



普通高等教育土建学科专业“十一五”规划教材
高校建筑环境与设备工程专业指导委员会规划推荐教材

自动控制原理

任庆昌 主 编
袁冬莉 魏 东 副主编
王 磊 主 审

中国建筑工业出版社

普通高等教育土建学科专业“十一五”规划教材
高校建筑环境与设备工程专业指导委员会规划推荐教材

自动控制原理

	任庆昌	主 编
袁冬莉	魏 东	副主编
	王 磊	主 审

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

自动控制原理/任庆昌主编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2011.12

普通高等教育土建学科专业“十一五”规划教材.
高校建筑环境与设备工程专业指导委员会规划推荐教材

ISBN 978-7-112-13907-1

I. ①自… II. ①任… III. ①自动控制理论-高等学校-教材 IV. ①TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 274305 号

本书为普通高等教育土建学科专业“十一五”规划教材、高校建筑环境与设备工程专业指导委员会规划推荐教材。全书共七章, 内容包括: 自动控制的一般概念, 控制系统的数学模型, 线性系统的时域分析, 线性系统的复域分析, 线性系统的校正方法, 现代控制理论基础, 计算机过程控制及自控原理的应用, MATLAB 基础知识 (附录)。本教材注重基本概念和原理的阐述, 注意结合专业特点取材及与工程应用的结合。

本书可作为建筑环境与设备工程专业的本科教材, 也可供建筑电气与智能化专业等相关专业使用。上述专业的教师、研究生、科研人员、工程技术人员可在教学 and 工作中作为参考用书。

* * *

责任编辑: 齐庆梅

责任设计: 张 虹

责任校对: 刘梦然 赵 颖

普通高等教育土建学科专业“十一五”规划教材
高校建筑环境与设备工程专业指导委员会规划推荐教材

自动控制原理

任庆昌 主 编

袁冬莉 魏 东 副主编

王 磊 主 审

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

北京市书林印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 15½ 字数: 386 千字

2011 年 12 月第一版 2011 年 12 月第一次印刷

定价: 32.00 元

ISBN 978-7-112-13907-1

(21927)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

本教材是根据全国高校建筑环境与设备工程专业指导委员会的规划，为建筑环境与设备工程专业编写的。

随着国民经济的发展，最近几年国内设置建筑环境与设备工程专业（以下简称建环专业）的高校增加，规模扩大，发展迅速。专业的内涵有了新的意义，教学体系、课程设置与其前身（暖通空调专业）相比，已有很多变化。其特征之一是建筑环境与设备和信息与自动化技术有了紧密结合，信息与自动化技术课程在本专业培养方案中已经成为一个重要的教学模块。在专业指导委员会制定的培养方案中，共有 13 门主干课程，其中信息与自动化教学模块占四门：电工与电子学、建筑环境测试技术、自动控制原理、建筑设备自动化。

专业指导委员会的培养方案中也给出了“自动控制原理”课程的参考性教学大纲。但是多年来一直未产生被专业指导委员会认可并正式出版的教材，使各院校在组织教学过程中有一定困难，培养方案的要求难以完全实现。

在以往的教学过程中，建环专业的学生对“自动控制原理”这门课程有过以下反映：认为本课程内容抽象，与实际相差甚远，对不上号，非自动化专业学习该课程没有必要；或认为学习该课程应当立竿见影，马上解决实际问题。

随着教学改革的深入，对培养目标与市场需求之间的关系需要逐步明晰，课程建设和改革需要不断探索。作者认为，“自动控制原理”是研究自动控制一般规律的学科基础课，是掌握自动控制设备与技术必备的基础知识。“自动控制原理”不仅是自动化专业的重要专业基础课，对其他工科专业也有普遍意义，该课程的设置对提高建环专业学生综合素质和能力完全必要。但试图通过学习一门学科基础课立即解决大量的工程实际问题是不现实的。课程的“效益”是通过和其他专业课程（包括实践性教学环节）的结合才能最终体现。就课程学习本身而言，只要在取材上精心研究，尽可能多地联系建筑环境与设备工程中的物理概念和现象，提高本专业学习者的兴趣和学习效果是有可能的。

根据作者的调研和教学体会，由于培养目标的区别和学时限制，建环专业尚不宜直接照搬和采用自动化专业的同名教材，要结合本专业的需求“量体裁衣”，体现出一定的适用性和实用性。因此，对本课程的内容规划如下：

