

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



ZIDONG TIAOJIE
YUANLI JI XITONG

自动调节 原理及系统

(第二版)

张丽香 林金栋 降爱琴 编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



TM621.6/3

2007

ZIDONG TIAOJIE
YUANLI JI XITONG

自动调节 原理及系统

(第二版)

张丽香 林金栋 降爱琴 编
杨 平 主审



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书较全面地阐述了自动调节的基本理论,以经典控制理论的时域和频域分析方法为主,讲述了调节系统的分析和整定方法;结合 300、600MW 机组的控制系统实例,讲述了火电厂大型单元机组过程控制系统的构成及工作原理。

此次修订的内容更注重理论与实际现场控制方案紧密结合,充分体现了大型火电生产自动控制技术的进步。

本书可作为高等院校能源动力类专业本科教材,也可作为高职高专电力技术类专业教学用书,同时可供相关科技人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

自动调节原理及系统/张丽香等编. —2 版. —北京:中国电力出版社, 2007

普通高等教育“十一五”规划教材

ISBN 978-7-5083-5896-3

I. 自... II. 张... III. ①火电厂—自动调节—理论—高等学校—教材②火电厂—自动调节系统—高等学校—教材
IV. TM621.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 100953 号

中国电力出版社出版、发行

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

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

1996 年 11 月第一版

2007 年 8 月第二版 2007 年 8 月北京第三次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 20 印张 489 千字

印数 5431—8430 册 定价 32.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

再版前言

本书的第一版是 1996 年出版的,到现在已经近十一年了。使我们深感荣幸的是,本教材受到了不少大专院校师生的欢迎,被选为相关专业的主要教材和主要教学参考书,同时也受到许多发电生产企业热工自动控制、集控运行、热能动力等相关技术人员的欢迎。

此次再版,我们努力保持第一版原有的优点,并力求克服原教材中的缺点,特别是随着大型火电生产自动控制技术的进步,原书的某些部分显然已经落后了。近十多年来,火电生产过程控制与其他工业自动化一样,发生了巨大的变化。主要体现在两个方面:一方面是 DCS 系统已成为目前控制装置的主流,火电机组大多设计成机、炉、电监测,控制与保护连锁一体化的结构,自动化的范围不断扩大,覆盖了整个生产过程。集散控制系统除了完成常规的过程信息采集、数据处理、设备启停与控制以及参数越限情况的必要保护动作外,控制装置自身及控制系统故障检测与诊断有效地提高了生产的安全性和可靠性,操作优化与系统优化给发电机组带来了十分显著的经济效益,同时集散控制系统与管理自动化结合正在向着综合自动化的目标发展。另一方面是随着先进控制理论、智能决策方法的不断完善与发展,将智能控制与经典 PID 控制相结合研究成功的综合控制策略在复杂被控过程控制中得到了成功应用,为解决生产过程控制难题开拓了更有效的方案。再版后的内容更注重理论与实际现场控制方案紧密结合,加入了 300、600MW 机组的控制系统实例,删去不少现在看来较次要的内容。

本书第一章至第四章基本维持一版内容没变,第五章~第十一章由张丽香和降爱琴执笔。本书由上海电力学院杨平教授主审。不妥之处欢迎读者批评指正。

编者

2007 年 5 月

目 录

再版前言

绪论	1
第一章 自动调节的基本概念	2
第一节 生产过程的自动调节	2
第二节 自动调节系统方框图	3
第三节 环节特性	4
思考题与习题	12
第二章 自动调节系统的数学描述	14
第一节 拉普拉斯变换	14
第二节 传递函数	24
第三节 系统方框图与信号流图	28
第四节 脉冲响应函数和阶跃响应函数	35
第五节 典型环节的动态特性	39
第六节 简单物理过程的建模	50
思考题与习题	55
第三章 调节系统的时域响应分析	58
第一节 概述	58
第二节 二阶系统分析	59
第三节 高阶系统的瞬态响应分析	69
第四节 劳斯稳定判据	71
第五节 稳态误差分析及误差系数	76
思考题与习题	81
第四章 调节系统的频域响应分析	83
第一节 频率响应特性的概念	83
第二节 典型环节及对象的频率特性	87
第三节 二阶系统的频率响应特性	92
第四节 频率特性稳定判据	94
思考题与习题	107
第五章 单回路反馈调节系统	109
第一节 调节系统的性能指标	109
第二节 单回路调节系统的组成	113
第三节 单回路调节系统的整定	138
第四节 调节系统的工程整定方法	153
思考题与习题	158

