

火电厂

模拟量控制系统 及其应用

张 彬 陈立新 王亦昕 等 编著



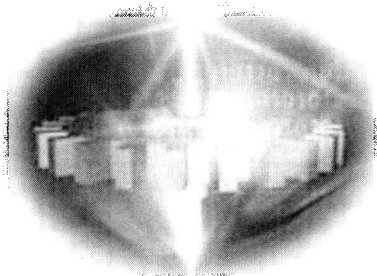
中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

火电厂 模拟量控制系统 及其应用

张 彬 陈立新 王亦昕 等 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



前 言

随着新机组的陆续投产,模拟量控制技术应用日益广泛,新技术不断应用于机组 DCS 改造和控制系统优化,许多从事热工控制专业工作的人员迫切需要了解这方面的新技术,本书主要是针对电厂常用控制系统的具体论述和详细分析,对系统构成、控制过程、应用情况、存在问题及其解决方法进行了详细论述。

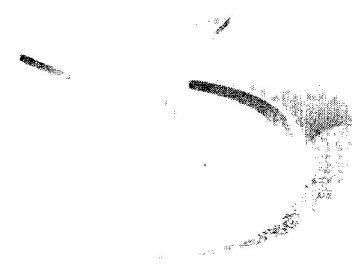
作者利用业余时间收集资料,在缺陷处理、调试记录、检修规程的基础上结合多年的检修调试和系统优化经验、最新技术革新成果编写而成,内容涵盖了锅炉燃烧控制(包括燃料控制系统、送风控制和引风控制)系统,汽轮机和辅机控制(包括 DEH 控制、MEH 控制、除氧器水位控制、高低加水位控制)系统。

第 1 章介绍模拟量控制基本知识,包括基本概念、系统分类、控制规律、控制指标。第 2 章讲解单元机组协调控制系统,包括基本控制方案、存在问题和技术改进过程、一次调频逻辑与试验。第 3 章讲解锅炉燃料控制系统,包括均衡燃烧控制、磨煤机料位控制、给煤机和给粉机改变频控制。第 4 章讲解锅炉汽包水位控制系统,包括汽包水位特性与控制方案、测量误差分析、执行机构改进。第 5 章讲解锅炉蒸汽温度控制系统,包括过热汽温和再热汽温特性分析、逻辑控制功能、阀门流量特性试验、执行机构改型。第 6 章讲解汽轮机 DEH 控制系统,包括 DEH-ⅢA、IA'S 和 SPEC-200 三种类型,系统升级改进过程。第 7 章讲解送风和引风控制系统,包括系统构成、逻辑分析与控制组态。第 8 章讲解一次风和辅助风控制系统,包括控制方案改进、电气转换器、执行机构、定位器改型。第 9 章讲解汽动给水泵 MEH 控制系统,系统应用与升级,指令冗余方案比较,接地问题探讨。第 10 章讲解汽轮机辅机控制系统,包括除氧器水位和高低加水位测量与控制,给水泵最小流量阀控制。

限于作者水平,如有不当或错误之处,敬请读者批评指正。

编者

2011 年 7 月



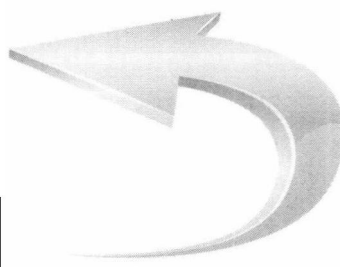
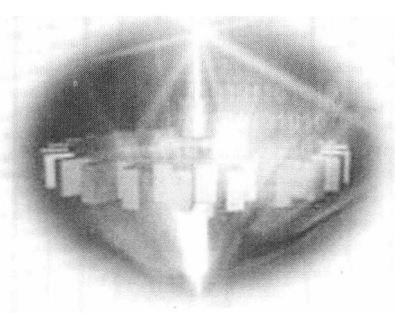
目 录

前言

1 模拟量控制基本知识	1
1.1 模拟量控制技术特点	1
1.2 模拟量控制有关基本概念	1
1.3 控制规律和参数整定	9
1.4 模拟量控制系统分类	13
1.5 模拟量控制品质指标	14
1.6 控制系统主要组成部分	16
1.7 控制系统设备检修规定	16
2 单元机组协调控制	18
2.1 机组协调控制逻辑	19
2.2 协调控制主要功能	35
2.3 一次调频设计方案分析	46
2.4 125MW 机组一次调频试验	53
2.5 300MW 机组一次调频试验	57
2.6 协调控制系统改造	65
3 锅炉燃料控制	76
3.1 燃烧控制任务和控制对象动态特性	76
3.2 磨煤机料位测量与优化	79
3.3 给煤机称重原理与应用	86
3.4 CFC-300 给煤机控制系统校验和改进	92
3.5 V7AA41P50 变频器控制原理与应用	97
3.6 双进双出磨煤机料位测量方法及其控制	103
3.7 CS2024 型给煤机控制与定度程序	109
3.8 均衡燃烧控制系统及应用	119
3.9 给煤机滑差调速改变频控制	130
3.10 给粉机滑差调速改变频控制	138
4 锅炉汽包水位控制	147
4.1 给水控制任务和控制对象特性	147

