

高等学校教材

工业过程辨识与控制

► 李少远 蔡文剑 编著



化学工业出版社

教材出版中心

高等学校教材

工业过程辨识与控制

李少远 蔡文剑 编著



化学工业出版社
教材出版中心

·北京·

(京)新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

工业过程辨识与控制/李少远,蔡文剑编著. —北京:
化学工业出版社, 2005. 3

高等学校教材

ISBN 7-5025-6752-6

I. 工… II. ①李…②蔡… III. 化工过程-过程
控制-高等学校-教材 IV. TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 018989 号

高等学校教材

工业过程辨识与控制

李少远 蔡文剑 编著

责任编辑: 王丽娜

文字编辑: 徐卿华

责任校对: 陶燕华

封面设计: 潘 峰

*

化学工业出版社
出版发行
教材出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销
大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷
三河市东柳装订厂装订

开本 720mm×1000mm 1/16 印张 16½ 字数 296 千字

2005 年 5 月第 1 版 2005 年 5 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-6752-6/G·1734

定 价: 28.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

如何将“自动控制理论”课程中学到的系统建模与控制的理论方法应用到实际系统中，是自动化专业的本科生和控制科学与工程学科的研究生经常感到比较棘手的问题。工业过程辨识与控制是一门与实际工业过程控制系统联系十分密切的课程，介绍控制理论中的分析方法在应用于实际控制系统中需要考虑的问题是本课程的主要任务。

大部分大型复杂工业过程事实上都是多输入多输出（MIMO）系统，而现有的多变量控制技术当中，许多先进的控制算法如预测控制等都需要已知过程的传递函数矩阵或者整个工作频率范围内频率响应矩阵的完整模型。在许多情况下，这一模型是未知的，并且物理建模所需的代价非常高昂。因此，实用有效的过程完整模型估计方法引起控制界的关注。本书介绍了无论从过程控制理论方面还是过程系统工业应用方面都十分需要的研究内容和方法。

本书在写作上特别注意了控制理论中的分析方法在解决实际过程控制系统设计上的作用，并结合大量的实际过程控制系统实例进行描述，具有较好的工程背景，便于读者对控制理论方法实用性的认识和对实际问题的理解。

本书作者李少远两次到新加坡进行访问，与南洋理工大学的蔡文剑博士在过程控制方面进行了合作研究，书中部分内容是最近得到的结果，其他内容也经过了广泛讨论，由李少远完成初稿，经过多次讨论修改完成定稿。在完成本书写作过程中，得到了国家863计划项目（2002AA412130）和上海市科委重大攻关项目经费上的支持，在此深表感谢！

由于作者水平有限，书中纰漏和错误在所难免，恳请广大读者批评指正。

作 者

2005年1月

内 容 提 要

工业过程辨识与控制是自动化专业本科生和控制科学与工程学科研究生重要的专业课,本书针对工业过程系统在辨识与控制方面对现有控制理论和方法提出的要求,重点介绍国内外近年来的进展。

本书将控制理论中辨识、控制、优化的方法与过程系统的特点有机结合,着重讲述如何利用控制理论的方法分析设计实际工业过程系统的问题,共有12章,大体分为三部分。第一部分为第1~4章,主要介绍过程控制系统的动态特性和系统结构,包括PID控制器的结构形式、控制系统分析的主要方法、过程控制系统动态特性以及串联、前馈等基本的过程系统结构。第二部分为第5~9章,主要从过程控制系统实际应用的角度,分别讲述单变量系统和多变量系统通过能够被工业现场操作容许的继电反馈和阶跃测试进行系统辨识的方法。第三部分为第10~12章,主要分析了对于多变量控制系统进行输入/输出配对分析、耦合性分析及分散控制器设计的方法与系统稳定性的分析。