第六章 常用复杂调节系统	161
第一节 串级调节系统	161
第二节 前馈—反馈调节系统	163
第三节 比值调节系统	166
第四节 自动选择性调节系统	168
第五节 大迟延过程的调节方案	170
第六节 自动调节系统的无扰切换和跟踪	173
第七节 火电厂单元机组自动控制综述	174
思考题与习题	182
第七章 汽包锅炉给水自动调节系统	183
第一节 给水调节任务和给水对象动态特性	183
第二节 给水自动调节系统方案	185
第三节 600MW 机组全程给水自动调节系统实例	199
思考题与习题	204
第八章 汽包锅炉蒸汽温度自动调节系统	205
第一节 蒸汽温度调节任务和调节对象特性	205
第二节 过热汽温自动调节系统方案	208
第三节 再热汽温自动调节系统方案	220
第四节 2093t/h 锅炉蒸汽温度自动调节系统实例	222
思考题与习题	227
第九章 汽包锅炉燃烧过程自动调节系统	228
第一节 燃烧过程调节的任务和调节对象的特性	228
第二节 燃烧调节系统的基本方案	231
第三节 300MW 机组燃烧过程自动调节系统实例	240
思考题与习题	249
第十章 汽轮机电液控制系统	250
第一节 汽轮机数字电液控制系统概述	251
第二节 DEH 转速调节系统	264
第三节 DEH 负荷调节系统	275
思考题与习题	282
第十一章 单元机组负荷自动控制系统	283
第一节 负荷自动控制系统概述	283
第二节 单元机组负荷控制系统的运行方式	285
第三节 机炉协调控制系统的典型方案	288
第四节 单元机组负荷控制系统	297
思考题与习题	311
参考文献	313

绪 论

火力发电厂大型单元机组是典型的热工生产系统。单元机组是由锅炉、汽轮机、发电机和辅机等设备构成的庞大的设备群。其工艺流程复杂,主、辅设备众多,管道纵横交错,而且随着机组容量的增大、蒸汽参数的提高,整个机组的结构也愈加复杂:有近万个参数需要监视、操作或控制,运行方式多样,切换关系复杂,对象特性多变及非线性,因而单元机组也是一个典型的多输入多输出相互耦合的复杂控制对象。

显然,没有先进的自动化设备和控制系统要想使机组正常运行是根本不可能的,对于具有高度安全性和经济性要求的大型单元机组而言更是如此。所以,大型单元机组的自动化水平受到特别的重视。以某 350MW 单元机组为例,计算机集散控制系统(distributed control system, DCS)所处理的 I/O 量共计 6400 多点,使用了共 13 对冗余的过程控制站,DCS 覆盖的控制功能包括:单元机组数据采集系统(data acquisition system, DAS)、单元机组操作维护系统(operation maintenance, OMD)、炉膛安全监控系统(furnace safeguard supervisory system, FSSS)或燃烧器管理控制系统(burner management system, BMS)、单元机组协调控制系统(coordination control system, CCS)、单元机组模拟量控制系统(modulating control system, MCS)、单元机组顺序控制系统(sequence control system, SCS)、汽轮机数字电液控制系统(digital electric-hydraulic system, DEH)、单元机组旁路控制系统(bypass control system, BPCS)、辅机控制系统、电气系统逻辑控制功能(ECS)等。另外,还有部分控制项目是由专用控制设备实现的,如汽轮机监测仪表(turbine supervisory instrument, TSI),给水泵汽轮机电液控制系统(machine electric-hydraulic system, MEH)等。

电厂中公用系统及其他辅助系统则采用 PLC 等专用装置完成控制,重要的信息通过通信或者硬接线等方式,传送到 DCS 中进行显示、归档以及供其他控制功能使用。在控制室不设热工、电气常规仪表和后备手操装置,运行人员可以通过任一台 CRT 和大屏幕显示器对机组的运行或者控制系统的工作状态进行操作干预。单元机组的各种信息在 DCS 覆盖的各种控制系统中,达到了很高的共享度。

单元机组启、停及正常运行全部过程的控制,只需运行人员在启、停、运行过程的若干控制选择点上进行运行方式的选择,或者启、停条件确认,即可由控制系统完成全部的控制功能。在机组控制系统处于全部自动运行状态下,运行人员无须对机组运行状态和参数进行干预。各级控制系统还可以选择手动方式运行。但是,主辅机的各种连锁、保护功能和安全、经济运行的边界和限制条件,无论控制系统处于自动或手动方式,都在起作用。从而保证机组总是运行在安全经济区内。

在控制系统的结构方面,采用了一些有效措施和先进控制策略,提高控制系统的工作范围,增加和改善调节系统的自适应性,以满足各个控制子系统全程工作的要求。

本教材内容分为两大部分,第一章至第五章介绍电厂热工自动调节基本原理,重点讲授经典控制理论在热工自动调节系统中的应用。第六章至第十一章介绍热工自动调节系统的基本组成结构和工作原理,重点讲授大型单元机组模拟量控制系统的基本方案、特点及应用实例。

第一章 自动调节的基本概念

第一节 生产过程的自动调节

一、人工调节和自动调节

生产过程中,为了保证产品质量和保证生产过程的正常进行,需要对一些物理参数进行调节。以电厂汽包炉的水位调节为例,水位调节的任务是保持汽包水位在正常值,以保证锅炉的安全运行。汽包水位反映了进入锅炉内的给水量与锅炉送出的蒸汽量之间的质量平衡关系,而锅炉的产汽量取决于汽轮机用汽量的多少,为了维持汽包水位在正常值,就需要经常地调整给水量的大小。水位调节的任务可以用两种方法来实现。