教材应贯穿一条主线：让学习者深刻理解反馈的概念和优化思想是控制科学的灵魂与核心。

(1) 学习掌握自动控制系统的组成、主要类型，以微分方程、传递函数、状态空间方程表达的自控系统数学模型。

(2) 能够进行自控系统的时域分析。

(3) 了解经典控制理论中分析和设计系统的两个主要方法——根轨迹法和频率法，并着重掌握频率法的主要内容及运用。

(4) 了解现代控制理论的基本框架和要点。

(5) 可以用 MATLAB 软件进行上述学习内容的分析与设计。

(6) 以自动控制原理为基础, 学习掌握计算机过程控制系统的一般概念和典型应用。限于篇幅, 本教材未讲解 Z 变换及其设计方法, 计算机控制系统的设计思路均按照连续系统设计后离散化去理解。

和其他教材相比, 本教材有以下特点:

(1) 在教材的每一部分(章), 都尽可能给出和建筑环境与设备工程相结合的实例——传热学、流体输配、暖通空调对象方面的实例, 使学习者感受到这门课程与本专业的贴近程度。

(2) 自动控制理论的学习和应用离不开软件工具。MATLAB 是国内外流行的功能强大、内容丰富的科学计算和工程应用软件, 目前已经成为自动控制系统分析、设计、仿真的有力工具, 在国内外多种教科书中均被采用, 在本教材中也有体现。

(3) 教材最后一章——第 7 章安排了计算机过程控制系统的内容, 以便学生在了解掌握自动控制的基本理论知识之后, 能够对本专业的自控问题提出控制方案, 进行原理性设计, 确定控制参数, 并可以进行中小型控制系统的调试。这部分内容超出了传统的“自动控制原理”教材的范围, 由于建环专业培养方案中信息类课程的设置门数有限, 为体现自动控制原理的工程应用, 这样处理应当是比较恰当的, 希望得到学习者和专业人士的理解。

教材第 1~5 章是自动控制原理的基本内容, 第 6~7 章为选修性教学内容。任课教师可据此制定适合本校的课程教学大纲。

全书编写分工如下: 任庆昌(西安建筑科技大学)编写第 3 章, 第 5 章(部分), 第 6 章 6.1(部分)、6.3(部分), 第 7 章 7.5, 附录 1, 编辑各章中有关建筑环境与设备工程实际的例题、习题; 袁冬莉(西北工业大学)编写第 1、2、4 章, 第 5 章(部分), 附录 2; 魏东(北京建筑工程学院)编写第 6 章(部分), 第 7 章 7.1~7.4。全书由任庆昌负责对各章执笔校改, 统编定稿。同济大学中德学院王磊教授担任本书的审稿人。西安建筑科技大学 04 级~05 级控制理论与控制工程、暖通空调专业硕士研究生多人为本教材收集了部分例题和习题, 06 级~09 级多名研究生和长安大学建环专业教师孟庆龙博士为书稿后期的校对和整理工作付出了辛勤劳动, 作者向他们表示衷心的感谢。

为方便任课教师制作电子课件, 我们制作了包括书中公式、图表等内容的素材库, 可发送邮件至 jiangongshe@163.com 免费索取。

建筑环境与设备工程专业指导委员会前任主任、清华大学彦启森教授生前对本书的编写十分关心, 曾多次提出过建设性意见。现任专业指导委员会主任、清华大学朱颖心教授也一直关注着本书的编写和出版。中国工程院院士、清华大学江亿教授, 天津大学安大伟教授曾参加本书编写提纲的讨论, 提出过宝贵建议。中国建筑工业出版社齐庆梅编辑在本书编写过程中给予了很多帮助。作者对他们的关心、指导表示衷心感谢。

本书是建筑环境与设备工程专业本科生教材, 也可供建筑电气与智能化专业使用。自动化专业等专业本科生、研究生和相关领域的科研人员、工程技术人员也可以作为参考书使用。

由于作者水平所限, 编写错误难免, 恳请读者不吝指正, 以便今后继续改进。

目 录

第 1 章 自动控制的一般概念	1
1.1 引言	1
1.2 自动控制和自动控制系统的基本概念	1
1.2.1 自动控制问题的提出	1
1.2.2 开环控制系统	3
1.2.3 闭环控制系统	3
1.2.4 复合控制系统	5
1.3 控制系统示例	6
1.4 自动控制系统的基本组成	9
1.5 自动控制系统的分类及基本要求	9
1.5.1 自动控制系统的分类	9
1.5.2 对自动控制系统的基本要求	11
习题	12
第 2 章 控制系统的数学模型	14
2.1 引言	14
2.2 控制系统的时域数学模型	14
2.3 控制系统的复域数学模型	16
2.3.1 传递函数	16
2.3.2 典型环节的传递函数	18
2.4 控制系统的结构图及其等效变换	21
2.4.1 控制系统结构图	21
2.4.2 结构图等效变换	22
2.5 控制系统的传递函数	25
2.5.1 系统的开环传递函数	25
2.5.2 闭环系统的传递函数	26
2.5.3 闭环系统的误差传递函数	26
习题	28
第 3 章 线性系统的时域分析	30
3.1 引言	30
3.2 系统的时域性能指标	30
3.2.1 时域法常用的典型输入信号	30
3.2.2 系统的时域性能指标	31
3.3 一阶系统的时间响应及动态性能	33

