

中等专业学校教材

自动调节系统

西安电力学校 殷树德 沈阳电力专科学校 姜树君 合编

水利电力出版社

中等专业学校教材

自动调节系统

西安电力学校 殷树德

沈阳电力专科学校 姜树君 合编

*

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

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 20印张、452千字

1988年6月第一版 1988年6月北京第一次印刷

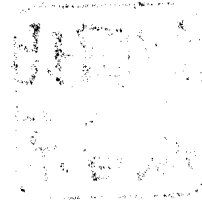
印数00001—16100册 定价2.95元

ISBN 7-120-00318-6/TP·10

内 容 提 要

本书讲述火电厂热工过程主要调节系统的组成原理、分析及整定。主要内容为调节对象动态特性的求取；单回路和多回路调节系统的分析、整定；汽包锅炉的给水、汽温、燃烧调节系统；直流锅炉的调节系统；参与调峰调频的单元机组的协调控制系统及其计算机控制系统。取材较新，反映了国内80年代的技术水平。

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。



前 言

“热工过程自动调节系统”是电厂热工测量及自动化专业的主要专业课之一。它涉及的知识面很广，诸如自动调节原理、测量仪表及调节设备、计算机控制及仿真技术、机炉电的运行知识以及其它方面的知识。同时它也是实践性很强的一门课程。各种调节系统的组成原理、功能、整定方法与许多因素有关，头绪繁多，初学者难于抓住实质。这是组织本课程教学时应注意的特点。

本书共分九章。前三章讲述调节对象动态特性的求取方法；单回路系统的整定；多回路系统的分析和整定。这为学习后面几章提供了基础知识。

第四章至第七章讲述发电厂单元机组的锅炉自动调节系统，如给水、汽温、燃烧、直流锅炉自动调节系统的组成原理、工作过程、整定方法。以上是带基本负荷的锅炉自动调节的主要内容。

第八章讲述一台参与电网调峰调频的200MW单元机组的协调控制系统（包括主控制系统及燃烧、汽温、全程给水等调节系统）的组成原理、功能和整定原则，以使学者对这类控制系统有比较完整的概念。

第九章讲述计算机控制系统的基本概念，DDC系统的基本组成，采样、数字滤波，PID算式、参数整定，以及微机在电厂中的应用等。为应用计算机控制生产过程提供初步知识。

本书由殷树德、姜树君编写。殷树德编写绪论、第四、五、六、九章及第二章的2-4节。姜树君编写第一、二（第1、2、3、5节）、三、七章。第八章由水利电力部西安热工研究所王世海工程师与西安电力学校殷树德合编。全书由殷树德统稿。

南京工学院陈来九教授对本书进行了认真、仔细的审查，提出了许多中肯的、宝贵的意见和建议，对本书初稿的修改和提高帮助很大。

本书编写过程中还受到水利电力部西安热工研究所王世海、孟祖浩等同志的帮助。

编写本书时所用到的主要参考资料和文献，其目录已列于书末。

在此，谨向上述所有同志表示衷心感谢。

限于编者水平，本书难免有不少缺点和错误，恳请读者批评指正。

编 者

1987年1月

目 录

前 言	
绪 论	1
第一章 热工过程调节对象的动态特性及其测试方法	3
1-1 热工过程调节对象动态特性的特点	3
1-2 阶跃响应特性的测试方法	7
1-3 矩形脉冲响应特性的测试与试验结果的整理	8
1-4 根据阶跃响应特性求取调节对象的近似传递函数	10
本章小结	17
思考题与习题	19
第二章 单回路调节系统的整定	20
2-1 调节系统的性能指标	21
2-2 按给定衰减指数的整定方法	26
2-3 调节系统的根轨迹整定法	39
2-4 调节系统的伯德图整定法	49
2-5 调节系统的工程整定法	66
本章小结	71
思考题与习题	72
第三章 多回路及其他调节系统	73
3-1 串级调节系统	73
3-2 具有导前微分信号的双回路调节系统	82
3-3 比值调节系统	89
3-4 前馈-反馈调节系统	95
3-5 多变量调节系统	101
本章小结	108
思考题与习题	109
第四章 汽包锅炉给水自动调节系统	110
4-1 锅炉给水调节对象的动态特性	110
4-2 给水自动调节的原则性系统	113
4-3 单级三冲量给水自动调节系统	115
4-4 串级三冲量给水自动调节系统	127
4-5 自动调节系统投运的一般步骤	136
本章小结	138
思考题与习题	139
第五章 汽包锅炉汽温自动调节系统	141
5-1 过热汽温调节对象的动态特性	141