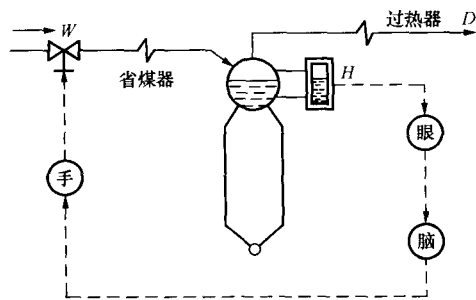


图 1-1 汽包水位人工调节
 H —水位信号; D —蒸汽流量信号;
 W —给水流量信号

1. 人工调节

人工调节如图 1-1 所示。人工调节过程通过人的三个器官来完成:眼——用来观察水位的变化情况,并将观察到的信息通过神经系统传至大脑;脑——对传送到的水位变化信息进行思考、分析比较并做出判断,发出开大或关小给水调节阀门的调节命令;手——执行由大脑传递来的调节命令,调整阀门的开度,以改变给水流量 W ,将水位 H 恢复在正常值上。三个器官的作用归纳为:眼起观察作用;脑起运算作用;手起执行作用。人工调节的质量取决于人员的运行经

验和操作的熟练程度,调节精确度较低。

2. 自动调节

上述的水位调节任务也可以用一套仪表来实现。用一套仪表取代人工操作完成调节任务称为自动调节。水位的自动调节如图 1-2 所示。这里用变送器(含水位发信装置)取代人的眼,起观察作用;用调节器取代大脑,起运算作用,即比较水位测量信号 H 与正常水位 H_0 之偏差,运算后发出调节信号;用执行器取代手,起执行调节命令的作用,即调节给水阀开度,改变给水流量的大小,使之与蒸汽流量相平衡,维持汽包水位在正常值。

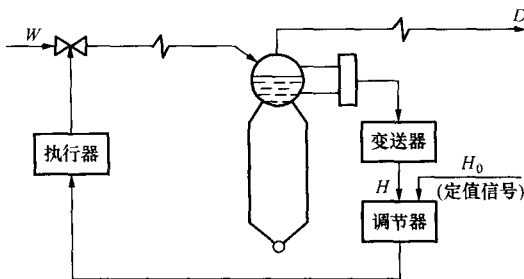


图 1-2 汽包水位自动调节

在自动调节领域内,经常使用一些专业术语,在此以水位调节为例介绍几个常用术语:

- (1) 被调节的生产过程或设备(如锅炉汽包水位),称为调节对象;
- (2) 生产过程中需要调整的参数(如水位值),称为被调量;
- (3) 希望被调量保持的数值(如水位的正常值),称为给定值;

- (4) 引起被调量（如水位）变化的因素（如给水流量、蒸汽流量），称为扰动量；
 (5) 完成调节任务的仪表称为调节仪表，也可统称为调节器。

二、自动调节系统的组成

由前例可知，汽包炉水位调节系统由调节对象和调节器两个基本部分组成，在调节过程中，这两部分是相互作用的。当被调量因扰动而变化后，其值与给定值之差作用于调节器，使调节器动作。调节器通过执行器去控制调节阀开度，使给水量变化，给水量变化又反过来作用于调节对象，从而使被调量逐步趋近其给定值。由此可见，调节对象和调节器形成的闭合系统能自动完成调节任务，称之为自动调节系统，如图 1-3 所示。如果将虚线框作为一个整体考虑，则图 1-3 可以改变为图 1-4 所示形式。

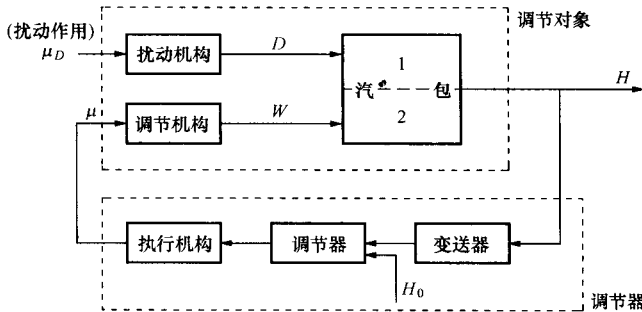


图 1-3 水位调节系统框图

μ_D —蒸汽负荷扰动作用； μ —调节作用

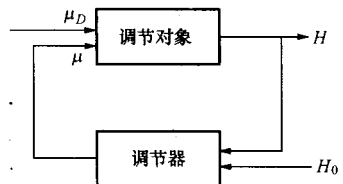


图 1-4 调节系统组成

第二节 自动调节系统方框图

自动调节系统方框图可以清楚地表示出系统中变量的传递关系及组成系统的各个元件的功能。一个单回路反馈调节系统如图 1-5 所示。图中，每一个方框代表一个元件的某种功能，该功能不是指这个元件在生产过程中的物理功能，而是指在调节系统中的信号转换功能。每一个方框在自动调节系统中被称之为一个环节，如图 1-6 所示。每个环节上都作用有输入信号和输出信号，用有箭头的线段来表示。箭头指向环节的信号为输入信号；箭头离开环节的信号为输出信号。

