

第一单元 自动控制系统概述

单元概述

本单元介绍了自动控制系统的发展历史及学习自控理论的重要性，还介绍了自动控制的基本概念，包括自动化与自动控制、开环系统与闭环控制系统的结构组成、自动控制系统的性能指标以及比例积分微分调节器在控制系统中的重要作用。

引言 自动控制系统的诞生与发展

人类自诞生以来，就没有停止过对提高生产能力的追求。从发明简单工具到创造机器，从人工操作机器到让机器按照指令完成预期任务，从机械装置的自动化到电气自动化，在这过程中，人类一直执着于自动控制装置的发明。

我国古代的能工巧匠们发明了很多原始的自动化装置。如公元 132 年由东汉张衡发明的地动仪（图 1-1），不仅能自动监测地震信号的强度，还能指示震动的方向。再如，《宋史》中记载的指南车，配有自动齿轮离合装置，能自动指示方向。还有铜壶滴漏，能利用浮子自动指示时间。



图 1-1 地动仪

公元 1 世纪前后，古埃及和希腊的科学家就为教堂发明了多种自动化装置，如教堂的自动开门和自动洒圣水装置。17 世纪以来，随着科学技术的发展，自动化发明无论是在水平、种类还是规模上都超越了中国。比较著名的有：法国物理学家 B·帕斯卡发明的加法器、荷兰机械师 C·惠更斯发明的钟表、英国工程师 E·李设计的能随风向转动的风磨、俄国机械师 H·波尔诺发明的能控制锅炉水位的浮子式阀门调节器等。自动控制装置的创造极大地促进了新机器的的发展与应用。18 世纪，瓦特为蒸汽机配置了离心式调节器，能自动调节蒸汽流量以适应负载的变化，是第一台具有应用价值的蒸汽机（图 1-2）。

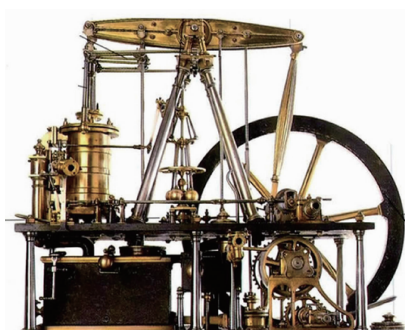


图 1-2 蒸汽机

自动控制装置的发明和应用，极大地促进了应用技术的发展，然而在实践中也遇到了诸多难题，主要问题是受控对象的动态变化与采集反馈控制过程时滞之间的矛盾。以蒸汽机为例，虽然自控装置完成转速信号采集和蒸汽压力调节的过程改变了蒸汽的流量，但此时蒸汽

机的负载和转速早已发生改变，自动控制装置不仅起不到转速控制的作用，甚至会导致“火中送炭，雪里送冰”的失误，形成所谓的“正反馈”，使系统抖动、震荡甚至崩溃。

为了解决这些实践中的问题，自动控制理论的研究应运而生。通过近百年的努力探索，形成了较完整的自动控制理论，包括经典和现代控制论。经典理论中最典型的三大方法论是时域法、频域法和根轨迹法。

时域法，由电磁理论的奠基人 J·C·Maxwell 创导，并由英、俄、瑞士等多国科学家和数学家完善、用微分方程分析稳定性的自控理论，开创了自动控制理论研究的先河。

频域法，是以美国 Bell 实验室为代表的科学家们创立的。例如：1932 年，Nyquist 发表了包含著名的“奈奎斯特判据”（Nyquist criterion）的论文；1940 年，Bode 引入了半对数坐标系，使频率特性的绘制工作更加适用于工程设计；1942 年，H·Harris 引入了传递函数的概念，用方框图、环节、输入和输出等信息传输的概念来描述系统的性能和关系。他们通过分析放大器反馈不同频率信号的响应特性与系统稳定性之间的关系，建立了频域稳定性分析方法，又称“伯德图”（Bode Plots）法。

根轨迹法，1948 年伊文斯（W·Evans）在经典控制理论的基础上进一步提出，它虽然也是一种时域分析法，但采用了全新的分析思维与角度，研究分析系统数学方程的根轨迹变化，从而设定系统最佳参数。

除了自动控制理论的发展，自动控制元器件，如各种放大器、伺服器 [1934 年，美国黑曾（H·Hazen）发表“关于伺服结构理论”（Theory of Servomechanism），并于 1939 年在 MIT 建立伺服结构实验室]、调节器的发明与应用在自动控制发展历程中功不可没，尤其是现代计算机技术的迅猛发展，将自动控制理论的发展及其应用推向了崭新的阶段。

此外，新材料、新工艺和新技术的不断涌现，使自动化控制理论广泛应用于工业控制、医学研究、金融、甚至航天和深海探险等领域。



火箭、飞船、太空舱对接及深海下潜艇

学习和掌握自动控制的基本理论与应用技术，是设计、调试和装配工业自动化生产设备所必须的，对工程技术人员而言意义重大。

学习任务一 自动控制系统的基本概念

学习目标

1. 掌握自动化、自动控制的概念
2. 了解自动化发展历程
3. 了解开环控制系统和闭环控制系统的优缺点
4. 了解生活中的自动化电气设备

导入

怎样降低劳动强度，减少人们去做重复性的、繁杂的和危险的工作是自动化、自动控制最初的目的。电的发现和应用使自动化、自动控制的发展插上了飞翔的翅膀。自动控制系统的应用造就了汽车、飞机和火箭，给人类的生活带来了极大的便利。



任务知识点

一、自动化和自动控制

所谓自动化和自动控制，是指根据目标或设想来研究、设计、调试并组装起来的设备，在无人直接参与的情况下完成预先设定的目标。例如，自动化的生产装配线、能够实现人机对话的机器人、特殊工艺操作的机械手、上下承载的电梯、可自动调节温度的电饭煲、洗衣机和冰箱等。

由于每个控制系统的被控制量不同，尽管它们控制过程、工作原理都是一样的，但完成目标的器件、装置和设备也不同。因为系统控制的输入或给定条件仅限一个，其输出结果也是单一量。对于单一条件输入所产生单一结果的线性控制系统的研究理论，也称为经典控制理论或古典控制理论，它的数学基础是建立在微积分理论和工程数学（复

变函数) 基础上的, 本书所述的工业自动控制是这一理论的应用之一。而现代自动控制理论是研究多输入和多输出、时变和非线性等控制系统的分析与设计问题, 有线性系统理论、最优控制理论、最佳滤波、自适应控制、系统辨识和随机控制等。它的数学基础不仅是微积分理论和工程数学, 还有矩阵等, 航天航空领域的自动控制是这一理论的典型应用。



高铁、机器人、机械手及自动化生产线

二、开环控制与闭环控制

任何简单或复杂的控制系统, 首先都要分析其结构形式。结构上各环节或装置之间是依次作用的串联形式, 且这个系统的所有环节, 均是单一方向的控制系统, 我们称之为开环控制, 否则为闭环控制。如电灯、电扇、手表及大楼中自动开启和关闭的玻璃门等。

其次, 分析各环节之间的作用量关系。被控制的量通过传感器又返回到输入端, 并使被控量保持恒定, 即输出量参与了输入控制的系统为闭环控制, 否则为开环控制。如冰箱、空调、温控烤箱和电子压力锅等。

图 1-3 为电灯控制系统结构图, 从图中可以看出, 开关是控制器, 灯泡是被控装置, 被控制量是光, 当电网电压波动变化时, 灯泡的亮度会随之变化。没有检测光变化的装置, 光不能保持恒定, 所以为开环控制。