4.2	汽包水位控制逻辑功能	149
4.3	300MW 机组汽包水位测量	161
4.4	125MW 机组给水控制系统改造	166
4.5	给水控制改造后逻辑分析	174
4.6	125MW 机组汽包水位信号测量改进	184
4.7	给水泵耦合器勺管执行机构改造	189
5	锅炉蒸汽温度控制	195
5.1	汽温控制任务和控制对象特性	195
5.2	过热汽温控制逻辑功能	197
5.3	再热汽温控制逻辑功能	206
5.4	300MW 机组锅炉汽温控制系统调试	211
5.5	汽温控制执行机构由 L-120 型改为 Bernard-SD 型	219
5.6	一级过热汽温远操系统及其执行机构改造	227
6	汽轮机 DEH 控制	233
6.1	DEH 控制任务和控制对象特性	233
6.2	DEH 控制逻辑功能与仿真试验	236
6.3	DEH-ⅢA 控制系统与升级	254
6.4	DEH-ⅢA 系统硬件组成与调试维护	262
6.5	SPEC-200 电液控制系统	270
6.6	用 DCS 和 SPEC-200 电调系统实现协调控制	279
6.7	SPEC-200 电调系统改 DEH 控制	284
6.8	DEH 系统在机组启动和试验过程中的操作方式	291
7	锅炉送风和引风控制	299
7.1	锅炉风量控制逻辑功能	299
7.2	送风控制系统构成	313
7.3	送风控制逻辑组态	325
7.4	炉膛负压控制逻辑	339
7.5	引风控制系统构成与应用	344
7.6	引风控制系统逻辑功能完善	351
7.7	SIPOS 5 Flash PROFITRON 型变频智能型执行机构应用技术	356
7.8	氧化锆分析仪测氧原理及应用	361
8	一次风和辅助风控制	369
8.1	一次风压控制系统分析与改进	369
8.2	锅炉辅助风控制系统构成与改进	378
8.3	QZD-1002 型电气转换器改为 E69F-BI2-M 型	385
8.4	ZSZ-63×125 型气动执行机构改为 CPA1CN63-125-K 型	391
8.5	气动执行机构 F40 型定位器改 TZID-C 型	395

9 汽动给水泵 MEH 控制	406
9.1 330MW 机组 MEH 控制逻辑	406
9.2 MEH-Ⅲ A 控制系统应用与升级	426
9.3 MEH-Ⅲ A 控制系统调试	436
9.4 LC 卡通信中断问题	446
9.5 MEH-Ⅲ A 系统指令冗余方案分析	451
10 汽轮机辅机控制.....	455
10.1 除氧器水位控制与信号选择逻辑完善.....	455
10.2 汽泵最小流量阀控制应用与技术改进.....	461
10.3 高低压加热器水位测量控制技术.....	466
参考文献.....	476



1

模拟量控制基本知识

火电厂生产特点包括生产过程连续性和负荷适应性要求严格，运行机组安全可靠性和经济性要求高，控制对象复杂，被调参数多，控制区域广。随着机组容量的增大和参数的提高，对模拟量控制的功能和可靠性提出了更高要求。为保证安全、经济运行，要求熟练地掌握有关基本知识，优质高效地及时检修调试系统设备，处理控制设备故障。因此，必须了解控制对象特性，优化系统方案，熟练掌握系统结构原理及其调试技能，提高技术水平。

► 1.1 模拟量控制技术特点

模拟量控制技术涉及许多学科，渗透着各专业知识，利用了各种控制工具，如图 1-1 所示。

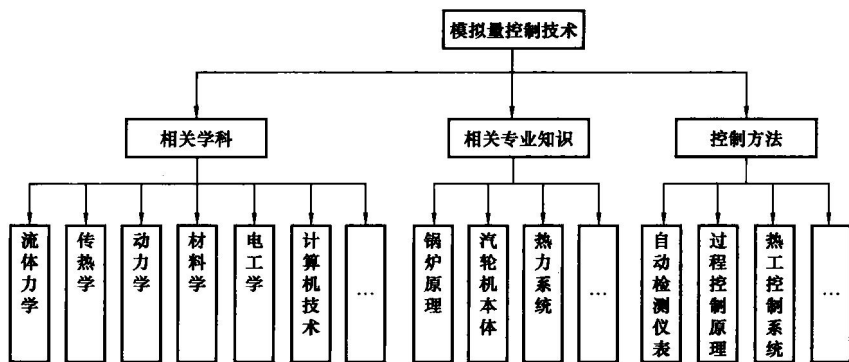


图 1-1 模拟量控制技术特点

随着计算机技术和现代控制理论的高速发展，大容量、高参数单元机组不断投运，为模拟量控制技术的广泛应用与改进创新创造了有利条件，其优化调试的目的是恢复和确认其工作性能和质量，对其维护则要确保热控设备工作状态的良好和可靠。