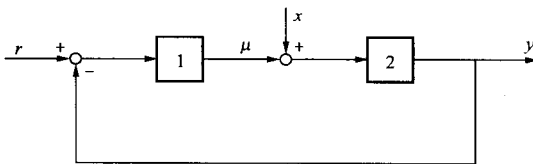


图 1-5 单回路反馈调节系统

x —扰动量； y —被调量； r —给定值；

1—调节器；2—调节对象； μ —调节作用

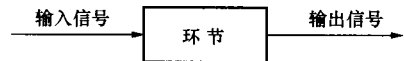


图 1-6 环节框图

当环节的输入信号改变时，其输出信号将按某种特定的规律变化，两者间具有内在的因果关系（函数关系），这种关系反映了环节具有某种功能，因此可以把输出信号看作是环节对输入信号的反映。需要指出的是，环节的输出信号变化不会反过来影响环节的输入信号。

图 1-5 所示为单回路反馈调节系统, 设该系统为稳定无差调节系统, 即过程结束时, 系统中各个信号(变量)均处于稳定状态, 且被调量等于给定值($y=r$)。环节 1(调节器)的输出 μ 一定, 扰动量 x 不变, 所以环节 2(对象)的输入不变, 其输出也不变。若某一时刻人为地改变给定值 r , 则 $y \neq r$, 环节 1 的输入信号发生变化, 环节 1 的输出信号 μ 则按其所确定的规律(函数关系)而变化。 μ 的变化使环节 2 的输入改变, 于是环节 2 的输出 y 也将按其所确定的规律变化。被调量 y 经闭合回路反馈到环节 1 的输入端, 整个系统处于动态过程中。经过不断的相互作用, 被调量最终与给定值相平衡, 系统重新进入稳定状态。

由以上分析可知, 自动调节系统是一个动态系统, 而方框图可表示出动态过程中各个变量之间的关系。

对方框图可以作如下总结:

(1) 方框图中的每一方框表示一个环节, 该方框并不是代表一个设备或部件的结构, 而是反映作用于这个环节上的输入、输出信号间的内在因果关系;

(2) 方框图表示的是调节系统动态过程中信号传递与转换关系, 而不是生产流程, 箭头方向不是物质的流动方向;

(3) 对于每一个环节, 信号的作用方向是不可逆的, 具有单向性;

(4) 对同一系统, 方框图的形式不是唯一的。

第三节 环节特性

欲分析一个自动调节系统, 首先要了解组成该系统的各个环节的特性。所谓环节特性, 系指环节输入与输出信号之间的函数关系。环节特性分为:

(1) 静态特性。指稳定状态下, 输入与输出信号间的函数关系;

(2) 动态特性。指动态过程中, 输入与输出信号间的函数关系。

一、环节的静态特性

调节系统中, 系统的平衡状态(稳定状态)是由各个环节的静态配合来实现的, 环节的静态特性不良, 将直接影响调节效果, 系统中各元件静态特性良好是实现自动调节的先决条件。

环节的静态特性可以用平衡状态下环节的输入、输出之间的函数方程式来描述, 或者用输入、输出关系曲线来描述。图 1-7 给出了几个环节静态特性示例。其中图 1-7(a) 是 RC 电路构成的环节, 以电压 u_r 为输入量, 以电容两端电压 u_c 为输出量, 其静态特性为一直线, 即 $u_c = u_r$; 图 1-7(b) 是一个阀门, 以阀门前后的差压 Δp 作为输入量, 以通过阀门的流量 Q 作为输出量, 其静态特性为一条二次曲线, 可用方程式表示为

$$Q = \sqrt{\frac{\Delta p}{f_r}}$$

式中 f_r ——阀门的局部阻力系数。

图 1-7(c) 亦为一阀门。以阀门开度 μ 为输入量, 以流量 Q 为输出量, 其静态特性很难用确切的方程式来描述, 只能用如图 1-7(c) 所示的试验曲线来描述, 该曲线形状随阀芯型线的不同而有较大差异。

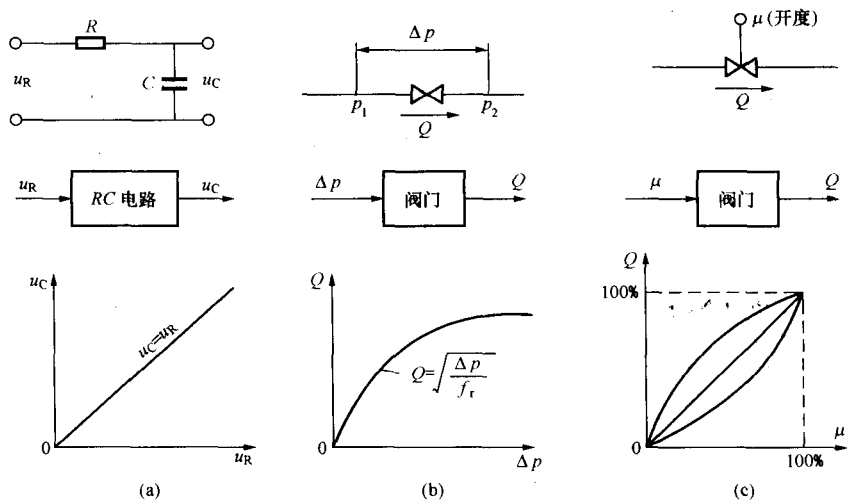


图 1-7 环节静态特性举例

(a) RC 电路; (b), (c) 阀门

二、环节的动态特性

当自动调节系统工作时,其内部各个环节的状态都处于变动之中,它们的输入量和输出量都随时间在变化。因此要想进一步研究调节系统的工作情况,就必须对各个环节的动态特性有深入的了解。