5-2 串级汽温自动调节系统	144
5-3 采用导前微分信号的双回路汽温自动调节系统	156
5-4 过热汽温分段自动调节系统	165
5-5 再热汽温自动调节系统	166
本章小结	170
思考题与习题	171
第六章 汽包锅炉燃烧自动调节系统	173
6-1 概述	173
6-2 燃烧调节对象的动态特性	175
6-3 燃烧过程自动调节系统的基本方案	186
6-4 具有仓储式制粉系统的锅炉燃烧自动调节系统	195
6-5 燃烧自动调节系统的整定	197
6-6 采用直吹式制粉系统的锅炉燃烧自动调节系统	207
本章小结	218
思考题与习题	220
第七章 直流锅炉自动调节系统	221
7-1 直流锅炉的动态特性	222
7-2 直流锅炉自动调节系统	226
本章小结	233
思考题与习题	234
第八章 具有调峰调频能力的单元机组自动调节系统	235
8-1 概述	235
8-2 定压运行与变压运行方式	238
8-3 单元机组的主控系统	241
8-4 200MW单元机组的燃烧自动调节系统	256
8-5 200MW单元机组的全程给水自动调节系统	268
8-6 200MW单元机组的汽温自动调节系统	278
本章小结	279
思考题与习题	280
第九章 计算机过程控制系统	282
9-1 概述	282
9-2 计算机控制系统的分类	282
9-3 DDC系统的基本组成	288
9-4 DDC系统的信号采样	290
9-5 数字滤波	292
9-6 PID算式	294
9-7 计算机控制系统的参数整定	300
9-8 微机在火电厂中的应用举例	302
本章小结	311
思考题与习题	311
参考文献	312

绪 论

自动化在现代生产、技术、科学领域中有着极为重要的作用。在电力、化工、石油、冶金等生产过程中及机械、轻纺等制造加工工业中，自动化已成为重要的不可缺少的组成部分。而在宇航、导弹制导、船舶导航和飞机驾驶等领域中，自动化有着更为重要的作用。自动化水平是衡量一个国家科技发达的重要标志之一。

自动化在电厂大型单元机组实现过程控制中具有十分重要的意义。其意义已远远超出节省人力、提高劳动生产率、改善劳动条件的范围，更重要的是为大型机组及全厂实现安全、经济运行提供了可靠的保证，并为实现最佳经营管理提供了条件。

电厂热工过程自动调节是热工过程自动控制中最重要的职能。随着单元机组容量的增大，对热工过程自动调节系统的功能和可靠性的要求不断提高，除自动调节功能外，还包含了报警、监控、保护和某些逻辑功能。所以，这样的自动调节系统也可以叫做热工过程模拟量控制系统。而以顺序控制为主要内容的过程控制系统在热工开关量控制系统课程中讲述。

从1920年至今，从火电厂自动控制的方式来看，经历了三个发展阶段：

1.分散控制。锅炉、汽轮机和电气设备各自独立地进行控制，在控制系统上没有联系。机、炉、电以及重要辅助设备都各自就地设置一套控制表盘，有专门的运行人员进行监视操作。调节仪表采用大尺寸的基地式仪表。国外在1940年以前和我国于50年代建设的火电厂基本上属于这种控制方式。

2.集中控制。1940年以后，出现了中间再热式汽轮机，使汽轮机与锅炉之间的关系更加密切。为了使机、炉更协调地运行，以满足负荷变化的要求和保持运行参数为给定值，以及便于事故处理，要求对汽轮机和锅炉进行集中控制，即将它们的控制盘集中安装在一起，让值班员同时监视和操作机、炉。调节仪表采用电动或气动单元组合仪表。这可以说是集中控制的初级阶段。

50年代后，出现了新型的巡回检测仪表、局部顺序控制装置，同时仪表尺寸大为缩小，使集中控制技术有了进一步发展。另一方面，由于单元机组容量的增大，在机组启停、调峰调频、事故处理等过程中机、炉、电的关系进一步密切，要求对机、炉、电进行集中控制。调节仪表采用组件组装式仪表或以微处理机为核心的数字调节器。

3.综合自动化。这是指火电厂生产过程实现最优控制与调度管理自动化相结合的分级计算机控制。从60年代至今，不少国家的火电厂都朝着综合自动化的方向在发展。目前，我国某些电厂在计算机分级控制下的自动化程度已接近这个水平。

在应用计算机实现综合自动化的发展过程中也经历了三个阶段：

第一阶段，采用一台大型计算机对生产过程进行最优控制，即所谓集中型计算机控制。经验证明，这种方式存在不少问题。首先，对计算机硬件的可靠性要求很高，因为一旦机

器发生故障将对全厂带来严重影响。若采用双机制，又会导致投资昂贵；其次，控制范围愈大，建立数学模型愈困难，在这方面虽进行过不少研究工作，但至今尚难得到满意的结果。所以，逐渐放弃集中型计算机控制方式。

第二阶段，用计算机实行分散的小范围局部控制，即所谓分散型计算机控制。特别是近几年以微处理机为核心的微型计算机的诞生，为实现分散型计算机控制创造了良好条件。这种控制方式的优点是可靠性高，便于实现多种控制规律，灵活，控制系统可以逐步由少到多，分期投资，而且易于建立数学模型。但现代工业企业的特点是高度连续化和大型化，各设备之间的联系日趋密切，因此，仅实现局部的、孤立的控制是不能获得优良效果的。

