



热工控制系统

REGONG KONGZHI XITONG

边立秀 周俊霞 赵劲松 杨建蒙 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

热工控制系统

边立秀 周俊霞 赵劲松 杨建蒙 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书较全面地阐述了单回路控制系统的组成、特点、工作原理及控制参数整定方法,介绍了复杂控制系统的原理及在大型火电厂单元机组中的实际应用。

本书主要内容包括自动控制系统的基本概念,控制对象的动态特性,控制仪表的工作原理,单回路控制系统的分析、整定,串级、前馈—反馈、比值、解耦、大迟延控制系统的组成、特点、工作原理,单元机组蒸汽温度、汽包水位控制系统,燃烧过程控制系统以及协调控制系统的分析、整定方法及实例分析。

本书理论知识精炼、重点突出,专业知识的针对性和应用性强。本书可作为高等院校热能与动力工程、测控技术与仪器、自动化及其相关专业的热工自动控制系统课程的教材,也可作为相关专业、函授课程的教材,还可供从事电力研究、设计及各大电厂从事热工自动控制工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

热工控制系统/边立秀、周俊霞、赵劲松、杨建蒙编者.
—北京:中国电力出版社,2001

ISBN 7-5083-0686-4

I. 热... II. ①边... ②周... ③赵... ④杨... 编者
III. 热力工程-自动控制-控制系统 IV. TK323

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 045616 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京密云红光印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2002 年 1 月第一版 2002 年 1 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 17 印张 381 千字

印数 0001—3000 册 定价 25.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

前言

本书是根据热能与动力工程、测控技术与仪器、自动化及其相关专业“热工自动控制系统”教学的需要而编写的，它可作为高等院校热能动力类、仪器仪表类、自动控制类及相关专业的教材，也可作为从事热工过程自动控制工作的工程技术人员的参考书。

全书共十三章，分为简单控制系统、复杂控制系统和火电厂单元机组自动控制系统三个部分。第一章讲述了自动控制系统的基本概念、控制系统的分类及性能指标。第二章讲述了热工控制对象的特点，介绍了根据对象的阶跃响应曲线求取传递函数的方法。第三章讲述了控制仪表的发展、特点、工作原理及调节器的控制规律。第四章讲述了单回路控制系统的组成、分析、调节器参数的整定方法及实例分析。第五章至第九章主要介绍串级、前馈—反馈、比值、大迟延、解耦控制系统的组成、特点、分析及整定方法。第十章至第十三章主要介绍蒸汽温度、汽包水位控制系统、燃烧过程控制系统以及协调控制系统的组成、工作原理、方案比较、调节器参数整定及大型单元机组控制系统的实例分析。

本书是在历年讲稿、讲义的基础上经多次修改完善而写成的，是多年的教学与研究实践的结果。该书在内容上力求反映近年来热工过程控制中的新技术、新方法和新发展。在阐述方法上注意深入浅出、循序渐进、理论和实际的结合。

本书由华北电力大学边立秀、周俊霞、赵劲松、杨建蒙编者，由华北电力大学博士生导师刘吉臻教授主审，刘吉臻教授认真审阅了书稿，提出了许多颇有价值的宝贵意见，在此向他表示诚挚的感谢。本书在编写过程中，华北电力大学动力系集控教研室老师们和许多同行曾给予了大力帮助和支持，并提出了许多宝贵意见，在此一并致以忠心感谢。

由于作者水平有限，对新技术的认识和实践尚不够，书中的缺点、疏误在所难免，真诚希望读者提出批评指正。

编 者

2001年7月

目 录

前言

绪论	1
----------	---

第一篇 简单控制系统

第一章 控制系统概述	3
第一节 概述	3
第二节 自动控制系统分类	6
第三节 控制系统的性能指标	7
第二章 控制对象的动态特性	12
第一节 概述	12
第二节 单容控制对象的动态特性	12
第三节 多容控制对象的动态特性	22
第四节 对象动态特性的求取	28
第三章 控制仪表及调节器的控制规律	40
第一节 概述	40
第二节 控制仪表	41
第三节 调节器的控制规律	53
第四章 单回路控制系统	60
第一节 概述	60
第二节 对象特性对控制质量的影响	62
第三节 单回路控制系统的分析	67
第四节 单回路控制系统的整定	81
第五节 单回路控制系统实例	95

第二篇 复杂控制系统

第五章 串级控制系统	99
第一节 串级控制系统的基本原理和结构	99
第二节 串级控制系统的分析	100
第三节 串级控制系统的设计和调节器的选型	105
第四节 串级控制系统的整定	106
第六章 前馈控制系统	110