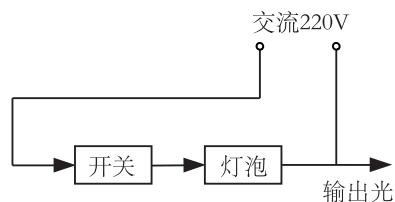


图 1-3 电灯控制系统结构

图 1-4 是自动门结构图，虽然环节比较多，但是它们均是依次作用，没有形成闭环的控制。当有人通过时，在感应器的作用下启动电子开关，电机开始转动，在门开启到位时碰触另外的感应器，电机停止转动，经过延时器设定延时时间后，电机反向转动关闭自动门，在实际的使用中，还会有许多人性化的保护措施。在自动门的控制系统中，开关是控制器，被控装置是电机，被控制量是门的开启到关闭这个流程，它们也仅仅是完成了单一方向的控制。

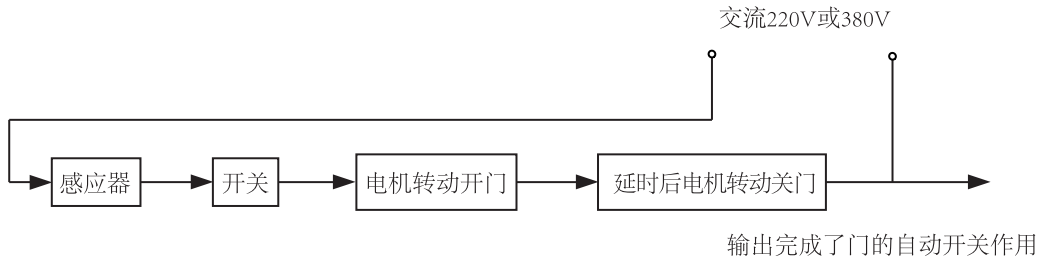


图 1-4 自动门结构

图 1-5 是电冰箱温度控制结构图，虽然控制器仍然是开关控制，压缩机是被控装置，温度是输出量，在温度传感器的监测下，使得冰箱温度在干扰量（冰箱门的开启）的作用下保持恒定，它是通过温度传感器将温度转换后，反馈到输入端与输入条件进行比较，当高于设定值时就关闭压缩机，反之就启动压缩机进行工作，使冰箱温度保持在一定范围内。这就是在调节作用下的闭环控制。

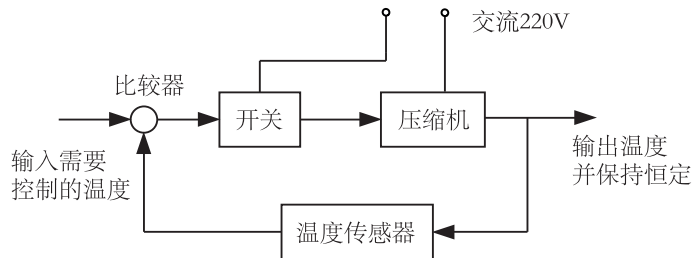


图 1-5 电冰箱温度控制结构

另外，开环控制有结构简单、维修方便、价格低廉等优点；缺点是在外界干扰下被控制的量随之波动，同时也会产生误差。闭环控制与之相反，优点是抗干扰能力强、控制精度高；缺点是结构相对复杂、不容易维修和价格昂贵等。

在分析工业自动化控制系统中，首先要掌握开环和闭环控制的基本结构形式，按照输入到输出的信号作用方向依次画出系统的结构图，其次是找出检测装置，并判断检测到的信号是否又返回到输入端参与控制，使得能够在合理干扰范围内，被控制的量保持恒定。后者是判断系统闭环控制的重要依据。

思考题

1. 组织学生到商场调研，了解电气自动化设备在生活中的应用。
2. 了解生活中的自动化设备有哪些是开环控制，哪些是闭环控制。
3. 了解新工艺、新技术及新材料在自动控制设备中的应用。
4. 了解目前家用电气设备的发展历程。

注：根据调研结果写出报告，进行小组交流讨论。

学习任务二 闭环自动控制系统的基本结构

学习目标

1. 掌握闭环控制系统的基本结构
2. 了解控制器、被控装置和反馈装置
3. 了解输入量、偏差量、控制量、输出量、反馈量和干扰量
4. 了解复杂控制系统的结构分析

导入

在自动化控制系统中不一定是开环控制或闭环控制，也有可能是交叉使用的。例如，在洗衣机中的温度、水位控制为闭环控制，而洗衣机中的电机转速却是基于开环控制的。工业控制中，一般车床是开环控制，而数控机床很多却是闭环控制。考虑到开环自动控制系统相对而言比较简单，本节将闭环控制系统作为重点讲解的对象。

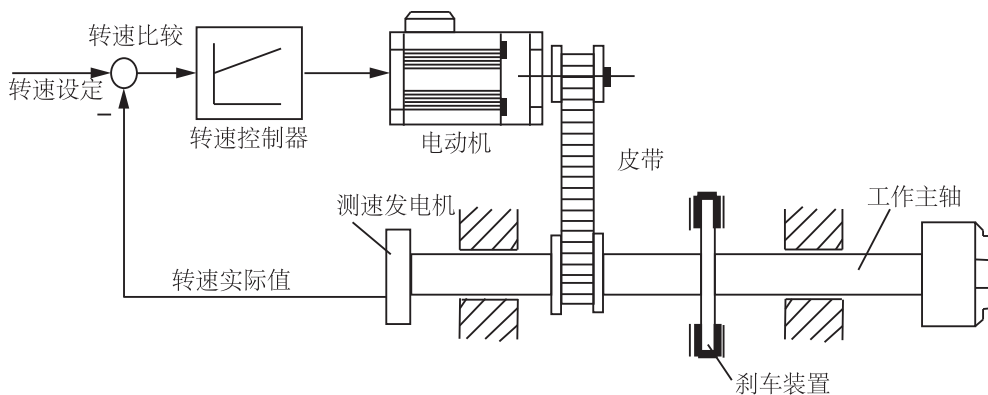


图 1-6 车削机床转速控制系统

任务知识点

自动控制系统在生活和工业控制中的应用程度不同。工业控制中的自动化控制相对复杂主要是在结构上相互交叉、相互作用的关系让我们无从下手，因此找出主环节、主回路对控制系统的研究非常重要。下面针对主环节和主回路的闭环控制系统进行分析与探讨。

一、闭环控制系统的基本结构

工业控制中的自动化控制系统虽然比较复杂，但只有一个主回路，且最基本的结构和闭环作用是不变的。它们调节的目标都是要使输出的控制量保持恒定。归纳和总结闭环控制系统基本结构，如图 1-7 所示。

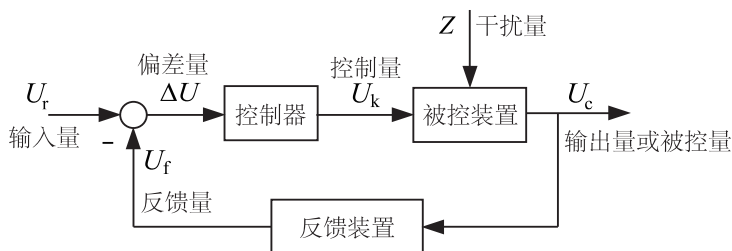


图 1-7 闭环控制系统基本结构

根据基本结构，我们规划了三个框和六个量。

(1) 控制器：是指在自动控制系统中为了保持输出量的恒定所采用的控制装置。控制方法有多种，如家电系列产品中最常用到的开关控制方法，在许多工业自动化控制系统中，则用比例调节器、比例积分调节器、比例微分调节器和比例积分微分调节器作为控制方法。比例积分微分调节器可以用数学公式来表达它们的输入和输出关系，通过电阻、电容和运算放大器元件模拟仿真它们的数学关系，最终达到最佳的控制效果。