第三阶段为现代的计算机分散型综合控制（即集散控制）。在这种控制系统中，每台微型计算机靠近控制对象安置，只控制少量回路。利用数据通道将各台微型计算机、CRT显示操作站和监控计算机（根据要求设置，可有可无）有机地连接起来。这种控制系统的优点是：通过功能分散达到“分散危险”，同时因连接导线短，减少了噪音和干扰，提高了系统的可靠性；用CRT屏幕实现集中显示；用智能化操作台简便地实现复杂高级的功能；用监控计算机易于实现最优控制和管理；系统可大可小，易于扩展。在分散型综合控制系统的基础上，根据需要，容易向上扩展成为多级计算机控制系统——这是计算机控制系统的一个重要发展方向。

虽然采用计算机控制是过程控制的发展方向，但目前国内 300MW 及以下机组主要采用常规调节仪表，因此，本书仍以介绍常规仪表组成的调节系统为主。

第一章 热工过程调节对象的动态特性 及其测试方法

热工过程自动调节系统是由调节对象和调节设备组成的反馈（或前馈-反馈）控制系统。在自动调节系统中，调节对象是指被控制的生产过程或设备。表征生产过程是否符合规定工况的物理量称为被调量或被调参数。当调节对象受到扰动作用（包括调节作用）时，被调量将随时间而变化。被调量的变化与扰动作用之间的关系称为调节对象的动态特性。例如，汽包锅炉给水调节过程的被调量是汽包水位，它反映了给水量和蒸汽负荷之间的平衡关系。当给水量或蒸汽负荷发生变化时，汽包水位将如何变化，是由给水调节对象的动态特性决定的。

研究调节对象的动态特性，对于设计合理的调节系统和选择调节系统的最佳整定参数都是非常重要的。有些生产过程之所以控制得不好，往往是由于人们没有弄清调节对象的动态特性，因而不能实现正确的控制。

调节对象的动态特性可以通过理论分析获得，也可以通过现场测试求取。在这一章里，主要介绍适合工程需要的现场测试方法。

1-1 热工过程调节对象动态特性的特点

最简单的调节对象只有一个集中容积，称为单容对象。热工过程调节对象一般都包括热交换过程。当热量由一种介质向另一种介质传递时，在大多数情况下，加热介质与被加热介质各处的温度是不相同的，传热系数也不同，所以不能把这种对象看作单容对象，而应看作是具有多个集中容积的对象。此外，多数热工过程调节对象具有非线性特征，在输入量和输出量变化范围较小时，通过“线性化”可以把非线性调节对象近似为线性调节对象。

最简单的调节对象具有一个被调量、一个调节量以及一个或几个扰动量。扰动量会使被调量偏离给定值，而调节量则会使被调量恢复为给定值。调节对象内信号的传递关系如图 1-1 所示。这是一个多输入单输出的调节对象。输入信号与输出信号之间的传递途径称为“通道”。调节作用 μ 与被调量 y 之间的传递途径称为“调节通道”，而干扰作用 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 等与被调量 y 之间的传递途径则称为“干扰通道”。在自动调节系统中，调节作用（一般为调节阀门的开度）经常地对被调量施加影响，并且通过被调量的反馈信号形成闭环，所以调节对象调节通道的动态特性对过渡过程的稳定性有极大的影响。由此

① 本书方框图上的英文符号 $X(s)$ 、 $Y(s)$ 、 $G(s)$ 、 $M(s)$ …等，为书写和看图简明，一律省去 (s) ，只保留大写字体 X 、 Y 、 G 、 M …等。对应于时域中的符号为小写字母 x 、 y 、 g 、 μ …等。请读者注意。

可见, 调节作用是调节对象的主要输入信号。通过调节机构也可以对调节对象施加扰动。这种通过调节机构实现的扰动称为基本扰动。其它扰动 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 等均称为外部扰动, 简称为外扰。外扰在一般情况下具有随机的性质。外扰通道在调节系统的闭环之外, 其动态特性对过渡过程起始阶段的形状以及被调量的变化幅度发生影响。所以, 分析调节系统时主要依据调节通道的动态特性, 同时也必须考虑主要外扰通道的动态特性。

图1-1所示调节对象的输入和输出关系可由下式表示:

$$Y(s) = W_0(s)M(s) + W_1(s)X_1(s) + \dots + W_n(s)X_n(s) \quad (1-1)$$

式中 $W_0(s), W_1(s), \dots, W_n(s)$ 分别为调节对象调节通道和各干扰通道的传递函数, 并且

$$\left. \begin{aligned} W_0(s) &= \frac{Y(s)}{M(s)}, \text{ 当 } X_1, X_2, \dots, X_n \text{ 不变时;} \\ W_1(s) &= \frac{Y(s)}{X_1(s)}, \text{ 当 } M, X_2, \dots, X_n \text{ 不变时;} \\ &\dots\dots\dots \\ W_n(s) &= \frac{Y(s)}{X_n(s)}, \text{ 当 } M, X_1, \dots, X_{n-1} \text{ 不变时} \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

