

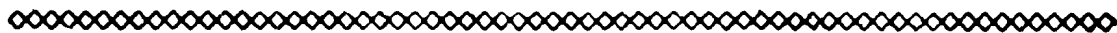
中等专业学校教材

热工过程自动控制系统

西安电力高等专科学校 殷树德 编



中等专业学校教材



热工过程自动控制系统

西安电力高等专科学校 殷树德 编

水利电力出版社

内 容 提 要

本书讲述火电厂热工过程主要控制系统的组成原理、分析及整定。内容包括：控制对象动态特性的求取；单回路及复杂系统的分析、整定；汽包锅炉的汽温、给水、燃烧控制系统；直流锅炉的控制系统；汽轮机的控制系统；单元机组的协调控制系统。取材较新颖，大体上反映了目前国内火电厂热工自动控制的先进水平。

本书为中等专业学校电厂热力过程自动化专业的教材，也可作为相近专业的教学参考书，以及供从事电力、化工、冶金、石油等过程自动控制工作的技术人员学习参考。

中等专业学校教材

热工过程自动控制系统

西安电力高等专科学校 殷树德 编

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

北京市地矿局印刷厂印刷

*

787×1092 毫米 16 开本 16.5 印张 373 千字

1995 年 11 月第一版 1995 年 11 月北京第一次印刷

印数 0001—3870 册

ISBN7-120-02366-7/TK·345

定价：12.80 元

前 言

本书根据电力工业部热能动力类教研会热力过程自动化专业组会议通过的热工过程自动控制系统教材编写细纲写成。

全书共分八章。第一章单回路控制系统和第二章基本的复杂控制系统是本书的基础部分。第三章至第六章讲述汽包锅炉的汽温、给水、燃烧自动控制及直流锅炉的自动控制。第七章讲述汽轮机的电液控制系统和旁路控制系统。第八章讲述单元机组的协调控制，重点是主控系统。

本书着重讲解上述控制内容的模拟量控制（常称为自动调节），但随着自动控制系统的发展，在模拟量控制中已广泛应用逻辑控制进行生产过程的监控、运行方式切换与跟踪、连锁与保护等。因此，本书在讲述模拟量控制（调节）时也适当介绍了一些逻辑控制方面的内容。

东南大学陈来九教授对本书初稿进行了仔细审阅，提出许多宝贵的意见和建议。部系统热力过程自动化专业课程组的老师们对编写细纲进行了深入地讨论。在此，谨致以衷心的感谢。

限于编者水平，难免有不正确之处，恳请读者批评指正。

编 者

1993年3月22日

目 录

前 言

第一章 单回路控制系统	(1)
第一节 热工控制对象动态特性的测取	(1)
第二节 根据阶跃响应曲线求控制对象的近似传递函数	(4)
第三节 控制系统的性能指标	(9)
第四节 单回路控制系统的工程整定法	(13)
第五节 自动控制系统投运的一般步骤	(24)
本章小结	(25)
思考题与习题	(27)
第二章 基本的复杂控制系统	(28)
第一节 串级控制系统	(28)
第二节 采用导前微分信号的双回路控制系统	(34)
第三节 前馈-反馈控制系统	(38)
第四节 多变量自动控制系统	(43)
本章小结	(47)
思考题与习题	(47)
第三章 汽包锅炉汽温自动控制系统	(49)
第一节 过热汽温控制对象的动态特性	(49)
第二节 过热汽温控制系统的基本方案	(52)
第三节 串级汽温自动控制系统	(56)
第四节 采用导前微分信号的双回路汽温自动控制系统	(68)
第五节 过热汽温控制系统举例	(75)
第六节 再热汽温自动控制系统	(81)
本章小结	(84)
思考题与习题	(86)
第四章 汽包锅炉的给水自动控制系统	(87)
第一节 锅炉给水控制对象的动态特性	(87)
第二节 给水自动控制系统的基本方案	(89)
第三节 单级三冲量给水自动控制系统	(92)
第四节 串级三冲量给水自动控制系统	(99)
第五节 采用可编程控制器的给水自动控制系统	(104)
第六节 给水全程自动控制系统	(106)
本章小结	(126)
思考题与习题	(127)

第五章 汽包锅炉燃烧自动控制系统	(129)
第一节 概述	(129)
第二节 燃烧控制对象的动态特性	(130)
第三节 燃烧自动控制系统的基本方案	(134)
第四节 燃烧控制系统的整定	(142)
第五节 燃烧控制系统举例	(149)
本章小结	(168)
思考题与习题	(169)
第六章 直流锅炉自动控制系统	(171)
第一节 直流锅炉的控制特点	(171)
第二节 直流锅炉的动态特性	(172)
第三节 直流锅炉基本控制方案	(175)
第四节 直流锅炉控制系统的整定	(177)
第五节 直流锅炉控制系统举例	(182)
本章小结	(184)
思考题与习题	(185)
第七章 汽轮机控制系统	(186)
第一节 大容量再热式机组的控制特点	(186)
第二节 汽轮机控制部件的传递函数	(190)
第三节 功频电液控制系统的组成原理	(192)
第四节 功频电液控制系统的功能	(193)
第五节 功频电液控制系统的正常运行	(201)
第六节 旁路控制系统	(203)
本章小结	(215)
思考题与习题	(216)
第八章 单元机组协调控制系统	(217)
第一节 概述	(217)
第二节 基本控制方式	(219)
第三节 基本运行方式	(225)
第四节 主控系统实例 (一)	(232)
第五节 主控系统实例 (二)	(245)
本章小结	(255)
思考题与习题	(256)
参考文献	(257)