环节的动态特性通常可用环节的输入量和输出量之间的微分方程来描述,也可以令输入量为一定的时间函数而以输出量随时间变化的关系曲线来描述。下面举几个简单的例子。

【例 1-1】 由 RLC 串联电路组成的环节,其输入信号为电流 i , 输出信号为电压 u , 如图 1-8 所示。试建立该环节的动态方程。

解 由电工原理知

$$u = u_R + u_C + u_L$$

先找出各元件上电压、电流之间的关系:

$$u_R = iR; u_C = \frac{1}{C} \int_0^t i dt; u_L = L \frac{di}{dt}$$

所以

$$u = iR + \frac{1}{C} \int_0^t i dt + L \frac{di}{dt}$$

$$\frac{du}{dt} = L \frac{d^2 i}{dt^2} + R \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} i$$

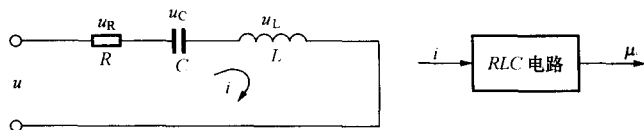


图 1-8 RLC 串联环节

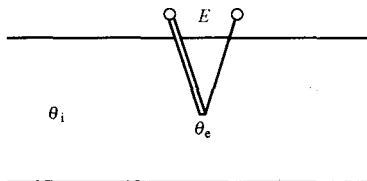


图 1-9 无保护套管热电偶

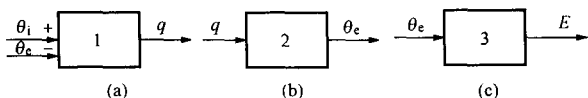
θ_i —介质温度; θ_e —热电偶热端温度; E —输出热电势

【例 1-2】 无保护套管的热电偶环节, 输入信号为被测介质温度 θ_i , 输出信号为热电偶输出电势 E , 如图 1-9 所示。试建立该环节的动态方程。

解 在介质温度改变的动态过程中, $\theta_e \neq \theta_i$, 存在传热过

程。为便于分析,将信号转换过程分为几步来考虑。

(1) 热电偶吸热过程用环节 1 来表示。该过程表示介质温度 θ_i 与热电偶热端温度 θ_e 之差的变化使流向热电偶的热量发生变化的过程。输入信号为温差 $\theta_i - \theta_e$; 输出信号为传热量 q 。环节 1 的框图见图 1-10 (a)。根据传热学有



$$q = \frac{1}{R}(\theta_i - \theta_e) \quad (1-1)$$

式中 R ——传热热阻。

(2) 热电偶吸热后,自身温度的变化过程用环节 2 来表示。该过程的输入信号为传热量 q ; 输出信号为热电偶热端温度 θ_e 。环节 2 的框图见图 1-10 (b)。根据热力学有

$$\theta_e = \frac{1}{C} \int_0^t q dt \quad (1-2)$$

图 1-10 热电偶环节框图

(a) 环节 1; (b) 环节 2; (c) 环节 3; (d) 热电偶环节

式中 C ——热电偶材料的热容。

(3) 热电偶热端温度变化引起其输出热电势变化的过程用环节 3 来表示。该过程的输入信号为热端温度 θ_e , 输出信号为热电势 E , 框图如图 1-10 (c) 所示。根据物理学有

$$E = \gamma \theta_e \quad (1-3)$$

式中 γ ——热电转换系数。

由式 (1-1) ~ 式 (1-3) 消去中间变量 q 、 θ_e , 得

$$E = \gamma \theta_e = \gamma \frac{1}{C} \int_0^t q dt = \frac{\gamma}{C} \int_0^t \frac{1}{R} (\theta_i - \theta_e) dt$$

对上式两边求导得

$$\frac{dE}{dt} = \frac{\gamma}{RC} (\theta_i - \theta_e) = \frac{\gamma}{RC} \left(\theta_i - \frac{E}{\gamma} \right)$$

整理后得

$$RC \frac{dE}{dt} + E = \gamma \theta_i$$

为一阶线性微分方程。将图 1-10 (a)、(b)、(c) 三个环节方框图按变量传递关系相互连接, 即可得到热电偶环节方框图, 如图 1-10 (d) 所示, 一般可改画为图 1-11 所示规范形式。

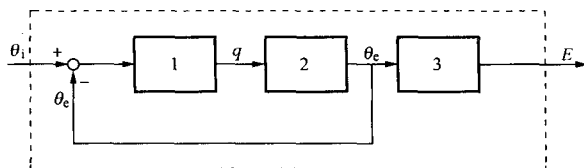


图 1-11 热电偶环节方框图

【例 1-3】 RC 电路见图 1-12, 试以外加电压 u_R 为输入信号, 以电容两端电压 u_C 为输出信号, 建立动态方程。

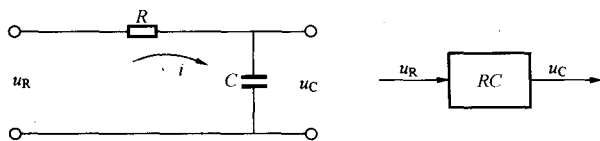


图 1-12 RC 电路

解 由电工学知, RC 电路的充电过程为外加电压 u_R 在 RC 回路上产生电流 i , 随着电流 i 对电容 C 不断充电而建立起输出电压 u_C 的过程, 故可以用两个环节来分析。