第一节 前馈控制系统的分析	110
第二节 前馈—反馈控制系统	112
第七章 比值控制系统	115
第一节 比值控制系统的分析	115
第二节 比值控制系统的整定	118
第八章 大迟延控制系统	122
第一节 补偿纯迟延的常规控制	122
第二节 预估补偿控制	123
第九章 解耦控制系统	129
第一节 概述	129
第二节 系统的耦合	129
第三节 解耦控制方法	137

第三篇 大型火电厂单元机组自动控制系统

第十章 汽包锅炉蒸汽温度自动控制系统	143
第一节 引言	143
第二节 串级过热汽温控制系统	145
第三节 采用导前汽温微分信号的双回路过热汽温控制系统	148
第四节 过热汽温分段控制系统	158
第五节 300MW 单元机组过热汽温控制系统实例	160
第六节 再热汽温自动控制系统	163
第十一章 汽包锅炉给水自动控制系统	169
第一节 引言	169
第二节 给水自动控制系统	172
第三节 给水全程控制系统	180
第四节 300MW 单元机组给水全程控制系统实例	189
第十二章 燃烧过程自动控制系统	196
第一节 引言	196
第二节 燃烧控制系统	203
第三节 典型燃烧控制系统	208
第四节 600MW 单元机组燃烧控制系统实例	223
第十三章 单元机组协调控制系统	235
第一节 引言	235
第二节 主控制系统	239
第三节 600MW 单元机组协调控制系统实例	248
参考文献	263

绪 论

实现生产过程自动化对国民经济的发展有十分重大的意义。在火力发电厂中,实现热力过程自动化后,能使机组安全、可靠、经济地运行。具有下列几方面的好处:

(1) 提高机组运行的安全可靠。安全可靠是机组运行的首要要求,特别是对大容量机组更具有重要的意义。随着机组容量的增大,热力系统越来越复杂,需要监视、控制的项目显著增多。例如,一台 500MW 的机组,需要监视的项目达 1200 多个,需要操作的项目达 40000 多个。仅在启动过程中,就需要监视 500 多个项目,进行 400 多个操作。靠人来监视和操作,不仅劳动强度大,而且很难胜任,同时极易因误操作而造成事故,所以必须采用自动化仪表来完成监视和操作。因为检测装置能把机组的运行状态随时报告给人和调节装置;自动调节装置能随时对机组的运行状态进行调节,使机组在良好的状态下运行;程序控制装置能简化操作步骤和减少操作数量,避免误操作;保护装置能在机组运行中发生异常或运行参数超过允许值时进行报警,避免、限制、处理事故。计算机的应用使机组运行的安全可靠得到了进一步的提高。

(2) 提高机组运行的经济性。自动化仪表能保护机组在良好状态下运行,因此,可以减少事故停机的损失和设备检修费用,可提高热效率,降低供电热耗和煤耗。例如,锅炉实现了燃烧自动控制后,其热效率可提高 0.5%~3%。采用计算机进行运行指导时,供电热耗约降低 25.1~54.4kJ/(kW·h) (占 0.25%~0.5%)。2 台 600MW 机组一年可节约 1~2 万 t 煤;当机组按最佳方式运行时,热耗可降低 62.7~125.4kJ/(kW·h)。机组实现自启停,可缩短启停时间,因而使各种热损失及工质损失都大为减少。

(3) 减少运行人员,提高劳动生产率。采用集中控制方式的国产 125MW 机组,一台机组的运行人员每班需要 8~10 人左右,但由于未实现机组的自动启停,机组启动时还需派人协助操作及做抄表工作。在国外,由于自动化程度高,一般每台单元机组每班运行人员为 5 人左右,有的国家仅为 2~3 人,正常启停时不需临时增加人员。例如,容量为 2170MW (2 台 385MW 和 2 台 700MW 均烧煤),全厂仅 127 人,平均为 0.06 人/MW;容量为 4400MW (4 台 600MW 和 2 台 1000MW 均烧油),全厂共 350 人,平均为 0.08 人/MW。

(4) 改善劳动条件。实现生产过程自动化,可使运行人员从繁忙的体力劳动和紧张的精神负担中解脱出来,值班员除在机组启停时有些操作外,正常运行时只需在控制室内集中监视主设备及自动化仪表的运行情况。以锅炉汽包水位为例,在旧式锅炉中,必须有司水员整天呆在温度高、飞灰多、工作环境很差的炉顶汽包旁进行监视。在新式锅炉中,利用电接点式水位计或工业电视的摄像装置等将汽包水位真实地反映到控制室,值班员在控制室内就可以清楚地看到汽包水位的高低。