► 1.2 模拟量控制有关基本概念

1.2.1 控制系统，控制过程和自动控制

1. 控制系统

由起控制作用的全套自动化仪表装置和被控制的生产设备相互作用，形成一个闭合系统

称为控制系统，如图 1-2 所示。

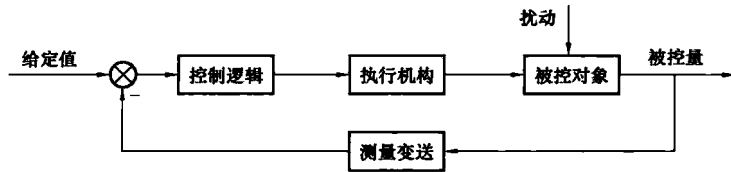


图 1-2 控制系统构成原理

2. 控制过程

使表征生产设备正常运行的物理量保持在给定值的必要操作称为控制。在自动控制系统中，被调参数随时间变化，控制对象受到扰动后，被控量偏离给定值，通过控制装置或运行人员的控制作用，使被控量重新稳定到给定值的过程称为控制过程。

3. 自动控制

生产过程受到干扰而使运行工况发生偏移时，控制设备进行必要的操作来抵消干扰的影响，使运行工况恢复正常，这样的控制称为自动控制。

1.2.2 环节，环节特性，传递函数

1. 环节

如图 1-2 所示，在控制系统方框图中，每一个小方框代表控制对象或自动控制装置的一个部件或一个设备或几个设备的组合体，称之为环节，环节为组成模拟量控制系统的最基本单元。

2. 环节特性

环节的输入信号和输出信号之间的关系称为环节特性，处于平衡状态时的关系称为静态特性，在变动状态时的关系称为环节的动态特性，根据动态特性试验，确定被控量，选择控制方案，整定参数。

典型环节是指具有单向传递信号的性质，有代表性的动态特性，可以用一阶或二阶微分方程来描述的环节，其微分方程的一般形式为

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \cdots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x \quad (m \leq n) \quad (1-1)$$

3. 传递函数

传递函数 $W(s)$ 是初始条件为 0 时，输出量的拉普拉斯变换式和输入量的拉普拉斯变换式之比，由线性常数微分方程变换得到，通过拉普拉斯变换，把微分方程的阶次和各项系数等特征与输入量、输出量分离出来，并以环节内部结构和参数来表示输入量和输出量之间的关系，即

$$W(s) = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \cdots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_1 s + a_0} \quad (m \leq n) \quad (1-2)$$

式 (1-2) 中，分母 $a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_1 s + a_0 = 0$ 就是微分方程的特征方程式，它的根的性质决定环节或系统的动态过程的基本形态——稳定和不稳定、单调和振荡，如图 1-3 所示。

图 1-3 (a) 为单调过程, 图 1-3 (b) 为衰减振荡过程, 图 1-3 (c) 为等幅振荡过程, 图 1-3 (d) 为发散振荡过程。稳定的控制过程是指如图 1-3 (a) 所示的单调过程和图 1-3 (b) 所示的为衰减振荡过程, 不稳定的控制过程是指如图 1-3 (c) 所示的等幅振荡过程和图 1-3 (d) 所示的发散振荡过程。

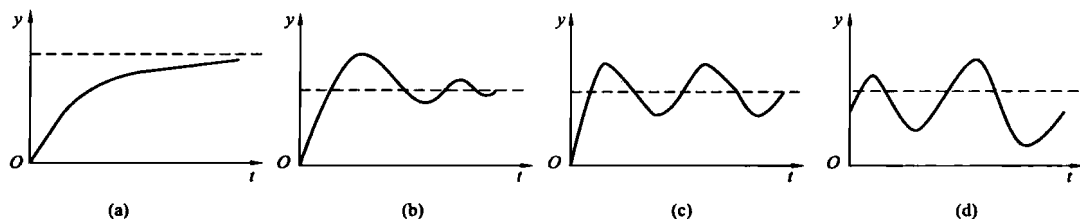


图 1-3 动态过程的基本形态

(a) 单调过程; (b) 衰减振荡过程; (c) 等幅振荡过程; (d) 发散振荡过程

1.2.3 比例环节, 积分环节, 惯性环节, 微分环节, 二阶环节, 纯迟延环节

1. 比例环节

输出信号按照一定比例、无迟延和无惯性地反映输入信号变化的环节称为比例环节。

动态方程

$$y(t) = Kx(t) \quad (1-3)$$

传递函数

$$W_K(s) = \frac{y(s)}{x(s)} = K \quad (1-4)$$

式中: K 为放大系数。

2. 积分环节

输出信号与输入信号的积分成比例, 或输出信号的变化速度与输入信号成比例, 称之为积分环节。

其动态方程表示为

$$y(t) = K_1 \int_0^t x(t) dt \quad (1-5)$$

传递函数

$$W_1(s) = \frac{y(s)}{x(s)} = \frac{K_1}{s} = \frac{1}{T_a s} \quad (1-6)$$

式中: T_a 为积分时间。

如无自平衡单容对象是一个积分环节, 积分环节一个很重要的特点是当输入信号为 0 时, 输出信号才能保持不变, 即 $x(t)=0$ 时, $\frac{dy}{dt} = K_1 x(t) = 0$ 。

