1 自动控制的基本知识

1.1 概 述

1.1.1 单元机组自动控制技术的作用

在生产和科学技术的发展过程中，自动控制起着十分重要的作用。目前，自动控制技术已广泛应用于工农业生产、交通运输和国防建设。生产过程自动化是保持生产稳定、降低成本、改善劳动条件、促进文明生产、保证生产安全和提高劳动生产率的重要手段，是21世纪科学与技术进步的特征，是工业现代化的标志之一。可以说，自动化水平是衡量一个国家的生产技术和科学水平先进与否的一项重要标志。

火电厂单元机组自动控制主要是对锅炉、汽轮机、发电机及其辅助设备运行的自动控制，控制的目的是使机组自动适应工况的变化而保持在安全、经济的条件下运行。单元机组的生产过程，是将燃料在锅炉中燃烧放出的热量传给工质而产生具有一定压力和温度的蒸汽，供给汽轮机作功并带动发电机产生电能的火力发电生产过程。由于电能无法大量储存，所以这种能量转换必须是连续的，并且能随时适应外界负荷变动的需求。随着电力工业的技术进步、发电设备制造技术水平的提高，高和超高参数大容量单元机组，如300、600MW的机组在电网中已占主导地位。监视每台机组状态的测点数已达2000个以上，操作项目数也有近千个，仅依靠人工监视工况变化和进行运行操作已不可能。不仅如此，常规的模拟式控制仪表也已无法适应复杂系统控制的要求，当前，功能强大的计算机分散控制系统在单元机组自动控制中得到广泛应用。随着单机容量的增大，机组运行的安全性就显得更为重要。因此，单元机组自动控制是现代单元火力发电机组生产的必要条件之一，是衡量电厂生产技术和企业现代化水平的重要标志。

人们常把实现自动控制的仪表设备形象地比拟为运行人员的“眼睛”、“大脑”和“手”。但事实上，目前大型单元机组的自动化装置所实现的功能已远远大于人的“眼”、“脑”、“手”的作用，其实现的功能是仅靠人工所不能完成的。所以，随着机组向高参数、大容量方向发展，自动化装置在系统中的地位也显得越来越重要，对于单元机组运行人员来说，必须熟悉机组自动化系统的原理，掌握单元机组自动控制技术，才能熟练地使用它们，保证机组的安全、可靠、经济运行。

1.1.2 电厂生产过程自动控制的发展概况

电厂生产过程自动化技术相对于其他工业部门来说，有较长的历史和较高的水平，电厂

需要全本请访问 www.ertongbook.com

生产过程自动控制的发展，大致经历了以下几个阶段：

（1）分散就地阶段。20世纪50年代前后，生产过程主要是凭生产实践经验，局限于一般的控制元件及机电式控制仪器，采用比较笨重的基地式仪表实现机、炉、电各目独立的分散的局部自动控制。机组容量小、参数低，机、炉、电各控制系统之间没有或很少有联系。过程控制的目的是维持几种主要热工参数，如温度、压力、流量及液位在正常范围内，所应用的理论为古典控制理论。

（2）集中控制阶段。20世纪50年代末至80年代，先后出现了电动单元组合仪表、巡回检测装置和组装式仪表，从而实现了把机、炉作为单元整体来进行集中控制，仪表盘装在一起，以便于监视，从而使机、炉启停运行比较协调，对提高设备效率和强化生产过程有所促进，适应了工业生产设备日益大型化发展的需要。随着仪表工业的迅速发展，对过程控制及对象特性认识的提高，仪表及控制系统的设计计算方法都有了较快的发展，而且随着机组容量的增大，机、炉集中控制又进一步发展为机、炉、电集中控制，即单元机组集中控制。此时所用的仪表有电动单元组合仪表和组装式仪表，所应用的理论仍以古典控制理论。

（3）计算机综合控制阶段。20世纪80年代至今，由于集成电路、计算机及其网络技术的飞速发展，由分散的机组或车间控制向全车间甚至全企业的综合自动化发展，实现了过程控制最优化与管理调度自动化相结合的计算机分散控制，这是过程控制发展的一个新阶段。对电厂而言，则是把火电厂的生产过程（包括机组主、辅机和全厂各辅助车间）作为一个整体来进行控制，此时所用的仪表有气动仪表、电动组合仪表、组装式仪表及计算机，所用理论仍以古典控制理论为主，现代控制理论也在系统得到应用。

随着计算机技术的迅速发展，单元机组生产过程自动控制又经历了以下几个计算机控制过程：

1）集中型计算机控制：它是用一台计算机对整个机组生产过程进行整体控制，因此对计算机的可靠性要求很高，一旦计算机出现事故，将使整个机组的生产受到严重影响。我国实际上跨越了这个阶段。

2）分散型计算机控制：随着微机的大批量生产，其生产成本不断降低，性能不断提高，逐渐把集中控制改为用微机进行局部控制，克服了集中控制的一些缺点，但此时各系统之间很难协调起来。

3）分散控制系统：它把各机组之间、厂级管理、调度等用一台功能很强的计算机进行上位集中管理，而把单元机组的各子系统用若干台微机进行分散控制，充分发挥了集中管理和分散控制各自的优点，是一种比较合理的控制系统。

4）现场总线控制系统：它是分散控制系统的进一步“分散”的结果，它将过程控制微机进一步小型化，用现场总线将分散到生产现场、执行测控任务的智能变送器、智能执行器等设备连接起来，实现集中管理，代表了新世纪自动控制技术的发展方向。

1.1.3 单元机组生产跳程自动化的主要功能

火力发电机组的生产过程自动化随着科学技术的发展和自动化水平的提高，它所包含的功能越来越广泛，概括起来有以下几个方面。

（1）自动检测。对反映生产过程运行状态的物理量、化学量参数（如温度、压力、液位、化学成分等）以及各种生产设备的工作状态参数，自动进行检查、测量和监视，称为自

动检测。它所使用的检测设备有常规的模拟量仪表、巡回检测数字式仪表，还有计算机图形、图像显示，以及自动记录、打印和警报装置目前在大型单元机组上，主要的显示仪表是计算机及其 CRT。

（2）顺序控制。按照预先拟定的顺序、有计划、有步骤、自动地对生产过程进行一系列的操作，称为顺序控制。顺序控制也称自动操作，或称为程序控制，在发电机组中主要用于主机或辅机的自动启动和停止，以及辅助系统的程序控制如送、引风机的启／停程序控制，制粉系统启／停程序控制，定期排污和定期吹灰的程序控制等。

（3）自动调节。自动地维持生产过程在规定的工况下进行，或者说自动地维持表征生产设备在正常工作状态的物理量为规定值如锅炉给水控制系统自动维持汽包水位在给定值由于生产过程经常受到各种因素的干扰和影响使运行工况发生偏离，必须通过自动调节使其达到正常运行的要求因此，自动调节是经常起作用的一种自动控制手段。

（4）自动保护。在发生事故时，自动采取保护措施，以防止事故进一步扩大，保护生产设备使之不受严重破坏，称为自动保护如锅炉的灭火保护、超压保护；汽轮机的超速保护；发电设备的接地、短路保护等等。