(2) 被控装置：指加热器、电机、水泵和阀门等，同时包括与这些设备配套的功率转换装置。如果控制系统是由多个设备组合完成控制，则它们统称为被控装置。

(3) 反馈装置：也叫传感器。不同的被控量需要不同的传感器，但经过传感器后都需要对应转换出与输入量相同的量，例如电压量和电流量。

(4) 输入量 U_r ：也叫目标值、设定值或理想值。例如用 $0 \sim 10V$ 表示 $0 \sim 100^\circ C$ ，当输入量是 $5V$ 时就表示希望输出量要恒定在 $50^\circ C$ ，也可以用 $0 \sim 10V$ 表示 $0 \sim 10000n/m$ 等。有些设备也用 $0 \sim 10mA$ 或 $4 \sim 20mA$ 作为设定目标值。在很多智能化的设备仪器中，直接用数字来设定目标值。

(5) 偏差量 ΔU ：它是指输入量与反馈量相减，即 $\Delta U = U_r - U_f$ 。当偏差量为正偏差时说明输出量还没有达到目标值，反之表示输出量超过了目标值。控制器就是根据偏差量计算出控制量来决定下一步的控制量大小，以调节输出量，达到目标值或保持输出量的恒定。

(6) 控制量 U_k ：它是控制器经过运算之后输出的量。一般这个量为 $0 \sim 10V$ 左右，所以它不能直接去驱动被控装置，需要功率转换。也有输出 $0 \sim 10mA$ 或 $4 \sim 20mA$ ，它可以直接驱动电流型的电动阀门。

(7) 输出量 U_c ：也叫被控制量、测量值或实际值。不同的系统有不同的被控量。如温度、转速、压力、流量和液位等。

(8) 反馈量 U_f ：通过传感器测量后转换给输入端的量。例如，将 $0 \sim 100^\circ C$ 通过温度传感器和与其对应的电路转换成 $0 \sim 10V$ 。

(9) 干扰量 Z ：它是随机的外来作用量，会对系统产生不良影响。

二、闭环控制系统的调节

工业控制中的温度、转速、水位和压力等闭环控制系统无论有多少环节，都离不开最基本的闭环结构形式，闭环控制的调节过程是框图结构之间的信号相互作用的过程。假设图 1-7 为温度控制系统并已经达到恒定温度（即假设输出 U_c 为温度 T ），这时有干扰量 Z 作用于被控装置，使温度突然上升。其作用量之间的调节过程如下：

输出量 $U_c \uparrow$ (T 温度上升) \rightarrow 反馈量 $U_f \uparrow \rightarrow$ 偏差量 $\Delta U \downarrow$ ($\Delta U = U_r - U_f$) \rightarrow 控制量 $U_k \downarrow \rightarrow$ 输出量 $U_c \downarrow$ (T 温度下降)

当温度突然下降时具有同样的道理。

输出量 $U_c \downarrow$ (T 温度下降) \rightarrow 反馈量 $U_f \downarrow \rightarrow$ 偏差量 $\Delta U \uparrow$ ($\Delta U = U_r - U_f$) \rightarrow 控制量 $U_k \uparrow \rightarrow$ 输出量 $U_c \uparrow$ (T 温度下降)

这个调节过程中输入量 U_r 是保持不变的，最重要的是反馈量 U_f 一定要负反馈，这是达到调节作用并保持输出恒定的充分条件。

在实际控制系统中，输入量与反馈量在同一物理量下一定要相减，例如给定量是用电压模拟给定（设定温度的大小），反馈量则要通过传感器转换成电压，经过电路完成两个量的相减，如果是用电流量模拟给定也是同样的原理。在智能化的调节仪表中是直接输入数字设定目标值，但还是离不开传感器，经过智能化采集传感器转换后的电压或电流量，再转换成数字量，用编程技术将两个数字相减，用数学方法完成负反馈的作用。

三、工业自动化控制设备的结构分析

工业自动化控制中最常见的如图 1-8 所示的温度控制系统。

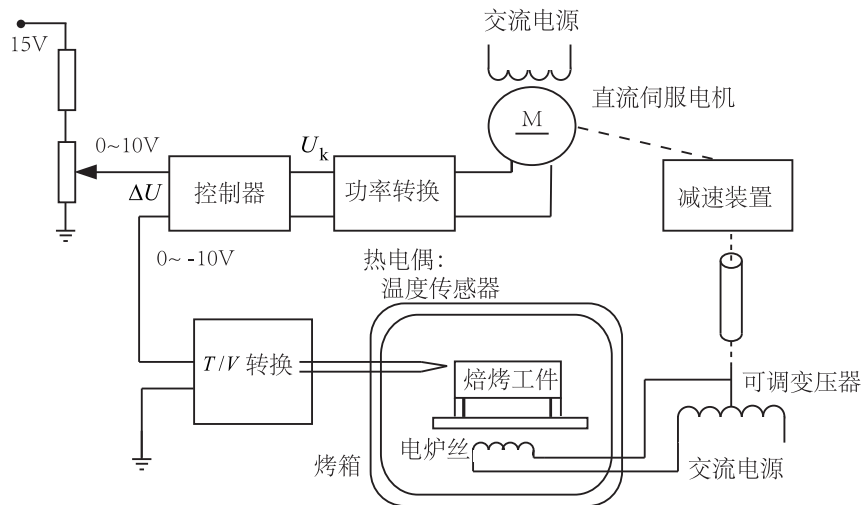


图 1-8 工业温度控制系统

如图 1-8 所示，烤箱中由电炉丝加热，需要恒温烘培工件，由于炉壁散热等不确定因素的干扰，使温度上升或下降，采用热电偶温度传感器，将变化的温度经过热电偶转换为电压，放大后与输入电压（也是设定的目标值）进行相减得到偏差量（负反馈的

作用), 控制器根据输入偏差量 ΔU 而产生控制量 U_k , 经过功率转换后驱动直流伺服电机, 减速装置完成了直流伺服电机转速到转角的过渡, 减速器的转角大小控制可调变压器的电压大小, 最终电炉丝根据所加电压大小, 加热的温度随之变化。

温度控制系统的结构, 如图 1-9 所示。

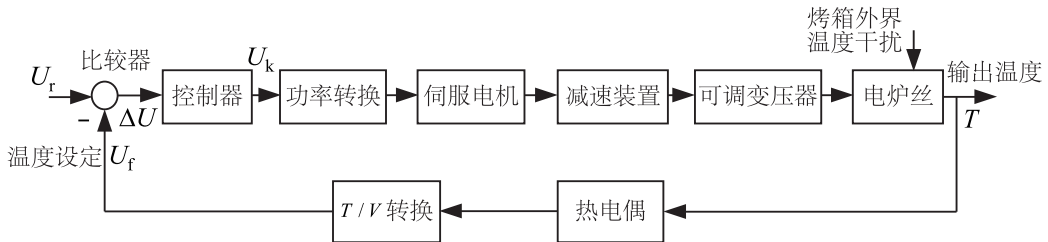


图 1-9 工业温度控制系统结构

它的调节过程及作用关系如下：当温度控制系统达到一个恒定的温度值时（ 200°C ），温箱受到外界干扰（温箱的密封不严或门的开启）使温度下降（ T ），各框图之间的量化关系如下：

T 温度下降 \rightarrow 热电偶输出的电位差下降 $\downarrow \rightarrow T/V$ 转换将电位差转换为与给定值对应的电压量后反馈给比较器 \rightarrow 因为输入量是不变的，则比较后的偏差量 $\uparrow (\Delta U = U_r - U_f) \rightarrow$ 控制器根据偏差量计算出控制量 $U_k \uparrow$ 提供给功率转换单元 \rightarrow 伺服电机加大转角使可调变压器输出加大 $\uparrow \rightarrow$ 作用到电炉丝的电压加大了 $\uparrow \rightarrow$ 这时温度 T 就会上升。在负反馈的基础上经过反复调节，温度会始终保持在一个恒定值上。