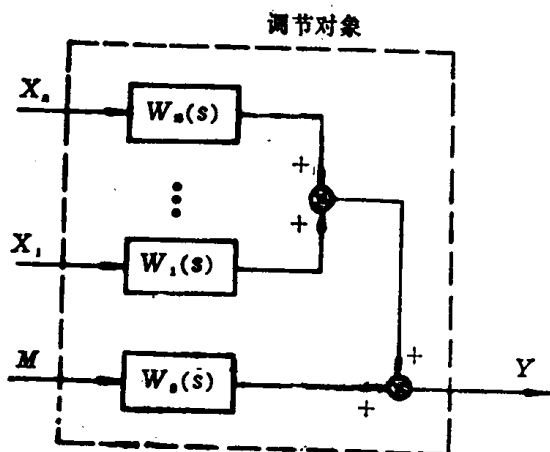


图 1-1 调节对象内信号传递示意

以上式(1-1)和式(1-2)说明, 对于线性调节系统, 虽然调节对象各通道的动态特性不同, 但是调节对象的总输出却是各个输入信号单独作用时的各个输出的总和。实际的热工调节对象往往不是线性的, 如果这种非线性不是特别严重, 则可以在一定范围内通过“线性化”近似为线性环节。为此需要在预定的运行条件下, 分别测出调节对象在不同输入信号作用下不同通道的动态特性。

在阶跃扰动作用下, 被调量随时间的变化规律称为调节对象的阶跃响应特性。

这是调节对象动态特性的一种描述方式。热工调节对象的阶跃响应特性具有图1-2所示的基本形式。从这些响应曲线来看, 热工调节对象具有以下特点:

(1) 被调量的变化不具有振荡形式, 有的逐渐趋于某一定值(图1-2, a); 有的则趋于某一不变的速度(图1-2, b)。

(2) 在扰动发生后, 被调量变化的起始阶段具有迟延和惯性。作为动态环节的热工调节对象, 具有两个普遍的性质——容积和迟延。调节对象的容积是指调节对象具有存贮物质或能量的能力, 其大小可用容量系数表示, 即被调量变为一个单位时所对应的存贮量的变化量。作为容积的例子, 如流体系统中的气容、液容, 热系统中的热容, 电力系统中的电容等。当工质或能量通过调节对象时, 由于容积的存在, 被调量的变化会表现出惯性。而当工质(或能量)沿一条路径传输时, 则会表现出传递迟延(即纯迟延)。路径的长度

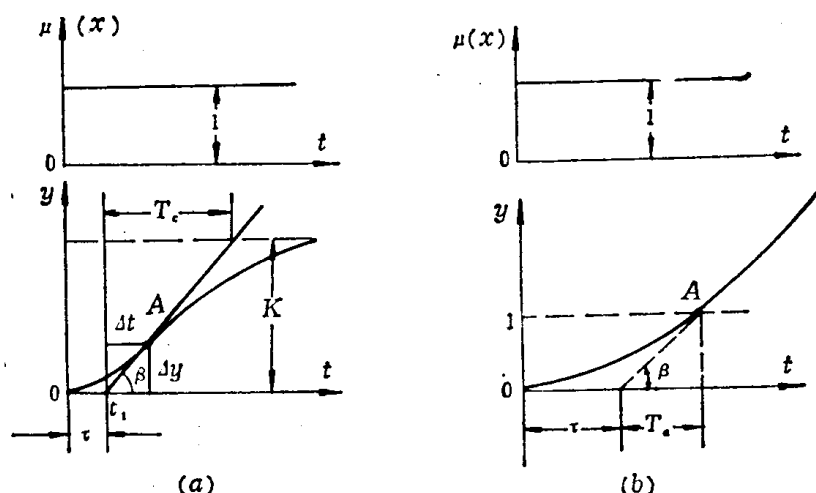


图 1-2 热工调节对象典型阶跃响应曲线
(a)有自平衡能力的对象；(b)无自平衡能力的对象

和工质的流动速度是决定传递迟延大小的主要因素。

在确定调节对象动态特性时，必须对迟延和惯性给予足够的重视。

(3) 在阶跃响应曲线的最后阶段，被调量可能达到新的平衡状态（图1-2, a），也可能按某一不变的速度变化下去（图1-2, b）。前者称为有自平衡能力的调节对象，而后者则称为无自平衡能力的调节对象。自平衡能力是调节对象本身的“自调节”作用。扰动破坏了流入量和流出量之间的平衡，使被调量偏离给定值而造成偏差。偏差的产生又会通过自平衡作用，重新使流入量和流出量之间恢复平衡。

描述热工调节对象的动态特性，可以采用如下一组动态参数：迟延时间 τ 、响应速度 ε 和自平衡率 ρ 。

1) 有自平衡能力调节对象

有自平衡能力调节对象阶跃响应曲线的动态参数 ε 、 ρ 和 τ 的意义如下：

τ —— 迟延时间，包括调节对象的纯迟延和容积迟延。通过阶跃响应曲线的拐点 A 作切线，该切线与被调量初始值的横坐标轴相交，所得的时间间隔 τ 即为迟延时间。

ε —— 响应速度（即飞升速度）。当调节对象受到单位阶跃扰动时，被调量所能达到的最大变化速度即为响应速度。从实验曲线可以看出，被调量在拐点处的变化速度最大，所以该点处被调量的变化速度即为响应速度，其数值可由下式给出：