(1) 环节 1 为外加电压在 RC 电路中形成电流的过程。输入信号为电阻 R 上的电压差 $(u_R - u_C)$ ，输出信号为回路电流 i ，根据欧姆定律有

$$i = \frac{1}{R}(u_R - u_C) \quad (1-4)$$

环节 1 框图如图 1-13 (a) 所示。

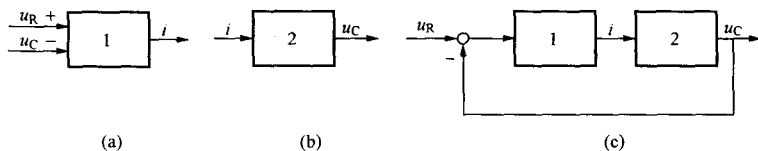


图 1-13 RC 电路方框图

(a) 环节 1; (b) 环节 2; (c) RC 电路环节

(2) 环节 2 为电流 i 对电容 C 的充电升压过程。输入信号为电流 i ，输出信号为电压 u_C ，根据电工学有

$$u_C = \frac{1}{C} \int_0^t i dt \quad (1-5)$$

框图如图 1-13 (b) 所示。

由式 (1-4)、式 (1-5) 消去中间变量 i ，得

$$\frac{du_C}{dt} = \frac{1}{C} i = \frac{1}{RC} (u_R - u_C)$$

所以

$$RC \frac{du_C}{dt} + u_C = u_R$$

为一阶线性微分方程。将图 1-13 中 (a)、(b) 框图按信号传递关系连接后便得到图 1-13 (c) 所示的 RC 电路方框图。

【例 1-4】 双容水箱如图 1-14 所示，两水箱底部由连通管连通，设进水流量为 Q_1 ，出水流量为 Q_2 ，液面高度为 h ，水箱 1 截面积为 A ，试以 Q_1 为输入信号， h 为输出信号建立环节动态方程。

解 由于水箱 2 有溢流管，所以液面高度恒定不变，出水流量 Q_2 即为由水箱 1 流入水箱 2 的流量。

(1) 水箱 1 为第一环节，设输入信号为流量差 $(Q_1 - Q_2)$ ，输出信号为液面高度 h ，则有

$$(Q_1 - Q_2) dt = A dh$$

$$\frac{dh}{dt} = \frac{Q_1 - Q_2}{A} \quad (1-6)$$

(2) 水连通管为第二个环节，输入信号为 h ，输出信号为 Q_2 ，根据水力学知，连通管中的流量为

$$Q_2 = \alpha \sqrt{h} \quad (1-7)$$

式中 α ——阻力系数，当 Q_2 变化不大时，可以视为常数。

将式 (1-7) 代入式 (1-6)，消去变量 Q_2 ，得

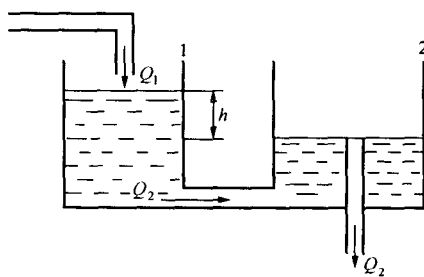


图 1-14 双容水箱

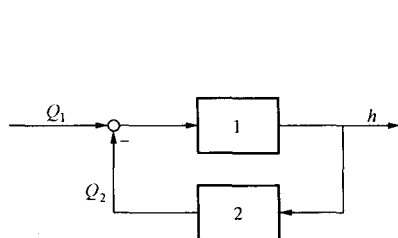


图 1-15 双容水箱方框图

$$\frac{dh}{dt} = \frac{Q_1}{A} - \frac{\alpha}{A} \sqrt{h}$$

所以

$$\frac{dh}{dt} + \frac{\alpha}{A} \sqrt{h} = \frac{Q_1}{A}$$

环节方框图见图 1-15。环节的动态方程中出现了变量的非一次幂项，故为非线性方程，此环节为非线性环节。在实际部件或设备中，都多少存在非线性问题，而非线性方程的解析较复杂，因此为分析问题简便起见，提出了非线性方程的近似线性化问题。

三、非线性方程近似线性化

在调节过程中，变量与其稳态值之间只会产生很小的偏差，因此，可以认为动态方程中各个变量所表示的是其增量（变量与稳态值间的偏差），而不是绝对值。这种形式的方程称为增量方程，采用动态增量方程便可方便地对非线性关系进行线性化处理。

1. 以增量方程表示环节的动态特性

增量方程式可由一般微分方程转化而得出，以例 1-2 为例，方法如下：

原方程为

$$RC \frac{dE}{dt} + E = \gamma \theta_i$$

(1) 确定额定工作点，写出静态方程，设额定工作点为 E_0 、 θ_{i0} ，则静态方程为

$$E_0 = \gamma \theta_{i0}$$

(2) 将原方程中瞬态变量用额定值与其增量之和来表示，即

$$E = E_0 + \Delta E$$

$$\theta_i = \theta_{i0} + \Delta \theta_i$$

代入原方程有

$$RC \frac{d(E_0 + \Delta E)}{dt} + (E_0 + \Delta E) = \gamma(\theta_{i0} + \Delta \theta_i)$$