生产过程中必须保证产品满足一定的数量和质量要求，同时又要保证生产的安全和经济，这就要求生产过程在预期的工况下进行。但是，生产过程往往受到各种扰动影响而偏离正常工况，必须通过自动控制随时消除各种于扰，保证正常运行。现代自动控制系统不仅具有自动检测、自动调节、自动保护、顺序控制功能，而且还将这些功能有机地组合成一个不可分割的整体，形成功能齐全的综合自动化系统，以确保控制系统的安全可靠和机组的安全、经济运行。

1.1.4 单元机组自动监视与控制系统的组成

单无机组自动控制的功能是通过各种自动化系统实现的。大容量单元发电机组的自动化系统主要可分为计算机监视（或数据采集）系统、机炉协调控制系统、锅炉自动控制系统、汽轮机自动控制系统、发电机和电气控制系统、辅助设备自动控制系统等。

一、计算机监视系统

计算机监视系统包括厂级监视用计算机和机组级用分散控制系统的数据采集系统，简称 DAS。其作用是对锅炉、汽轮机、发电机及电气系统生产过程参数和设备运行状态进行监视

计算机监视系统的主要功能有数据采集与处理、越限报警、屏幕显示、性能计算、操作指导、打印制表、事故追忆打印、事件顺序记录和历史数据存储等。计算机监视系统与各仪表控制系统都有联系，并取代了大部分常规仪表。由于计算机监视系统数据处理能力强，提高了对机组的监视能力，并有大量的历史数据存储，可供运行人员对机组运行问题进行分析。这是传统的常规仪表装置所无法实现的。

二、单元机组机炉协调控制系统

单元机组机炉协调控制系统，简称 CCS。根据负荷调度命令和电力系统频率，在单元机组所能承担的负荷水平下，对汽轮机自动控制系统和锅炉自动控制系统发出控制指令，使机组输出功率适应外界负荷需要。该系统不仅具有调节功能，还具有逻辑判断功能，当设备发生异常或故障时，发出必要的连锁保护动作指令，以保证机组安全。

三、锅炉自动控制系统

锅炉自动控制系统包括锅炉自动调节系统和炉膛安全监控系统。

（1）锅炉自动调节系统。主要包括给水调节、燃料量调节、送风量调节、炉膛负压调节、过热汽温和再热汽温的调节系统等。锅炉自动调节系统是单元机组协调控制系统的组成部分，或称为子系统。

（2）炉膛安全监控系统，简称 FSSS。该系统又称锅炉燃烧器管理系统，简称 BMS，包括燃烧器管理和锅炉安全保护两大部分。其主要功能包括锅炉运行安全监控功能、点火操作功能和火焰检测。

四、汽轮机自动控制系统

汽轮机自动控制系统包括汽轮机调节系统、汽轮机监视保护系统、汽轮机辅助设备控制系统和主蒸汽旁路控制系统等。

（1）汽轮机调节系统。该系统的作用是对汽轮发电机组的转速和负荷进行连续调节控制，目前广泛采用数字电液控制系统，简称 DEH

（2）汽轮机自启动控制系统。该系统的作用是保证汽轮机安全启停并缩短启停时间，延长机组寿命。现代汽轮机设有应力监视系统，可在汽轮机启停过程中控制关键部件、如转子的热应力在设计范围之内，并以此为基础实现汽轮机的寿命管理，如 ATC 系统。该系统一般属于 DEH 的组成部分。

（3）汽轮机监视系统。包括对汽轮机转速、轴向位移、相对膨胀、轴承振动、偏心、推力轴瓦和支持轴瓦温度等参数进行监视，并在必要时向保护系统发出启动停机信号。

（4）汽轮机保护系统。如超速保护、低真空保护等，还接受汽轮机监视系统发出的保护信号。保护动作的结果是自动关闭主汽门，实现停机，以保护汽轮机安全。

五、发电机组控制系统

发电机组控制系统包括汽轮发电机控制系统和厂用电控制系统等。

（1）发电机组自动控制系统。发电机及其励磁系统为控制对象组成的发电机励磁自动控制系统控制发电机电压和无功功率；汽轮机、发电机及其控制系统组成发电机组转速自动控制系统，控制发电机转速（频率）和有功功率；自动同期并列装置和发变组出口断路器控制组成发电机同期并列控制。

（2）厂用电控制系统。厂用电对保证单元机组安全可靠运行是十分重要的。厂用电控制系统的作用是确保机组辅机和控制系统用电不致中断，一般都设有工作电源和备用电源，并有备用电源自动投入装置，还有直流系统、交流不停电电源等。

六、辅助设备及各支持系统的自动控制系统

辅助设备及各支持系统的自动控制系统，也可称为火电厂辅助系统的自动控制系统。这些控制系统大多属于顺序控制系统，简称 SCS。其作用是保证机组各辅助设备及其支持系统的安全运行。火电厂辅助设备的自动控制系统主要有输煤控制系统、锅炉吹灰控制系统、锅炉补给水处理控制系统、给水泵启停控制、风机启停控制、制粉系统启停控制等。

本书将从单元机组运行人员的实际需要出发，在自动控制有关基本概念的基础上，着重讨论单元机组主要自动控制系统，如 FSSS、DEH、SCS、CCS 以及发电机机组自动控制系统等的功能、组成与使用技术，力求使读者对单元机组自动控制的功能有一个完整、全面的了解，进而理解和掌握控制系统的原理与操作方法，掌握单元机组自动控制技术。

1.2 自动控制的基本概念

单元机组自动控制是火力发电厂生产过程实现现代化的重要技术措施之一，是确保电厂发电设备安全经济运行的重要手段。所谓自动控制，就是指在没有人直接参与的条件下，通过自动控制设备的控制作用使生产设备或生产过程按预定的目标进行。虽然自动控制包括自动检测、顺序控制、自动保护、自动调节等内容，但在生产过程中，自动调节是一种经常起作用的自动控制职能，它对维持生产过程的正常进行起主导作用，所以在有些文献中把自动调节称为自动控制。

1.2.1 自动控制与人工控制

在单元机组生产过程中，为了保证电力生产的安全性、经济性，保持设备的稳定运行，必须对标志生产过程进行情况的一些物理参数进行控制，使它们保持在所要求的额定道附近，或按照一定的要求变化，如汽轮发电机的转速，锅炉蒸汽的温度、压力，汽包的水位，炉膛负压等。在设备运行过程中，这些参数总要经常受到各种因素的影响而偏离额定值（给定值），运行人员就要及时进行操作，对它们加以控制，使这些参数回到所希望的数值上。这一操作过程就是控制这个控制任务由人工操作来完成，称为人工控制。假若用一套自动控制装置来代替人工操作，就称为自动控制