第一章 单回路控制系统

最简单的热工过程自动控制系统的方框图如图 1-1 所示，它主要由控制对象、控制器（图中包括执行器）和测量、变送元件组成。

图中控制对象是一个多输入、单输出的对象。输入信号包括控制作用 μ 和扰动作用 $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ ，输出信号指被控量 y 。输入信号至输出信号之间的传递途径叫做通道。控制作用 μ 至被控量之间的传递途径叫做控制通道，其传递函数用 $W_{op}(s)$ 表示。扰动作用 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ 至被控量之间的传递途径叫做扰动通道。在某一扰动量作用下（其余扰动量不变），其传递函数分别用 $W_{oi1}(s), \dots, W_{oin}(s)$ 表示。一般，控制通道的动态特性 $W_{op}(s)$ 与扰动通道的动态特性 $W_{oi}(s)$ 是不相同的。

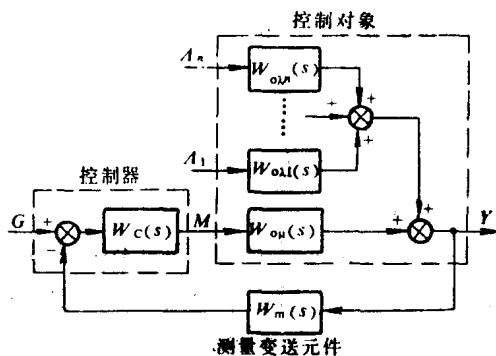


图 1-1 简单热工自动控制系统

系统的输出信号（被控量） y 经过测量、变送元件后反馈到系统的输入端与给定值 g 进行比较（控制器根据二者的偏差进行控制），这样就构成单回路（反馈）控制系统。

本章讨论单输出控制对象在某一输入时，动态特性的测取方法，近似传递函数的建立方法，及单回路控制系统的工程整定方法。这些内容，是研究复杂对象及系统的基础。

有些热工控制对象是多输入、多输出的，它有几个被控量和几个控制量，每个控制量变化会同时影响几个被控量，即任一个被控量将同时受到几个控制量的影响。这种控制对象叫做多变量对象。火电厂中的锅炉就是一种多变量对象；而锅炉-汽轮发电机组是另一种多变量对象。有些多变量对象，可以在一定条件下，把它近似简化为几个单输出对象来处理。

第一节 热工控制对象动态特性的测取

在设计、分析及整定控制系统时，都需要知道控制对象的动态特性。用理论方法来求出一个比较复杂的控制对象的动态特性，往往是十分困难的。工程上通常用试验方法来求取控制对象的动态特性，常用方法有如下两种。

① 为简明，本书方框图上的信号，如 $G(s), Y(s), M(s), \Lambda_n(s)$ 等仅用大写字母 G, Y, M, Λ_n 等，略去 (s) 。在文字叙述中则用对应的小写字母，如 g, y, μ, λ_n 等。请读者注意。

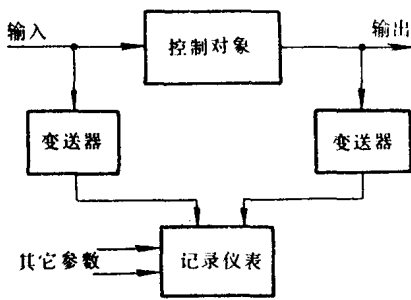


图 1-2 阶跃响应特性试验原理图

人的其它主要参数的变化情况，供分析试验结果时参考。

但是，在现场进行实际测试时会遇到一些困难。例如，控制对象在运行中难免会遇到这样或那样随机干扰的影响，使试验结果（输出信号）发生畸变；再如，生产过程往往不允许主参数大幅度变化，这就使阶跃响应试验受到一定限制，等等。因此，在试验中必须注意以下事项：

(1) 整个试验过程中应尽可能保持工况的稳定。扰动加入之前，负荷及各被测参数应维持不变。扰动加入后，不应进行不必要的操作。

(2) 根据安全运行和读数准确的要求，确定输入信号的幅值。若扰动量的幅值过小，被控量的变化幅值也小，这就难以区分随机干扰信号对被控量的影响；扰动量的幅值过大，可能引起被控量超出允许的变化范围。通常输入信号的幅值取其额定值的 10%~15% 为宜。

(3) 在试验开始前，应将被控量调整到适当的初始值。在做被控量上升试验时，被控量的初始值应调至允许的低限值；而在做下降试验时，被控量应调至允许的高限值。这样便于在试验过程中保持被控量在允许范围内变化，以获得一条完整的试验曲线。

(4) 所加扰动信号应尽可能是阶跃的。如果扰动是通过执行器、控制机构加入的，则由于受执行器和阀门移动速度的限制，所加入的扰动量只能按一定速度变化（并非阶跃），如图 1-3 所示。这种情况，可认为阶跃信号是在 $t_1/2$ 时刻加入的，并以此点作为阶跃响应曲线的起始点。

(5) 要特别仔细记录阶跃响应曲线的初始阶段。因为这部分曲线形状的准确性对确定对象动态特性参数的影响很大。对有自平衡的对象，试验后期被控量变化缓慢，要等待足够长时间，让被控量趋于稳态值。