$$\varepsilon = \frac{\Delta y / \Delta t}{\Delta x} \quad (1-3)$$

式中 Δy —— 从时刻 t ，开始到出现拐点 A 为止被调量的变化量；

Δt —— 通过拐点的切线与时间轴的交点 t_1 至拐点的时间坐标的时间间隔。被调量如果以拐点处的速度变化，那么从零变化至 Δy 所需的时间，即为 Δt ；

Δx —— 扰动的幅值。对于单位阶跃扰动 $\Delta x = 1$ ，则 ε 可写作

$$\varepsilon = \frac{\Delta y}{\Delta t} = \lg \beta \quad (1-4)$$

在一般情况下, ε 是个有量纲的物理量, 其量纲为 $\left[\frac{\text{被调量量纲}}{\text{时间} \times \text{扰动量量纲}} \right]$ 。当被调量和扰动量均采用相对量表示时, 响应速度 ε 的量纲为 $\left[\frac{1}{s} \right]$ 。

有时也用 ε 的倒数 $T_s = \frac{1}{\varepsilon}$ 表示调节对象的响应速度。 T_s 称为调节对象的响应时间 (也称飞升时间)。

$$T_s = \frac{1}{\varepsilon} = \frac{\Delta x}{\Delta y / \Delta t} = \frac{\Delta x}{\Delta y} \Delta t$$

因此, 只有当输入信号与输出信号的量纲相同或采用相对量表示时, T_s 才具有时间的量纲。在一般情况下, T_s 的量纲由 Δx 和 Δy 的量纲决定。

$$\rho \text{ —— 自平衡率 (或称自衡率), } \rho = \frac{\Delta x}{\Delta y}.$$

自平衡率 ρ 在数值上等于单位被调量的变化所对应的扰动量的变化值。对于有自平衡能力的调节对象来说, ρ 值愈大, 说明调节对象的自调节能力愈强, 即在受到某一数值的扰动时, 被调量从初始平衡值达到新的平衡值的变化量愈小。反之, 当自平衡率 ρ 值减小时, 在相同的扰动下, 被调量 y 的变化将会增大。而当调节对象不具有自衡能力时, $\rho = 0$, 这时调节对象如果受到扰动而又没有外加调节作用, 仅靠调节对象自身的变化是不能重新达到平衡的。

在实际工作中有时还使用另一套动态参数描述调节对象的动态特性, 它们是迟延时间 τ 、时间常数 T_s 和稳态放大系数 K 。

稳态放大系数 K 表示调节对象自平衡的稳态效应。稳态放大系数 K 可以由下式表示:

$$K = \frac{\Delta y(\infty)}{\Delta x} \quad (1-5)$$

式中 $\Delta y(\infty)$ —— 被调量的稳态值 (增量)。

稳态放大系数在数值上等于平均自平衡率的倒数。

时间常数 T_s 是从响应曲线上直接求出的时间。通过拐点 A 的切线与被调量的初值线、终值线所截得的时间间隔就是时间常数 T_s 。

以上两套参数之间的关系可根据它们的定义得出:

$$\left. \begin{aligned} K &= \frac{1}{\rho_{pj}} \\ \frac{K}{T_s} &= \operatorname{tg} \beta = \varepsilon = \frac{1}{T_s} \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

或

$$\left. \begin{aligned} T_s &= K T_s = \frac{T_s}{\rho_{pj}} \\ T_s &= \frac{K}{\varepsilon} = \frac{1}{\varepsilon \rho_{pj}} \end{aligned} \right\} \quad (1-7)$$

式中 ρ_{pj} —— 平均自平衡率。

在分析调节对象动态特性时, 迟延时间 τ 与时间常数 T_c 的比值具有重要意义。由式 (1-7) 可知,

$$\frac{\tau}{T_c} = \varepsilon \rho \tau \quad (1-8)$$

乘积 $\varepsilon \rho \tau$ 的大小, 在一定程度上表示了调节对象的动态性能。

2) 无自平衡能力调节对象

对于无自平衡能力的调节对象, $\rho = 0$ 。当调节对象受到扰动时, 在没有调节作用的情况下, 单靠调节对象自身的力量是不可能使被调量重新达到平衡的。因此, 对于无自平衡能力调节对象来说, 放大系数 K 是没有意义的。表征无自平衡能力调节对象的阶跃响应特性时, 只要迟延时间 τ 和响应速度 ε 就可以了。

迟延时间 τ 的意义与以上所述相同, 如图1-2(b)所示。响应曲线的渐近线与时间轴的交点至坐标原点间的距离 τ , 就是无自平衡能力调节对象的迟延时间。

响应时间 T_c : 当对象的输入为单位阶跃扰动时, 如果被调量以其响应曲线上最快的速度 (其数值等于渐近线的斜率 $\tan \beta$) 变化时, 被调量的变化量为一个单位时所需要的时间, 即为响应时间 T_c 。

响应速度 ε : 响应时间 T_c 的倒数即为响应速度 ε , $\varepsilon = \frac{1}{T_c}$ 。由图1-2(b)可见, 响应速度 ε 正是渐近线的斜率 $\varepsilon = \tan \beta$ 。