此外,实现生产过程自动化,对促进科学技术的发展和加速四个现代化建设都有十分

重要的意义。所以，实现生产过程自动化是实现四个现代化的重要标志之一。

火电厂自动化的范围是极其广泛的，它包括主机、辅助设备、公用系统等的自动化，大致可以分为四个基本内容：

(1) 自动检测。自动检测是对生产过程及设备的参数、信号自动进行转换、加工处理、显示并记录下来。它相当于人和自动化的“眼睛”。火电厂需要连续进行检测的信号有温度、压力、流量、液位、电流、电压、转速、频率、振动、气体成分、汽水品质等。检测所采用的装置有测量仪表、记录仪表、巡回检测装置、工业电视等。

(2) 自动调节。自动调节一般是指正常运行时操作的自动化，即在一定范围内自动地适应外界负荷变化或其他条件变化，使生产过程正常进行。火电厂的自动调节主要有锅炉水位调节、汽温调节、燃烧调节、辅助设备调节等。将程序控制技术、逻辑功能和保护同自动调节结合起来，可以实现全程控制，即在机组启动、停止及正常运行的全过程中，实现自动控制，如水位全程控制。

(3) 远方控制及程序控制。远方控制是通过开关或按钮，对生产过程中重要的调节机构和截止机构实现远距离控制。程序控制主要是指机组（或局部系统、设备）在启动、停止、增减负荷、事故处理时的一系列操作的自动化。

火电厂局部程序控制对象主要有锅炉点火、吹灰、定期排污、汽轮机自升速、制粉系统、化学水处理、输煤等。

(4) 自动保护。自动保护是利用自动化装置对机组（或系统、设备）状态、参数和自动控制系统进行监视，当发生异常时，送出报警信号或切除某些系统和设备，避免发生事故，保证人身和设备的安全。

火电厂的自动保护对象主要有锅炉、汽轮发电机本体、辅助设备、局部工艺过程等。

上述的自动检测、自动调节、远方控制及程序控制、自动保护，一般用常规的模拟仪表来实现，也可以用微型计算机来实现。微型计算机可靠、价廉，还有很强的计算、逻辑判断、记忆功能，它能快速计算机组在正常运行时以及启停过程中的重要数据，进行事故分析、处理。以前，微型计算机在火电厂主要用于数据处理及运行监视指导，随着电子技术的发展，微型计算机，特别是微处理机已经在火电厂中得到了广泛应用。

自动化系统四个方面的内容是相对独立而又相互配合的。自动调节是主要的，也是基本的内容。要保证自动调节的正常投入，必须有准确可靠的检测信号，必须有自动保护作保证，否则，自动调节系统投入运行是不安全的。当自动调节的范围进一步提高时，程序控制就成为必要的手段。

第一篇

简单控制系统

简单控制系统是由一个被调量、一个控制量、一个调节器、一个调节阀组成的一个闭合回路。

在热工过程控制中，简单控制系统是最基本的，也是应用最多的。即使是复杂控制系统，也是在简单控制系统的基础上发展起来的。因此，学习和掌握简单控制系统是非常重要的。

本篇分四章，第一章讲述控制系统的基本概念。第二章讨论热工控制对象的动态特性。第三章主要分析调节器的控制规律。第四章阐述单回路控制系统的组成、控制对象的动态特性及调节器的控制规律对控制过程的影响、各种整定方法及单回路控制系统实例。

第一章 控制系统概述

第一节 概 述

正常运行的生产设备必须保证产品满足一定的数量和质量的要求，同时也要保证生产设备的安全性和经济性。因此，要求生产设备在规定的工况下运行。但是生产过程在进行的时候总是处在许多因素的影响下，如果不加以操作和控制就不能保证生产过程的正常进行。

生产过程是否正常进行，通常是用一些物理量来表征的（例如：汽轮发电机的参数、锅炉的汽压、汽温、炉膛负压、烟气成分、汽包水位等）。当这些物理量偏离所希望维持的数值时，就表示生产过程离开了规定工况，必须加以调节。因此调节的任务就是使表征生产过程是否正常进行的这些物理量保持在所希望的数值上。

自动调节是在人工调节的基础上产生、发展起来的，所以在开始介绍自动调节的时候，首先分析人工调节，并与自动调节加以比较，这对初学者了解和分析自动调节是有益的。

锅炉给水人工调节示意图如图 1-1 所示。给水经过省煤器加热后进入汽包，给水调节阀用以调节汽包水位。为了使水位保持在要求的数值上或在一定范围内变化，必须在汽包上设置一个水位计，操作人员根据水位计的指示，不断地改变调节阀的开度，控制进入汽