为了了解自动控制系统组成的一般概念，首先以人工控制锅炉汽包水位为例，分析完成一个控制任务需要哪些功能，以及这些功能在自动控制系统中是如何实现的

图 1-1（a）是锅炉汽包水位人工控制示意图。图中 W 为流入锅炉的给水流量，D 为流出锅炉的蒸汽流量，h 为汽包水位。水位是表征锅炉运行状况的一个重要参数。为了保证锅炉的安全运行，通常希望将水位保持在某一规定的数字附近，这个数值就是汽包水位的希望值，称为水位的给定值，用 h_0 表示。水位是反映锅炉流入量与流出量是否平衡的标志。当

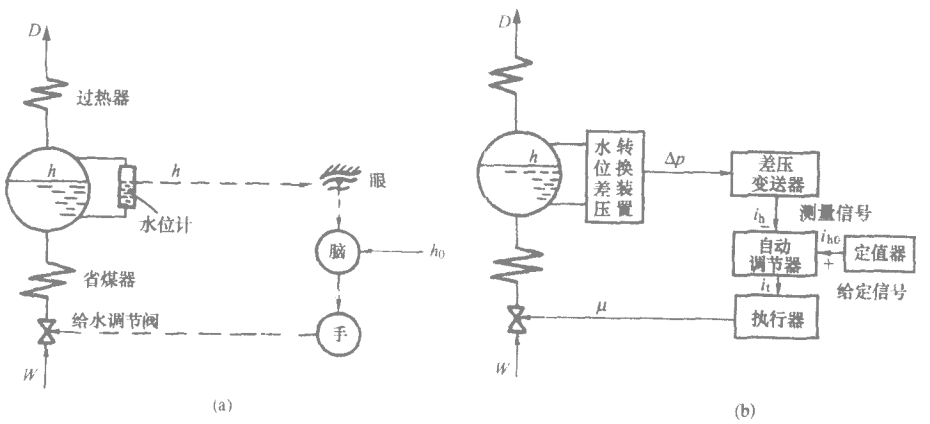


图 1-1 锅炉汽包水位控制示意图

（a）人工控制；（b）自动控制

需要全本请访问 www.ertongbook.com

实际水位稳定在希望值附近时，锅炉的流入量与流出量平衡，不需要调节。当锅炉负荷变化使汽包水位发生变化时，操作人员必须调整给水控制阀开度来改变给水流量，使之与蒸汽流量平衡，以维持汽包水位在希望的范围内。

为了便于分析说明上述水位控制过程，先介绍自动控制理论的几个常用术语。

（1）控制对象（或称调节对象）。指被控制的生产设备或生产过程，如本例中以汽包为中心的锅炉本体设备。

（2）被调量。表征生产过程是否正常而需要调节物理量。如本例中的汽包水位 h，单元机组自动控制中常见的被调量有压力、温度、水位、电压、频率等。

（3）给定值。根据生产工艺要求，被调量应达到的数值。如本例中汽包水位的希望值为 h_0，即水位 h 的给定值。

（5）控制量（或称调节变量）。由控制作用来改变，以控制被调量的变化，使被调量恢复为给定值的物理量。如本例中水位的控制是通过改变给水流量来实现的，给水流量就是给水控制系统中的控制量。

（4）控制机构（或称调节机关）。接受控制作用去改变控制量的具体设备，如本例中的给水控制阀。

（6）扰动。引起被调量偏离其给定值的各种原因，如蒸汽流量 D 的变化会引起汽包水位变化，蒸汽流量的变化称为扰动。

运用上述术语可以说，调节就是指在扰动作用下被调量偏离给定值以后，根据被调量与给定值的偏差情况，通过分析判断后适当地动作控制机构，改变控制量，抵消扰动的影响，使被调量重新恢复到给定值的过程。下面运用这些概念分析人工控制过程。

首先，操作人员通过眼睛观察被调量水位的变化，同时利用大脑分析观察的结果，将观察到的水位 h 与其给定值 h_0 进行比较，判断是否存在偏差，以及偏差的大小和方向（实际水位比给定值高还是低）；决定是否需要对控制阀进行操作，开大还是关小，以及按什么规律进行操作（是缓开，还是猛开，先过调再回调等）手则根据大脑的指挥命令去操作给水控制阀，使给水流量与蒸汽流量相适应，维持汽包水位在正常范围内。

可见，人工控制就是通过人的眼睛、大脑和手分别进行观察、分析和操作来实现的。控制过程就是了解情况、分析决策、执行操作的过程。

随着生产的发展，人工控制已远远不能满足生产的要求。为了实现自动控制，就要用一套自动控制装置来代替人工操作。图 1-1（b）为汽包锅炉给水自动控制示意图。自动控制装置主要包括以下三个部分：

（1）测量部件（即测量变送器）。用来测量被调量的大小，并将被调量转变成某种便于传送、与被调量大小成正比（或某种函数关系，如水位变送器输出的信号 i_h 与汽包水位 h 成比例）的信号，测量部件代替了人眼。

（2）调节器（或称控制器）。调节器接受测量部件输出的与被调量大小成比例的信号，把它与被调量的给定值进行比较，当被调量与给定值之间存在偏差时，根据偏差的大小和方向，按预定的运算规律进行运算，并根据运算结果发出控制指令，如本例中调节器的输出信号 i_t。这里，调节器代替了人脑。

（3）执行器。根据调节器送来的控制指令，驱动控制机构，改变控制量。如本例中的电动执行器，根据调节器输出信号 i_t，改变给水控制阀开度尸，从而改变给水流量 W 可见，

执行器起人手的作用。

用一套自动控制装置代替人工操作，实现自动控制，把自动控制设备与控制对象连接起来，构成自动控制系统，如图 1-1（b）所示不难理解，人工控制效果的好坏主要取决于操作人员的操作经验。如上述给水控制系统，当蒸汽流量扰动发生后，要很快恢复水位为给定值并不是一件容易的事情。因为，当操作人员通过改变给水控制阀的开度改变给水流量后，由于锅炉本身的结构和热力生产过程的特点水位并不能及时反映出控制效果。操作人员必须根据对象动态特性（如控制阀开度改变时水位随时间的变化规律，称为水位对象的动态特性）进行分析思考：控制阀开度改变后，水位是如何随时间变化的？变化量有多大？变化速度怎样？只有对这些胸中有数，才能正确地操作控制阀门，收到预期的控制效果。如果对控制对象特性一无所知，要正确地进行控制是不可能的。同理，并不是自动控制设备一经安装好就能执行控制任务、实现自动控制的。为使自动控制系统能满意地进行工作，必须研究控制系统的运动规律、研究控制对象的动态特性，研究如何根据控制对象特性组成自动控制系统。

1.2.2 自动控制系统的组成

如上所述，自动控制系统是由控制对象和自动控制设备组成的，也就是说，自动控制系统包括起控制作用的自动控制装置（如变送器、调节器、执行器等）和在自动控制装置控制下运行的生产设备（即控制对象）。自动控制系统中的各设备是通过信号的传递和转换相互联系起来的。如图 1-1（b）所示的给水自动控制系统中，当负荷变化使蒸汽流量 D 发生变化时，汽包水位 h 就会发生变化，反映水位高低的测量值 i_h 也随之变化，i_h 与其给定值 i_{h0} 比较得到偏差信号 e。在调节器中按预定的规律对偏差信号 e 进行运算得到控制信号 i_t，i_t 在执行器中进行功率放大后去推动给水控制阀，改变控制阀的开度 μ，从而改变给水流量 W，以抵消蒸汽流量变化对水位的影响。给水控制系统中的信号传递关系可用图 1-2 所示的示意图直观地表示出来。像这种能直观地表达自动控制系统中各设备之间相互作用与信号传递关系的示意图称为自动控制系统的方块图。