(6) 考虑到测量仪表有变差、控制阀有死区等，试验应在被控量上升和下降两个方向进行。若两条曲线无明显差别，可取二者动态参数的平均值作为对象的动态参数；或取特性较差的一条曲线为依据。

(7) 热工控制对象的动态特性随负荷而变。一般高负荷时动态特性较好，低负荷时特性变坏。因此，应在不同负荷下做试验。在分析、整定全程控制系统、调峰调频机组的控制系统时，应考虑动态特性随负荷变化的情况。

一、阶跃响应曲线的测取方法

首先，根据试验目的选定输入信号，例如控制作用 μ ，或负荷，或给定值 g 。输出信号即为被控量 y 。试验原理框图如图 1-2 所示。在控制对象的输入端加入一个阶跃扰动信号，在对象输出端便出现被控量随时间变化的曲线，即阶跃响应曲线。用专用快速记录仪（通常为多笔的）记录输入与输出信号随时间变化的曲线。如有必要，同时还可以记录影响对象输出、输入

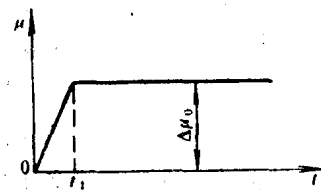


图 1-3 阶跃扰动通过等速执行器加入时，控制阀开度实际变化曲线

二、矩形脉冲响应特性曲线的测取

当控制对象在受到一定阶跃扰动量（例如 10%~15%）时，若被控量的变化将超出允许的变化范围，这种情况宜施加矩形脉冲扰动进行试验。有自平衡对象的矩形脉冲响应曲线，如图 1-4 (a) 所示。由于扰动量 x_0 在时刻 a 以后消失，所以被控量 y 最终将回到起始值。无自平衡对象的矩形脉冲响应曲线如图

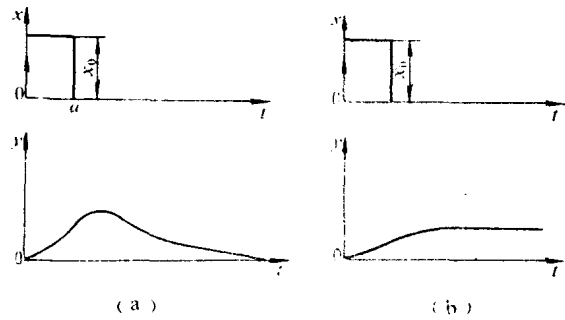


图 1-4 矩形脉冲响应曲线
(a) 有自平衡对象；(b) 无自平衡对象

1-4 (b) 所示。由于对象存在积分作用，所以被控量稳定在某个新的数值。

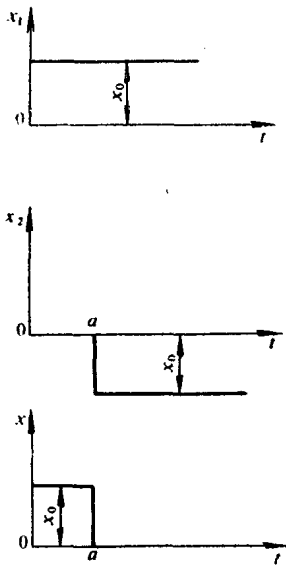


图 1-5 矩形脉冲信号与阶跃信号的关系

矩形脉冲响应特性曲线的试验方法步骤与阶跃响应特性试验基本相同。但要注意两点：一是要适当选择矩形脉冲的幅值和宽度。矩形脉冲幅值可以比阶跃信号取得大一些，可取额定值的 20%~30%。矩形脉冲信号的宽度过大过小都不好。过大，容易引起被控量的变化超出允许值；过小，被控量变化小，降低测试精度。一般在试验前通过试探方法选定脉冲幅值和宽度。二是试验结束时，要使扰动量真正恢复到扰动前的数值，否则被控量不能变化到应有的平衡状态，造成测试误差。

由矩形脉冲响应曲线能简便地画出阶跃响应曲线。说明如下：

一个脉冲宽度为 a 、幅值为 x_0 的矩形脉冲，可以看成由幅值相等、方向相反而在时间上相差 a 的两个阶跃信号所组成，如图 1-5 所示。阶跃信号 x_2 可看作阶跃信号 x_1 的反向延迟环节，延迟时间为 a 。于是矩形脉冲 $x(t)$ 可表示为：

$$x(t) = x_1(t) + x_2(t) = x_1(t) - x_1(t-a) \quad (1-1)$$

式中

$$x_2(t) = -x_1(t-a)$$

由矩形脉冲扰动引起的矩形脉冲响应 $y(t)$ 也可看作是由两部分构成的：由 $x_1(t)$ 的阶跃响应 $y_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 的阶跃响应 $y_2(t)$ 叠加而成，即

$$y(t) = y_1(t) + y_2(t)$$

式中

$$y_2(t) = -y_1(t-a)$$

故

$$y(t) = y_1(t) - y_1(t-a)$$

或

$$y_1(t) = y(t) + y_1(t-a) \quad (1-2)$$

式(1-2)说明，由矩形脉冲响应 $y(t)$ 与一个延迟 a 后的阶跃响应 $y_1(t-a)$ 叠加便可得到阶跃

响应 $y_1(t)$ 。具体求法可以分段进行,逐段向后推进。先将时间轴按 a 等分为若干等分〔图 1-6(a)〕。注意到前一段的 $y_1(t)$ 就是后一段的 $y(t-a)$,再按式(1-2)叠加,便可得出后一段的 $y_1(t)$ 。如此向后推进。下面取几个点说明〔图 1-6(a)〕:

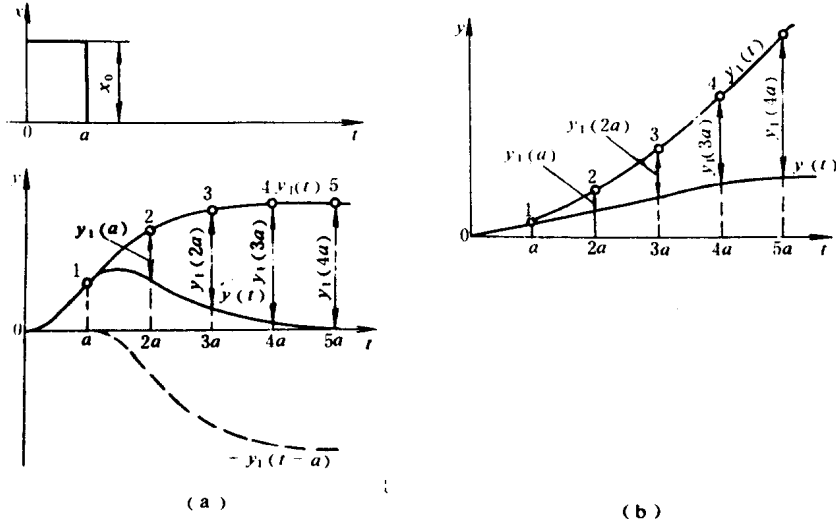


图 1-6 由矩形脉冲响应画出阶跃响应曲线

(a)有自平衡对象;(b)无自平衡对象

在 $t=a$ 时, $y_1(a)=y(a)$, 即阶跃响应与矩形脉冲响应重合, 由此确定了 $y_1(t)$ 的第一点 1。

在 $t=2a$ 时, $y_1(2a)=y(2a)+y_1(a)$, 由此确定了 $y_1(t)$ 的第二点 2。

在 $t=3a$ 时, $y_1(3a)=y(3a)+y_1(2a)$, 由此确定了 $y_1(t)$ 的第三点 3。

如此后推, 直到把 $y_1(t)$ 的点全部求出。

用同样方法, 可以依据无自平衡对象的矩形脉冲响应 $y(t)$ 画出其阶跃响应 $y_1(t)$, 如图 1-6(b) 所示。

最后指出, 倘若在做阶跃响应特性试验时, 被控量的变化超出了允许范围, 这时应立即取消扰动量, 但试验记录可继续进行, 所得的被控量变化曲线实际上就是矩形脉冲响应曲线。用上述方法便可画出阶跃响应曲线。

第二节 根据阶跃响应曲线求控制对象的近似传递函数

阶跃响应曲线能直观地反映控制对象的动态特性, 但对于进一步分析研究自动控制系统却很不方便。因此, 需要从阶跃响应曲线求出控制对象的近似传递函数。下面介绍工程上常用的方法。

一、用 n 阶惯性环节近似有自平衡的控制对象

热工生产过程常含有热交换、蒸发等过程, 因此控制对象常具有多容惯性的特征, 其传

递函数可以表示为:

$$W_{ob}(s) = \frac{K}{(1 + Ts)^n} \quad (1-3)$$

式中特性参数 T 、 n 、 K 都可从阶跃响应曲线上求得。下面介绍两种常用的方法。

1. 切线法

设控制对象的阶跃响应曲线如图 1-7 所示。过曲线的拐点 A 作曲线的切线, 便可得出阶跃响应曲线上的参数 τ 和 T_c 。根据得到的 τ/T_c 的比值, 便可从表 1-1 或图 1-8 查出与 τ/T_c 值对应的 n 值及 τ/T (或 T_c/T) 值。有了 τ/T (或 T_c/T) 值就可求出传递函数中的 T 值。至于稳态放大系数 K 可按

$$K = \frac{\Delta y(\infty)}{\Delta x_0} \quad (1-4)$$

求得。这样, 式 (1-3) 所示传递函数便成为已知的了。

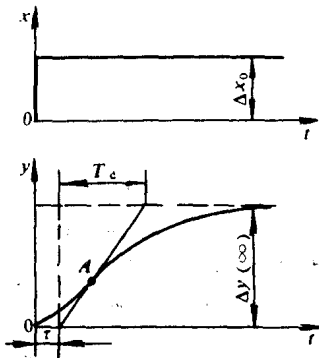


图 1-7 有自平衡对象的阶跃响应曲线

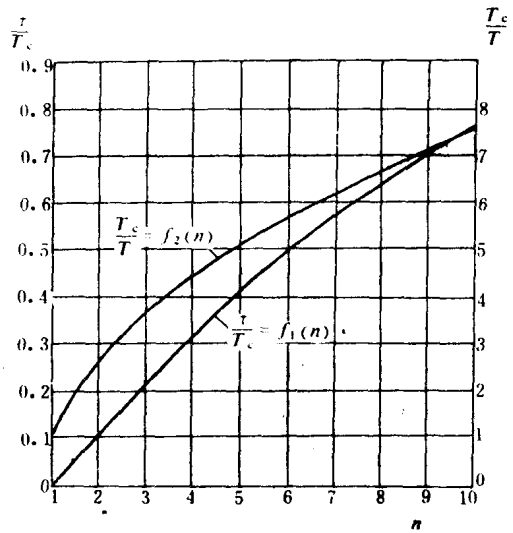


图 1-8 τ/T_c 、 T_c/T 与 n 的关系曲线

表 1-1 $\frac{K}{(1+Ts)^n}$ 中 T 、 n 及其阶跃响应曲线上 τ 、 T_c 的关系

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
τ/T_c	0	0.104	0.218	0.319	0.410	0.493	0.570	0.642	0.710	0.773
τ/T	0	0.282	0.805	1.43	2.10	2.81	3.56	4.31	5.08	5.86
T_c/T	1	2.718	3.695	4.46	5.12	5.7	6.22	6.71	7.16	7.6