在这个控制过程中我们看到，除了电压之间的作用，也存在温度和电压的转换，电压与转角的转换，转角与电压的转换，电压与温度的转换，在有些系统中还会有电流与电压的转换，位置与电压的转换等。虽然环节比较多，但只要按照闭环的基本结构分析，确定输入量、输出量，循序渐进就可以依次画出它们的作用框图。

另外在系统中每一个框图都说明要经过一个转换，每个转换对系统都会产生一个滞后，正是这个滞后给控制系统的调节带来很复杂的影响。分析和测量这些环节，建立对应的数学关系，找到克服这些不良因素的办法，才能达到被控制量恒定的最终目的。

思考题

1. 分别画出原理图 1-10、图 1-11、图 1-12、图 1-13 所示的结构图。
2. 分析原理图中各有什么不同，列出控制器、被控装置、反馈装置各是什么？列出输入量、输出量是什么？指出哪些因素是对控制系统的干扰？
3. 试说明图 1-10、图 1-11、图 1-12、图 1-13 中各控制系统的调节过程。

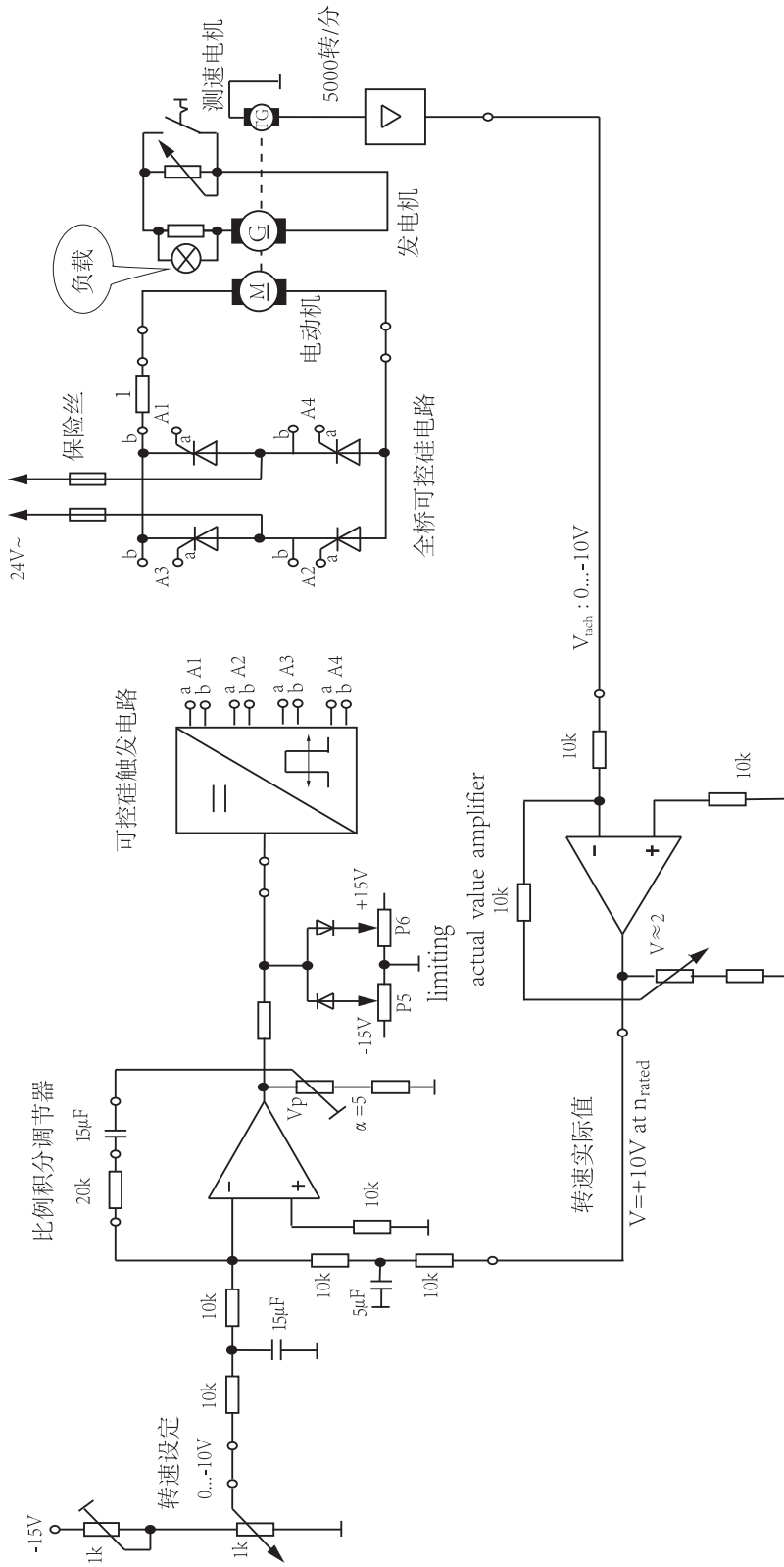


图1-10 直流电机调速控制实验系统

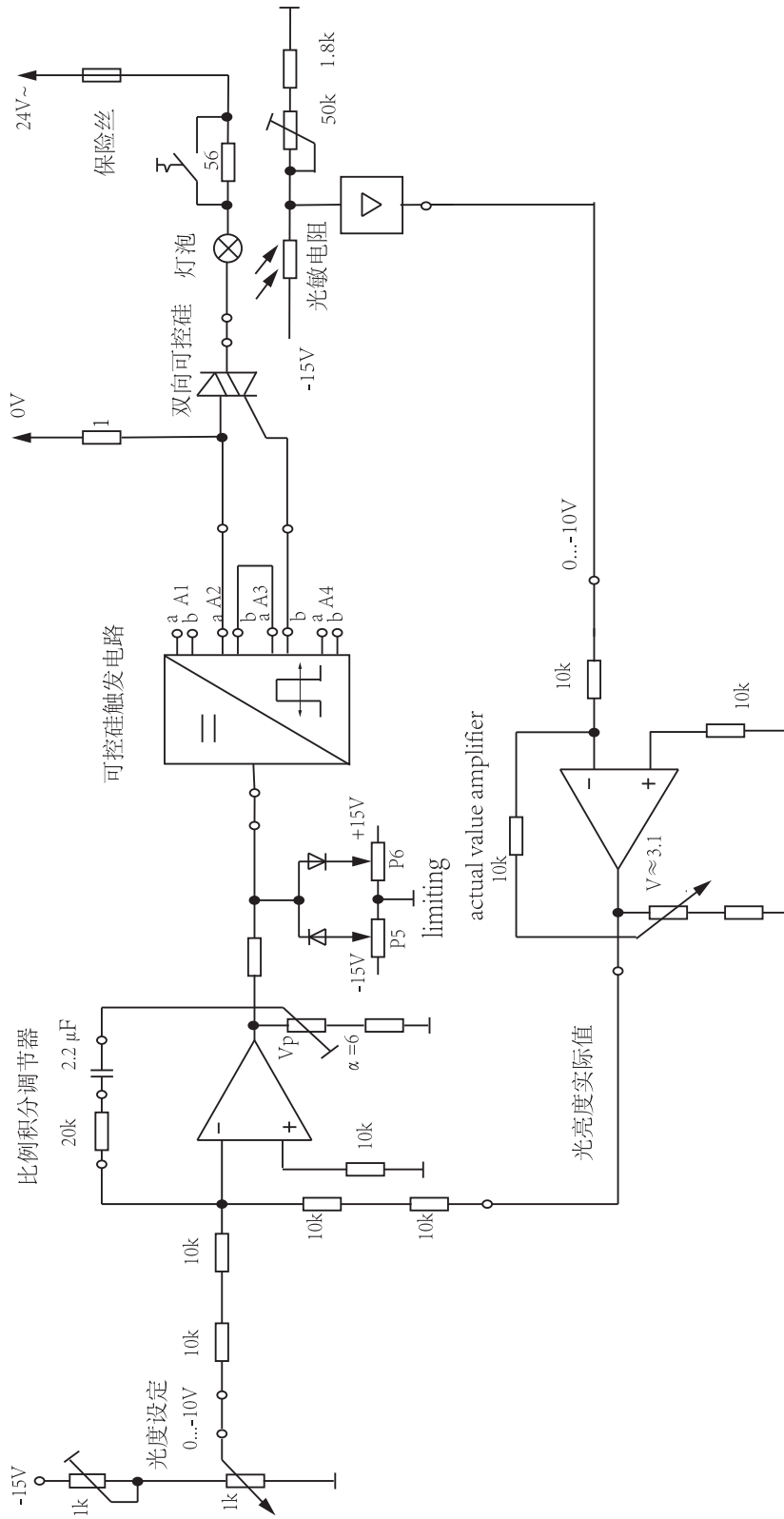


图1-11 灯光强度控制系统

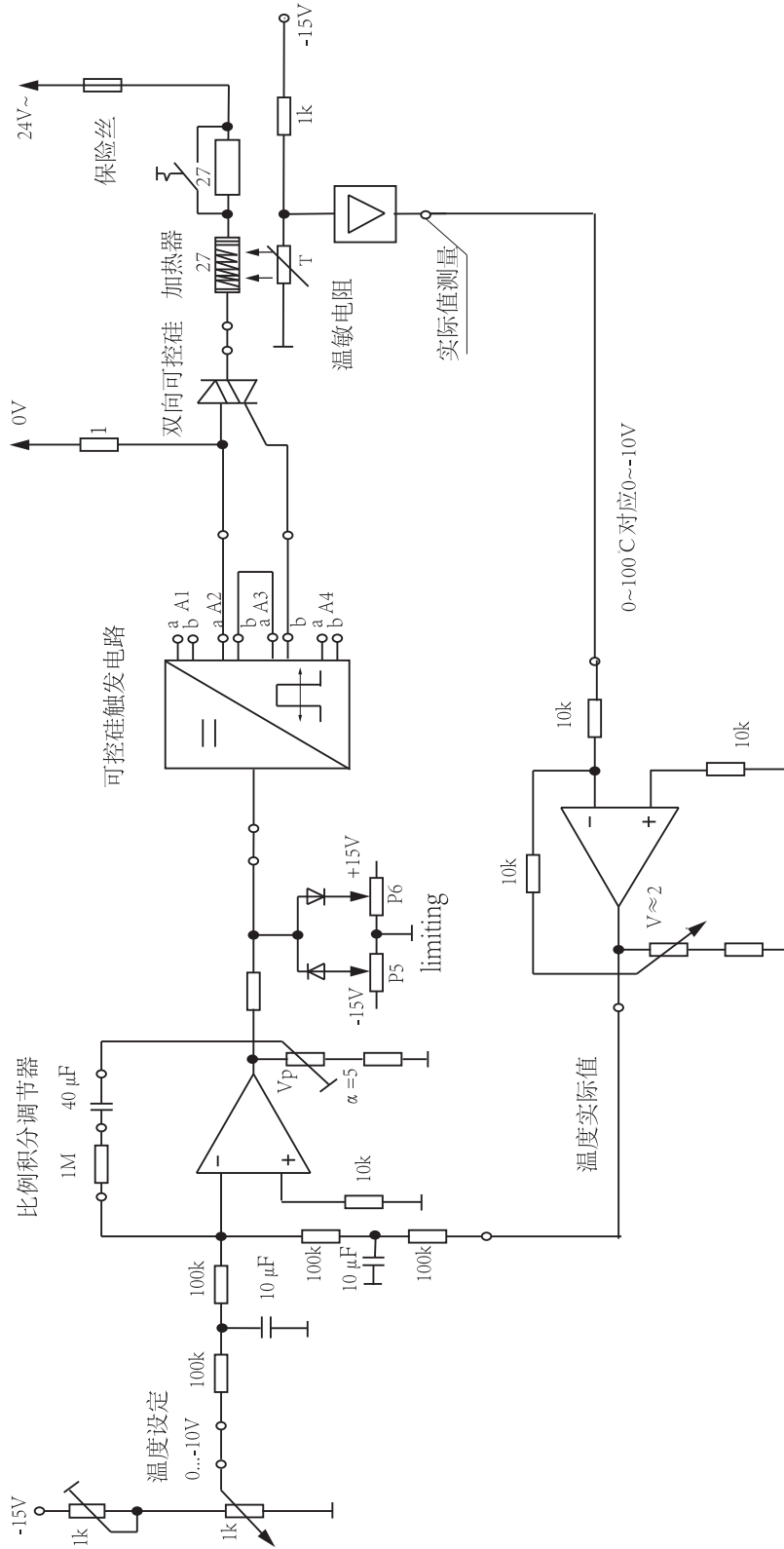


图1-12 温度控制系统

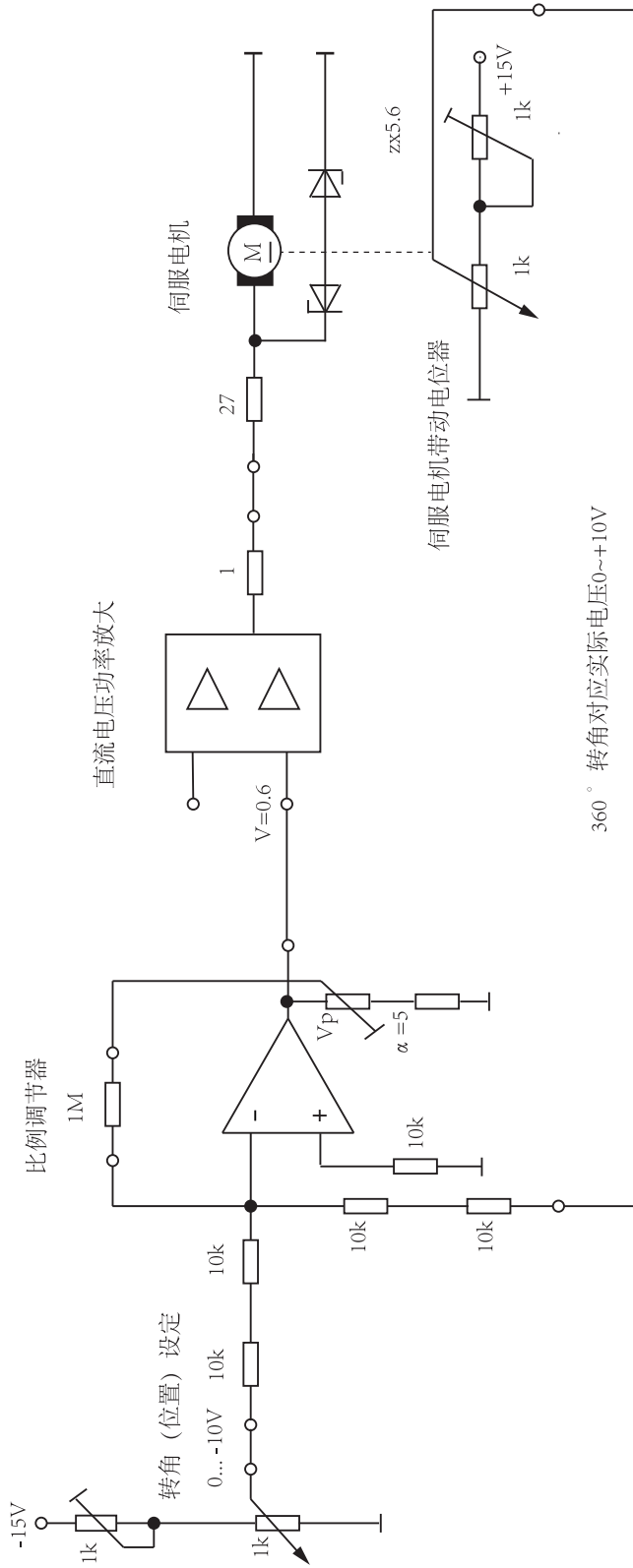


图1-13 位置控制系统

学习任务三 自动控制系统的性能指标

学习目标

1. 了解评价自动控制系统的标准
2. 掌握稳定性、准确性和快速性的基本概念
3. 了解超调量、调节时间、上升时间和振荡次数的定义

导入

