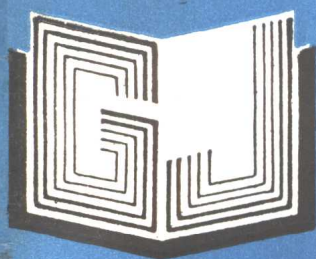


988935



高等学校教材

专科适用

自动调节原理及系统

太原电力高等专科学校 林金栋 主编



高等学校教材

自动调节原理及系统

太原电力高等专科学校 林金栋 主编

中国电力出版社

内 容 提 要

本教材第一部分(前七章)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。对采样调节内容也作了简要介绍。

第二部分(八章至十三章)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。结合应用实例,着重阐述各类系统的定性分析方法。对热工控制新技术作了简要介绍,用较多篇幅讲述了汽轮机控制系统和热工过程计算机控制系统。

本书理论知识讲述尽量精炼、突出重点;专业知识突出针对性和应用性。可供高等专科学校集控、热动等专业教学使用,也可供从事热工自动控制工作的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

自动调节原理及系统/林金栋主编.-北京:中国电力出版社,
1996

高等学校教材 专科适用

ISBN 7-80125-129-6

I. 自… I. 林… II. ①自动调节-理论-高等学校-教材②
自动调节系统-高等学校-教材 N. TP272

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 03605 号

中国电力出版社出版

(北京三里河路 6 号 邮政编码 100044)

北京市地矿局印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

1996 年 11 月第一版 1996 年 11 月北京第一次印刷

787×1092 毫米 16 开本 28.75 印张 654 千字

印数 0001—2390 册 定价 22.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

前 言

本书是根据电力工业部专科教学委员会确定的发电厂集控运行专业和电厂热能动力专业教材编写出版计划编写的。编写大纲经由 1992 年专科教学委员会集控运行和生产过程自动化两教学组全体会议审定通过。

全书共十三章，以讲授火电厂单元机组热工自动调节的基本理论和调节系统为主要内容，力求较全面反映单元机组过程控制系统中的典型系统和新技术的应用。

本书绪论及第九章至第十二章、第十三章的第三、四、五节由太原电力高等专科学校林金栋编写；第三章至第八章，第十三章的第一、二节由该校张丽香编写；第一、二章由北京电力高等专科学校王爽心编写。

全书由沈阳电力高等专科学校章心荣主审，对本书的框架及具体内容提出了宝贵的意见，对此，编写人员表示衷心的感谢。

由于热工自动控制技术发展很快，在编写过程中又有许多新技术应用于生产实际之中，未能在这本教材中体现，对许多引进技术的理解由于水平所限，不一定十分准确，望广大读者批评指正。

编 者

1995 年 11 月

440000/11

目 录

前言

绪论	1
第一章 自动调节的基本概念	3
第一节 生产过程的自动调节	3
第二节 自动调节系统方框图	4
第三节 环节特性	5
思考题与习题	15
第二章 拉普拉斯变换和传递函数	16
第一节 拉普拉斯变换的定义和性质	16
第二节 拉普拉斯逆变换及部分分式法	22
第三节 传递函数	26
第四节 系统方框图的等效变换与信号流图	31
第五节 脉冲响应函数和阶跃响应函数	38
第六节 典型环节的动态特性	42
第七节 简单物理过程的建模	54
思考题与习题	60
第三章 热工调节对象和工业调节器	63
第一节 热工调节对象	63
第二节 自动调节器及其调节规律	75
第三节 工业调节器动态特性的实现方法	85
第四节 工业自动化仪表发展概况	90
思考题与习题	92
第四章 调节系统的瞬态响应分析	93
第一节 概述	93
第二节 二阶系统分析	94
第三节 高阶系统的瞬态响应分析	106
第四节 劳斯稳定判据	109
第五节 稳态误差分析及误差系数	114
思考题与习题	118
第五章 调节系统的频率响应分析	121
第一节 频率响应特性的概念	121
第二节 典型环节及对象的频率特性	126
第三节 二阶系统的频率响应特性	132
第四节 频率特性稳定判据	134