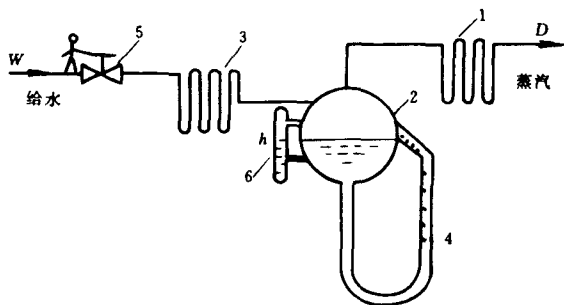


图 1-1 锅炉给水人工调节示意图

1—过热器；2—汽包；3—省煤器；4—水冷壁；5—给水调节阀；6—水位计

包的水量，从而使水位维持在某个要求的范围内。例如，当操作人员从水位计上观察到的数值低于要求的水位值时，则开大阀门，增大给水流量，使水位上升到要求的数值；当从水位计上观察到的数值高于要求的水位值时，就关小阀门，减小给水流量，使水位下降到要求的数值。归纳起来，操作人员所进行的工作是：

- (1) 观察水位计的指示值；
- (2) 将汽包水位的指示值与汽包水位要求的数值比较，并算出两者的差值；

当偏差值偏高时，则关小给水调节阀，而当偏差值偏低时，则开大给水调节阀，阀门开大或关小的程度与偏差的大小有关。

将上述三步工作不断重复下去，直到水位计指示值回到要求的数值上，这种由人来直接进行的操作就叫做人工调节。

从上述可知，要进行人工调节，必须有一个测量元件（如上例中的水位计）和一个被人工操纵的器件（如上例中的给水调节阀）。人们把指示水位与要求水位进行比较，就会得到水位偏差的大小，根据这个偏差大小进行判断，并决定如何去控制阀门，使偏差得到纠正。所以人在调节过程中起到了观测、比较、判断和控制的作用。人工调节就是“检测偏差、纠正偏差”的过程。

如果用一整套自动控制仪表（自动调节器）来代替操作人员的作用，使生产过程不需操作人员的直接参与而能自动地执行调节任务，这就叫做自动调节。

锅炉给水汽包水位自动调节示意图如图 1-2 所示。

图 1-2 中测量单元、给定单元、调节单元、执行单元代替操作人员完成调节给水的任务。测量单元（相当于人的耳目）用来测量水位的大小，并把水位信号转变成与之成一定关系（一般为比例关系）、便于远距离传送的电流或电压信号。调节单元（相当于人的大

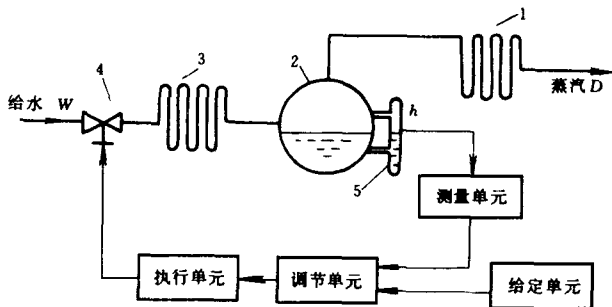


图 1-2 汽包锅炉给水自动调节示意图

1—过热器；2—汽包；3—省煤器；4—给水调节阀；5—水位计

脑)接受测量单元来的测量信号,并把它与水位希望保持的值(由给定单元给出)进行比较。当有偏差时,调节单元发出一定规律的指令给执行单元。执行单元(相当于人的手)按照调节单元这一指令去操作调节机构(给水调节阀),调节效果如何,再由测量单元测出水位的变化,并将这一信号给调节单元,与水位希望保持的数值再比较。根据偏差,调节器再发出调节指令,执行单元再次改变给水调节阀,直到调节系统达到一个新的平衡状态为止,调节过程结束,这样就实现了用自动控制仪表代替人工调节的自动调节。

从图 1-1 到图 1-2 表示了从人工调节到自动调节的演变过程。从这个演变过程可以看出;人工调节中人用眼睛、大脑、手完成观测、比较、判断和控制的任任务。自动调节中则用测量单元、调节单元、执行单元完成,也就是说用这套控制仪表完全能代替人。在人工调节中,人是凭经验支配双手操作的,其效果在很大程度上取决于经验。而在自动调节中,调节单元是根据偏差信号,按一定规律去控制调节阀的,其效果在很大程度上决定于调节单元的调节规律选用得是否恰当。

通过上述实例可以概括出自动调节中的一些常用术语。

1. 被调量(被控制量)