即

$$RC \frac{d\Delta E}{dt} + E_0 + \Delta E = \gamma \theta_{i0} + \gamma \Delta \theta_i$$

(3) 变化后的动态方程减去静态方程，即得到增量方程

$$\left(RC \frac{d\Delta E}{dt} + E_0 + \Delta E \right) - E_0 = (\gamma \theta_{i0} + \gamma \Delta \theta_i) - \gamma \theta_{i0}$$

即

$$RC \frac{d\Delta E}{dt} + \Delta E = \gamma \Delta \theta_i$$

从形式上看，只要将原方程中变量瞬时值换成增量值，即可得到增量方程式。为简便起见，书写时可以省略“ Δ ”符号，这样增量方程的形式与原动态方程完全一样。今后如无特殊说明，均认为动态方程为增量形式。

2. 线性化方法

若方程中含有变量的非线性函数，可以用泰勒公式分解这些变量为额定点附近的增量表达式，然后略去高于一阶的微增量项，即可获得近似的线性函数。将方程中所有非线性项都用对应的线性函数代替，就可以得到近似的线性方程。

设 x 的多项式 $P(x)$ 在额定点 x_0 处的泰勒展开式为

$$P(x) = P(x_0) + P'(x_0)(x - x_0) + \frac{P''(x_0)}{2!}(x - x_0)^2 + \cdots + \frac{P^{(n)}(x_0)}{n!}(x - x_0)^n \quad (1-8)$$

设 $x - x_0 = \Delta x$, 略去二阶以上增量项有

$$\begin{aligned} P(x) &\approx P(x_0) + P'(x_0)\Delta x \\ \Delta P(x) &\approx P'(x_0)\Delta x \end{aligned} \quad (1-9)$$

例如, 某环节的输出 y 与输入 x 为非线性函数, 即

$$y = F(x)$$

则在额定点 x_0 附近的近似线性函数为

$$F(x) \approx F(x_0) + \left. \frac{dF}{dx} \right|_{x=x_0} \Delta x$$

用增量形式描述为

$$\Delta y \approx F(x) - F(x_0) = \left. \frac{dF}{dx} \right|_{x=x_0} \Delta x$$

由于 $\left. \frac{dF}{dx} \right|_{x=x_0}$ 为常数, 所以增量式为线性方程。

根据上述方法, 对例 1-4 的非线性方程进行线性化, 原方程为

$$\frac{dh}{dt} + \frac{\alpha}{A} \sqrt{h} = \frac{Q_1}{A}$$

两个环节的原始方程为

$$\frac{dh}{dt} = \frac{Q_1 - Q_2}{A} \quad (1-10)$$

$$Q_2 = \alpha \sqrt{h} \quad (1-11)$$

非线性因素是由方程式 (1-11) 引入的, 所以对式 (1-11) 进行线性化处理。设额定点为 Q_2, h_0 , 则

$$Q_2 \approx Q_{20} + \left. \frac{dQ_2}{dh} \right|_{h=h_0} \Delta h$$

$$\Delta Q_2 \approx \frac{\alpha}{2\sqrt{h_0}} \Delta h$$

即

$$Q_2 = \frac{\alpha}{2\sqrt{h_0}} h \quad (1-12)$$

式 (1-12) 代入式 (1-10) 有

$$\frac{dh}{dt} = \frac{Q_1}{A} - \frac{\alpha}{2A} \frac{1}{\sqrt{h_0}} h$$

所以

$$A \frac{dh}{dt} + \frac{\alpha}{2\sqrt{h_0}} h = Q_1$$

两点说明:

(1) 由于自动调节系统工作时, 系统中各个变量总是在某个平衡状态值 (额定点的值) 附近上、下变化, 且变化量一般很小, 因此可以以该额定值为起始点进行分析, 故系统或环节的动态方程都采用增量形式;

(2) 线性化处理是在某一额定点进行的, 额定点不同时, 线性化后微分方程的系数是不同的;

(3) 线性化处理只有在变量偏离额定点足够小时, 才能保证近似化的精确度。

【例 1-5】 双容水箱环节如图 1-16 所示。试以 h 为输出信号, Q_1 和 Q_2 为输入信号建立动态方程。

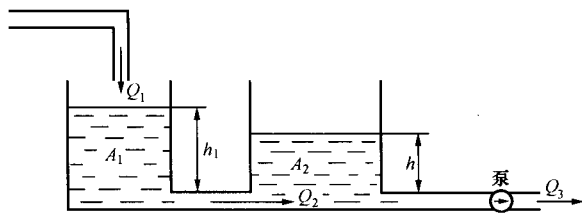


图 1-16 双容水箱环节

A_1 —第一水箱截面积; A_2 —第二水箱截面积; h_1 —第一水箱水位; h —第二水箱水位; Q_1 —流入水量;
 Q_2 —连通管水量; Q_3 —流出水量