如果按上面方法求出的 n 值不是整数, 则所得传递函数不便于模拟和运算。此时, 可令 $n = n_1$ (整数部分) + a (小数部分), 将传递函数变为如下形式:

$$W_{ob}(s) = \frac{K}{(1 + Ts)^n} \approx \frac{K}{(1 + Ts)^{n_1}(1 + aTs)} \quad (1-5)$$

式中 n 、 T ——根据 τ/T_c 由表 1-1 或图 1-8 求出的数值 (n 不是整数)。

例 1-1 用试验方法测得锅炉过热汽温在喷水量阶跃变化时的阶跃响应曲线与图 1-7

所示的形状相似。喷水量阶跃变化幅值为 $\Delta x_0 = -2\text{t/h}$ ，从阶跃响应曲线上量得 $\Delta\theta(\infty) = 18^\circ\text{C}$ ， $\tau = 63\text{ s}$ ， $T_c = 153\text{ s}$ 。写出此汽温控制对象以喷水量为输入、主汽温为输出的近似传递函数。

解 设近似传递函数的形式为

$$W_{ob}(s) = -\frac{\Theta(s)}{X(s)} = \frac{K}{(1+Ts)^n}$$

式中各参数求法如下：

$$(1) \quad K = \frac{\Delta\theta(\infty)}{\Delta x_0} = \frac{18}{2} = 9 \quad [^\circ\text{C} \cdot (\text{t/h})^{-1}]$$

$$(2) \quad \frac{\tau}{T_c} = \frac{63}{153} = 0.412$$

查表 1-1，得 $n \approx 5$ ， $T_c/T = 5.12$

则
$$T = \frac{T_c}{5.12} = \frac{153}{5.12} \approx 30(\text{s})$$

于是，汽温控制对象在减温水扰动时的近似传递函数为：

$$W_{ob}(s) = -\frac{\Theta(s)}{X(s)} = \frac{9}{(1+30s)^5} \quad \left(\frac{^\circ\text{C}}{\text{t/h}} \right)$$

式中“—”号表示当减温水量减小时，主汽温升高。

2. 两点法

运用切线法时要通过阶跃响应曲线的拐点作切线。但由于切点位置和切线斜率不易准确确定，因而得出的 τ 、 T_c 值就可能因人而异，出现不同程度的误差。这是切线法的缺点。如果能在阶跃响应曲线上适当地选取两点，根据这两点的数据来确定传递函数分母中的 T 、 n ，而 K 值仍按式(1-4)求出，这样就可比较正确地写出所求的近似传递函数。

两点法是在阶跃响应曲线上找到 $y(t_1) = 0.4y(\infty)$ 和 $y(t_2) = 0.8y(\infty)$ 两点，并读出这两点对应的的时间 t_1 、 t_2 如图 1-9 所示。然后按下面介绍的近似关系求传递函数中的参数 n 、 T 、 K 。

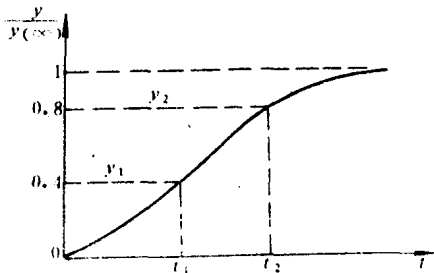


图 1-9 根据 $0.4y(\infty)$ 和 $0.8y(\infty)$ 两点求出 t_1 、 t_2 的图示

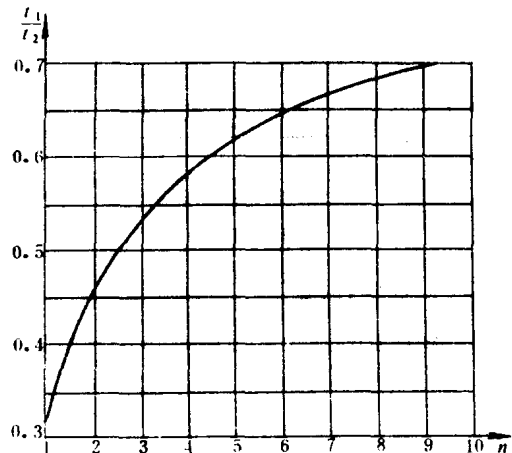


图 1-10 $W_{ob}(s) = \frac{K}{(1+Ts)^n}$ 对象的 $n = f\left(\frac{t_1}{t_2}\right)$ 曲线

(1)按式
$$n = f\left(\frac{t_1}{t_2}\right) \approx \left[\frac{1.075 \frac{t_1}{t_2}}{1 - \frac{t_1}{t_2}} + 0.5 \right]^2 \quad (1-6)$$