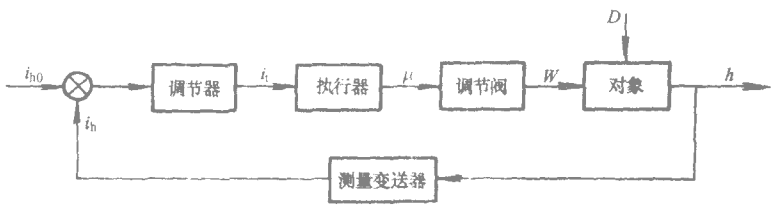


图 1-2 汽包锅炉给水自动控制系统方块图

方块图是研究自动控制系统的重要工具。方块图有四个要素，即信号线、信号综合点、信号分支点和环节，如图 1-3 所示。

（1）信号线。用箭头表示信号“ x ”的传递方向的连接线，如图 1-3（a）所示。

（2）相加点。即信号综合点，表示两个信号“ x_1 ”与“ x_2 ”的代数和，如图 1-3（b）所示。

（3）分支点。表示把信号“ x ”分两路取出，如图 1-3（c）所示。

（4）环节。即方块图中的一个方块，如图 1-3（d）所示。方块图中的每一个方块即一个

环节。环节表示系统中一个元件或一个设备，或者几个设备的组合体。 x 为环节的输入信号， y 为环节的输出信号。

方块图中，环节的输入信号是引起环节变化的原因，而环节的输出信号则是在该输入信

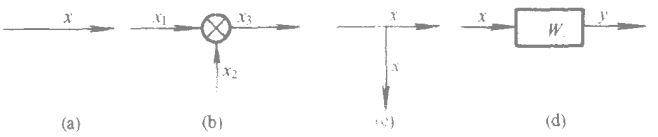


图 1-3　方块图的四要素

（a）信号线；（b）相加点；（。）分支汽；（d）环节

号作用下环节变化的结果。如汽包水位变化的原因可以是给水流量或者蒸汽流量的变化，故给水流量和蒸汽流量都是汽包环节的输入信号 。蒸汽流量或给水流量变化都会引起汽包内部工况发生变化，其结果是水位变化，水位是这个环节的输出信号。应当注意，环节的输入信号与输出信号之间的因果关系是不可逆的。如上例中，蒸汽流量或给水流量的变化都能引起水位变化，但水位的变化不能反过来直接影响给水流量或蒸汽流量，即信号只能沿箭头方向传递，具有单向性。同时，还要看到，方块图中的信号线只是表示环节之间信号的传递关系，不代表实际物料的流动。例如蒸汽流量是“汽包”环节的输入信号，是从蒸汽流量的变化会直接引起水位发生变化这一因果关系的意义来说的，故方块图与实际的生产流程图是有本质区别的。

自动控制系统的方块图一般是一个闭合回路。图 1-2 中水位 h 通过侧量变送器、调节器和执行器等环节，反过来影响水位本身。所以这个系统中的信号是在闭合回路中传递的，这种系统称为闭环系统或称为反馈系统。传递到调节器的信号是给定水位信号 i_{h0} 与实际水位信号 i_h 的偏差值。当水位升高时，偏差信号 $e = i_{h0} - i_h$ 是一个负值，其意义是要关小给水控制阀门，使水位向反方向变化。因此，自动控制系统是一个“负反馈系统”，这种负反馈的实质就是“基于偏差、消除偏差”。如果不存在被调量与给定值的偏差，也就不会产生控制作用，而控制作用的最终目的是要消除偏差，使被调量重新恢复到给定值。

1.2.3　自动控制系统的分类

由于生产过程不同，生产设备不同，控制对象具有不同的性质。因此，自动控制系统的类型也是多种多样的，可以从不同的角度进行分类，每种分类都反映了自动控制系统的某些特点。

一、按给定值的变化规律分类

（一）定值拉制系统

被调量的给定值在系统工作过程中保持不变，从而使被调量保持不变的系统称为定值控制系统。如锅炉汽包水位控制系统就属于定值控制系统。

（二程序控制系统

给定值是时间的已知函数的控制系统，称为程序控制系统。如汽轮机自启动过程中，转速的给定值在一定范围内可以按事先规定的时间关系曲线变化，这种变化规律是根据汽轮机启动的工艺要求确定好了的。

（三）随动控制系统

有的系统，其被调量的给定值是时间的未知函数，这类系统称为随动控制系统（或称为伺服系统）。如电子自动电位差计中的自动指下和记录值是跟随与被测参数相应的电动势变化的。

二、按控制系统的结构分类

（一）开环控制系统

开环控制系统的控制设备和控制对象之间在信号传递上没有形成闭合回路，如图 1-4 所示。它是直接根据扰动了进行控制的，一般称为“前馈控制”。在扰动作用于控制对象、使输出量 y 发生变化的同时，扰动 f 也被直接送入调节器，调节器根据扰动的大小发出一个控制指令 μ 作用于控制对象去克服扰动对输出量 y 的影响。如果控制作用大小整定合适，就有可能抵消扰动的影响，使输出保持不变例如、蒸汽流量增加会使锅炉汽包水位下降，可将蒸汽流量信号直接引入前馈调节器，在蒸汽流量增加的同时，开大给水调节阀，增加给水流量，就能有效地减小蒸汽流量扰动对汽包水位的影响。但是，如果仅有前馈调节，没有输出量 y 的反馈，就无法克服其他扰动的影响，故前馈控制在生产过程中一般不单独采用。

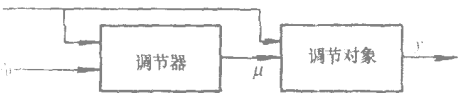


图 1-4　开环控制系统方块图

（二）闭环控制系统

闭环控制系统即反馈控制系统，系统中的被调量信号反馈到输入端作为调节器产生控制作用的依据。只要被调量的偏差存在，控制设备就不停地向控制对象施加控制作用，直到被调量符合要求为止。图 1-2 所示的给水控制系统就是反馈控制系统的例子。单元机组自动控制系统大都属于闭环控制系统。

（三）复合控制系统

在反馈控制的基础上，加入主要扰动的前馈控制，构成复合控制系统，或称为前馈一反馈控制系统，如图 1-5 所示。复合控制系统综合了开环控制和闭环控制各自的优点。当外界扰动 f 作用于控制系统时，在输出量还没有反应之前，先按开环原理进行粗调（μ_1 控制作用），尽量使控制作用 μ_1 在一开始就抵消扰动 f 对控制对象的大部分影响，使被调量不发生变化或者变化很小。如果 μ_1 控制作用不是恰到好处，被控制量 y 有了一些偏差，则可以通过反馈回路进行细调（μ_2 控制作用），使被调量 y 等于给定值 y_0。因此，这类系统对于特定的扰动作用来说，能获得比一般反馈控制系统更好的控制效果。