3. 微分环节

在阶跃扰动下, 输出信号随时间按指数规律变化的环节称为惯性环节, 动态方程为

$$T_C = \frac{dy}{dt} + y = kx \quad (1-7)$$

传递函数

$$W_D(s) = \frac{y(s)}{x(s)} = \frac{k}{T_C s + 1} \quad (1-8)$$

式中： T_C 为惯性环节的时间常数； k 为惯性环节的传递系数，或静态放大系数。它等于平衡状态时，输出信号与输入信号的比值。在汽温控制系统中，测温热电偶可以看作是一个惯性环节。

输出信号和输入信号的一阶导数成比例的环节称为理想微分环节。

动态方程

$$y(t) = T_d \frac{dx(t)}{dt} \quad (1-9)$$

传递函数

$$W_D(s) = \frac{y(s)}{x(s)} = T_d s \quad (1-10)$$

T_d 为理想微分时间常数，实际微分环节由理想微分环节串联惯性环节构成。

动态方程

$$T_D \frac{dy}{dt} + y(t) = k T_D \frac{dx(t)}{dt} \quad (1-11)$$

传递函数

$$W_d(s) = \frac{y(s)}{x(s)} = \frac{k T_D s}{T_D s + 1} \quad (1-12)$$

式中： T_D 为实际微分时间常数； k 为传递系数。

从动态特性来看，实际微分环节由一个正向的比例环节和反向的积分环节反馈连接构成，也可以看作为由一个比例环节和一个惯性环节并联相减构成。

4. 二阶环节

用二阶微分方程来描述动态特性的环节称为二阶环节。

动态方程

$$a_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x \quad (1-13)$$

传递函数

$$W(s) = \frac{y(s)}{x(s)} = \frac{b_1 s + b_0}{a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \quad (1-14)$$

特征方程

$$a_2 s^2 + a_1 s + a_0 = 0$$

其方程根为

$$S_{1,2} = \frac{-a_1 \pm \sqrt{a_1^2 - 4a_2 a_0}}{2a_2} = -\frac{a_1}{2a_2} \pm \frac{\sqrt{a_1^2 - 4a_2 a_0}}{2a_2}$$

整理 $\frac{\sqrt{a_1^2 - 4a_2a_0}}{2a_2}$ 项为 $\sqrt{\left(\sqrt{\frac{a_1}{4a_2a_0}}\right)^2 - 1} \sqrt{\frac{a_0}{a_2}}$ 。

设 $\xi = \sqrt{\frac{a_1}{4a_2a_0}}$, $\omega_n = \sqrt{\frac{a_0}{a_2}}$, 则

$$\sqrt{\left(\sqrt{\frac{a_1}{4a_2a_0}}\right)^2 - 1} \sqrt{\frac{a_0}{a_2}} = \omega_n \sqrt{\xi^2 - 1}$$

$$S_{1,2} = \frac{-a_1 \pm \sqrt{a_1^2 - 4a_2a_0}}{2a_2} = -\omega_n \xi \pm j\omega_n \sqrt{1 - \xi^2} \quad (1-15)$$

式中: ξ 为阻尼系数; ω_n 为振荡频率。

ξ 的取值不同, $S_{1,2}$ 有 5 种不同性质的根, 对控制过程有不同影响。 $\xi > 1$, $S_{1,2}$ 为 2 个不相等的实根, 阶跃响应为具有拐点的单调非周期曲线。 $\xi = 1$, $S_{1,2}$ 为 1 对重根, 阶跃响应为临界非周期曲线。 $0 < \xi < 1$, $S_{1,2} = -\omega_n \xi \pm j\omega_n \sqrt{1 - \xi^2}$, 其根为 1 对负实部的共轭复根, 阶跃响应为衰减振荡曲线。 $\xi = 0$, $S_{1,2}$ 为 1 对共轭重根, 阶跃响应为临界稳定状态。 $-1 < \xi < 0$, $S_{1,2}$ 为 1 对正实部的共轭复根, 阶跃响应为扩大振荡曲线。

5. 纯迟延环节

纯迟延环节输出信号的形状与输入信号的形状完全相同, 仅迟延一段时间 τ 。

1.2.4 控制对象, 自平衡能力, 容量, 容量系数

1. 控制对象

控制对象为被控量所在生产设备的局部或全部, 是指被控制的生产过程或生产设备, 控制对象分为有自平衡能力对象和无自平衡能力对象、单容被控对象和多容被控对象。

2. 自平衡能力

自平衡能力是指对象在受到扰动后, 仅依靠自身能力而不依靠任何外加的控制作用就能使被控量趋于某一稳定值的能力, 控制对象典型阶跃响应曲线的变化特点是一开始被调量并不立即明显变化, 而是有迟延和惯性, 在最后阶段, 如果被调量不断变化而其变化速度趋近等于一数值, 称为无自平衡能力, 如图 1-4 (a) 所示, 被调量能够达到一平衡值, 称为有自平衡能力, 如图 1-4 (b) 所示。