本书适合高等院校控制科学与工程、计算机控制、系统工程和信息工程等专业的教师、研究生和高年级本科生,亦可供有关科技人员参考。

目 录

1 过程控制的基本概念	1
1.1 工业过程控制系统	1
1.2 PID 控制	3
1.2.1 比例作用	3
1.2.2 积分作用	4
1.2.3 微分作用	5
1.2.4 闭环系统的稳定性	6
1.3 控制器设计的时域方法	12
1.4 控制器设计的频域方法	16
1.4.1 基于频域响应-稳态增益的控制器设计	16
1.4.2 采用频域响应判据设计控制器	17
2 高级过程控制	21
2.1 高级过程控制系统结构	21
2.1.1 直接合成	21
2.1.2 内模控制近似模型调整规律	22
2.2 过程控制系统的积分饱和现象和抗饱和方案	24
2.2.1 输入受限	24
2.2.2 反馈补偿	25
2.2.3 可实现参考值	27
2.2.4 条件积分	29
2.3 先进 PID 控制器参数调整	31
2.3.1 图表法	31
2.3.2 两点法	32
2.3.3 面积法	32
2.4 继电器反馈	33
3 复杂动态系统的控制器设计	37
3.1 复杂过程动态特性	37
3.2 时间延迟系统的控制	39
3.2.1 常规反馈控制器设计	40

3.2.2	Smith 预估器	42
3.2.3	改进的 Smith 预估器	46
3.3	负响应系统	47
3.3.1	负响应系统的控制	48
3.3.2	负响应补偿	51
3.4	开环不稳定系统	54
3.4.1	控制系统设计的难点	55
3.4.2	两步法设计	56
4	复杂控制系统	59
4.1	基本概念	59
4.2	串级控制系统	60
4.2.1	串级控制的基本原理	62
4.2.2	串级控制器参数调整	65
4.2.3	串级控制系统的防积分饱和	66
4.3	前馈控制	67
4.3.1	前馈控制器的设计	67
4.3.2	实际中需要注意的事项	70
4.3.3	反馈/前馈控制	71
4.4	比值控制	72
4.5	单个输入控制多个输出	74
4.6	多个输入控制单个输出	76
4.7	推断控制	77
4.7.1	反馈控制方法	79
4.7.2	串级控制	79
4.7.3	基于估计器的控制	80
4.7.4	推断控制	81
5	工业过程系统的经验建模与辨识	84
5.1	基础概念	84
5.1.1	过程辨识的基本定义	84
5.1.2	经验建模的原则	86
5.2	最小二乘法	89
5.2.1	线性方法	89
5.2.2	线性化模型	93
5.2.3	加权最小二乘法	94
5.2.4	递推最小二乘法	94

5.2.5	指数型遗忘最小二乘法	95
5.3	傅里叶理论	96
5.3.1	傅里叶变换	96
5.3.2	傅里叶变换的性质	98
5.3.3	离散傅里叶变换 (DFT)	101
5.3.4	快速傅里叶变换 (FFT)	101
5.4	描述函数	101
5.4.1	基本概念	101
5.4.2	描述函数估计	102
5.4.3	典型的非线性环节	103
5.4.4	极限环	106
6	基于阶跃响应的参数辨识	108
6.1	阶跃响应辨识的基本概念	108
6.2	开环阶跃测试的典型方法	109
6.2.1	LOG 方法	109
6.2.2	两点法	109
6.2.3	面积法	110
6.3	用于开环回路测试的最小二乘法	112
6.4	经典的闭环回路阶跃测试	115
6.5	系统在 PID 控制下的最小二乘法	117
6.5.1	问题描述	117
6.5.2	递归求解	119
6.5.3	传递函数模型辨识	120
6.5.4	应用和仿真实例	122
7	基于继电测试的参数辨识	125
7.1	继电反馈的基本原理	125
7.1.1	产生稳定的振荡	125
7.1.2	估计传递函数	128
7.1.3	傅里叶变换法	130
7.2	改进的继电反馈测试	131
7.2.1	不对称的开关反馈	131
7.2.2	带磁滞的开关	133
7.2.3	带滞后的磁滞的实现	135
7.2.4	不对称磁滞开关	136
7.3	非传统的继电反馈方法	137