生活中我们常常遇到买来的冰箱或洗衣机出现了质量问题，但质量的标准是什么？如何去评判它？其实每一件电气设备在出售之前必须要经过检验，检验的标准由国家统一制定，有些标准是强制执行的，例如：不能漏电，要有接地保护，这是人身安全的必须标准。但有些标准又是有级别之差的，例如：冰箱如果标注三个星，表明它的温度可以达到零下 18°C 。那么，温度控制的过渡过程又是什么样的标准？这个标准就是自控理论要研究的核心内容。

如何去挑选一台冰箱？很多人可能更重视冰箱的性价比、售后服务、耐用性及功能等。但如果有五台同样品牌和型号的冰箱，但它们的制冷过程不同，那你将如何去选购呢？

任务知识点

一个自动控制系统调节的好坏或调节的过渡过程如何，我们可以用性能指标来衡量。如何去评判这个控制系统，就是指它的性能指标达到了多少或经过调节改善了多少。

一、系统的稳定性、准确性和快速性

有五台同样品牌和同样型号的冰箱，它们的制冷过程如图 1-14 所示。

分析如下：①号冰箱相对于其它是最稳的，⑤号冰箱是制冷最快的，但明显看出它是不稳定的，而①②③④号冰箱只要给它们足够的时间，从理论上分析都能达到要求的精度，因为它们过渡曲线是随着时间不断接近目标值的，用数学方法分析，当时间足够长时，它是收敛的。

理想的系统是比较稳、比较准和比较快。即衡量系统的标准是稳定性、准确性和快速性。

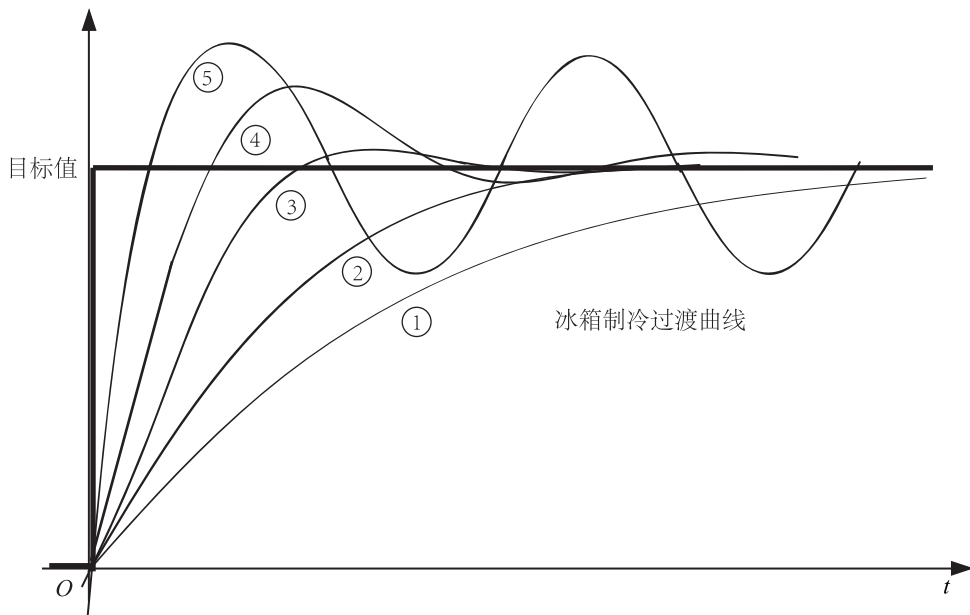


图 1-14 冰箱制冷过渡曲线

系统的稳是指相对的稳定性，不是绝对的稳，否则控制系统不会响应输入变化，在五台冰箱中，②冰箱比③、④冰箱的稳定性要好；比①冰箱的稳定性要差。三项性能指标之间是相互制约的。如果系统太稳了（①冰箱最稳），就会使系统的快速性下降，反之亦然。

系统的准确性是指在一定时间范围内系统达到的精度，即实际输出与目标值的差。在同样的时间内系统比较快地达到精度，会使稳定性相对下降。③冰箱能够在较短时间内到达目标值。

系统的快速性是指系统的反应能力，尤其是能够迅速跟踪输入变化或快速克服干扰的能力，所以系统反映能力越快，稳定性就会降低。在相对稳定性的基础上④冰箱是最快的。