思考题与习题	148
第六章 单回路调节系统的分析和整定	150
第一节 调节系统的性能指标	150
第二节 使单回路调节系统的主导复数根衰减指数 m 为指定值的整定方法	155
第三节 调节系统的工程整定方法	171
思考题与习题	177
第七章 采样调节系统	179
第一节 采样调节的基本概念	179
第二节 z 变换和脉冲传递函数	188
第三节 采样系统稳定性概念	198
第四节 连续系统的离散化	205
思考题与习题	208
第八章 自动调节系统综述	210
第一节 自动调节系统的组成	210
第二节 串级调节系统和前馈-反馈调节系统	216
第三节 比值调节系统和大滞后对象的调节方案	222
第四节 自动调节系统的无扰切换和跟踪	227
思考题与习题	233
第九章 汽包炉自动调节系统	234
第一节 汽包炉给水调节系统	234
第二节 汽温调节系统	250
第三节 燃烧调节系统	276
思考题与习题	295
第十章 强制循环锅炉自动调节系统	297
第一节 直流炉自动调节系统	297
第二节 低循环倍率锅炉自动调节系统	312
思考题与习题	319
第十一章 汽轮机电液控制系统	320
第一节 汽轮机控制系统概述	320
第二节 电液控制系统的自动调节功能	323
第三节 电液控制系统的热应力监控功能	327
第四节 保护系统功能	331
第五节 液压伺服系统	333
第六节 自启停控制系统	337
第七节 数字电液控制系统	339
思考题与习题	357
第十二章 单元机组负荷控制系统	359
第一节 单元机组负荷控制系统的特点	359
第二节 单元机组负荷控制的基本方案	361
第三节 协调控制系统的基本方案	364

第四节 单元机组负荷控制系统	369
第五节 变压运行单元机组负荷控制系统原则方案	382
思考题与习题	385
第十三章 火电机组的现代控制技术	386
第一节 火电机组现代控制技术综述	386
第二节 现代控制装置概述	391
第三节 YS-80 微机控制仪表	400
第四节 SLPC 专家 PID 系统	433
第五节 YS-80 仪表锅炉给水调节系统	438
思考题与习题	450
参考文献	452

绪 论

一、火电厂实现生产过程自动化的意义

随着国民经济的高速增长,社会生产和社会生活的各个方面对电能的需求量日益增多。电力工业作为国民经济的先导行业,得到了迅猛发展,目前已进入了大电网、大机组、高参数、高度自动化的时代。电网中火电机组单机容量的增大和参数的提高,导致了对机组自动化程度要求的提高。

大容量机组的特点之一是系统复杂,监视和操作的项目多,以 500MW 单元机组为例,其监视参数有 1200~1300 个左右,操作项目有 400~500 个左右。启动过程中需要进行 500 余次项目的监视,完成 400 余个操作动作,最高频度为一分钟内需完成 40 余次的监视或操作。况且高参数,大容量机组的许多控制参数变化速度快,控制对象之间的关联性大,彼此互有影响。因此如果完全依靠运行人员进行手动控制,不仅体力和脑力劳动强度大,而且很难做到及时、准确的监视和操作,一旦发生失误,极易造成运行事故,后果将会十分严重。因此从提高机组运行的安全性,减轻运行人员的劳动强度方面考虑,实现机组生产过程的自动化是非常必要的。

火电机组自动化程度的高低对机组运行的经济性有很大影响。以正常运行机组为例,设计完善的自动控制系统,可以根据机组的运行状态自动维持各项参数在要求的数值上,使机组处于最优控制状态下运行,可提高机组的热经济性、降低各项消耗。以某电厂 300MW 单元机组为例,采用西屋公司的 WDPF 微机分散控制系统对机组实行自动控制后,可降低供电煤耗 4.45g/(kW·h),每年节约标准煤 8000 余 t,经济效益是相当可观的。

自动控制系统在机组异常情况下,可以针对当时的运行状态,按预定的处理规律进行运行方式的自动调整,尽快恢复到正常状态,以保证机组的安全运行。如果异常状态有可能发展成为事故,危及人身或设备的安全,自控系统可以采取果断措施予以处置。

总之,单元机组实现高度自动化控制,可以保证机组安全经济运行,提高全厂劳动生产率,减轻运行人员的劳动强度,提高电网管理的自动化水平。

二、火电机组自动化的内容

火电厂自动化从广义上讲应包含两大部分,即生产过程自动化和工厂管理自动化,本课程所涉及的是生产过程自动化的部分内容。火电机组生产过程自动化应包括以下几个方面的内容:

(1) 参数的自动检测和监视 火电机组需要监测的参数有热工类参数,化学监督参数,电气类参数等。整个检测系统由各类传感器,信号传输系统,参数处理和在线计算部分,显示和记录装置等部分组成。现今机组参数的检测和监视是由计算机数据采集系统——DAS 来实现的。

(2) 过程控制系统 (APC) 过程控制是指对电能生产过程中的参数进行自动调节的

过程，火电机组的过程控制主要集中在热工过程之内。过程控制系统包括锅炉的各类自动调节系统、单元机组的协调控制系统（CCS）、汽轮机电液调节系统（EHC）、机组旁路调节系统（BPS）等。

（3）顺序控制系统（SCS） 顺序控制系统输入、输出信号均为开关量信号，所以又称为二进制控制系统或开关量控制系统。顺序控制系统主要完成单元机组的主、辅机设备的自启停控制任务。顺序控制系统一般是按辅机类型和系统划分为若干个功能组，各功能组分别执行相应辅机的自启停任务。自动化程度较高的单元机组应能实现汽轮机的自启停或整个单元机组的自启停。

（4）自动保护系统 对于高参数、大容量单元机组，自动保护系统的作用日趋重要。火电机组自动保护的范围广，就热工保护而言，大体上可以分为锅炉保护系统、汽轮机保护系统、辅助设备保护系统等。锅炉保护系统中，以炉膛安全监控系统（FSSS）或称燃烧器管理系统（BMS）最为庞大和复杂。汽轮机保护以轴系保护为主，含超速、振动、膨胀、应力等保护内容。

三、本教材的主要内容

本教材内容分为两大部分，第一章至第七章重点讲授电厂热工自动调节基本原理，介绍了经典控制理论在热工自动调节系统中的应用。在第七章中简要介绍了采样调节的基本原理。第八章至第十二章着重介绍自动调节系统基本原理、单元机组各种类型的调节系统的组成。在第十三章中，介绍了热工控制新技术在电厂中的应用，并以单回路调节器 SLPC 为例，介绍数控仪表构成的调节系统。

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流量的大小。水位调节的任务可以用两种方法来实现。

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——对传递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。

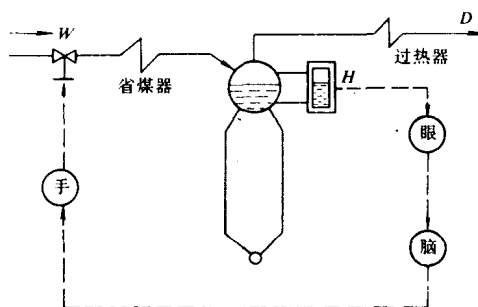


图 1-1 汽包水位人工调节

H —水位信号； D —蒸汽流量信号；

W —给水量信号

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

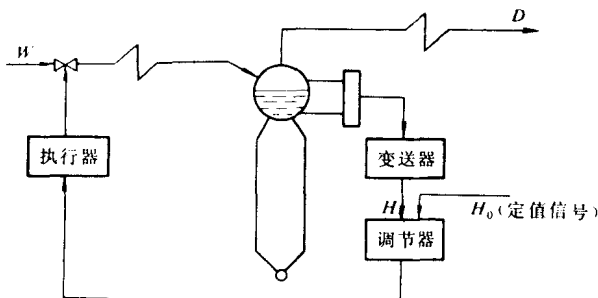


图 1-2 汽包水位自动调节

汽包水位在正常值。

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。调节器的动作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。