表征生产过程是否正常运行并需要加以调节的物理量,例如图 1-1 中的水位 h 。

2. 给定值

按生产要求被调量必须维持的希望值,简称给定值。在许多情况下给定值是不变的(如正常运行时锅炉的汽包水位、过热蒸汽温度等),但在有些情况下给定值是变化的,如汽轮机启动过程中转速的给定值就应不断改变。

3. 控制对象(被控对象)

被调节的生产过程或设备称为控制对象,例如图 1-1 中的汽包。

4. 调节机构

可用来改变进入控制对象的物质或能量的装置称为调节机构。

5. 控制量(调节量)

由调节机构(阀门、挡板等)改变的流量(或能量),用以控制被调量的变化,称为控制量,例如图 1-1 中的给水量 W 。

6. 扰动

引起被调量偏离其给定值的各种原因称为扰动。如果扰动不包括在控制回路内部(例如外界负荷),就称为外扰。如果扰动发生在控制回路内部,称为内扰。其中,由于调节机构开度变化造成的扰动,称为基本扰动。变更控制器的给定值的扰动称为给定值扰动,有时也称控制作用扰动。

7. 控制过程(调节过程)

原来处于平衡状态的控制对象,一旦受到扰动作用,被调量就会偏离给定值。要通过自动控制仪表或运行人员的调节作用使被调量重新恢复到新的平衡状态的过程,称为调节过程。

8. 自动控制系统

自动控制仪表和控制对象通过信号的传递互相联系起来就构成一个自动控制系统。

运用上述术语来表述，控制就是根据被调量偏离给定值的情况，适当地动作调节机构，改变控制量，最后抵消扰动的影响，使被调量恢复到给定值。

第二节 自动控制系统分类

一、按系统结构特点分类

1. 反馈控制系统

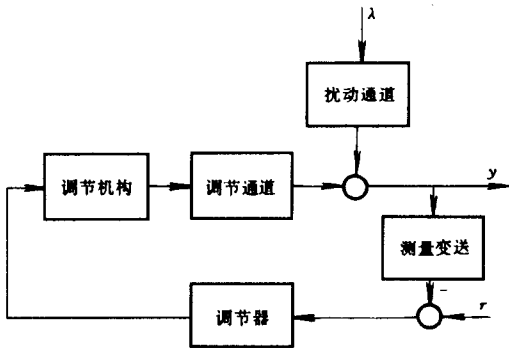


图 1-3 反馈控制系统

这种系统的基本工作原理是根据被调量与其给定值之间的偏差进行调节，最后达到减小或消除偏差，简单说就是“按偏差调节”。为了取得偏差信号，必须要有被调量测量值的反馈信号，因而将系统构成一个闭合回路，如图 1-3 所示。这种系统也称为闭环控制系统。

反馈控制的特点：一是按偏差调节，由于需要反复调节，所以控制过程时间较长，但可以克服各种扰动对被调量的影响；二是闭环系统需要进行稳定性分析；三是由于控制作用落后于扰动，则控制作用不及时。

2. 前馈控制系统

这种控制系统的基本工作原理是根据扰动信号进行调节，即利用扰动信号产生的调节作用去补偿（抵消）扰动对被调量的影响，简单说就是按“扰动调节”或“扰动补偿”。

图 1-4 表示一个前馈控制系统，扰动 λ 是引起被调量 y 变化的原因，而前馈调节器在扰动出现的同时就根据扰动信号 λ 进行调节，用此控制作用去抵消扰动 λ 对被调量的影响。如果完全抵消，被调量就可保持不变。在前馈控制系统中，没有被调量（及其他）的反馈信号，所以系统是不闭合的，因此也称开环控制系统。

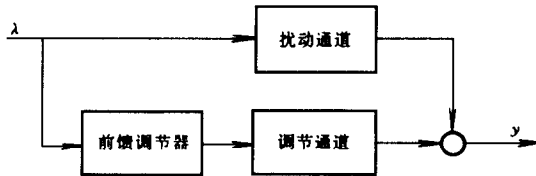


图 1-4 前馈控制系统

前馈控制的特点：一是按扰动调节可以及时有效地制止被调量的变化，使控制过程时间短，但只能克服某种扰动；二是因为属于开环系统，所以不存在稳定性分析问题；三是扰动作用一发生就产生控制作用，因此控制作用及时。

3. 前馈—反馈控制系统

在反馈控制系统的基础上加入前馈控制就称为前馈—反馈复合控制系统。将经常发生的主要扰动（负荷）作为前馈信号，由于前馈信号快于被调量的偏差信号，故可以进行“立即”调节，及时克服主要扰动对被调量的影响。利用反馈来克服其他扰动，使系统的