7.3.1	带积分的开关反馈	137
7.3.2	双开关测试	140
7.3.3	开关加阶跃	142
8	基于脉冲响应的参数辨识	144
8.1	脉冲响应辨识	144
8.1.1	基本原理	144
8.1.2	一般理论	145
8.1.3	简单模型形式的辨识	147
8.1.4	从实验数据中获得矩	150
8.1.5	从其他响应中得到脉冲响应数据	151
8.2	基于脉冲响应的频率辨识	153
8.2.1	频率响应	153
8.2.2	频谱	155
8.3	用于自调节过程的辨识	156
8.4	仿真实例	159
9	多变量过程系统的参数辨识	162
9.1	多变量系统辨识的基础概念	162
9.2	TITO 过程闭环阶跃测试	163
9.2.1	分散辨识	163
9.2.2	时域辨识	167
9.2.3	频域辨识	169
9.3	一般 MIMO 过程的辨识	171
9.3.1	测试过程和一般公式	171
9.3.2	解耦辨识系统	174
9.4	不对称双边脉冲辨识	176
9.5	仿真举例	179
10	多变量系统控制基础知识	185
10.1	基本概念	185
10.1.1	输入/输出配对	185
10.1.2	相互关联	186
10.1.3	操作窗口	187
10.1.4	能控性与能观测性	188
10.2	多变量过程模型	190
10.2.1	状态空间模型形式	190
10.2.2	传递函数模型形式	190

10.2.3	两种模型之间的关系	190
10.3	开环分析	192
10.3.1	解析解	192
10.3.2	稳定性	193
10.3.3	开环传递函数分析	195
10.3.4	奇异性-奇异值	197
10.3.5	动态分析	198
10.4	闭环动态分析	200
10.4.1	多变量方框图	200
10.4.2	闭环传递函数	201
10.4.3	闭环暂态响应	202
10.4.4	闭环稳定性	202
11	多变量系统的耦合性分析	204
11.1	预备知识	204
11.1.1	控制回路耦合性的测度	204
11.1.2	基于耦合分析的回路配对	206
11.2	相对增益序列 (RGA)	206
11.2.1	RGA 的性质	207
11.2.2	由第一原理计算 RGA	207
11.2.3	计算 RGA 的矩阵方法	209
11.3	利用 RGA 进行回路配对	210
11.3.1	RGA 元素的说明	210
11.3.2	基本配对规则	211
11.4	附加规则	212
11.4.1	Niederlinski 定理	212
11.4.2	Niederlinski 配对规则	213
11.4.3	Jacobi 特征值判据	213
11.4.4	回路配对规则的应用	214
11.5	其他系统的配对	215
11.5.1	非线性系统的回路配对	215
11.5.2	带积分环节的系统回路配对	219
11.5.3	非方系统的回路配对	219
11.5.4	时间解耦	222
11.5.5	无过程模型的回路配对	224
11.6	相对干扰增益	224

12 MIMO 过程分散控制	228
12.1 预备知识	228
12.1.1 一般概念	228
12.1.2 两入两出系统	230
12.2 经典的多回路控制器设计	232
12.2.1 采用试凑-误差法设计多回路控制器	233
12.2.2 采用最优化方法设计多回路控制器	233
12.2.3 采用 RGA 失调因子法设计多回路控制器	233
12.3 基于回路分解的控制器设计	238
12.3.1 结构分解	238
12.3.2 增益裕度和相角裕度设计	239
12.3.3 仿真实例	240
12.4 基于 Nyquist 稳定性判据设计	243
12.4.1 分散控制系统稳定性分析	243
12.4.2 分散系统的稳定域	245
12.4.3 仿真实例	247
参考文献	250

1 过程控制的基本概念

1.1 工业过程控制系统

在过程控制系统中，被控对象是工业生产过程中的各种装置和设备，例如换热器、蒸汽锅炉、精馏塔、反应器等。被控量通常是指温度、压力、流量、液位、成分和物性六类参数的控制，被控对象内部所进行的物理、化学过程可以是多种多样的，但从控制系统构成和完成的目标观点来看，它们在本质上有许多共同点。