3.3.1 一阶系统单位阶跃响应	33
3.3.2 一阶系统动态性能指标计算	33
3.4 二阶系统的时间响应及动态性能	33
3.4.1 二阶系统传递函数标准形式及分类	33
3.4.2 欠阻尼二阶系统动态性能指标计算	34
3.4.3 过阻尼二阶系统动态性能指标计算	36
3.5 线性系统的稳定性分析	37
3.5.1 稳定性的概念	37
3.5.2 稳定的充要条件	37
3.5.3 稳定判据	38
3.6 线性系统的稳态误差	41
3.6.1 误差与稳态误差	42
3.6.2 计算稳态误差的一般方法	42
3.6.3 静态误差系数法	43
3.6.4 动态误差系数法	45
3.6.5 减小或消除稳态误差的方法	47
3.7 应用 MATLAB 进行时域分析	48
习题	51
第 4 章 线性系统的复域分析	55
4.1 根轨迹法的基本概念	55
4.1.1 根轨迹的基本概念	55
4.1.2 根轨迹与系统性能	56
4.1.3 根轨迹方程	56
4.2 绘制根轨迹的基本法则	57
4.3 广义根轨迹	63
4.3.1 参数根轨迹	63
4.3.2 零度根轨迹	64
4.4 应用 MATLAB 进行复域分析	65
习题	68
第 5 章 线性系统的校正方法	72
5.1 控制系统综合与校正的概念	72
5.2 线性系统时域校正	72
5.2.1 反馈校正	72
5.2.2 复合校正	73
5.3 线性系统的频域分析与校正	75
5.3.1 频率特性的基本概念	75
5.3.2 幅相频率特性 (Nyquist 图)	79
5.3.3 对数频率特性 (Bode 图)	85
5.3.4 频域稳定判据	91
5.3.5 稳定裕度	97
5.3.6 利用开环频率特性分析系统的性能	99

5.3.7 频域法串联校正	102
5.4 自动控制系统设计举例	109
5.4.1 位式控制器设计	109
5.4.2 P、PI、PID 控制器设计及参数整定方法	111
5.4.3 自整定调节器	118
5.4.4 大滞后系统的补偿控制	119
5.4.5 多回路控制系统设计	126
5.5 应用 MATLAB 进行控制系统设计与分析	131
习题	143
第 6 章 现代控制理论基础	147
6.1 控制系统的状态空间描述	147
6.1.1 状态空间的基本概念	147
6.1.2 线性定常连续系统状态空间表达式的建立	151
6.1.3 从状态空间表达式求传递函数(矩阵)	155
6.2 线性定常系统状态方程的解	158
6.2.1 线性定常齐次状态方程的解(自由解)	158
6.2.2 状态转移矩阵	159
6.2.3 线性定常系统非齐次方程的解	160
6.3 线性定常系统的能控性和能观性	162
6.3.1 能控性问题	163
6.3.2 能观性问题	165
6.3.3 能控性、能观性与传递函数的关系	171
6.3.4 传递函数的最小阶动态方程实现问题	172
6.4 应用 MATLAB 进行状态方程分析求解	173
习题	174
第 7 章 计算机过程控制及自控原理的应用	177
7.1 计算机过程控制系统组成、特点及分类	177
7.1.1 计算机过程控制的一般概念	177
7.1.2 计算机过程控制系统的组成	178
7.1.3 计算机过程控制系统的特点	180
7.1.4 计算机过程控制系统的分类	183
7.2 计算机过程控制系统的实现	186
7.2.1 控制用计算机系统基本硬件配置	186
7.2.2 对控制用计算机系统的一般要求	187
7.2.3 计算机过程控制系统主机的选择	189
7.2.4 控制系统的应用软件设计	190
7.3 计算机输入输出技术	196
7.3.1 数字量过程通道	196
7.3.2 模拟量过程通道	196
7.4 数字 PID 算法	202
7.4.1 PID 控制和数字 PID 控制算法	202