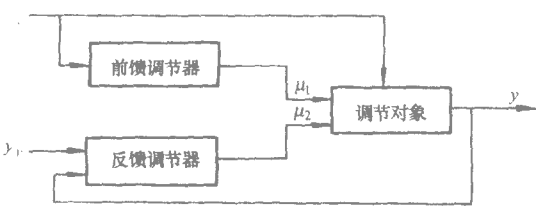


图 1-5　前馈一反馈控制系统方块图

三、按控制系统闭合回路数目分类

一）单回路控侧系统

单回路控制系统中，只有一个被调量反馈到调节器的输入端，只形成一个闭合回路，系统结构比较简单，如图 1-2 所示。单回路控制系统也称单级控制系统。

（二）多回路控制系统

为了改善系统控制性能，可引入局部反馈，闭合回路数不只一个，这就形成了多回路控制系统。图 1-6 所示为具有两个回路的控制系统，这是多回路控制系统的一个例子。本系统中，由于两个调节器是串接在一起的，因此也称为串级控制系统。

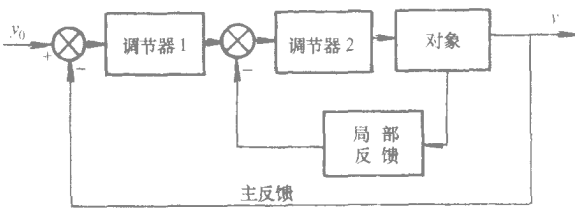


图 1-6　双回路控制系统方块图

四、其他分类

自动控制系统还可以根据其他特点进行分类。

（一）线性系统和非线性系统

控制系统可以（或近似可以）用线性方程式来描述的称为线性控制系统，必须用非线性方程式描述的系统称为非线性控制系统。

（二）连续拴制系统和采样拴制系统

连续控制系统中各环节的输入、输出信号都是时间的连续函数，被调量被连续地测量和连续地控制，故称为连续控制系统。每隔一段时间测量一次被调量与给定值的偏差，并对生产过程进行一次控制的系统称为采样控制系统。由于这类系统有一个或一个以上变量在时间上是离散的，故也称为离散控制系统，其工作原理与连续控制系统基本相同。用计算机作为控制设备组成的控制系统就是离散控制系统。

此外，还有其他自动控制系统的分类方法。单元机组自动控制中常用的是定值反馈控制系统，最基本的是单回路反馈控制系统。

1.2.4　控制过程品质指标

一、控制过程

控制系统在受到某一扰动后，被调量将偏离原来的稳态值而产生偏差，系统的控制作用又使其趋近于回到原来的稳态值，这一过程称为控制系统的控制过程，或称为过渡过程。对于定值控制系统，在受到扰动后，被调量的变化总是先偏离给定值，经历一个变化过程后，又趋近于给定值。以后，只要系统不受到新的扰动，系统中的参数就不再发生变化。因此，控制系统存在两种状态，即系统的稳态（静态）和动态。被调量不随时间变化的平衡状态称为系统的稳态（静态），稳态出现在控制过程结束之后。一个处于稳态的系统，一旦受到某一扰动，系统内部就会发生物质或能量的不平衡，被调量将偏离给定值而随时间变化，这种被调量随时间变化的不平衡状态称为系统的动态。干扰作用使系统由稳态进入动态，控制作用使系统克服扰动的影响，建立新的平衡，恢复到稳态。例如给水控制系统，当负荷发生扰动使蒸汽流量发生变化时，被调量水位就会发生变化，系统进入动态。调节器根据水位的偏差，发出控制指令，改变给水流量，使之与蒸汽流量重新平衡，被调量水位重新稳定在给定值上，系统重新进入稳态。这样，系统就经历了一个控制过程。所以，控制过程就是系统在控制设备的控制作用下，克服扰动的影响，从动态重新进入新的稳态的过程。

显然，在不同形式和幅度的扰动作用下，自动控制系统的控制过程是不一样的。实际生产过程中，可能遇到的扰动形式是多种多样的。为了分析控制系统工作品质的好坏，判断一个控制系统能否满足实际生产过程的需要，通常是选择实际控制过程中遇到的一种最典型、

最经常出现的扰动形式作为研究自动控制系统工作品质的标准输入信号。如果控制系统在这种标准信号扰动下能令人满意地完成控制任务，则在其他形式信号扰动下必然能满足实际工作的要求。在热力过程自动控制系统中，最常用的扰动信号是一种突然变化的信号，称为阶跃信号。阶跃信号的数学表达式为

$$x(t)=\begin{cases}0 & \text{当 } t<0 \text{ 时}\\ x_0 & \text{当 } t\geqslant 0 \text{ 时}\end{cases}$$

阶跃信号的函数曲线如图 1-7 所示，如果 x_0 值取 1 则称为单位阶跃信号。

图 1-7　阶跃信号函数曲线

在分析控制系统品质时，人们最关心的是系统在扰动作用下，被调量是否能通过控制作用恢复到稳态值。输入信号选定为阶跃信号后，研究的对象就是系统的输出信号了。控制系统在阶跃信号作用下，如果将其被调量（即系统的输出信号 y）随时间的变化规律用一条曲线来描述，则该曲线称为控制系统的过渡过程曲线，或称为系统的阶跃响应曲线。人们可以通过对过渡过程曲线的研究来评价控制系统的工作品质。

自动控制系统在阶跃信号作用下，其过渡过程可能具有如图 1-8所示的几种不同形式。由图 1-8（a）、图 1-8（b）表示的两种过渡过程可见，被调量在经历一个动态过程之后能够重新达到稳态值。具有这两种过渡过程的系统称为稳定的控制系统，其中图 1-8（a）所示过渡过程没有发生振荡，称为非周期过渡过程，图 1-8（b）所示的被调量在稳态值上下来回摆动几次，最后趋于稳态值，这是衰减振荡的过渡过程。图 1-8（c）、图 1-8（d）所示的过渡过程曲线表明被调量不能趋于一个稳态值，这类控制系统的过渡过程是不稳定的。图 1-8（c）所示的过渡过程是一个不衰减的等幅振荡过程，这种过程界于稳定与不稳定之间（称为边界稳定），属不稳定的范畴。图 1-8（d）所示被调量的幅值随着时间的增加而增大，称为渐扩振荡过程。具有这种过程的控制系统，一旦受到扰动，其被调量就可能会超过生产上允许的限值而发生事故，如给水控制系统就可能会发生锅炉缺水或满水事故。所以具有后两种过程的系统是不能采用的。