计算阶数 n 。为简便,把式(1-6)给成曲线如图 1-10 所示,或列表如表 1-2,供查用。

表 1-2 $n \approx f(t_1/t_2)$

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14
t_1/t_2	0.32	0.46	0.53	0.58	0.62	0.65	0.67	0.685	0.70	0.71	0.735	0.75

(2)按式
$$nT \approx \frac{t_1 + t_2}{2.16} \quad (1-7)$$

求 T 。

(3) K 值仍按式(1-4)计算。

由表 1-2 看出, $t_1/t_2 = 0.32$ 时,是一阶惯性环节。 $t_1/t_2 = 0.46$ 时是二阶惯性环节。当 $0.32 < t_1/t_2 < 0.46$ 时,是二阶不等容惯性环节,其传递函数为

$$W_{ob}(s) = \frac{K}{(1+T_1s)(1+T_2s)} \quad (1-8)$$

式中 T_1, T_2 按下面近似公式计算

$$T_1 + T_2 \approx \frac{t_1 + t_2}{2.16} \quad (1-9)$$

$$\frac{T_1 T_2}{(T_1 + T_2)^2} \approx 1.74 \frac{t_1}{t_2} - 0.55 \quad (1-10)$$

而 K 值仍按式(1-4)计算。

例 1-2 某过热汽温控制对象在喷水量 q_d 阶跃减小 $2t/h$ 的阶跃响应曲线如图 1-11 所示。汽温稳态变化 $\Delta y(\infty) = 16^\circ C$ 。试用两点法求近似传递函数。

解 首先在图 1-11 的曲线上找出 $y(t_1) = 0.4y(\infty)$ 和 $y(t_2) = 0.8y(\infty)$ 的两点,读出 $t_1 = 80s, t_2 = 135s$, 得 $t_1/t_2 = 0.59$ 。

(1)由表 1-2 查出, $n \approx 4$ 。

(2)由式(1-7)

$$T \approx \frac{80 + 135}{4 \times 2.16} = 25 \quad (s)$$

(3)由式(1-4)

$$K = \frac{y(\infty)}{\Delta x_0} = \frac{16}{2} = 8 \quad [^\circ C (t/h)^{-1}]$$

于是控制对象的传递函数为

$$W_{ob}(s) = \frac{y(s)}{Q_d(s)} = \frac{8}{(1+25s)^4}$$

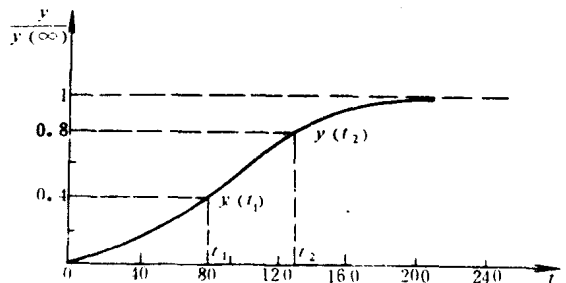


图 1-11 某汽温控制对象的阶跃试验曲线

二、用 n 阶惯性环节和积分环节近似无自平衡对象

设无自平衡对象的阶跃响应曲线,如图 1-12 所示。其传递函数可表示为

$$W_{ob}(s) = \frac{1}{T_a s (1 + Ts)^n} \quad (1-11)$$

式中 T_a 、 n 、 T 三个参数可从阶跃响应曲线上求出。

将阶跃响应曲线上后阶段的直线段延长(即作曲线的渐近线),交横轴于 B ,交纵轴于 H 。由此得到三个数据:

- 1) 线段 $OB = \tau$
- 2) 线段 OH

如果作 $W_{ob}(s) = \frac{1}{T_a s}$ 的阶跃响应曲线 $y_0(t)$ (图

1-12 中的虚线),则它与 $W_{ob}(s) = \frac{1}{T_a s (1 + Ts)^n$ 的阶

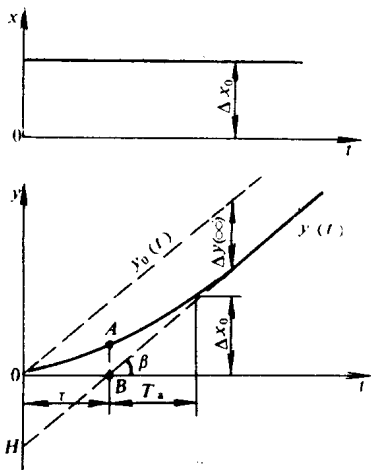


图 1-12 无自平衡对象的阶跃响应曲线

跃响应曲线 $y(t)$ 之间有关系

$$\Delta y(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} [y(t) - y_0(t)] \quad (1-12)$$

从图上看 $OH = \Delta y(\infty)$ 。

- 3) 线段 $AB = y(\tau)$

由上面三个数据可求出 T_a 、 n 、 T 。

- (1) T_a

$$T_a = \frac{1}{\epsilon} = \frac{1}{(\text{tg } \beta) / (\Delta x_0)} = \frac{OB}{OH} \Delta x_0 = \frac{\tau}{\Delta y(\infty)} \Delta x_0 \quad (1-13)$$

T_a 值也可用作图法直接从图上得出,如图 1-12 所示。

- (2) n

n 值按比值 $y(\tau)/y(\infty)$ 来确定。 n 值愈大,曲线 $y(t)$ 愈平缓,则比值 $y(\tau)/y(\infty)$ 愈小。按比值 $y(\tau)/y(\infty)$ 从表 1-3 或图 1-13 查出 n 值。