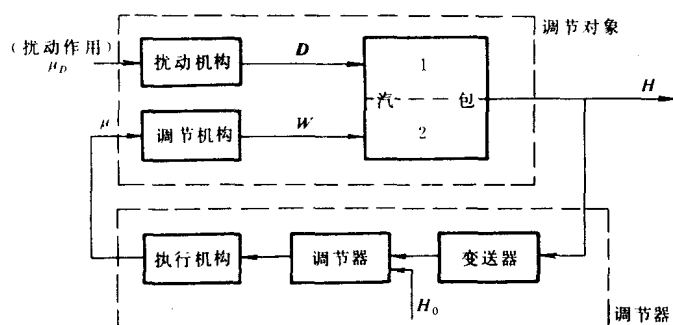


图 1-3 水位调节系统框图

μ_D —蒸汽负荷扰动作用; μ —调节作用

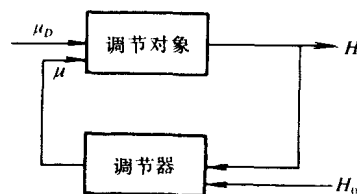


图 1-4 调节系统组成

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。

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

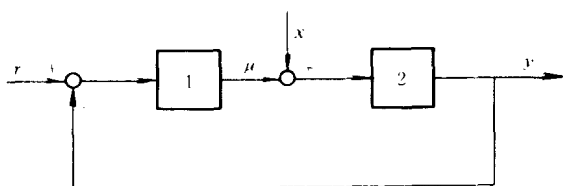


图 1-5 单回路反馈调节系统

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

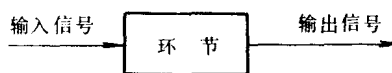


图 1-6 环节框图

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 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性质。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 (a) 是 RC 电

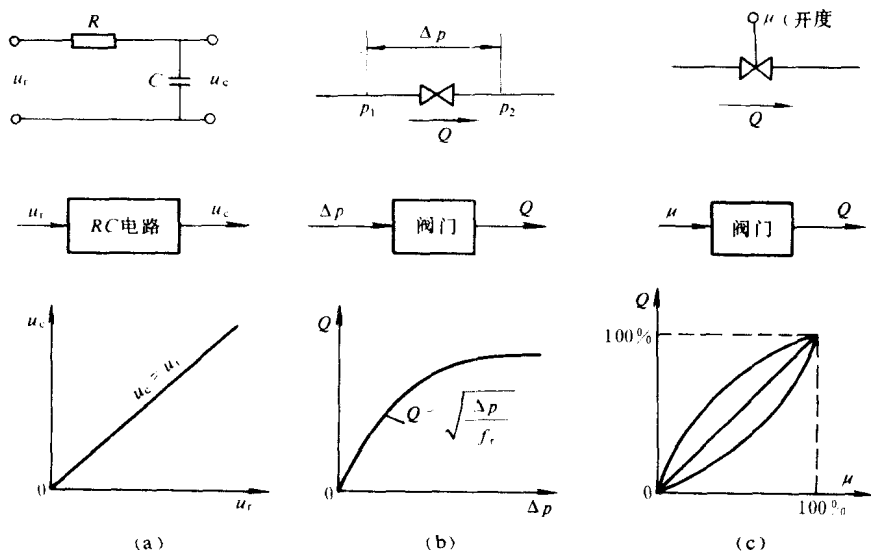


图 1-7 环节静态特性举例

(a) RC 电路; (b), (c) 阀门

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 (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 是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。

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

$$u = u_R + u_C + u_L$$

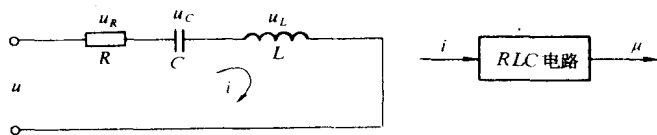


图 1-8 RLC 串联环节

先找出各元件上电压、电流之间的关系：

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

所以

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

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

【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。

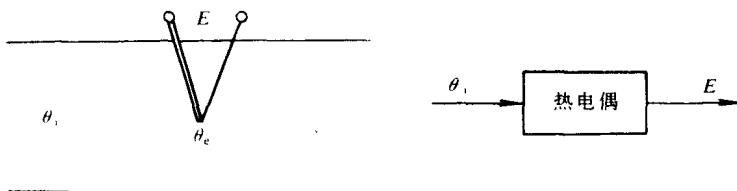


图 1-9 无保护套管热电偶

θ_i —介质温度； θ_e —热电偶热端温度； E —输出热电势

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

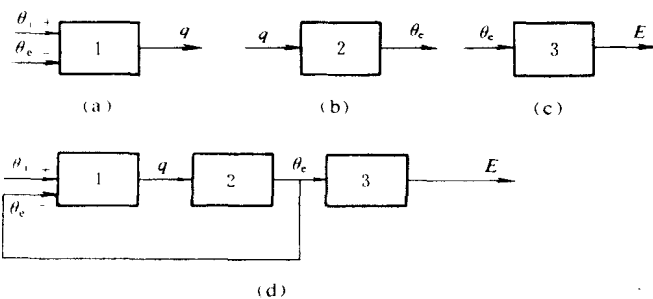


图 1-10 热电偶环节框图

(a) 环节 1；(b) 环节 2；(c) 环节 3；(d) 热电偶环节

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

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_c 。环节 2 的框图见图 1-10 (b)。根据热力学有：