被调量在稳态时能准确地控制在给定值。在复合控制系统中把前馈控制称为粗调，把反馈控制称为细调。只要充分利用前馈与反馈的优点，可以提高控制质量。

前馈—反馈控制系统是目前广泛应用的系统。

二、按给定值特点分类

生产过程不同，被调量应保持的希望数值也可能不同，可分为下面三种情况。

1. 定值控制系统

这种系统的给定值保持恒定，或给定值在某一很小范围内变化。定值控制系统是过去和现阶段热工过程控制中广泛应用的一种自动控制系统，例如锅炉汽包水位控制系统、炉膛负压控制系统等。

2. 随动控制系统

这种系统的给定值是按预先不能确定的一些随机因素而变化（变化规律事先未知）的，因而要求其被调量以一定精度跟随给定值变化。例如，在锅炉滑压运行时，主蒸汽压力的给定值随外界负荷而变化，其变化规律是未知的，要求主蒸汽压力（测量值）紧紧跟随其给定值变化而变化。随动控制系统在热工过程自动控制中应用日益增多，特别是在参与调峰调频的大型单元机组控制系统中得到广泛应用，例如，锅炉燃烧控制系统等。

3. 程序控制系统

这种系统的给定值是预定的时间函数，例如，在汽轮机的自启动过程中，预先拟定转速的给定值随时间的变化规律，要求汽轮机的实际转速按预先拟定的这个规律变化。

此外，还有其他一些分类方法，不一一叙述。有些系统在后面遇到时再作介绍。

第三节 控制系统的性能指标

自动控制系统调节品质的优劣，表示了控制系统克服外来干扰能力的大小。

自动控制系统所要克服的干扰有小有大，有的变化快，有的变化比较缓慢。一般来说缓慢的干扰总是比突然的干扰更容易克服些。我们常把一种突然地从一个数值变化到另一个数值，而且一经加上就持续下去不再消除的干扰称为阶跃干扰，如图 1-5 所示。阶跃干扰是最不利的干扰形式，如果一个控制系统能很好地克服阶跃干扰的影响，那么它对于其他形式的干扰，也就不难克服，所以我们常把对阶跃干扰的反应作为判别系统抗干扰能力好坏的标准。阶跃干扰也是一种最典型的最经常出现的扰动形式，因此把阶跃干扰作为研究控制系统调节品质的标准输入信号。在热工过程自动控制中最常用的是单位阶跃输入，其数学表达式为：

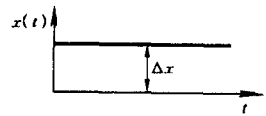


图 1-5 阶跃干扰

$$x(t) = 1(t) = \begin{cases} 0, & \text{当 } t < 0 \text{ 时} \\ 1, & \text{当 } t \geq 0 \text{ 时} \end{cases}$$

单位阶跃输入的函数曲线如图 1-6 所示。

一个控制系统的调节品质，可用控制系统在受到单位阶跃输入作用后（可以是阶跃干扰作用或阶跃给定作用），被调量在控制过程中的变化曲线来分析。

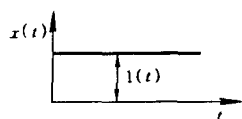


图 1-6 单位阶跃输入函数曲线

一、控制过程的基本形式

当系统受到阶跃干扰作用时，系统的控制过程有以下几种基本形式，如图 1-7 所示。曲线 (a) 是发散的振荡过程，被调量的变化幅度越来越大，这是一种不稳定的过程，在自动控制系统中是应避免的。曲线 (b) 是等幅振荡过程，在连续控制系统中一般认为它是不稳定的和不允许的。但在双位调节系统中，只要被调量的波动幅值及波动频率在工艺所允许的范围内，还是可以采用的。曲线 (c) 是一个衰减的振荡过程，被调量经过一段时间的振荡后，能很快地趋向于一个新的平衡状态，这种控制过程是比较理想的。曲线 (d) 是非振荡的调节过程，又称单调过程。这种控制过程是允许的，但由于控制过程时间太长，一般认为很不理想。综上所述，曲线 (a) 及 (b) 是不稳定的调节过程，而曲线 (c) 和 (d) 是稳定的调节过程，大多数情况下，都希望得到像曲线 (c) 那样的衰减振荡过程。

二、性能指标

一个控制系统控制品质的优劣，常用一些性能指标来评价。性能指标可以用计算的方法得到，也可以从控制过程曲线（被调量的阶跃响应曲线）上直观地得出。最常用的是时域（以时间为自变量的研究领域）性能指标。时域性能指标又可以分为单项性能指标和综合性能指标。