1-2 阶跃响应特性的测试方法

一、测试前的准备工作

阶跃响应特性的测试是在正常运行的设备上进行的。为保证测试工作不影响安全发电并能取得较为可靠的测试结果, 必须做好测试前的准备工作。

1. 正确选择输入量和输出量

在一个复杂的热工过程中, 往往有多个被调量、调节作用和扰动。究竟以哪些作为选定的输入量和输出量, 是不是要把所有的参数都考虑进来逐一加以测试? 要回答这些问题, 首先要明确测试调节对象动态特性的目的。在一般情况下, 我们最关心的是在调节作用下调节对象的动态特性 (即调节通道的特性); 其次, 也应测试主要扰动作用下调节对象的动态特性 (即干扰通道的特性)。例如, 把锅炉给水过程视为单变量调节对象, 则输出量是被调量水位, 而给水阀门开度和蒸汽流量则为输入量。在输入量选定以后, 应采取适当措施, 防止其他输入对被调量的影响。在上例中, 除给水阀门开度以外, 还应当尽量保持其他能影响水位的因素不变。

2. 选择合适的测量仪表

为了保证测试结果的准确性, 应当选用灵敏度和记录速度适当的仪表进行测试和记录。如果利用控制盘上现有的检测记录仪表, 则应在事前进行一次校验。

现场的测试工作一般采用多点快速记录仪进行, 这样可以同时记录多个被测参数。测

试调节对象阶跃响应曲线的系统方框图如图1-3所示。输入量为 x ，输出量为 y 。为了进行对比和监视，也可以同时记录其他有关的输入量和输出量。

3. 确定扰动量的大小和选择测试点

扰动量大小的确定，应以保证运行安全和读数准确为原则。扰动量选得过大，可能会影响安全运行，也可能引起调节对象的非线性，使测量结果误差太大。扰动量过小，因被调量变化过小，而使其他随机干扰造成的误差相对增加。通常可以用额定值的10%~15%作为扰动量。

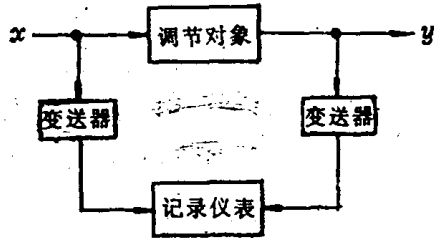


图 1-3 测试调节对象阶跃响应曲线的系统方框图

如果调节对象的负荷变化范围较大，为了考虑非线性的影响，可以选用若干个测试点分别进行测试。

4. 保证运行工况的稳定

为了保证测试工作的顺利进行，必须在测试过程中维持主设备的工况稳定。扰动加入之前，各被测参数应维持不变；扰动加入后，则不应进行不必要的操作。为了更好地进行测试，工作人员应当熟悉主设备的运行。

二、测试步骤及注意事项

测试调节对象阶跃响应特性的工作从原理上看并不复杂，只要在扰动加入前能保证各参数的稳定，而在扰动加入后能及时和正确地进行记录就可以了。考虑到实际工作中的情况，有必要指出如下各项：

(1) 所加的扰动尽量是“阶跃”变化的，也就是说扰动应当是突变的。如果扰动是通过调节机构加入的，其变化速度决定于执行机构的速度，这时所加入的扰动实际上不是阶跃变化的而是等速度式的斜坡扰动。设整个扰动是在 $0 \sim t_1$ 时间内完成的，那么可以认为是在 $t_1/2$ 时刻调节对象受到阶跃扰动，并以这一时刻作为阶跃响应曲线的起始点。

(2) 在试验中应尽量减少其它扰动的影响。为了使这种影响降低到最小程度，除在试验时注意外，还必须进行多次试验，至少应取得两次以上的相近的结果。

(3) 考虑到仪表的变差、阀门的死区等对测试结果的影响，试验应在开大和关小两个方向上重复进行。在做被调量上升试验时，被调量应调至较低的数值；而在做下降试验时，则应从较高的数值开始。

(4) 由于响应曲线的开始阶段对动态参数影响较大，应当尽量多取些数据。在进行记录过程中，则应注意被调量是否会超出工艺上的允许范围。如果估计有可能超出允许范围，应该立刻解除扰动。但是记录工作可继续进行，实际上将得到矩形脉冲响应曲线。

(5) 如需考虑调节对象的非线性特点，应当在不同负荷下（最大、最小和中间负荷）分别测试几条曲线。整定调节系统时应以最不利的条件进行。

1-3 矩形脉冲响应特性的测试与试验结果的整理

上面已经提到，当被调量的变化有可能超出工艺上允许的范围时，应立即解除扰动。

实际上,这是把阶跃扰动变为矩形脉冲扰动。一般说,当工艺上对被调量的限制较严格时,可以直接测取矩形脉冲响应特性。

一个持续时间为 T_0 、幅值为 Δx_0 的矩形脉冲,可以看作是由方向相反、幅值相等而在时间上相差 T_0 的两个阶跃信号所组成,如图1-4所示。由图可见,阶跃信号 x_2 可以看作是阶跃信号 x_1 的反向迟延环节,迟延时间为 T_0 ,于是可以写成

$$x(t) = x_1(t) + x_2(t) \quad (1-9)$$

而且

$$x_2(t) = -x_1(t - T_0)$$

故有

$$x(t) = x_1(t) - x_1(t - T_0) \quad (1-10)$$

以上各式中 $x(t)$ ——矩形脉冲信号;