【例 1.1】 换热器温度控制

图 1.1 表明了过程中的各种组件和控制回路，可以采用图 1.2 所示方框图来表示。

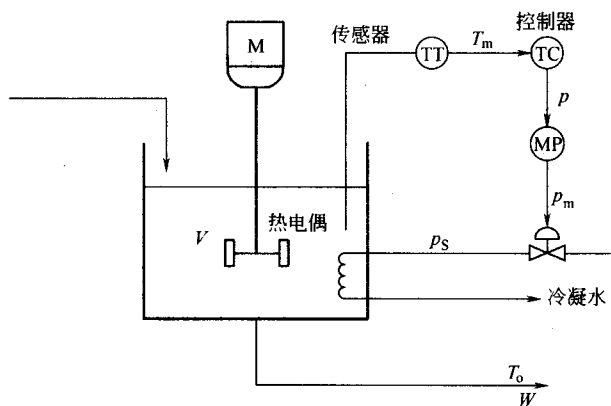


图 1.1 换热器控制框图

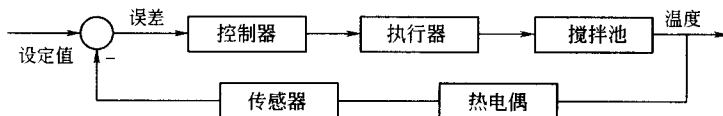


图 1.2 换热器控制系统方框图

【例 1.2】 加热器的温度控制（见图 1.3）

其控制系统的方框图可表示为图 1.4。

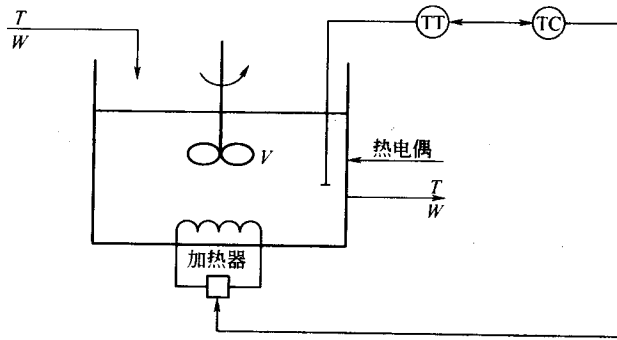


图 1.3 加热器

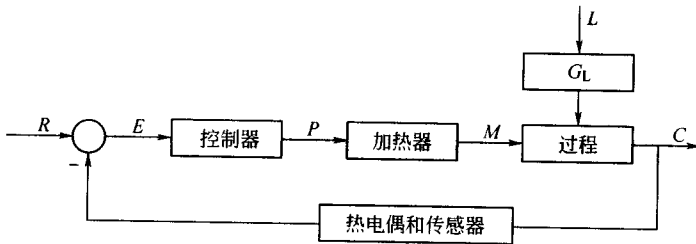


图 1.4 加热器控制系统方框图

通常采用传递函数形式表示系统变量之间的关系，以便于分析控制系统的性能指标（见图 1.5）。

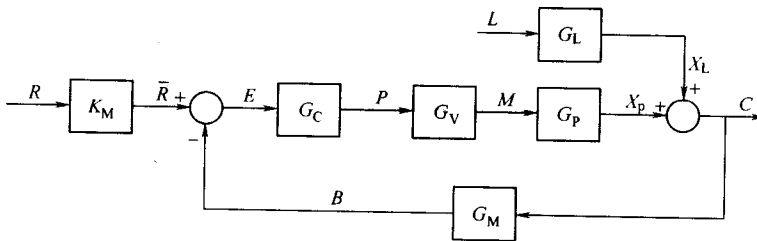


图 1.5 控制系统一般方框图

方框图中符号定义如下：

- C——控制变量（出口处温度）；
- M——控制变量（热负荷）；
- L——干扰（或负载变量），内部温度；
- R——设定值（或参考值）；
- B——被控变量测量值；

P ——控制器输出；

E ——误差信号， $E=R-B$ 。

系统的闭环传递函数可描述如下。

(1) 设定值变化（跟踪问题）

假设 $R \neq 0$ 和 $L = 0$ （当负载恒定时，设定值变化），则

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K_M G_C G_V G_P}{1 + G_C G_V G_P G_M} \quad (1.1)$$

(2) 负载变化（调节问题）

假设 $L \neq 0$ 和 $R = 0$ （设定值不变），则

$$\frac{C(s)}{L(s)} = \frac{G_L}{1 + G_C G_V G_P G_M} \quad (1.2)$$

上述符号 C/L 和 C/R 的分母相同。

1.2 PID 控制

PID 控制器结构简单，易于操作，广泛应用于石油、制药、食品、化工、航空和半导体等工业过程，并具有较好的鲁棒性，对过程参数和干扰的变化不敏感。据统计，在过程控制领域中大约 90% 的控制回路都采用 PID 控制。系统控制框图如图 1.6 所示。