在过程控制中对定值控制系统和随动控制系统的性能要求不同，就产生了两类不同要求的性能指标。对于定值控制系统，控制要求是克服扰动的影响，使被控变量保持在给定的范围。对于随动控制系统，控制要求是使被控制量跟踪新给定值。这两类系统同样要求被控制量接近给定值，但控制要求不完全相同。在定值控制系统中，突出的要求是克服扰动的性能。在扰动发生以后，希望被控制量稳定、准确、快速地达到给定值或新的平衡状态。在随动控制系统中突出的要求是跟踪性能，希望被控制量稳定、准确、快速地跟踪新给定值。设扰动或给定值作单位阶跃变化，控制系统的控制过程曲线如图 1-8 所示，图 1-8 (a) 所示为定值控制系统的曲线，图 1-8 (b) 所示为随动控制系统曲线。

控制系统的控制品质通常用如下性能指标来衡量（仅介绍时间域的单项性能指标）。

1. 静态偏差 $e(\infty)$

在定值控制系统中，静态偏差是指被调量的稳态值与给定值之间的长期偏差，即图 1-8 (a) 中的 $y(\infty)$ 。对于随动控制系统，静态偏差是指被调量的稳态值与新给定值之间的长期偏差，即图 1-8 (b) 中的 $e(\infty)$ 。静态偏差是衡量控制系统准确性的重要指标

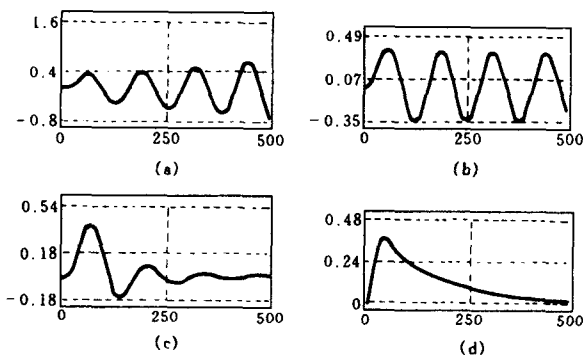


图 1-7 控制过程的几种基本形式

(a) 发散振荡；(b) 等幅振荡；
(c) 衰减振荡；(d) 单调过程

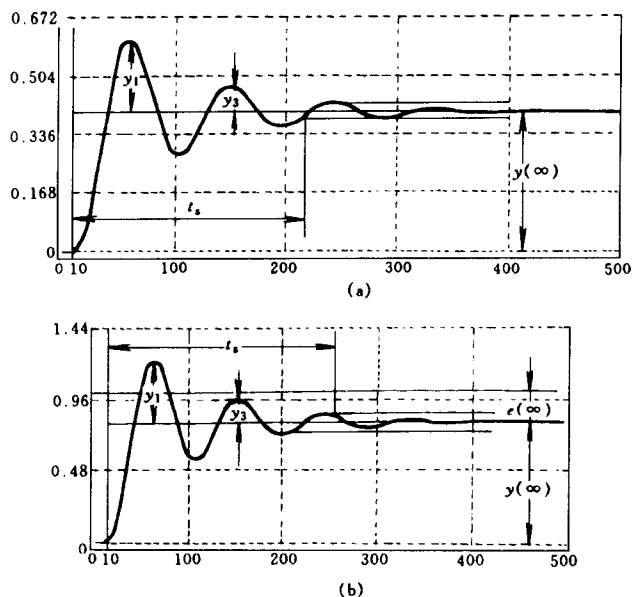


图 1-8 控制过程曲线
(a) 定值系统; (b) 随动系统

之一，它反映了控制系统的调节精度，静态偏差的大小要根据生产过程对控制系统精度的要求来确定。

2. 最大动态偏差 y_m 或超调量 σ

在定值控制系统中，常用最大动态偏差 y_m 这个指标来衡量被调量偏离给定值的程度。被调量最大动态偏差是指调节过程中被调量偏离给定值的最大暂时偏差，从图 1-8 (a) 中可知： $y_m = y_1 + y(\infty)$ ，对于稳定的调节过程就是被调量偏离给定值的第一波峰的高度。一个符合要求的系统，应该在实际可能出现的最大扰动下，被调量的最大动态偏差不应超过正常生产的允许值。