在实际的工业工程控制系统中，不同控制系统的性能指标会有适当调整，例如有些系统比较强调准确性，有些系统要求快速性高，但无论怎样调整，稳定性一定是最重要的。自动控制原理就是通过建立系统的数学模型，找出最优化的控制方法，让控制系统得到最优化的调节过程。

二、超调量、上升时间、调节时间和振荡次数

自动控制系统的调节过程通常受到所用器件、设备等因素的影响（机械转换器件中的滞后作用、继电器的电磁滞后作用），以及被控制量的变化特点不同（转速、温度、位移等）使得调节过程各自不同。如下的参数说明了不同调节过程中系统的稳定性、准确性和快速性。

(1) 最大超调量 $\delta\%$ ：超过目标值的最大偏差量 ΔU_{\max} 与目标值 $U_r(t)$ 之比，用百分比表示，如图 1-15 所示。即

$$\delta\% = \frac{\Delta U_{\text{msx}}}{U_r(t)}\%$$

超调量越大说明快速性越好，但稳定性越差。在实际的控制系统中，它的大小决定了系统的稳定性和快速性是否能够相互兼顾。

(2) 上升时间 t_r ：从开始上升到第一次到达目标值的时间，如图 1-15 所示。理想状态下希望越短越好，在实际的自动控制系统中上升时间太快，虽然快速性好，但稳定性就会变差。

(3) 调节时间 t_s ：从开始上升到不断调整后进入到稳定的误差范围内的时间，如图 1-15 所示。这段时间也可以称作动态过程时间，之后的时间称为稳态。通常动态过程中的性能指标包括稳定性和快速性，稳态所表现出的是准确性。调节时间越短说明快速性越好。

(4) 振荡次数 N ：从开始上升到反复穿越目标值的次数并除以 2，如图 1-15 所示。理想状态下希望 $N = 0.5$ 次。这是考虑到三项指标的综合性。振荡次数越多，说明系统的稳定性越差。

(5) 稳态误差 e_{ss} ：当系统通过调节时间 t_s 之后第一次进入误差范围，并且以后不会超出误差范围，系统达到的相对精度，一般用百分比表示，如图 1-15 所示。