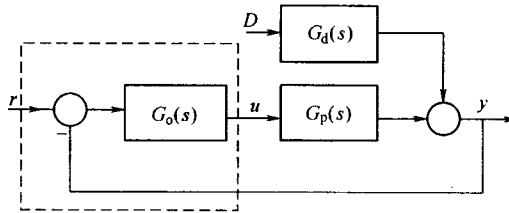


图 1.6 控制系统结构框图

定义

$$e \triangleq r - y \quad (1.3)$$

1.2.1 比例作用

控制器的输出 u 与误差信号 e 成比例关系，即

$$u = K_c e = \frac{1}{\delta} e \quad (1.4)$$

其中， δ 称为比例带。

P 控制的特性是有稳态余差。

【例 1.3】 如图 1.7 所示的换热器的温度控制系统，传感器 θ_T 检测热水温度 θ ，然后送给温度控制器 θ_C 。通过调节蒸汽阀来保持热水出口的温度恒定。换热器的负荷为热水的流量 Q 和出口处温度 θ 。采用比例控制，蒸汽阀的开度作为控制器的输出。

在图 1.8 中，斜线 1 表示比例控制的静态特性，热水温度越高，蒸汽阀的开度越小。没有控制作用时，热水温度和蒸汽阀呈现不同关系，斜线 2 和斜线 3 分别表示不同蒸汽流量时换热器的静态特性。

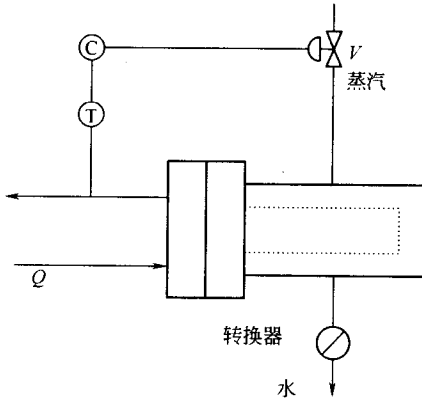


图 1.7 换热器系统

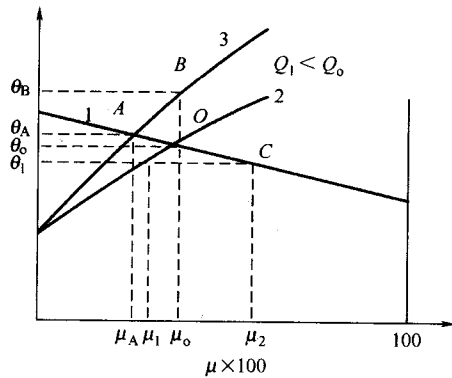


图 1.8 热水温度与蒸汽阀开度的关系

O 点是初始稳定点，蒸汽流量为 Q_0 ，热水温度为 θ_0 ，阀门开度为 μ_0 。如果蒸汽流量减少到 Q_1 ，通过调节阀开度将达到新的稳定点 A。但采用比例控制时，必须有一个偏差量 $\theta_A - \theta_0$ 存在，才能使蒸汽阀开大而保持热量平衡，因此，必定造成热水温度余差。即使存在温度余差，控制效果也优于无控制作用，由图中看出此时热水温度为 θ_B 。

1.2.2 积分作用

在积分作用中，控制器的输出变化率和误差 e 成正比。

$$\frac{du}{dt} = S_0 e \Rightarrow u = S_0 \int_0^t e dt \quad (1.5)$$

积分作用特性如下。

- ① 当且仅当 $e=0$ ，积分作用的输出是恒定的，没有稳态余差。
- ② 降低系统的稳定性。对于相同的对象，积分控制作用总是慢于比例控制。
- ③ 开环增益和 S_0 成比例，增加 S_0 导致系统稳定性降低并最终不稳定。

比例积分控制结合两者的优点，比例控制提高系统的响应时间以及减少干扰，积分控制消除稳态余差。如图 1.9 所示。

$$u = K_C e + S_0 \int_0^t e dt = \frac{1}{\delta} \left(e + \frac{1}{T_I} \int_0^t e dt \right) \quad (1.6)$$

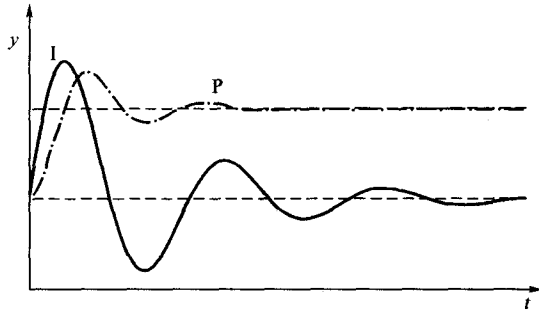


图 1.9 表示当换热器的热水流量阶跃变化时的调节作用

【例 1.4】 考虑图 1.7 中的热水温度 θ ， μ_P 为 PI 控制器的比例部分（蒸汽阀），与温度 θ 曲线正好相反。 μ_I 为 PI 控制器的积分部分，也就是温度 θ 曲线的积分和。因此蒸汽阀的全部输出 μ_{PI} 为 μ_P 和 μ_I 之和（见图 1.10）。