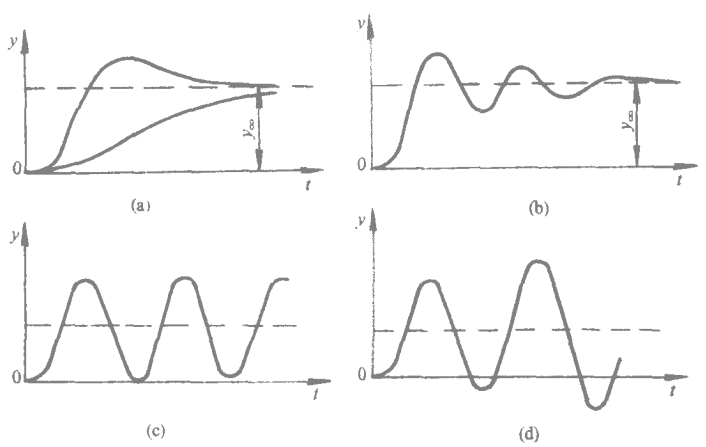


图 1-8　几种典型的过渡过程曲线

（a）非周期过渡过程；（b）衰减振荡过渡过程；

（c）等幅振荡过程；（d）渐扩振荡过程

需要全本请访问 www.ertongbook.com

二、控制过程品质指标

从生产过程的要求看，不仅希望控制过程是稳定的，而且希望自动控制系统能随时保持被调量与给定值相等，不受任何扰动的影响。但实际上扰动经常发生，被调量总会发生变化而产生偏差。从生产的要求和控制系统的实际出发，一般从稳定性、准确性和快速性三个方面来衡量控制系统的控制品质。

（一）稳定性

控制过程的稳定性是对控制系统的最基本要求，稳定性满足要求是控制系统能被采用的必要条件。只有稳定的控制系统才能完成自动控制的任务。在实际生产过程中，不仅要求系统是稳定的，而且要求系统具有一定的稳定性裕度，以保证系统在控制对象参数或控制设备参数发生变化时还能稳定地工作。控制系统的稳定性裕度一般用衰减率这个指标来衡量，即

$$\varphi = \frac{y_{m1} - y_{m2}}{y_{m1}} = 1 - \frac{y_{m2}}{y_{m1}} \tag{1-1}$$

式中 φ——衰减率；

y_{m1}、y_{m2}——被调量从新的稳态值 y_∞ 算起第一个波峰值和第二个波峰值，如图 1-9 所示。

衰减率和控制系统的稳定性之间有如下关系：

（1）$\varphi = 1$，即 $y_{m2} = 0$，过渡过程为非周期过程，如图 1-8（a）所示。

（2）$0 < \varphi < 1$，即 $0 < y_{m2} < y_{m1}$，过渡过程为衰减振荡过程，如图 1-8（b）所示。

（3）$\varphi = 0$，即 $y_{m1} = y_{m2}$，过渡过程为等幅振荡过程，如图 1-8（c）所示。

（4）$\varphi < 0$，即 $y_{m2} > y_{m1}$，过渡过程为渐扩振荡过程，如图 1-8（d）所示。

衰减率从等于 1 减小到小于零，过渡过程从稳定的非周期过程逐渐变化到不稳定的渐扩振荡过程，即系统的稳定性是随着衰减率下降而下降的，可以用 φ 值作为系统稳定性裕度的一种量度。φ 值越大，系统稳定性越高，一般要求控制系统的 φ 值为 0.75～0.9，即控制过程在振荡 2～3 次后就基本结束。

（二）准确性

生产过程不仅要求控制过程能够稳定，还要求被调量能稳定在给定值附近，并尽可能使之等于给定值。控制过程的准确性用稳态偏差和动态偏差来表示。动态偏差是指整个控制过程中被调量与给定值之间的最大偏差，用“E_{max}”表示。如图 1-9 所示，动态偏差可表示为

图 1-9　控制过程品质指标

$$E_{max} = y_{max} - y_0 \tag{1-2}$$

式中 y_{max}——被调量的最大幅值；

y_0——被调量的给定值。

通常要求控制系统保证在受到最大扰动情况下，其动态偏差不超过生产过程所允许的范围。

稳态偏差也称为静态偏差，是指控制过程结束后被调量与给定值之间的残余偏差，用 E_∞ 表示

$$E_\infty = y_\infty - y_0 \tag{1-3}$$

式中 y_∞——控制过程结束后被调量的数值。

系统的静态偏差一般与负荷有关，如 π 在负荷变动后系统的静态偏差为零，这种控制系统称为无差系统；反之如果静态偏差随负荷变化而变化，则称为有差系统。不同的生产过程对稳态偏差有不同的要求，一般要求静态偏差越小越好。

（三）快速性

快速性是指控制过程持续时间的长短，一般用控制过程时间来表示。控制过程时间就是从扰动引起被调量发生变化开始到被调量重新恢复到稳态值为止所经历的时间。在实际生产过程中，要使被调量与给定值绝对相等是不大可能的。一般用过渡过程曲线衰减到与稳态值之差 Δ 不超过 $\pm$（2～5）%稳态值所经历的时间 t_s 作为过渡过程时间，如图 1-9 所示控制过程时间越短，控制过程进行越快，说明控制系统克服扰动的能力越强。

必须指出，不同的生产过程对稳定性、准确性和快速性三个控制品质指标的要求（即它们的主次地位）是不同的。对一个控制系统同时要求这三个指标都很高往往是困难的。理论和实践分析都表明：这三个控制品质指标往往是相互矛盾的，例如提高了系统的稳定性、往往会使被调量的偏差增加，控制时间增长。实际应用过程中，必须根据具体的生产过程特点及工艺要求综合考虑。一般来说，总是在首先满足稳定性要求的前提下，尽可能提高系统的准确性和快速性。

1.3 热工控制对象的动态特性

自动控制系统是由控制对象和自动控制设备组成的。控制对象的输出就是控制系统的被调量，要分析研究控制系统的工作质量，设计或改造自动控制系统，首先必须分析控制对象的动态特性，并根据它来正确地选择和使用自动控制设备，确定调节器的最佳整定参数，使控制设备与控制对象相互协调配合，构成一个合理的控制系统，才能获得预期的控制效果。对于机组运行人员来说，熟悉控制对象的动态特性，也是正确使用好控制系统的必要前提。所以，研究热工控制对象的动态特性，是研究控制系统、实现生产过程自动化的基础工作。

控制对象的动态特性就是控制对象在动态变化过程中各种输入信号与输出信号之间的关系。影响控制对象输出的扰动分为外部扰动和内部扰动。凡是来自控制系统之外，引起被调量发生变化的各种原因，都称为外扰，而控制系统内部的扰动称为内扰。例如给水控制系统，给水流量和蒸汽流量的变化都会引起水位变化，但蒸汽流量的变化是用户需求变化引起的，调节系统本身无法控制，是系统的外扰，而给水母管压力变化引起的给水流量的变化是调节系统可以控制的，是系统的内扰。图 1-2 所示的汽包锅炉给水自动控制系统方块图中，当被调量水位变化时，调节系统是通过调节作用改变给水流量 W 来调节水位，使之恢复为给定值的，故称给水流量 W 到汽包水位之间 h 之间的信号作用路径为调节通道。而蒸汽流量变化是水位偏离给定值的原因，称由 D 到 h 之间的信号作用路径为干扰通道。内扰通过调节通道作用于对象，外扰通过干扰通道作用于对象。