随动控制系统常用超调量这个指标来衡量被控制量偏离给定值的程度。超调量 σ 可定义为

$$\sigma = \frac{y_1}{y(\infty)} \times 100\% \quad (1-1)$$

它是第一个偏离稳态值的波峰幅值 y_1 与被调量的稳态值 $y(\infty)$ 之比。若 y_m 或 σ 愈大，则表示被调量偏离生产规定的状态愈远。

3. 衰减率 φ 和衰减比 n

衰减率是指每经过一个波动周期，被调量波动幅值减少的百分数。如图 1-8 所示，衰减率的定义可表示为

$$\varphi = \frac{y_1 - y_3}{y_1} = 1 - \frac{y_3}{y_1} \quad (1-2)$$

式中 y_1 ——偏离稳态值的第一个波峰幅值；

y_3 ——偏离稳态值的第三个波峰幅值。

它常被工程上用来描述过渡过程为衰减振荡时的衰减速度。

根据 φ 的数值，很容易判别调节过程的性质和形式：

若 $\varphi < 0$ ，则调节过程是发散振荡，如图 1-7 (a) 所示。这种系统是不稳定的，不能应用。

若 $\varphi = 0$ ，则调节过程是等幅振荡，如图 1-7 (b) 所示。这种系统处于边界稳定。在某些不利的因素影响下，它就可能变为发散振荡。这种系统也不能应用。

若 $0 < \varphi < 1$ ，则调节过程是衰减振荡，如图 1-7 (c) 所示。这种系统是稳定的，可以应用。

若 $\varphi = 1$ ，则调节过程是不振荡的过程（非周期过程），如图 1-7 (d) 所示。这种系统稳定性高。

从上面讨论可知， φ 的数值可判别系统是否稳定，它是一项衡量系统稳定程度的指标。 $0 < \varphi \leq 1$ 时，系统是稳定的； $\varphi \leq 0$ 时，系统是不稳定的。不仅如此。在 $0 < \varphi \leq 1$ 的范围内， φ 的数值还可表明系统稳定裕量（富裕量或贮备量）的大小。显然，在 $0 < \varphi \leq 1$ 范围内， φ 值愈大则系统的稳定裕量愈大。对于恒值控制系统，一般取 $\varphi = 0.75 \sim 0.90$ 。

衰减比 n 是指振荡过程的第一个波的振幅 y_1 与第三个波的振幅 y_3 之比，即 $n = y_1 / y_3$ ，它也是衡量系统过渡过程稳定性的一个动态指标，反映了振荡的衰减程度。 $n < 1$ 表示系统不稳定，振幅愈来愈大； $n = 1$ 表示为等幅振荡； $n > 1$ 表示系统稳定； $n = 4$ 表示系统为 4:1 的衰减振荡。

4. 控制过程时间 t_s

控制过程时间是指从被调量受到扰动，过程开始变化直到结束所需要的时间，理论上它需要无限长的时间。对于定值控制系统，控制过程时间是指阶跃响应曲线由开始起到最后一次进入偏离稳态值为 $\pm \Delta$ 范围，并且以后不再超出此范围的时间，即

$$t \geq t_s \text{ 时, } |y(t) - y(\infty)| \leq \Delta, \Delta = (5\% |y(\infty)| \text{ 或 } 2\% |y(\infty)|) \text{ 或 } (5\% |y_1| \text{ 或 } 2\% |y_1|) \quad (1-3)$$

对于随动控制系统，控制过程时间是指被调量与其稳态值之差不超过稳态值的 $\pm 5\%$ 或 $\pm 2\%$ 所需要的时间，即

$$t \geq t_s \text{ 时, } y(t) - y(\infty) \leq \pm 5\% y(\infty) \text{ 或 } \pm 2\% y(\infty) \quad (1-4)$$

从以上分析可知，衡量控制系统调节品质优劣的性能指标可以归纳为三个，即稳定性、准确性、快速性。控制过程的稳定性是对控制系统最基本的要求。不稳定的系统在生产上是不能采用的。边界稳定的系统一般也不符合生产的要求，只有稳定系统才能完成正常的调节任务。

准确性是指被调量的实际值与给定值之间的动态偏差和静态偏差。动态偏差表示系统短期偏离给定值的程度。静态偏差表示长期偏离给定值的程度。若偏离越大，则控制系统离开规定的工况就越远，这是不希望的。最大静态偏差往往出现在负荷发生最大幅度的变化时，即由满负荷跌到零负荷时。

快速性是指控制过程持续时间，控制过程的时间越短，即控制过程进行得越迅速，说明控制系统克服干扰的能力越强。

上述性能指标在同一系统中是互相制约的，在不同系统中，则各有其重要性。因此，在设计自动控制系统时，应该根据具体情况分清主次、区别对待，对于那些主要的指标应优先予以保证。