表 1-3 n 值与 $y(\tau)/y(\infty)$ 的关系

n	1	2	3
$\frac{y(\tau)}{y(\infty)}$	0.368	0.271	0.224
n	4	5	6
$\frac{y(\tau)}{y(\infty)}$	0.195	0.175	0.161

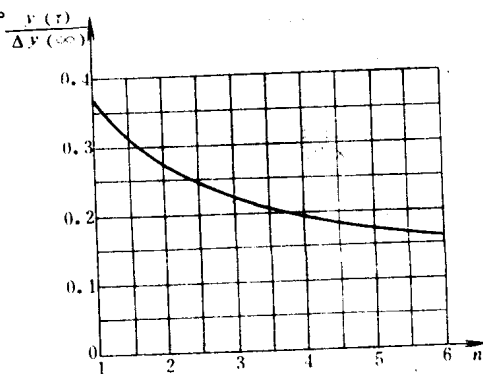


图 1-13 无自平衡对象 $n = f[\frac{y(\tau)}{y(\infty)}]$ 曲线

(3) T

乘积 nT 表示对象惯性的大小,可以证明(略)

$$nT = \tau \quad (1-14)$$

由此式求出 T 。

当无自平衡对象的 $n \geq 6$ 时,其传递函数可近似为

$$W_{ob}(s) = \frac{1}{T_s s} e^{-\tau s} \quad (1-15)$$

例 1-3 试验测得,当给水流量阶跃增大 $\Delta x_0 = 15 \text{ t/h}$,锅炉汽包水位的阶跃响应如图 1-12 中 $y(t)$ 曲线。从曲线上量出 $\tau = 30 \text{ s}$, $\overline{OH} = 13.5 \text{ mm}$, $\overline{AB} = 4.32 \text{ mm}$ 。试写出此对象的近似传递函数。

解 设所求近似传递函数的形式为

$$W_{ob}(s) = \frac{1}{T_s s (1 + Ts)^n}$$

$$(1) \quad T_s = \frac{\tau}{y(\infty)} \Delta x_0 = \frac{30}{13.5} \times 15 = 33.3 \quad [\text{s} \cdot (\text{t/h}) \cdot \text{mm}^{-1}]$$

$$(2) \quad \frac{y(\tau)}{y(\infty)} = \frac{4.32}{13.5} = 0.32$$

查表 1-3 知, $1 < n < 2$; 从图 1-13 查得, $n = 1.4$

$$(3) \quad nT = \tau = 30 \text{ s}$$

$$T = \frac{30}{n} = \frac{30}{1.4} = 21.4 \quad (\text{s})$$

故所求近似传递函数为

$$W_{ob}(s) = \frac{H(s)}{W(s)} = \frac{1}{33.3s(1 + 21.4s)^{1.4}}$$

式中 $H(s)$ ——汽包水位 h 的象函数;

$W(s)$ ——给水流量 w 的象函数。

为使用方便,按式(1-5)的方法,将上式改写成

$$W_{ob}(s) = \frac{1}{33.3s(1+21.4s)(1+0.4 \times 21.4s)} = \frac{1}{33.3s(1+21.4s)(1+8.6s)}$$

第三节 控制系统的性能指标

控制系统的性能指标是用来衡量系统工作品质的一些准则。设计和整定控制系统时应用的性能指标大致可分为两类:一类是稳定裕量方面的,另一类是积分准则方面的。

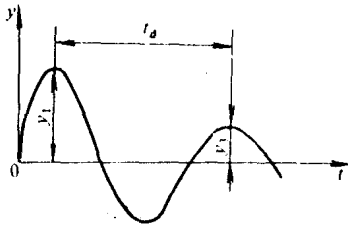
一、稳定裕量

稳定裕量指系统的稳定程度离开边界稳定状态有多“远”,即有多大的稳定储备量。系统稳定裕量的大小,应由生产过程的要求来确定。稳定裕量过大过小都不适宜。常用的稳定裕

量指标有下面几种。

1. 衰减率 ψ

设系统在阶跃(或脉冲)输入量作用下的控制过程如图 1-14 所示。按衰减率的定义



$$\psi = 1 - \frac{y_2}{y_1} \quad (1-16)$$

由式(1-16)知:

(1) 当 $\psi < 0$ 时, 为扩散的振荡过程, 系统不稳定;

(2) 当 $\psi = 0$ 时, 为不衰减的等幅振荡过程, 系统处于边界稳定状态;

(3) 当 $0 < \psi < 1$ 时, 为衰减振荡过程, 系统稳定;

(4) 当 $\psi = 1$ 时, 为不振荡的衰减过程, 系统很稳定。

由上述可知, $\psi > 0$ 时, 系统是稳定的; 而在 $0 < \psi < 1$ 范围内的 ψ 值表示系统离开边界稳定的“距离”, 即表示系统稳定裕量的大小。