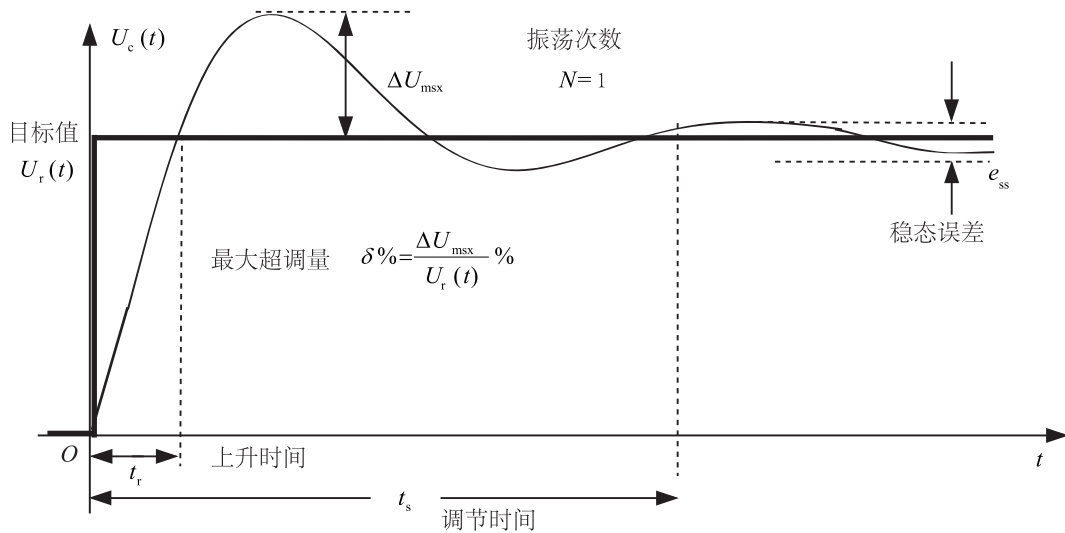


图 1-15 自动控制系统的超调量、上升时间、调节时间和振荡次数

学习任务四 PID 调节器在自动控制系统中的作用

学习目标

1. 了解控制器的分类
2. 了解比例、积分和微分所组成的调节器
3. 了解比例系数、积分时间常数和微分时间常数
4. 掌握 PID 调节器及调节参数的重要作用

导入

每个自动控制系统中的被控量不同，被控装置千差万别，反馈装置传感器也各不相同。工业控制中比较常见的被控量有温度、电机转速、流量、压力和灯光等，完成这些量控制的被控装置有加热器、电机、水泵、阀门和光源等，传感器有测温的热敏电阻或热电偶、测速直流电机、压敏电阻、光敏电阻等，它们涉及的知识非常广泛。对于这些控制系统来说，它们都离不开控制器，不同的控制方法决定了这个系统的性能指标。

任务知识点

一、控制方法的分类

1. 不连续调节器

前面提到的开关控制，也称断续控制，因为控制器的输出随时间的变化而跳跃，表现为开或关两个状态，也称为二位调节，俗称开关调节器或两点调节器。它的执行器件中有些设备选用的是继电器，因为继电器的使用寿命不适合频繁地开或关，所以一般用在精度要求不高的系统中，如电饭煲的温度控制、锅炉的水位控制等，这样可以减少开关次数。

另外，继电器在开和关的过渡中会存在时间差，使得在输出状态曲线上存在一个不灵敏区，这个不灵敏区即是控制系统达到的精度范围，另外，继电器的开关频率和系统控制精度是矛盾的，由于继电器不能频繁启动，所以选用这种调节的缺点是精度不高，优点是电路简单、维修方便、造价低廉。

在两点式调节器中，双金属片调节广泛用于温度调节中，如图 1-16 (a) 所示。当电炉丝加热装置接通时，双金属弹簧片的触点首先是闭合的，加热后双金属弹簧片出现

弯曲，即断开触点，这时温度接近上限值，当温度冷却回到下限值时，触点重新闭合，再次开始加热。由于接通和关闭之间产生温度差值，所以炉温被控制在设定的上下限之间。不连续调节器的输出特性曲线如图 1-16 (b) 所示。

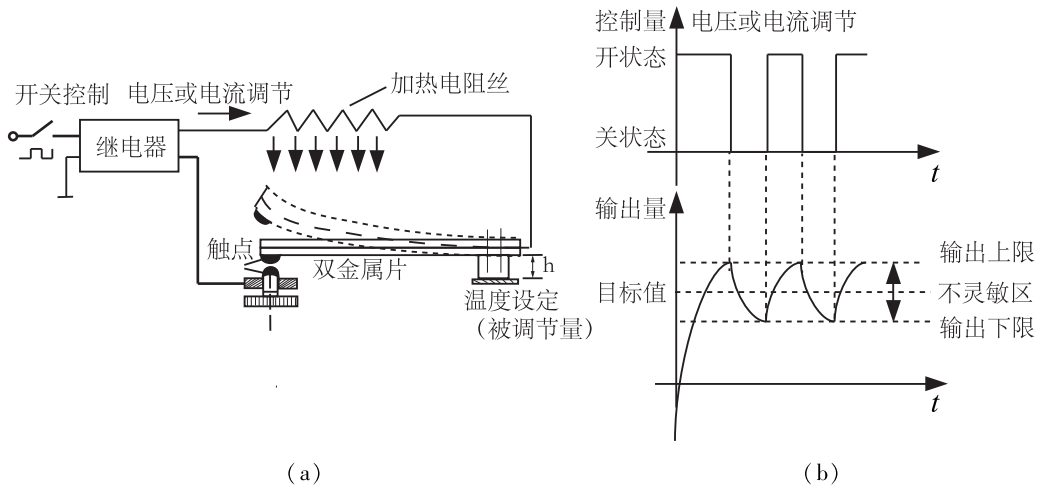


图 1-16 双金属片调节温度控制系统
(a) 双金属片调节电炉加热装置 (b) 不连续调节器输出特性

2. 连续调节器

工业中的控制量和控制环境比较复杂，单纯使用开关控制是不够的，用比例积分微分控制是工业控制中经典的控制方法。这种控制器随时间而连续变化，它能够更好地跟踪输入量的变化，从而达到比较理想的控制效果。最重要的是，它能够用数学公式表达输入与输出的作用关系，对自动控制系统调节过程建立数学模型，研究、分析、仿真自动控制系统。

在自动控制系统设计中，除了选取被控装置和配套的传感器之外，还要选取控制器，对闭环控制效果来讲，最重要的是控制器。针对不同的控制量和控制装置去选择与之配套的控制仪表，当然还要再关注控制仪表的输出特征及调节参数范围。例如，它的比例调整范围、积分时间常数和微分时间常数的调整范围以及输入输出方式。

这种调节器的优点是控制精度比较高，可根据系统的性能指标调整比例、积分和微分参数，更具有灵活性。缺点是电路比较复杂、控制系统成本偏高。

二、比例积分微分调节器及调节参数

(1) 比例积分微分调节器 (Proportional Plus-Integral Plus-Derivative Controller) 是工业自动化控制系统中最经典和最常用的控制方法。PID 调节器可分解成 P 调节器、PI 调节器和 PD 调节器。调节器是用电阻、电容及运算放大器等元器件搭出具有比例、积分和微分作用的电路，是基于数学上的比例、积分和微分表达式。对控制系统的作用可以简单理解为比例调节决定了控制系统的稳定性，积分调节决定了控制系统的准确性，微分调节决定了控制系统的快速性。