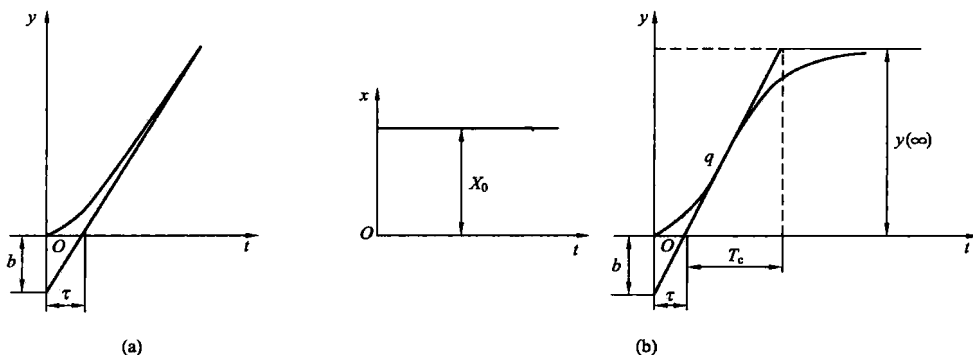


图 1-4 多容对象特征参数

(a) 无自平衡能力; (b) 有自平衡能力

无自平衡能力对象可以看作是积分环节与迟延环节的串联，其特征参数为迟延时间（容

积迟延） τ 和反应速度（飞升速度） $\epsilon = \frac{1}{T_a} = \frac{\left. \frac{dy}{dt} \right|_{t=\infty}}{x_0}$ ，反应时间 T_a ，即

$$T_a = \frac{1}{\epsilon} = \frac{x_0}{\left. \frac{dy}{dt} \right|_{t=\infty}} \quad (1-16)$$

T_a 反映了对象惯性大小，其值为在阶跃输入作用下，被控量的变化速度由 0 接近于渐近线斜率所需时间。

对于有自平衡能力对象，放大倍数 k 是对象自平衡能力 ρ 的度量， k 越大，说明对象的自平衡能力越差，即

$$P = \frac{1}{K} = \frac{x_0}{y(\infty)} \quad (1-17)$$

$$\epsilon = \frac{\left. \frac{dy}{dt} \right|_q}{x_0} = \frac{b}{x_0 t} \quad (1-18)$$

$$\left. \frac{dy}{dt} \right|_q = \frac{y(\infty)}{T_c} = x_0 \epsilon \quad (1-19)$$

$$T_c = \frac{1}{\epsilon \rho} \quad (1-20)$$

有自平衡能力对象特征参数为 τ 、 ρ 和 T_c ，或 ϵ 、 ρ 、 τ 。

3. 容量、容量系数

被控对象储存能量或工质的特性称为容量，只包含一个容积的被控对象称为单容被控对象，包含两个容积的被控对象称为双容被控对象，包含两个或两个以上容积的被控对象称为多容被控对象，其特征参数为容量系数，容量系数用来衡量对象存储工质能量的能力，容量系数越大，抵抗扰动的能力就越强，因此，容量系数表达了对象抵抗扰动的能力，数值上等于被控量变化一个单位时，所需对象储存量的变化量，即使被控量变化一个单位，必须从对象中加入或取出工质或能量的数量。

1.2.5 输入量，标准输入信号

输入到控制系统中，并对被调参数产生影响的信号（给定和扰动值）为输入量，标准输入信号包括脉冲函数、阶跃函数和正弦函数，对应标准输入信号的环节输出响应分别为脉冲响应特性、阶跃响应特性，即飞升特性和频率响应特性。

脉冲响应特性为 $y(s) = W(s)$ ，即阶跃响应特性函数是它的脉冲响应特性函数的积分，反之，脉冲响应特性函数是它的阶跃响应特性函数的微分。

频率响应特性为 $x(t) = A_x \sin \omega t = A_x e^{j0}$ ， $y(t) = A_y \sin(\omega t + \phi) = A_y e^{j\phi}$ 。

$$W(j\omega) = \frac{A_y}{A_x} e^{j\phi} \quad (1-21)$$

$$W(j\omega) = \frac{b_m(j\omega)^m + b_{m-1}(j\omega)^{m-1} + \cdots + b_1(j\omega) + b_0}{a_n(j\omega)^n + a_{n-1}(j\omega)^{n-1} + \cdots + a_1(j\omega) + a_0} = M(\omega) e^{j\theta(\omega)} = P(\omega) + jQ(\omega) \quad (1-22)$$

式中 $W(j\omega)$ 为频率响应特性;

$M(\omega)$ 为幅频特性;

$\theta(\omega)$ 为相频特性;

$P(\omega)$ 为实频特性, $P(\omega) = M(\omega)\cos\theta(\omega)$;

$Q(\omega)$ 为虚频特性, $Q(\omega) = M(\omega)\sin\theta(\omega)$ 。

1.2.6 被控量, 给定值, 控制故障

1. 被控量

表征生产设备运行情况是否正常而需加以控制的物理量, 即通过控制所要维持的参数称为被控量, 或被控参数, 被控量标志着生产过程是否符合规定工况, 表明工质状态特征的物理量称为工质的状态参数。