解 为清楚起见, 可划分为几个小环节来考虑。

(1) 第一水箱 (环节 1)。输入信号为 $(Q_1 - Q_2)$ 流量差, 输出信号为 h_1 水位, 根据质量平衡原理有

$$(Q_1 - Q_2)dt = A_1 dh_1$$

$$A_1 \frac{dh_1}{dt} = Q_1 - Q_2 \quad (1-13)$$

(2) 水连通管 (环节 2)。输入信号为 $(h_1 - h)$ 差压信号, 输出信号为 Q_2 流量, 根据水力学有

$$Q_2 = \sqrt{\frac{h_1 - h}{f_r}} \quad (1-14)$$

式中 f_r ——局部阻力系数。

(3) 第二水箱 (环节 3)。输入信号为 $(Q_2 - Q_3)$ 流量差, 输出信号为水位 h , 根据质量平衡原理有

$$(Q_2 - Q_3)dt = A_2 dh$$

$$A_2 \frac{dh}{dt} = Q_2 - Q_3 \quad (1-15)$$

各环节的方框图及双容水箱环节的方框图如图 1-17 所示。将三个小环节框图按信号传递关系连在一起即构成双容水箱环节的方框图。其中第二环节为非线性环节, 应进行线性化处理, 设额定点为 Q_{20} 、 h_{10} 、 h_0 , 则有

$$Q_{20} = \sqrt{\frac{h_{10} - h_0}{f_r}}$$

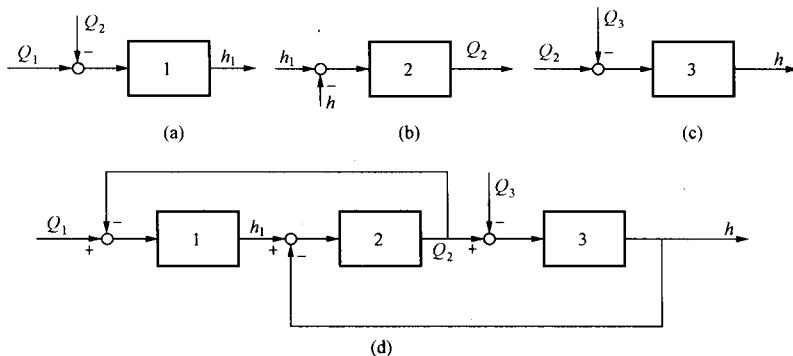


图 1-17 例 1-5 双容水箱环节方框图

$$Q_2 = Q_{20} + \left. \frac{dQ_2}{d(h_1 - h)} \right|_{\substack{h=h_0 \\ h_1=h_{10}}} [(h_1 - h) - (h_{10} - h_0)]$$

而

$$\left. \frac{dQ_2}{d(h_1 - h)} \right|_{\substack{h=h_0 \\ h_1=h_{10}}} = \frac{1}{\sqrt{f_r} 2} \left. \frac{\sqrt{h_1 - h}}{(h_1 - h)} \right|_{\substack{h=h_0 \\ h_1=h_{10}}} = \frac{1}{2} \frac{Q_{20}}{h_{10} - h_0}$$

令

$$\left. \frac{dQ_2}{d(h_1 - h)} \right|_{\substack{h=h_0 \\ h_1=h_{10}}} = \frac{1}{R}$$

则有

$$Q_2 = Q_{20} + \frac{1}{R} [(h_1 - h) - (h_{10} - h_0)]$$

增量式为

$$\Delta Q_2 = \frac{1}{R} \Delta(h_1 - h)$$

即

$$Q_2 = \frac{1}{R} (h_1 - h) \quad (1-16)$$

式中 R ——线性化后连通管的阻力系数。

消去式 (1-13)、式 (1-15)、式 (1-16) 中间变量 h_1 , Q_2 由式 (1-16) 有

$$\frac{dQ_2}{dt} = \frac{1}{R} \frac{dh_1}{dt} - \frac{1}{R} \frac{dh}{dt}$$

即

$$\frac{dh_1}{dt} = R \frac{dQ_2}{dt} + \frac{dh}{dt} \quad (1-17)$$

由式 (1-15) 有

$$A_2 \frac{d^2 h}{dt^2} = \frac{dQ_2}{dt} - \frac{dQ_3}{dt}$$

即

$$\frac{dQ_2}{dt} = A_2 \frac{d^2 h}{dt^2} + \frac{dQ_3}{dt} \quad (1-18)$$

将式 (1-18) 代入式 (1-17), 得

$$\frac{dh_1}{dt} = RA_2 \frac{d^2 h}{dt^2} + R \frac{dQ_3}{dt} + \frac{dh}{dt} \quad (1-19)$$

将式 (1-19) 代入式 (1-13), 得

$$RA_1 A_2 \frac{d^2 h}{dt^2} + A_1 R \frac{dQ_3}{dt} + A_1 \frac{dh}{dt} = Q_1 - Q_2 \quad (1-20)$$

由式 (1-15) 有

$$Q_2 = A_2 \frac{dh}{dt} + Q_3$$

代入式 (1-20) 有

$$RA_1 A_2 \frac{d^2 h}{dt^2} + (A_1 + A_2) \frac{dh}{dt} = Q_1 - Q_3 - A_1 R \frac{dQ_3}{dt}$$

该环节动态方程为二阶线性微分方程。

四、本节小结

(1) 任何一个环节, 不管其内部的物理现象属什么性质, 动态特性均可用输入量和输出