对于传递函数为 $\frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$ 的二阶系统, 衰减率 ψ 与衰减系数 m 、最大超调量 σ_p 之间有确定的关系:

$$\psi = 1 - e^{-2\pi m} \quad (1-17)$$

$$\psi = 1 - \sigma_p^2 \quad (1-18)$$

式中 $m = \alpha/\omega$ ——特征方程根 $(\alpha \pm j\omega)$ 的实部与虚部之比。

表 1-4 列出 ψ 、 m 、 σ_p (以及阻尼比 ζ 、相角裕量 γ) 之间某些对应值。

表 1-4 二阶系统 ψ 、 ζ 、 m 、 σ_p 、 γ 之间的对应值

衰减率 ψ	阻尼比 ζ	衰减指数 m	超调量 σ_p	相角裕量 $\gamma(^{\circ})$
0	0	0	1	0
0.15	0.025	0.025	0.921	2.86
0.30	0.057	0.057	0.837	6.52
0.45	0.095	0.095	0.742	10.85
0.60	0.144	0.146	0.632	16.38
0.65	0.165	0.167	0.591	18.73
0.70	0.188	0.192	0.547	21.28
0.75	0.216	0.221	0.500	24.35
0.80	0.248	0.256	0.447	27.80
0.85	0.289	0.302	0.387	32.13
0.90	0.344	0.366	0.316	37.72
0.95	0.430	0.477	0.224	45.86
0.973	0.500	0.577	0.163	51.82
0.980	0.529	0.623	0.141	54.10
0.998	0.707	1.00	0.044	65.52
0.9998	0.8	1.33	0.014	69.85
1	≥ 1	∞	0	76.34 ($\zeta=1$)

对于二阶系统, 关系式 (1-17)、式 (1-18) 说明, 衰减系数 m 、最大超调量 σ_p 也是表征系统稳定裕量的指标。实际上, 在设计或整定控制系统时, 也往往以衰减系数 m 或最大

超调量 σ_p 作为稳定裕量指标。

对于热工过程自动控制系统，常取衰减率 $\psi=0.9$ 左右。但对于不同的生产过程，应按其具体要求选取最合适的衰减率数值。例如，对锅炉燃烧控制系统，要求其控制过程基本不振荡，应取 ψ 接近于 1 而略小于 1。再如，过热汽温控制系统的内回路，要求其控制过程进行得快些，应取 $\psi \approx 0.75$ 。

2. 相角裕量和幅值裕量

图 1-15 表示闭环系统的开环对数频率特性（伯德图），图（a）为稳定系统，图（b）为不稳定系统。

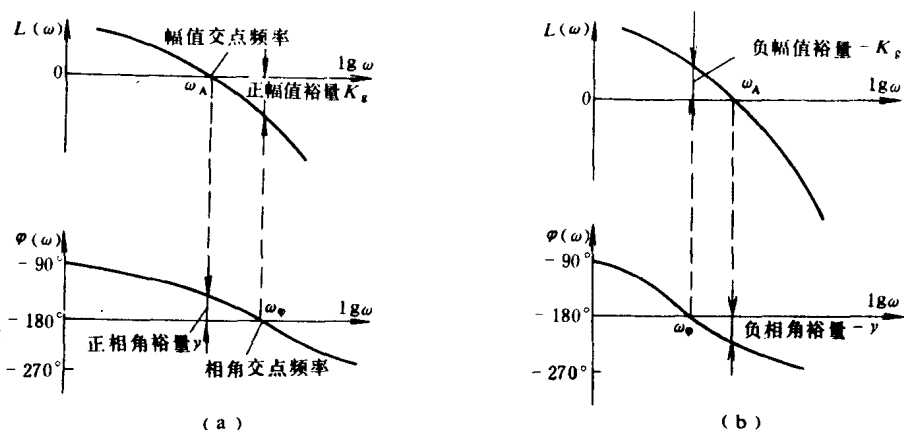


图 1-15 开环对数频率特性上的相角裕量和幅值裕量

(a) 稳定系统; (b) 不稳定系统

幅频线 $L(\omega)$ 与 0dB 线交点处的频率称为幅值交点频率 ω_A 。在此频率 (ω_A) 下，其相角 $\varphi(\omega_A)$ 与 -180° 的差值称为相角裕量 γ 。 $\varphi(\omega_A) > -180^\circ$ (绝对值小于 180°)，为正相角裕量 γ [图 1-15(a)]， γ 表示系统的相角 $\varphi(\omega_A)$ 离开边界稳定有多大的相角富裕量。这种系统是稳定的。反之，若在 ω_A 处 $\varphi(\omega_A) < -180^\circ$ (绝对值大于 180°)，为负相角裕量 $-\gamma$ [图 1-15(b)]， $-\gamma$ 表示系统的相角 $\varphi(\omega_A)$ 不仅没有储备，还比边界稳定的相角更滞后。这种系统是不稳定的。

相频线 $\varphi(\omega)$ 与 -180° 线交点处的频率称为相角交点频率 ω_φ 。在 ω_φ 处，幅值 $L(\omega_\varphi)$ 与 0dB 的差值称为幅值裕量 K_g 。若 $K_g < 0\text{dB}$ ，为正幅值裕量 [图(a)]；若 $K_g > 0\text{dB}$ ，为负幅值裕量 [图(b)]。

对于传递函数为 $\frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$ 的二阶系统，相角裕量 γ 与阻尼比 ζ 之间有确定关系：

$$\gamma = \text{tg}^{-1} \frac{2\zeta}{\sqrt{\sqrt{1+4\zeta^4} - 2\zeta^2}} \quad (1-19)$$

表 1-4 已列出 γ 与 ζ 、 ψ 等的某些对应值。

式(1-19)可近似用于有一对主导复根的高阶系统。

对于热工控制系统，一般取 $\gamma = 30^\circ \sim 65^\circ$ ， $K_g = 4 \sim 12\text{dB}$ 。

二、积分准则

积分准则是指在阶跃输入下，系统的输出 [被控量 $y(t)$] 与给定值 $g(t)$ (随动系统) 或与