$x_1(t)$ ——正向阶跃扰动信号;

$x_2(t)$ —— $x_1(t)$ 的反向阶跃扰动信号;

$x_1(t - T_0)$ —— $x_1(t)$ 的迟延环节的阶跃扰动信号。

由矩形脉冲扰动所引起的矩形脉冲响应 $y(t)$ 也可以看作是由两个部分构成的: $y_1(t)$ 是 $x_1(t)$ 的阶跃响应,而 $y_2(t)$ 是 $x_2(t)$ 或 $x_1(t - T_0)$ 的阶跃响应。于是 $y(t)$ 可以表示如下:

$$y(t) = y_1(t) + y_2(t) \quad (1-11)$$

其中

$$y_2(t) = -y_1(t - T_0)$$

故

$$y(t) = y_1(t) - y_1(t - T_0) \quad (1-12)$$

或

$$y_1(t) = y(t) + y_1(t - T_0) \quad (1-13)$$

式(1-13)表明,由矩形脉冲响应和一个迟延环节的响应可以叠加而得到阶跃响应 $y_1(t)$ 。在 $t = T_0$ 以前, $y_1(t - T_0) = 0$, $y_1(t) = y(t)$,即阶跃响应与矩形脉冲响应完全相同。当 $t > T_0$ 以后,每一瞬间的 $y_1(t - T_0)$ 值均可由 $y_1(t)$ 给出,从而得到了阶跃响应特性曲线各点的数值。图1-5(a)所示为有自平衡能力调节对象的情况,其作图方法如下:

首先以矩形脉冲的宽度 T_0 为单位,把时间轴分成若干个等份。

在 $t = T_0$ 时, $y_1(T_0) = y(T_0)$,由此确定了 $y_1(t)$ 的第一点 $y_1(T_0)$ 。

在 $t = 2T_0$ 时, $y_1(2T_0) = y(2T_0) + y_1(T_0)$,由此确定了 $y_1(t)$ 的第二点 $y_1(2T_0)$ 。

在 $t = 3T_0$ 时, $y_1(3T_0) = y(3T_0) + y_1(2T_0)$,由此确定了 $y_1(t)$ 的第三点 $y_1(3T_0)$ 。

如此下去直到把 $y_1(t)$ 的各点全部求出为止。若把时间分得更短些,则所求得的曲线更准确些。

用同样方法,可以依据无自平衡能力调节对象的矩形脉冲响应求得阶跃响应,如图1-5(b)所示。

矩形脉冲扰动试验是获取阶跃响应特性曲线的重要方法。在试验时要注意矩形脉冲宽

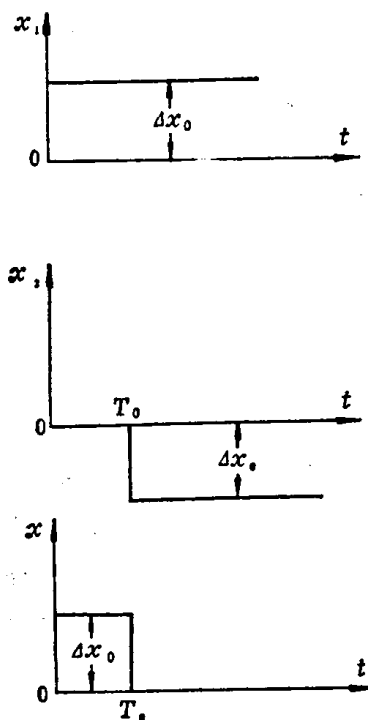


图 1-4 矩形脉冲扰动与阶跃扰动的关系

度 T_0 的合理选择, 它既不能太长, 也不能太短, 一般通过试探的方法进行选择, 直到合适为止。试验中值得注意的另一个问题是当扰动结束时, 一定要使输入量真正恢复到扰动前的数值, 否则会使被调量也不能恢复到原来的平衡状态, 这会增加测量的误差。