7.4.2 数字 PID 控制算法的改进	203
7.4.3 数字 PID 调节器参数的整定方法	206
7.5 计算机控制系统举例	206
7.5.1 直接数字控制系统 DDC 设计举例	206
7.5.2 集散控制系统 (DCS) 设计举例	208
习题	220
附录 1 常见函数拉氏变换对照表	221
附录 2 MATLAB 基础知识	222
参考文献	238

第 1 章 自动控制的一般概念

1.1 引言

在科学技术飞速发展的今天，自动控制理论和技术已经成为现代化社会不可缺少的组成部分，广泛地应用于机械、冶金、石油、化工、电子、电力、航空、航海、航天、核反应堆等各个领域。近些年来，控制学科的应用范围还扩展到建筑智能化、交通管理、生物医学、生态环境、经济管理、社会科学和其他许多社会生活领域，并为各学科之间的相互渗透起了促进作用。

自动控制理论是研究关于自动控制系统组成、分析和设计的一般性理论，是研究自动控制共同规律的技术科学。自动控制理论的任务是研究自动控制系统中变量的运动规律以及改变这种运动规律的可能性和途径，为建立高性能的自动控制系统提供必要的理论根据。作为现代的工程技术人员和科学工作者，都应当具备一定的自动控制理论知识。

本章主要介绍自动控制和自动控制系统的基本概念、自动控制系统的基本组成和自动控制系统的分类。

1.2 自动控制和自动控制系统的基本概念

1.2.1 自动控制问题的提出

在许多工业生产过程或生产设备运行中，为了保证正常的工作条件，往往需要对某些物理量（如温度、压力、流量、液位、电压、位移、转速等）进行控制，使其尽量维持在某个数值附近，或使其按一定规律变化。要满足这种需要，就应该对生产机械或设备进行及时的操作，以抵消外界干扰的影响。这种操作通常称为控制，用人工操作称为人工控制，用自动装置来完成操作称为自动控制。

如图 1-1 所示是锅炉给水人工控制示意图。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

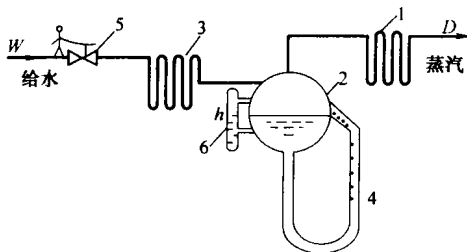


图 1-1 锅炉给水人工控制示意图

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

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；
- (3) 当偏差值偏高时，则关小给水调节阀门，而当偏差值偏低时，则开大给水调节阀门，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就能自动地执行调节任务，这就叫做自动控制。

图 1-2 所示是锅炉给水汽包水位自动控制示意图。

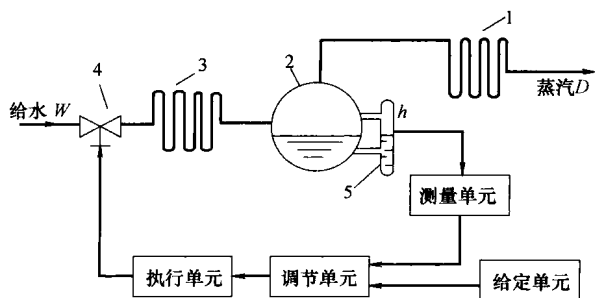


图 1-2 锅炉给水汽包自动控制示意图

1—过热器；2—汽包；3—省煤器；4—给水调节阀；5—水位计

图 1-2 中测量单元、给定单元、调节单元以及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便于远距离传送的、与之成一定关系（一般为比例关系）的电流或电压信号。调节单元（相当于人的大脑）接受测量单元来的测量信号，并把它与希望保持的水位值（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）按照调节单元发出的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当前值，并将这一信号送给调节单元，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，执行单元再次调节给水调节阀，直到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。

可见，自动控制和人工控制极为相似，自动控制系统只不过是把某些装置有机地组合在一起，用以代替人的职能。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、手完成了观测、比较、判断

和控制的任務，而自動調節中，這些任務則由測量單元、調節單元、執行單元完成。也就是說用這套控制儀表完全能代替人，這些裝置相互配合，承擔着控制的職能，通常稱之為控制器（或控制裝置）。任何一個控制系統，都包含着被控對象和控制器兩個組成部分。