2. 给定值, 控制故障

根据生产过程的要求, 规定被控量应达到并保持的数值, 即被控量所应具有数值称为被控量的给定值, 被控量与给定值偏差大于一定值发出控制故障, 一般为 10%。

1.2.7 扰动, 飞升速度, 飞升时间

1. 扰动, 内扰, 外扰

生产过程中, 各种因素会引起被控制量变化, 除控制作用外, 引起被控制量变化的其他因素统称为扰动。若扰动发生在闭环系统内部称为内扰, 若发生在闭环系统外部称为外扰。

2. 飞升速度, 飞升时间

在阶跃输入信号作用下, 环节的输出响应称为阶跃响应, 一般的扰动试验均采用阶跃扰动, 因为这是一种规定的标准形式的扰动, 便于分析, 也是一种最为严重的扰动, 它是控制系统中最为常见的扰动形式, 飞升速度是指在单位阶跃扰动量作用下, 被控量的最大变化速度。飞升时间又称反应时间, 是指在阶跃扰动量作用下, 被控量以最大飞升速度达到稳态值所需时间。控制对象飞升特性试验方法: 在试验前, 要切断控制功能块对控制对象的控制作用, 用手动远方操作, 保持被调量稳定在其给定值附近, 然后用手动远操, 突然改变控制机构的位置, 即给控制对象加一阶跃。

1.2.8 反馈, 闭环系统, 滞后

1. 反馈

把输出量的全部或部分信号送到输入端的输入方式称为反馈, 反馈信号与输入信号极性相同时称为正反馈, 反馈信号与输入信号极性相反时称为负反馈。

2. 闭环系统

系统输出的被控量和输入量之间存在着反馈回路的系统称为闭环系统, 反之为开环。

3. 滞后

控制对象受到扰动后, 被控量不立即变化, 而是要迟延一段时间发生变化的特性称为滞后。

1.2.9 执行机构, 控制作用, 自动跟踪, 无扰切换

1. 执行机构, 控制作用

由运行人员或其他装置控制起控制作用的机构称为执行机构, 改变控制机构位置, 以改

变进入控制对象的工质或能量，从而控制被调量的作用称为控制作用，执行机构输入信号较小时不动作，只有输入信号到一定值时，执行机构才动作，死区现象过于严重，可能导致控制系统产生振荡，使控制品质下降。

2. 自动跟踪，无扰切换

控制指令与执行机构反馈偏差大于一定值发出控制故障，一般为 10％。当系统在手动时，控制功能块输出始终能自动地与执行机构的输入电流或位置反馈电流保持同步，称为自动跟踪，具体实现方法如图 1-5 所示。其中，参数 INITI 为 PID 模块初始化输入信号，连接到 AOUT 模块的初始化输出参数 INITO，BCALCI 为反运算输入信号，在 PID 模块进入控制状态前，提供初始化输出值，使切换到控制状态时无扰动。连接到 AOUT 模块的反运算参数 BCALCO，当 INITI=1，PID 模块的输出跟踪它的 BCALCI。

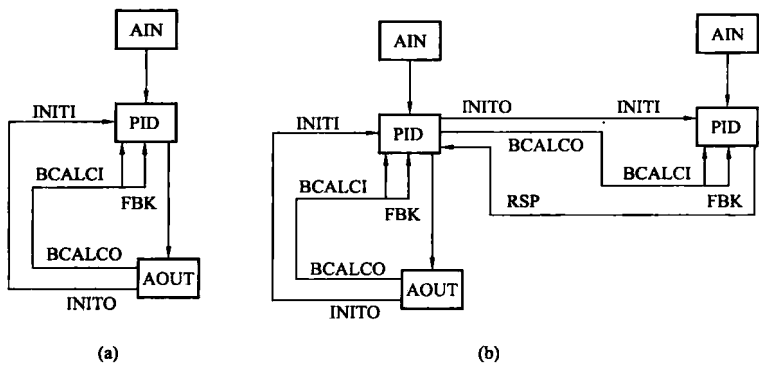


图 1-5 自动跟踪信号连接
(a) 单回路控制；(b) 串级控制

控制系统从自动状态进入手动状态时，执行机构应保持在原来的位置，手动操作在自动控制时执行机构原来的位置基础上进行；反之，当控制系统从手动转入自动时，执行机构在原来的位置基础上接受控制作用的指挥，然后按被控量的偏差变化的情况进行控制，符合上述情况的切换即为无扰切换。

1.2.10 流量特性、结构特性、可调范围

通过控制阀的相对流量与其相对开度之间的关系称为控制阀的流量特性。理想流量特性

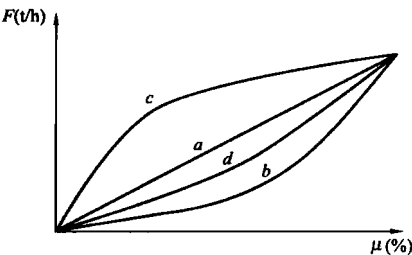


图 1-6 流量特性
a—直线特性；b—等百分比特性；
c—快开特性；d—抛物线特性

是指控制阀前后差压不变的情况下，相对流量与其相对开度之间的关系。结构特性是指控制阀的相对开度与相对通流截面积的关系。如果不考虑控制阀在管路系统中受配管状态 S 的影响， $S = \Delta P_{open} / \Delta P_{all}$ ，理想流量特性就是结构特性，一般包括直线特性、等百分比特性、快开特性和抛物线特性，如图 1-6 所示。