热工对象的动态特性取决于它内部的物理性质、设备结构和运行条件等，原则上可以用分析方法求出它的动态特性。但对于复杂对象，用数学方法求取精确的动态特性表达式是困难的，通常是用实验方法求取对象的阶跃响应曲线，再利用阶跃响应曲线来进行系统分析、

设计和整定。

实际热工控制对象虽然种类很多，但基本上可以分为两类：一类是简单对象，称为单容对象；另一类是复杂对象，称为多容对象。单容对象只有一个储存物质或者能量的容积，而多容对象具有两个或两个以上储存物质或能量的容积。同一参数在多容对象内部各处的数值可能是不一致的，所以，这类对象又称为具有分布参数特性的对象。

1.3.1 单容对象的动态特性

单容对象是最简单的热工控制对象，电厂热工生产过程中许多储水容器，如除氧器、加热器、凝汽器等，在一定条件下都可看成是单容对象。研究单容对象的动态特性是研究复杂对象特性的基础。为了理解热工对象的基本性质，先研究单容对象的动态特性

一、单容对象的阶跃响应

图 1-10（a）所示的单容水箱就是单容对象的一个例子。图中水箱的截面积为 A；流入量为 q_1，由流入侧控制阀 1 控制；流出量为 q_2，流出侧阀门 2 的阻力为 R，水箱水位为 h。

设 t_0 时刻前，水箱系统处于平衡状态，即此刻的流入量 q_{10} 等于流出量 q_{20}（q_{10}、q_{20} 分别表示 q_1、q_2 在初始平衡状态的流量），水位稳定在某一值 h_0，流入侧控制阀开度为 μ_0。

t_0 时刻，控制阀 1 阶跃开大 $\Delta\mu$，即：$\mu = \mu_0 + \Delta\mu$；流入侧阀门的开大使流入量随即阶跃增加 Δq_1，即 $q_1 = q_{10} + \Delta q_1$；流出侧阀门 2 的开度不变，即 $q_2 = q_{20}$。这样，t_0 时刻的不平衡流量 $\Delta q = q_1 - q_2 = q_{10} + \Delta q_1 - q_{20} = \Delta q_1$。水箱水位在不平衡流量 Δq_1 的作用下开始上升，其上升速度与 Δq_1 成正比。水箱水位的上升要引起流出量 q_2 的增加，设增加量为 Δq_2，而且随着水位的上升，Δq_2 越来越大，不平衡流量由 Δq_1 变为 $\Delta q_1 - \Delta q_2$，越来越小，因此水位 h 的上升速度也就越来越慢。到 $\Delta q_1 = \Delta q_2$ 时，水位 h 不再上升而稳定在一个新的数值上。其过渡过程可用图 1-10（b 所示的阶跃响应曲线来描述（图中用 q_0 表示 Δq_1 的幅度，并将 Δq_1、Δq_2 简记为 q_1、q_2，以下同）。

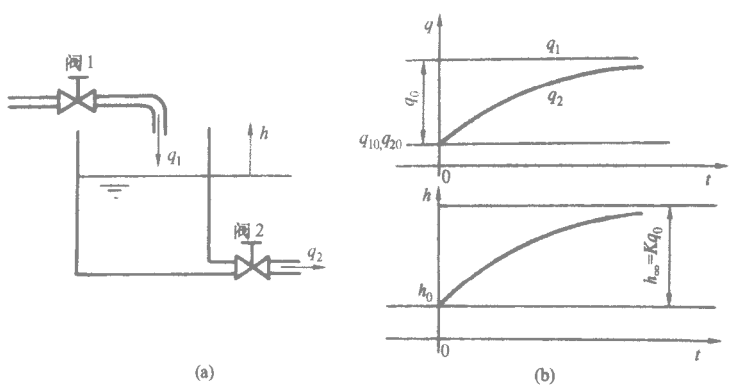


图 1-10 单容对象及其动态特性

（a）单容水箱；（b）单容水箱的阶跃相应曲线

田图可以看出，水箱水位在受到流入侧的流入量阶跃扰动后，开始上升速度较大，随后速度越来越小，最后变化速度为零。从水位 h 的数值上看，在扰动开始后并没有立即上升，而是经过一段时间后才上升到稳态值。我们将对象的这种特性称为惯性。从整个过渡过

程看，对象受到扰动后无需外力于预，水位能恢复到新的稳定状态，我们称这种对象具有自平衡能力。

二、单容水箱的动态方程

当水箱水位处于平衡状态时，$q_1 = q_2$，水位的变化量 h 等于零。t_0 时刻，控制阀 1 阶跃开大 $\Delta\mu$，流入量随即阶跃增加，幅度为 q_0，水位就会随之发生变化，设在 $\mathrm{d}t$ 时间内水位变化了 $\mathrm{d}h$，根据物质平衡原理可以写出方程

$$(q_1 - q_2)\mathrm{d}t = A\mathrm{d}h$$

$$\text{或 } A\frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}t} = q_1 - q_2 = \Delta q_1 - \Delta q_2 \tag{1-4}$$

式（1-4）中，流出量 q_2 与流出侧的流动阻力 R 和水箱水位 h 有关，当水位和流量在初始值附近变化范围不大时，流出量的变化量可写成

$$\Delta q_2 = h / R$$

将上式代入式（1-4）得

$$A\frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}t} = q_0 - h / R$$

$$AR\frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}t} + h = Rq_0 \tag{1-5}$$

对微分方程（1-5）求解可得

$$h(t) = Rq_0(1 - \mathrm{e}^{-t/T}) = Kq_0(1 - \mathrm{e}^{-t/T}) \tag{1-6}$$

式中 $T = AR$——对象的惯性时间常数；

$K = R$——对象的放大系数。

水位变化的初始速度为

$$\left.\frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}t}\right|_{t=0} = \left.\frac{Kq_0}{T}\mathrm{e}^{-\frac{t}{T}}\right|_{t=0} = \frac{Kq_0}{T} = \frac{q_0}{A} \tag{1-7}$$

如图 1-10（b）所示，t_0 时刻水位的变化速度最大，随后速度逐渐下降，水位慢慢趋于稳态值。水位的稳态值为

$$h(t)|_{t=\infty} = h(\infty) = Kq_0(1 - \mathrm{e}^{-\frac{t}{T}})|_{t=\infty} = Kq_0 = Rq_0 \tag{1-8}$$

当 q_1 扰动时，水位对象是一个惯性环节。环节的惯性时间常数为 R 与 A 之积。放大系数在数值上等于 R。截面积 A 主要影响水位的变化速度，阻力 R 主要影响水位的稳态值，即新的平衡位置与原平衡位置之间的距离。所以对象的动态特性主要是由对象的结构参数和物理性质决定的。现在来分析一下影响单容对象动态特性的两个主要因素——对象的容量和阻力。