1.2.2 開環控制系統

常見的控制方式有三種：開環控制、閉環控制和複合控制。對於某一個具體的系統，採取什麼样的控制手段，應該根據具體的用途和目的而定。

系統的控制輸入不受輸出影響的控制系統稱為開環控制系統。在開環控制系統中，輸入端與輸出端之間，只有信號的前向通道而不存在由輸出端到輸入端的反饋通路。

圖 1-3 所示的烘箱溫度控制系統就是一個開環控制系統。它的任務是控制加熱元件（電阻絲）的電流，使烘箱溫度與設定值一致。系統的工作原理是：當控制開關合向不同位置，由於電阻阻值不同，流經電阻絲的電流就不同，從而電阻絲加熱使得烘箱的溫度也隨之改變。控制開關的某一設定位置與烘箱溫度的某個值相對應，當控制開關根據烘箱的希望溫度設定了開關位置，假如烘箱壁的热損失很小，而且烘箱周圍的環境溫度改變不大，這時烘箱的溫度即為其期望值。當頻繁開關烘箱門或改變烘箱周圍環境溫度（即有了干擾），烘箱的溫度發生變化，不再與期望值一致。

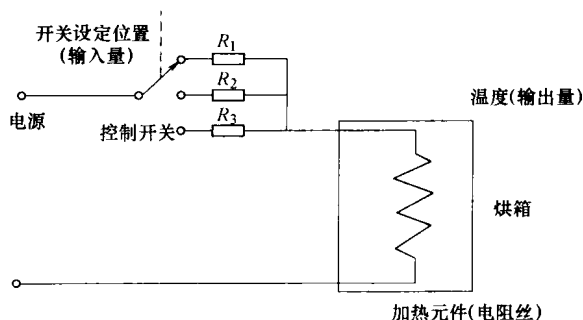


圖 1-3 烘箱溫度開環控制系統示意圖

在本系統中，烘箱是被控對象，烘箱的溫度是被控量，也稱為系統的輸出量或輸出信號。開關設定位置通常稱為系統的給定量或輸入量，電阻及加熱元件可看成是調壓器（控制器）。

就圖 1-3 而言，只有輸入量對輸出量的單向控制作用，而輸出量對輸入量卻沒有任何影響和聯繫，稱這種系統為開環控制系統。

烘箱溫度開環控制系統可用圖 1-4 所示的方框圖表示。圖中用方框代表系統中具有相應功能的元部件；用箭頭表示元部件之間的信號及其傳遞方向。烘箱門的開關或烘箱周圍環境溫度的改變，都會使輸出量偏离希望值，這種作用稱之為干擾或扰动，在圖 1-4 中用一個作用在烘箱上部的箭頭來表示。

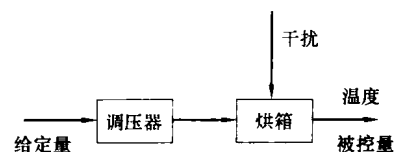


圖 1-4 烘箱溫度開環控制系統方框圖

1.2.3 閉環控制系統

開環控制系統精度不高和適應性不強的主要原因是缺少從系統輸出到輸入的反饋回

路。要提高控制精度，必须把输出量的信息反馈到输入端，通过比较输入值与输出值，产生偏差信号，该偏差信号以一定的控制规律产生控制作用，逐步减小以至消除这一偏差，从而实现所要求的控制性能。

在图 1-3 所示的烘箱温度开环控制系统中，加入一些装置，便构成了如图 1-5 所示的烘箱温度闭环控制系统。

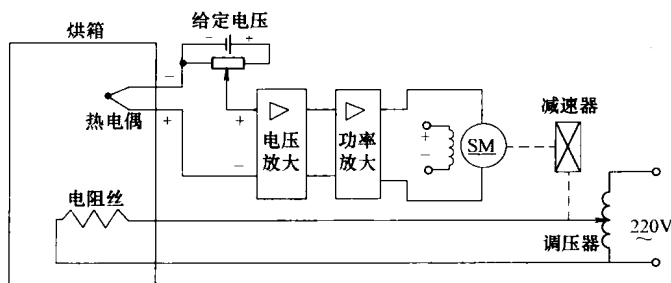


图 1-5 烘箱温度闭环控制系统示意图

图 1-5 中，烘箱采用电加热方式运行，热电偶测量出烘箱的实际温度并转换成电压 u_f ，再反馈到系统的输入端，与给定值电压 u_r （系统输入量）进行比较，从而得出电压 $u_e = u_r - u_f$ 。由于该电压能间接地反映出误差的性质（即大小和正负方向），通常称之为偏差信号，简称偏差。偏差 u_e 经放大器放大后成为 u_a ，用以控制可逆转电动机。

在正常情况下，烘箱温度等于某个期望值 T ，热电偶的输出电压 u_f 正好等于给定电压 u_r 。此时， $u_e = u_r - u_f = 0$ ，故： $u_a = 0$ ，可逆电动机不转动，调压器的滑动触点停留在某个合适的位置上，这时，烘箱散失的热量正好等于从电阻丝吸取的热量，形成稳定的热平衡状态，温度保持恒定。