可调范围 R 是指在控制阀全开时通过的最大流量 Q_{max} 与阀门全关时通过的最小流量 Q_{min} 的比值，即

$$R = \frac{Q_{\max}}{Q_{\min}} = \frac{C_{\max} \sqrt{\Delta P_{\max}}}{C_{\min} \sqrt{\Delta P_{\min}}} = \frac{C_{\max}}{C_{\min}} \sqrt{\frac{\Delta P_{\max}}{\Delta P_{\min}}} \quad (1-23)$$

实际上, $\frac{C_{\max}}{C_{\min}} = 10$, $\frac{\Delta P_{\max}}{\Delta P_{\min}} \approx S$, 所以

$$R = 10 \sqrt{S} \quad (1-24)$$

1.3 控制规律和参数整定

1.3.1 控制规律

1. 比例作用

控制规律是指控制功能块的输出信号与其输入信号之间的动态关系, 常用的控制规律包括比例控制、积分控制和微分控制。

比例控制输出的控制信号 m 与其偏差输入信号 e 之间成比例关系, 即

$$m = K_P e = \frac{e}{\delta} \quad (1-25)$$

执行机构位移量与被调量偏差成比例控制, 比例带 δ 为执行机构位移改变 100% 时, 被调量应有的改变量。单容对象在比例控制作用下, 控制过程为非周期的, 控制系统采用比例作用时, 当负荷变化后, 控制结果是有差的。

K_P 为比例增益, 比例传递函数 $W_P(s)$ 为

$$W_P(s) = \frac{m}{e} = K_P = \frac{1}{\delta} \quad (1-26)$$

如在比例作用时: 比例带设置为 200, 当输入偏差信号为 8mA DC 时, 则控制输出为 4mA DC; 比例带设置为 50, 当输入偏差信号为 8mA DC 时, 则控制输出为 16mA DC。

2. 积分作用

积分控制输出的控制信号 m 与其偏差输入信号 e 对时间的积分成比例关系, 即

$$m = \frac{1}{T_i} \int_0^t e dt \quad (1-27)$$

其传递函数为

$$W_I(s) = \frac{m}{e} = \frac{1}{T_i s} \quad (1-28)$$

积分作用能够消除被调量的静态偏差, 但积分控制规律与被调量的变化速度的大小和方向无关, 只要有偏差, 控制就动作, 这是积分作用在控制中产生过调的根本原因, 由于容易产生过调, 过调的结果扩大了被调量与给定值的差值, 此偏差反过来又使积分作用进一步进行, 引起振荡。

积分时间 T_i 是使控制功能块输出的变化为比例作用所造成的变化加倍所需要的时间, 控制比例带 δ 和积分时间 T_i 过大, 都会使控制动作速度慢、过渡过程时间长、被调量的变化缓慢、控制过程更加不稳定, 在比例控制作用基础上增加积分作用时, 比例带的整定要比单纯比例控制时大, 积分作用主要体现在控制过程的后期。

3. 微分作用

微分作用输出的控制信号 m 与其偏差输入信号 e 对时间的变化率成比例关系，即

$$m = T_d \frac{de}{dt} \quad (1-29)$$

其传递函数为

$$W_D(s) = \frac{m}{e} = T_d s \quad (1-30)$$

T_d 为微分时间，微分作用时，执行机构立即有一个位移，没有微分作用时，这个位移要在经过 T_d 时间后才能达到，这个超前时间即微分时间，在比例控制作用基础上增加微分作用时，比例带的整定要比单纯比例控制时小，微分作用主要体现在控制过程的初期。

微分作用可以减少过渡过程的最大偏差和控制过程时间，积分作用能够消除稳态偏差，但它使过渡过程的最大偏差及控制过程时间增大，如果系统迟延大，积分作用将会引起振荡，比例作用的特点是动作快，输出毫无延迟地反映出输入的变化，是各种控制中最基本的控制作用，缺点是控制结束后，被调量有稳态偏差，结合各自特点，常采用 P、PI、PD 和 PID 控制，PID 传递函数为

$$W_R(s) = \frac{m}{e} = \frac{1}{\delta} \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (1-31)$$

根据热力系统稳定性要求，PI 控制既可以不过分振荡，又可以无差控制，应用较多。

1.3.2 参数整定

因为不同的控制对象对控制的特性要求不同，改变控制参数的大小，就可以改变控制特性，使其与控制对象更好地配合，取得最佳控制效果，通过改变整定参数的大小，使之与对象配合好的过程叫做控制参数整定。闭环控制系统传递函数为

$$W(s) = \frac{W_0(s)}{1 + W_0(s)W_R(s)} = \frac{W_0(s)}{1 + \frac{1}{\delta} \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) W_0(s)} \quad (1-32)$$

