拉氏变换与扰动变量(输入)拉氏变换之比。由式(22-3)得传递函数 $KG(s)$

$$KG(s) = \frac{\text{输出}}{\text{输入}} = \frac{C(s)}{M(s)} = \frac{R}{Ts+1} \quad (22-4)$$

在控制框图中, 传递函数习惯上用 $KG(s)$ 式表示。当函数是 s 域时, 使用大写字母, 而小写字母用于时间域。 $G(s)$ 表示传递函数的动态部分, 而 K 相对于元件的稳态增益。在

式(22-4)的传递函数中, $K=R$, $G(s) = \frac{1}{Ts+1}$ 。

用 s 域来画框图时, 通常省略 $F(s)$ 中的 s , 仅用大写字母符号表示 s 域的变换。用传递函数的框图可用图22-7说明, 图中 H 是反馈测量装置的传递函数。

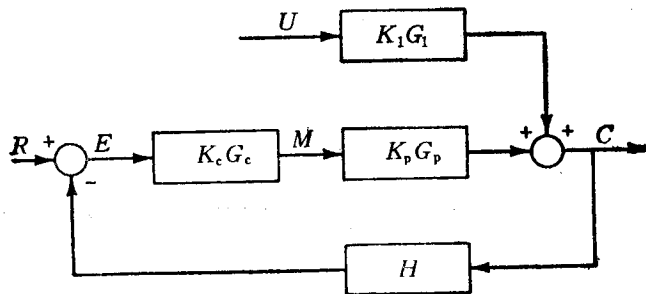


图 22-7 受到负荷扰动的过程反馈控制系统的一般框图

三、传递函数的组合

流体和热过程系统呈现出许多不同的动态特性。但是许多系统可以用下面五种传递函数的组合来描述

K	比例元件
$\frac{1}{Ts}$	容量元件
$\frac{1}{Ts+1}$	一阶元件
$\frac{1}{T^2s^2 + 2sTs + 1}$	二阶元件
e^{-Ls}	时滞元件

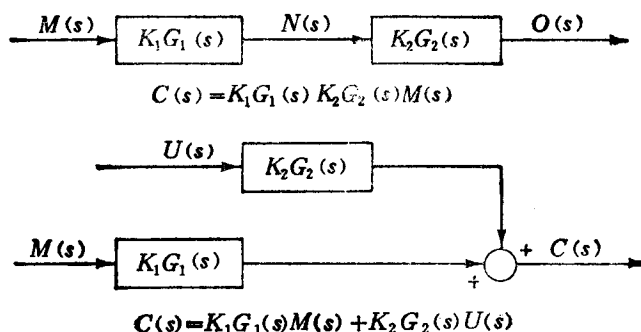


图 22-8 过程元件用传递函数的框图和相应的组合传递函数

在控制系统分析中,传递函数是重要工具。控制系统的每个方框或元件有它自己的特性传递函数。如果每一个方框使用S域传递函数标志 $KG(s)$,系统所有元件可以用代数方法组成整个控制系统总的表示式,如图22-8所示。然后,代入各个部分的传递函数,可以得到总的传递函数,由此可以进行控制系统的分析。

22.1.3 过程特性

用框图分析控制系统时,表示每个方框的稳态和动态行为的传递函数必须是已知的。为了描述物理过程的行为,必须定义该一过程的具体特性。过程方框定义为具有单一输入信号和单一输出信号,在S域中,输出的拉氏变换由输入的变换式乘以过程传递函数来确定。每个方框可以按上述的五种元件或它们的组合来描述。

一、比例元件

电阻类比可以描述流量、扩散和热系统的许多特性。电阻由欧姆定律给出

$$R = \frac{e_1 - e_2}{i} = \frac{\Delta e}{i} = \frac{\text{电位差}}{\text{电流}}$$

式中 e = 电位, V; i = 电流, A; R = 电阻, Ω 。

在湍流中,小的开孔等效于电阻。流经缩孔的流量由伯努利定理给出

$$f = kA\sqrt{2g_c(h_1 - h_2)} \quad (22-5)$$

式中 f = 流量, k = 流量系数, A = 缩孔截面积, g_c = 重力常数, h = 液压头。流量与液压头之间的关系是非线性的,不同于线性电路系统。然而,在假设 $h_1 - h_2$ 比起所考虑 $h_1 - h_2$ 的变化要大得多的情况,在特定操作点把系统线性化是可能的。此时的阻力定义是

$$R_{t_0} = \frac{\text{位差变化}}{\text{流量变化}} \Big|_{t_0} = \frac{d(h_1 - h_2)}{df} \Big|_{t_0}$$

式中 R_{t_0} 是按特定流量值 f_0 定义的。由这个定义和式(22-5)得

$$R_{t_0} = f_0 / g_c (k^2 A^2)$$

因此,在特定流量 f_0 下,位差微小的变化 $d(h_1 - h_2)$ 将导致流量成比例变化。要注意到在这个例子中,阻力不是常数,而取决于流量。

比例元件输出的暂态响应,除了幅值之外,是与输入一样的。讨论流量例子中位差阶跃变化的情况,线性流量系统的时间域表示如图22-9。对于 $(h_1 - h_2)$ 在 $t=0$ 时阶跃变化的 f 时间响应如图22-10所示。