当烘箱温度 T 由于某种原因突然下降（例如炉门打开造成的热量流失），热电偶测量出实际温度，对应的电压 u_f 下降，而偏差 u_e 不再是 0，且经过放大器使电机转动，导致调压器调高电压，电阻丝电流增大，烘箱温度回升，直至实际值等于期望值为止。

系统中，烘箱是被控对象，炉温是被控量，给定量是由给定电位器设定的电压 u_r （表征烘箱温度的希望值）。系统方框图如图 1-6 所示。通常，把从系统输入量到输出量之间的通道称为前向通道；从输出量到反馈信号之间的通道称为反馈通道。方框图中用符号“⊗”表示比较环节，其输出量等于各个输入量的代数和。因此，各个输入量均须用正负

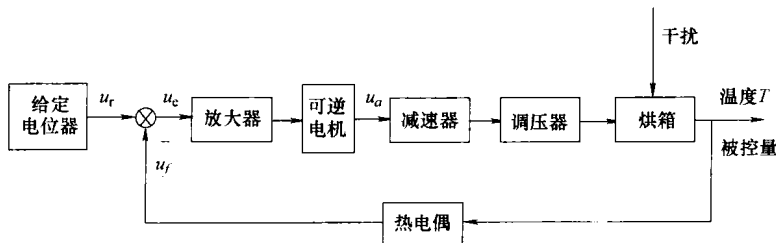


图 1-6 烘箱温度闭环控制系统方框图

号表明其极性。图中清楚地表明：由于采用了反馈回路，致使信号的传输路径形成闭合回路，使输出量反过来直接影响控制作用。这种通过反馈回路使系统构成闭环，并按偏差产生控制作用，用以减小或消除偏差的控制系统，称为闭环控制系统，或称反馈控制系统。在系统主反馈通道中，只有采用负反馈才能达到控制的目的。若采用正反馈，将使偏差越来越大，导致系统发散而无法工作。

闭环系统工作的本质机理是：将系统的输出信号引回到输入端，与输入信号相比较，利用所得的偏差信号对系统进行调节，达到减小偏差或消除偏差的目的。这就是负反馈控制原理，它是闭环控制系统的核心机理。

一般来说，开环控制系统结构比较简单，成本较低。但开环控制系统的缺点是控制精度不高，抑制干扰能力差，而且对系统参数的变化比较敏感，一般用于可以不考虑外界影响或精度要求不高的场合，如洗衣机、步进电机控制及水位调节等。

在闭环控制系统中，不论是输入信号的变化，或者干扰的影响，或者系统内部的变化，只要是被控量偏离了规定值，都会产生相应的控制作用消除偏差。因此，闭环控制抑制干扰能力强，与开环控制相比，系统对参数的变化不敏感，可以选用不太精密的元件构成较为精密的控制系统，获得满意的动态特性和控制精度。但是反馈装置需要添加元部件，造价较高，同时也增加了系统的复杂性，如果系统的结构参数选取不当，控制效果可能变得很差，甚至出现振荡或发散等不稳定的情况，因此，如何分析系统，合理选择系统的结构参数，从而获得满意的系统性能，是自动控制理论必须研究解决的问题。

1.2.4 复合控制系统

反馈控制只有在外部作用（输入信号或干扰）对控制对象产生影响之后才能做出相应的控制。尤其当控制对象具有较大延迟时间时，反馈控制不能及时地影响输出的变化，会影响系统输出的平稳性。前馈控制能使系统及时感受输入信号，使系统在偏差即将产生之前就注意纠正偏差。将前馈控制和反馈控制结合起来，构成复合控制，可以有效提高系统的控制精度。

图 1-7 所示的水温控制系统就是一个按干扰补偿的复合控制系统。

控制系统的工作机理是：温度传感器不断测量换热器出口处的实际水温，并在温度控制器中与给定温度相比较，若低于给定温度，其偏差值使蒸汽阀门开大，进入热交换器的蒸汽量加大，热水温度升高，直至偏差为零。如果由于某种原因，冷水流量加大，则流量值由流量计测得，通过温度控制器，开大阀门，使蒸汽量增加，提前进行控制，实现按冷水流量变化进行顺馈补偿，保证热交换器出口的水温不发生大的波动。