比例控制规律是偏差一出现就能及时控制，但控制作用同偏差量是成比例的，控制终了会产生静态偏差。 δ 越小， K_P 越大，静态偏差也越小， δ 过小，引起振荡的周期较短，如图 1-7 (a) 所示； δ 过大，曲线飘动大，变化不规则。积分控制规律是只要有偏差，就有控制作用，直到偏差为零，因此它能消除偏差，但积分作用过强，又会使控制作用过强，引起被调参数超调，甚至产生振荡，振荡周期较长，如图 1-7 (b) 所示；积分作用过弱，曲线虽振荡，仍能缓慢地接近给定值。微分控制规律是根据偏差的变化速度进行控制，因

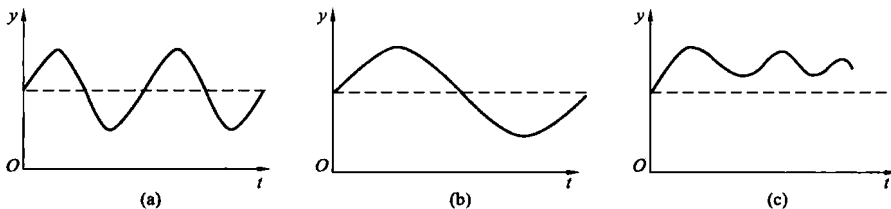


图 1-7 参数整定不当引起的控制曲线变化

(a) 比例作用过强；(b) 积分作用过强；(c) 微分作用过强

此,能提前给出较大的控制作用,大大减小了系统的动态偏差量及控制过程时间,但微分作用过强,又会使控制作用过强,引起系统超调和振荡,振荡周期相比于比例带或积分时间引起的振荡最小,如图 1-7 (c) 所示。

根据三种控制规律的特点,其参数调整原则如下:就每一种控制规律而言,在满足生产要求的情况下,比例作用应强一些,积分作用应强一些,微分作用也应强一些,当同时采用这三种控制规律时,三种控制作用都应适当减弱,且微分时间一般取积分时间的 $1/4 \sim 1/3$,只要三个作用配合得当,就可以避免过分振荡,这主要是比例作用,又能得到准确的控制结果,主要是积分作用,且能在控制过程中加强控制作用,减少动态偏差,主要是微分作用。

实际应用中,控制参数整定一般有动态特性参数法、经验试凑法、衰减曲线法和稳定边界法等 4 种。

1. 动态特性参数法

根据对象的阶跃响应曲线对控制参数进行整定,如图 1-4 所示,只需求取系统中被控对象的动态特性参数 ϵ 、 ρ 、 τ 。如果控制过程的 $\psi=0.75$:对于无自平衡能力对象,其动态特性参数法 PID 参数计算参考表 1-1;对于有自平衡能力对象,其动态特性参数法 PID 参数计算参考表 1-2。

表 1-1 无自平衡能力对象动态特性参数法 PID 参数计算

控制规律	δ (%)	T_i (s)	T_d (s)
P	$\epsilon\tau$		
PI	$1.1\epsilon\tau$	3.33τ	
PID	$0.83\epsilon\tau$	2τ	0.5τ

表 1-2 有自平衡能力对象动态特性参数法 PID 参数计算

控制规律			P	PI	PID
整定参数	δ (%)	$\epsilon\rho\tau \leq 0.2$	$\epsilon\tau$	$1.1\epsilon\tau$	$0.8\epsilon\tau$
		$0.2 < \epsilon\rho\tau < 1.5$	$\frac{2.6(\epsilon\rho\tau - 0.08)}{\rho(\epsilon\rho\tau + 0.7)}$	$\frac{2.6(\epsilon\rho\tau - 0.08)}{\rho(\epsilon\rho\tau + 0.6)}$	$\frac{2.6(\epsilon\rho\tau - 0.13)}{\rho(\epsilon\rho\tau + 1.5)}$
		$\epsilon\rho\tau \geq 1.5$	$\frac{2}{\rho}$	$\frac{2}{\rho}$	$\frac{1.7}{\rho}$
	T_i (s)	$\epsilon\rho\tau \leq 0.2$		3.3τ	2.5τ
		$0.2 < \epsilon\rho\tau < 1.5$		$\frac{0.8\tau}{\epsilon\rho\tau}$	$\frac{\tau}{\epsilon\rho\tau}$
		$\epsilon\rho\tau \geq 1.5$		0.6τ	0.7τ
	T_d (s)				$0.25 T_i$ (s)

2. 经验试凑法

不需要事先测取对象动态特性,直接通过闭环系统的试投来确定控制参数,凭借现场调试经验对控制参数进行试凑,具体步骤如下。

(1) $T_i \rightarrow \infty$, $T_d \rightarrow 0$,取消积分作用和微分作用,控制为比例作用,根据经验设置比例带 δ ,系统闭环运行,阶跃扰动试验,修改比例带 δ 值,直到过渡过程有一定的衰减率。