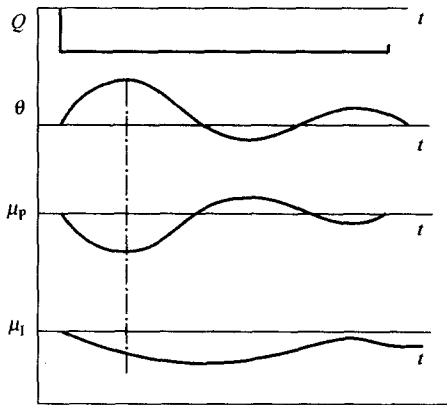


图 1.10 比例和积分作用

1.2.3 微分作用

控制器的输出与误差的变化率成比例。

$$u = S_2 \frac{de}{dt} \quad (1.7)$$

微分控制作用不能单独使用。因为任何控制器都存在死区，当偏差存在且变化很小时，基本上没有微分作用，这样将导致误差的累加。微分作用只能起辅助的控制作用，可以与其他控制作用构成 PD 或 PID 控制器。

PD 控制如下。

$$u = K_C e + S_2 \frac{de}{dt} = K_C \left(e + T_D \frac{de}{dt} \right) = \frac{1}{\delta} \left(e + T_D \frac{de}{dt} \right) \quad (1.8)$$

PD 控制的特性如下。

- ① 稳态时, $de/dt=0$, PD 控制存在稳态误差。
- ② 积分作用减少振荡, 因此增加系统稳定性。
- ③ 引入积分作用能增加开环增益, 因此, 提高系统的响应速度。
- ④ 对干扰较为敏感。

微分时间 T_D 可以通过一个斜坡输入响应来定义。

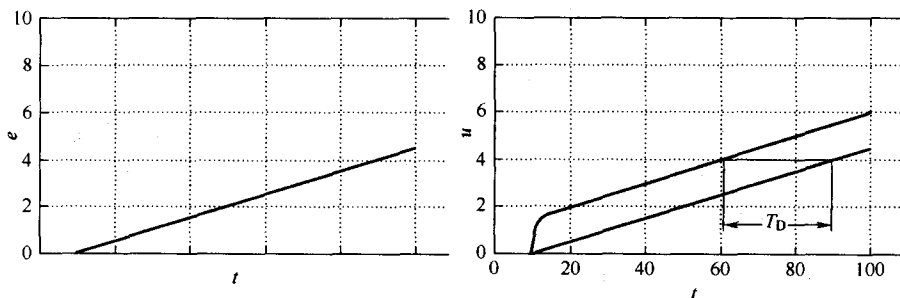


图 1.11 PID 控制的作用

T_D 必须仔细选择。增加微分时间将增加系统的稳定性, 然而, 当 T_D 的值超过一定的范围, 系统将变得不稳定。

PID 控制如下。

$$\begin{aligned} u &= K_C e + S_0 \int_0^t e dt + S_2 \frac{de}{dt} = K_C \left(e + \frac{1}{T_I} \int_0^t e dt + T_D \frac{de}{dt} \right) \\ &= \frac{1}{\delta} \left(e + \frac{1}{T_I} \int_0^t e dt + T_D \frac{de}{dt} \right) \end{aligned} \quad (1.9)$$

图 1.11 所示为 PID 控制的作用。

设计 PID 控制器的一般规律如下。

- ① 如果系统有时延并且时间常数较大, 采用微分控制。假设系统允许稳态余差则采用 PD 控制, 否则采用 PID 控制。
- ② PI 控制一般适用于系统时间常数较小, 有小的扰动, 同时不允许有稳态余差。
- ③ 比例控制适用于系统时间常数较小, 有小的扰动, 但允许有稳态余差。
- ④ 如果系统时间常数较大, 有大的时延和扰动, 往往采用更高级的控制方案。

1.2.4 闭环系统的稳定性

对于式 (1.1) 系统的特征方程