其中，热交换器是被控对象，实际热水温度是被控量，给定量（希望温度）在控制器中设定，冷水流量是干扰量。系统方框图如图 1-8 所示。

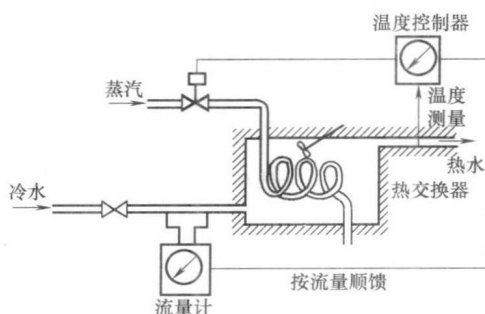


图 1-7 水温控制系统示意图

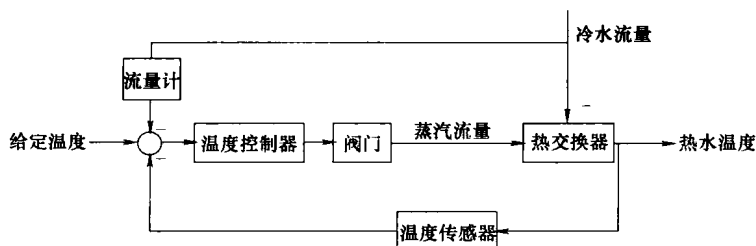


图 1-8 水温控制系统方框图

1.3 控制系统示例

1. 室温自动控制系统

如图 1-9 所示，室温自动控制系统的目的是将恒温室温度保持在希望值。在恒温室散热条件及外部因素（如恒温室门很少开关）不变，一定的热水流量能够使恒温室的温度保持在希望值，此时敏感元件测得的实际温度就是希望值，执行机构不工作，这个系统处于平衡状态。当恒温室散热条件改变或外部因素干扰，使得室温低于或高于给定希望值，控制器将温度差通过执行机构（如可逆转电机等）开大或关小调节阀，控制热水流量的增大或减小，使得热水加热器的温度升高或降低，再由风将热量送入恒温室，直到室温与希望值一致，执行机构不工作，控制阀开度不变，系统又处于平衡状态。

这是一个典型的闭环控制系统，恒温室是被控对象，室温是被控量。系统方框图如图 1-10 所示。

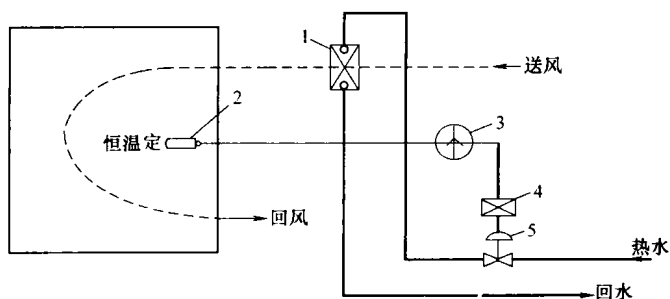


图 1-9 室温自动控制系统示意图

1—热水加热器；2—敏感元件；3—控制器；4—执行机构；5—调节阀

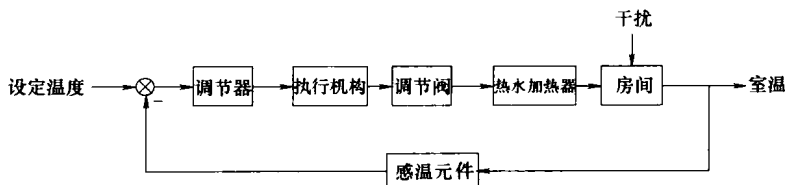


图 1-10 室温自动控制系统方框图

2. 电压调节系统

电压调节系统工作原理如图 1-11 所示。系统在运行过程中，不论负载如何变化，要求发电机能够提供由给定电位器设定的规定电压值。在负载恒定，发电机输出规定电压的情况下，偏差电压 $\Delta u = u_r - u = 0$ ，放大器输出为零，电动机不动，励磁电位器的滑臂保持在原来的位置上，发电机的励磁电流不变，发电机在原动机带动下维持恒定的输出电压。当负载增加使发电机输出电压低于规定电压时，输出电压在反馈口与给定电压经比较后所得的偏差电压 $\Delta u = u_r - u > 0$ ，放大器输出电压 u_1 便驱动电动机带动励磁电位器的滑臂顺时针旋转，使励磁电流增加，发电机输出电压 u 上升。直到 u 达到规定电压 u_r 时，电动机停止转动，发电机在新的平衡状态下运行，输出满足要求的电压。