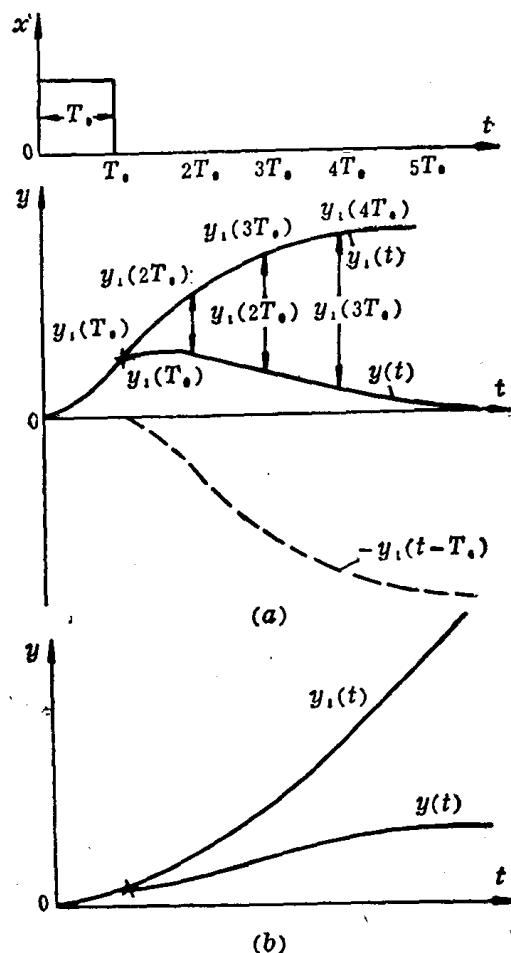


图 1-5 用作图法由矩形脉冲响应特性求取阶跃响应特性
(a)有自平衡能力调节对象; (b)无自平衡能力调节对象

1-4 根据阶跃响应特性求取调节对象的近似传递函数

通过试验方法得到的阶跃响应特性、矩形脉冲响应特性等, 虽能直观地表示调节对象的动态特性, 却不便于系统的分析和研究。为了把动态特性曲线转化为传递函数的形式, 本节介绍工程上常用的几种转换方法。

一、以有纯延迟的一阶惯性环节近似有自平衡能力的调节对象

如果调节对象的阶跃响应曲线如图 1-6 所示, 其起始部分有明显的纯延迟, 或有较大容量延迟而对结果又要求不高时, 则可以用一个具有纯延迟的惯性环节来近似, 其传递函数形式如下:

$$W_{00}(s) = \frac{K}{1+T_0 s} e^{-\tau s} \quad (1-14)$$

式中
$$K = \frac{y(\infty) - y(0)}{\Delta x_0} \quad (1-15)$$

当 $y(0)=0$ 时, 上式可写成

$$K = \frac{y(\infty)}{\Delta x_0} \quad (1-16)$$

以上各式中 T_c ——调节对象的时间常数;

τ ——调节对象的迟延时间;

K ——调节对象的稳态放大系数;

Δx_0 ——阶跃扰动的幅值;

$y(0)$ ——被调量的初始稳态值;

$y(\infty)$ ——被调量的终态值。

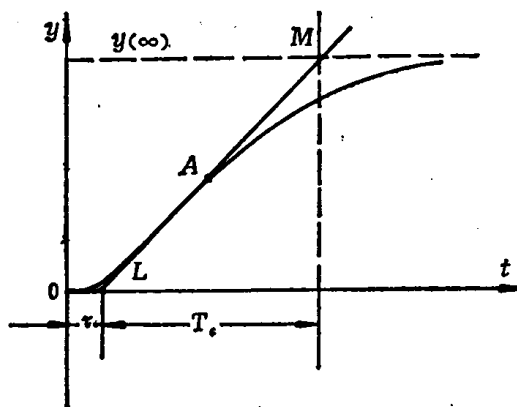


图 1-6 可用有纯迟延的一惯性环节近似的阶跃响应曲线

通过曲线上的拐点 A 作一切线, 交时间轴于 L 点, 交被调量终态值的渐近线于 M 。则 OL 即为调节对象的等效纯迟延时间 τ , 切线 ML 在时间轴上的投影即为时间常数 T_c 。这种方法较为简单, 但由于拐点往往选得不准, 所作的切线偏差又较大, 所以得出的结果与实验曲线可能有较大的误差。为了克服上述缺点, 可以采用“两点法”确定近似传递函数。

放大系数的求法同上述。

若调节对象的传递函数可以写成式 (1-14) 的形式, 则阶跃响应可由下式给出:

$$y(t) = \begin{cases} 0, & t < \tau; \\ K(1 - e^{-\frac{t-\tau}{T_c}}), & t \geq \tau \end{cases} \quad (1-17)$$

为了确定 T_c 和 τ , 可选择不同的时间 t_1 与 t_2 , 且 $t_2 > t_1 > \tau$, 由 t_1 与 t_2 所对应的坐标值 $y(t)$ 构成一组联立方程:

$$\left. \begin{aligned} y(t_1) &= 1 - e^{-\frac{t_1-\tau}{T_c}}; \\ y(t_2) &= 1 - e^{-\frac{t_2-\tau}{T_c}} \end{aligned} \right\} \quad (1-18)$$

对上式两边分别取自然对数:

$$\left. \begin{aligned} -\frac{t_1-\tau}{T_c} &= \ln[1-y(t_1)]; \\ -\frac{t_2-\tau}{T_c} &= \ln[1-y(t_2)] \end{aligned} \right\} \quad (1-19)$$

由此可以解出两个未知数 T_c 及 τ :

$$\left. \begin{aligned} T_c &= \frac{t_2 - t_1}{\ln[1-y(t_1)] - \ln[1-y(t_2)]}; \\ \tau &= \frac{t_2 \ln[1-y(t_1)] - t_1 \ln[1-y(t_2)]}{\ln[1-y(t_1)] - \ln[1-y(t_2)]} \end{aligned} \right\} \quad (1-20)$$

由式 (1-20), 就可以根据选定的 t_1 、 t_2 及所对应的 $y(t)$ 值分别确定 T_c 与 τ 值。在上式