三、影响单容对象特性的因素

（一）对象的容量

设有 A、B 两个水箱，水箱 A 的截面积 A_1 为水箱 B 的截面积 A_2 的 2 倍，其他条件相同，即

$$A_1 = 2A_2;\quad R_1 = R_2$$

两个水箱的 $h \sim q$ 之间的关系都可用式（1-6）描述，且有

$$T_1 = 2T_2;\quad K_1 = K_2$$

由式（1-6）很容易得到它们的阶跃响应曲线，如图 1-11 所示。曲线 1、2 分别表示水箱 A、B 的阶跃响应曲线。由式（1-7）和式（1-8）可知如果从阶跃响应曲线的初始点作一条切线与水位的稳态值水平线相交，则交点所对应的时间就是惯性时间常数 T。如图所示，两条曲线所对应的时间分别是 T_1、T_2。可见，在受到同样大小的扰动作用后，两水箱水位的变化量最终是相等的，但变化速度不一样这是因为水箱 A 截面积较大，水位单位变化时水箱储存（或者排出）的水量也大，在流入量相同时，水位变化速度就慢了，由于两水箱水位具有相同的稳态值，动态过程中 A 储存（或排出的水量比 B 多，所以过渡过程时间就长

一般地，把输出量每变化一个单位时，对象储存物质或能量的变化量称为对象的容量系数，用符号“C”表示。如，在水位对象中，容量系数可表示为

实际上，因为 $\mathrm{d}V=(q_1-q_2)\,\mathrm{d}t=A\mathrm{d}h$，因此，本例中，容量系数 C 在数值上等于截面积 A。单容水箱的容量系数就是水位上升（或下降）一个单位高度时，需要加入（或排出）水的数量。从控制的角度看，对象的容量系数是十分重要的，因为容量系数越大，对象储存物质或者能量的能力就越强，在流入量与流出量不平衡时，被调量的变化就越慢，对控制的要求就越低。反之，对象容量系数越小，在流入量与流出量不平衡时，被调量的变化就越快，控制任务就越重。所以也可以说，对象的容量系数越大，对象承受扰动的能力就越强。

同理，在电路中，对电容器，其储存的电荷量 Q 的多少是由其端电压 U 来表示的，即电容器的容量系数为

$$C=\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}U}$$

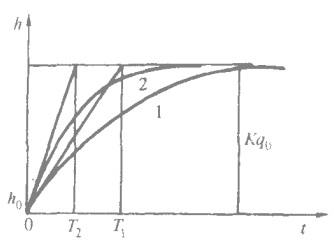


图 1-11　对象容量系数对动态特性的影响

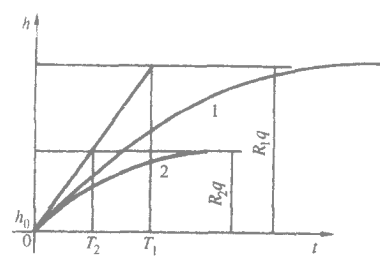


图 1-12 对象阻力对动态特性的影响

（二）对象的阻力

从图 1-10 所示的例子可以看出，水箱的流动阻力同时影响过渡过程时间和被调量的稳态值。如果两个水箱 A、B 截面积相等，但水箱 A 的阻力是水箱 B 的 2 倍，即

$$A_1=A_2,\quad R_1=2R_2$$

则有

$$T_1=2T_2;\quad K_1=2K_2$$

庄式（1-6）可以得到它们的阶跃响应曲线，如图 1-12 所示。图中曲线 1、2 分别表示水箱 A 和 B 的过渡过程。扰动前两水箱水位相等（初始水位为 h_0，在坐标原点），扰动开始

后，两箱水位同时开始发生变化。很显然，与水箱 B 相比，水箱 A 不仅有较长的过渡过程时间，而且还有较高的稳态值，即

$$h_1(\infty) = 2h_2(\infty)$$

对象重新进入稳态的条件是流入量与流出量相等。流入量增加了 q_0，流出量也要增加 q_0，而且，流出量的增加是以水位偏离初始值 h_0 为代价的。流量变化量一定时，阻力越大，水位偏离初始值越远。所以在相同的流量扰力下，水箱 A 比 B 有较高的稳态值，水位变化量越大，动态过程中储存（或排出）的水量越多，过渡过程时间越长。但是，尽管水箱 A 的时间常数比 B 的大，这并不意味着水箱 A 的水位变化速度比 B 慢。从图 1-12 可以看出：水箱 A 不仅比 B 有较高的稳态值，而且在 $t>0$ 时，h_1 比 h_2 变化速度更快，这是人们不希望的。所以，从控制的角度考虑，希望对象的阻力越小越好。一般地，对象的阻力与它的负荷有关，当负荷下降时，对象阻力增加，对象的动态特性变坏，更不利于控制。

影响单容对象特性的两个参数是容量系数 C 和阻力 R，它们之积为对象时间常数 T。从式（1-6）可以看出，是惯性时间常数 T 决定了单容对象的过渡过程时间。

当 t 趋于无穷时，$h = Kq_0$；

当 $t = 3T$ 时，$h = Kq_0(1 - e^{-3}) = 0.95Kq$

这就是说，当扰动经历的时间达 $3T$ 时，被调量水位 h 已达稳态值 Kq_0 的 95%，在工程上就可认为系统已进入稳态显然，惯性时间常数 T 越大，对象惯性越大，过渡过程时间越长。

工程上，常用飞升速度 ε 来描述对象的惯性。飞升速度 ε 定义为单位阶跃扰动下被调量的最大变化速度，即

$$\varepsilon = \text{被调量的最大变化速度} / \text{阶跃输入量} \quad (1\text{-}9)$$

对图 1-10 所示的单容对象，由式（1-7）可知，过渡过程曲线在初始时刻速度最大

$$\left.\frac{dh}{dt}\right|_{t=0} = \frac{Kq_0}{T}$$

根据定义有

$$\varepsilon = \frac{\left(\frac{dh}{dt}\right)_{max}}{q_0} = \frac{\left.\frac{dh}{dt}\right|_{t=0}}{q_0} = \frac{K}{T} = \frac{1}{A} \quad (1\text{-}10)$$

式（1-10）表明，对象的时间常数越大，飞升速度 ε 越小，对象的惯性就越大。

四、对象的自平衡能力

（一）有自平衡能力的对象

图 1-10 所示的单容对象，在初始平衡状态时，流入量 q_{10} 等于流出量 q_{20}，水位 h_0 等于 0，t_0 时刻流入量阶跃上升 q_0，由于 $q_1 > q_2$，水位开始上升。水位上升的结果，使流出量 q_2 自表增加，流入量与流出量的不平衡逐渐减小，水位上升速度变缓。最后，在一定的水位下流入量与流出量之间自动达到新的平衡。这表明，控制对象在受到扰动、平衡破坏后，不要外界帮助，能通过被调量的自身变化来克服扰动的影响，达到新的平衡。这种对象自己重新建立平衡的特性称为对象的自平衡特性。具有自平衡特性的对象也称为有自平衡能力的对象。

对象自平衡实质上是对象输出量变化对输入量发生影响的结果，或者说，对象内部存存

需要全本请访问 www.ertongbook.com