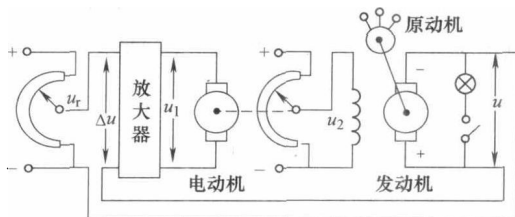


图 1-11 电压调节系统示意图

电压调节系统中，发电机是被控对象，发电机的输出电压是被控量，给定量是给定电位器设定的电压 u_r 。系统方框图如图 1-12 所示。



图 1-12 电压调节系统方框图

3. 水位控制系统

图 1-13 所示的水位控制系统目的是将水池的水位控制到希望高度。浮子是测量元件，连杆起着比较作用，它将期望水位与实际水位两者进行比较，得出误差，同时推动电位器的滑臂上下移动。电位器输出电压反映了误差的性质（大小和方向）。电位器输出的微弱电压经放大器放大后驱动直流伺服电动机，其转轴经减速器后拖动进水阀门，对系统施加控制作用。

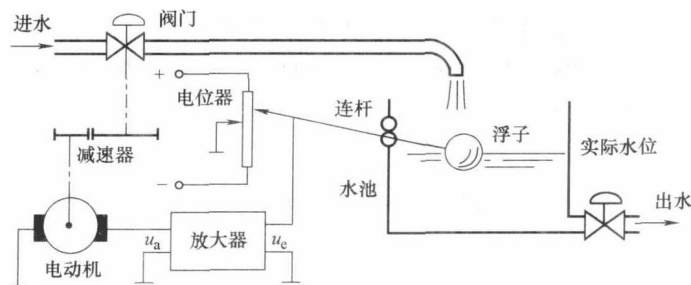


图 1-13 水位控制系统示意图

在正常情况下,实际水位等于期望值,此时,电位器的滑臂居中, $u_e=0$ 。当出水量增大时,浮子下降,带动电位器滑臂向上移动,输出电压 $u_e>0$,经放大后成为 u_a ,控制电动机正向旋转,以增大进水阀门开度,促使水位回升。当实际水位回复到期望值时, $u_e=0$,系统达到新的平衡状态。

水位调节系统中,水池是被控对象,水池的水位是被控量,给定量是给定电位器设定的电压 u_e 。系统方框图如图1-14所示。

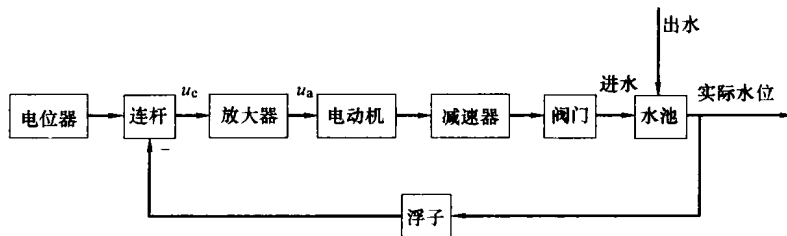


图 1-14 水位控制系统方框图

4. 制冷系统

制冷系统通常由冷凝器、压缩机、蒸发器及电子膨胀阀等装置组成,其工作原理如图1-15所示。压缩机将制冷剂压缩后送入冷凝器,在冷凝器中制冷剂被冷却后变成液体,液体制冷剂进入蒸发器,在蒸发器中吸收热蒸发。系统中蒸发回路的任务是通过电子膨胀阀的开度来控制蒸发器的热量。

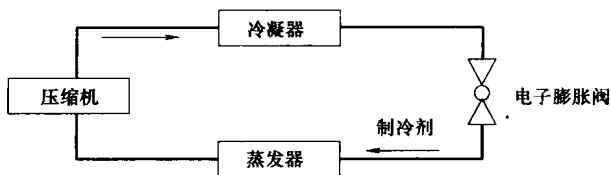


图 1-15 制冷系统工作原理图

制冷系统中蒸发控制回路方框图见图1-16,其中电子膨胀阀是执行机构,蒸发器为被控对象,蒸发器的过热度为被控值。当蒸发器的过热度经检测装置检测后,与给定值进行偏差计算,将差值送入控制器中,通过控制作用调节电子膨胀阀开度来改变制冷剂的流量,由此改变蒸发器吸收的热量,如此不断控制调节。当蒸发器的过热度等于设定值时,系统回路重新达到平衡。

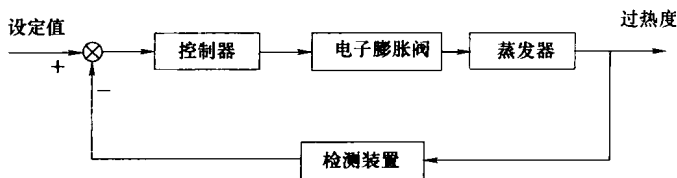


图 1-16 蒸发器过热控制系统方框图