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

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_c ，输出信号为热电势 E ，框图如图 1-10 (c) 所示。根据物理学有

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

式中 γ ——热电转换系数。

由式 (1-1) ~ 式 (1-3) 消去中间变量 q 、 θ_c ，得

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

对上式两边求导：

$$\frac{dE}{dt} = \frac{\gamma}{RC} (\theta_i - \theta_c) = \frac{\gamma}{RC} (\theta_i - \frac{E}{\gamma})$$

整理后得

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

一阶线性微分方程。将图 1-10 的 (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。

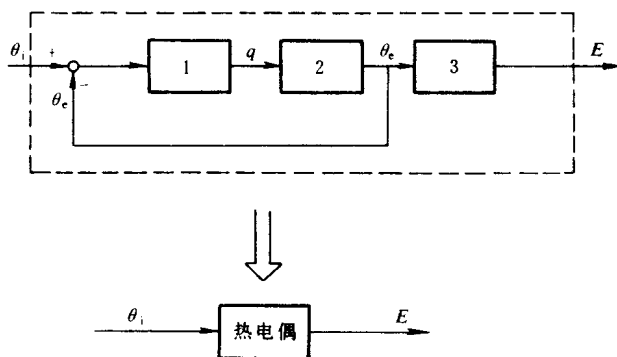


图 1-11 热电偶环节方框图

【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。

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

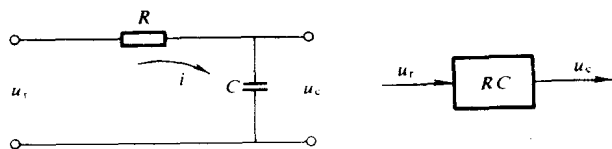


图 1-12 RC 电路

$(u_r - u_c)$, 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。

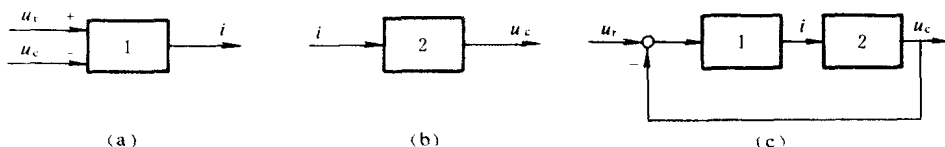


图 1-13 RC 电路方框图

(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 (c) 所示的 RC 电路方框图。

【例 1-4】 双容水箱如图 1-14 所示, 两水箱底部由水连通管连通, 设进水流量为 Q_r , 出水流量为 Q_c , 液面高度为 h , 水箱 1 截面积为 A , 试以 Q_r 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_c 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 $(Q_r - Q_c)$, 输出信号为液面高度 h , 则有

$$(Q_r - Q_c) dt = A dh$$

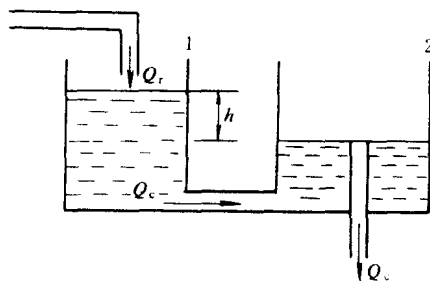


图 1-14 双容水箱

$$\frac{dh}{dt} = \frac{Q_r - Q_c}{A} \quad (1-6)$$

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

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

式中： α 为阻力系数，当 Q_c 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_c ，得

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

所以

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

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

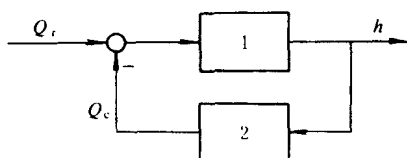


图 1-15 双容水箱方框图

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：

$$E = E_0 + \Delta E$$

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

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

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