(2) PID 调节器中有三个重要的可调参数：比例系数 K_p 、积分时间常数 T_i 和微分时间 T_d 。参数间的大小调整和相互配合非常重要。

如何使被控制量从上升到目标值有一个最优化的过渡过程（图 1-17），参数的调整直接影响了过渡曲线。用实验的方法去摸索参数调整的规律和特点等，在实际操作中往往不被允许或不方便，但利用 Multisim 的软件仿真，可以很容易地找出它们的参数调整规律，可节省很多仪器设备及设备的损耗，也提供了研究调整参数的手段。图 1-17 是最优化过渡曲线的示意图，是参考数学模型理想状态下得出的，对不同工业控制系统的性能指标要求不同，会有不同程度的调整。

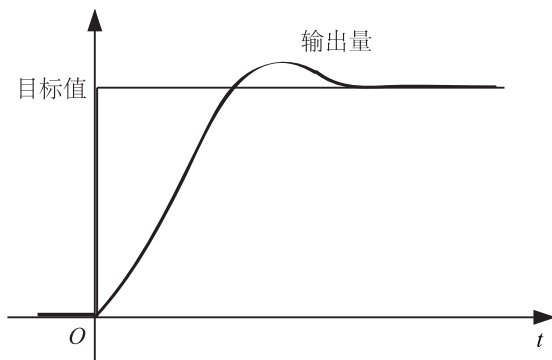


图 1-17 跟踪目标值最优化的过渡过程

综合来讲，比例调节器是将控制系统实际值（被控量）与理想值（给定量）比较后所产生的偏差按设定的比例系数放大或缩小的调节器。

积分调节器是在设定的积分时间常数下，不断减少偏差或逐渐消除偏差的调节器。

微分调节器是当外界对控制系统产生干扰，或实际值出现突变时，在设定的微分时间内能够快速消除这个影响的调节器。

PID 调节器根据其设定参数的大小，完成了对控制系统过渡过程的调节，其作用在于调节系统的稳定程度、准确性和快速响应能力。当然，这三个参数的选取和调节在一定程度上会互相制约，因此如何调到最佳状态是需要反复实验的。

如果用人来比喻的话，每个人的一生中都充满着比例、积分和微分的作用。按照规则去办事就像是比例作用，不断学习和经验的积累就像是积分作用，而微分作用就像我们一生中能够遇到或抓住的机遇。为了一个目标，我们要学会学习、积累，这样才能在机遇到来之时抓住它。自动控制系统不具备自我修正、自我调节和自我适应的能力，只能按我们设定的参数大小来做相应的线性调节，虽然如此，还是给不同的控制系统带来了极大的方便。努力让自动控制系统的控制过程像人类一样思考，这是我们不断追求的目标。随着智能芯片的开发及新工艺的不断创新，自动控制系统的自适应、自调整和智慧化的提高将大大简化我们对掌握调整参数的要求。

实验实训

(1) 参考第六单元关于 Multisim 软件的使用，在已建立的闭环仿真系统上，分别采用断续调节和连续调节器，观察控制系统的过渡曲线，比较两种调节器的不同。

(2) 在 PID 调节器作用下分别调整三项参数，体会比例、积分和微分作用对系统性能指标的影响，分析过渡曲线随时间变化的规律。

单元小结

1. 自动化及自动控制是在人的间接参与下，使设备或仪器完成预先设定的目标或任务。

2. 开环控制与闭环控制相比而言存在三方面不同点：首先是结构上有反馈装置的为闭环控制，反之为开环控制；其次是信号作用的方向，输出信号参与输入控制的为闭环控制，否则为开环控制；最后，闭环控制最大的优点是抗干扰能力强、精度高。缺点是结构复杂、价格高、维修难。

3. 闭环控制系统最基本的结构为三个框图（控制器、被控装置和反馈装置）和六个量（设定量、偏差量、控制量、输出量、反馈量及干扰量）之间的关系。

4. 评价自动控制系统优劣的标准是稳定性、准确性和快速性。其中稳定性最重要，如果系统相对不稳定，则准确性和快速性没有任何意义。稳定性是相对的稳定程度。

5. 稳定性、准确性和快速性三项指标可以由超调量 $\delta\%$ 、上升时间 t_r 、调节时间 t_s 、振荡次数 N 的大小及精度 e_{ss} 来判断。动态性能指标包括稳定性和快速性，稳态性能指标是指准确性。稳定性与稳态性不能混为一谈。

6. 在闭环控制系统调节的过程中，最为核心的是控制方法的选择。PID 是工业控制中比较经典的控制方法，但比例、积分和微分三项参数的选取或调整是核心中的核心，它关系到控制系统的最优化过渡过程，如果选取参数不当，其调整效果也许还不如开关调节。

单元练习

一、选择题

- 如图 1-18 所示的自动控制装置为什么没有调节作用？
 - 因为没有测量传感器
 - 因为温度设定值和温度传感器同时对调节器起作用
 - 因为不能调节所给定的参数
 - 因为被供热的房间温度不会影响温度传感器
 - 因为被调节量不是水温，而是对燃料阀门进行调节

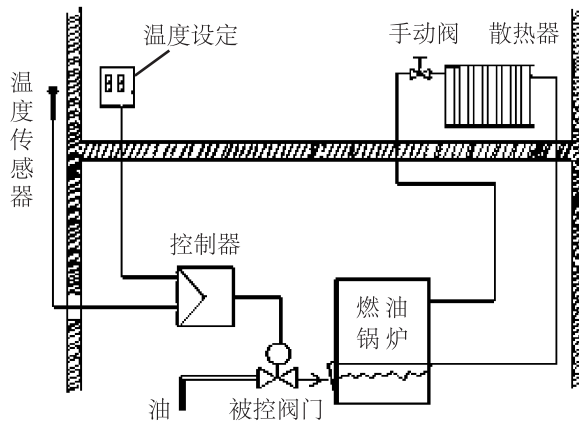


图 1-18 自动控制装置

- 图 1-19 给出了某控制系统的转速调节结构，该图中哪组名称是正确的？

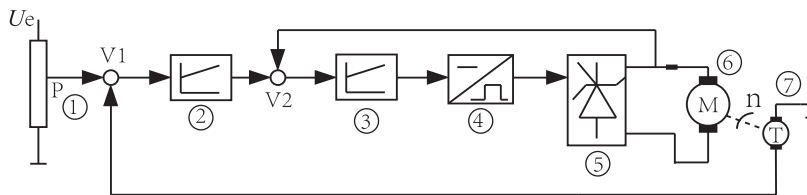


图 1-19 控制系统结构

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
A	干扰量	调节量	校正器	放大器	功率转换	马达	直流电机
B	被控质量	控制器	调节差值	驱动器	晶闸管	马达	交流电机
C	调节差值	调节量	控制器	放大器	二极管	电机	传感器
D	目标值	比例调节	控制量	触发器	三极管	直流电机	测速电机
E	给定值	比例积分器	调节器	触发器	可控硅	电机	测速电机

3. 如图 1-20 所示, 在开关调节器或两点调节器中, 哪个波形属于不连续调节器?

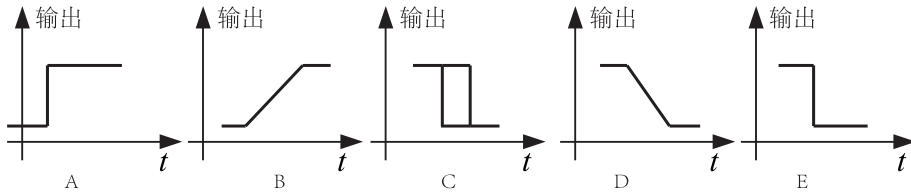


图 1-20

4. 在调节回路中的某个环节, 它可以把一个给定的物理量转变成另一个物理量, 它应该是?

- A. 变压器 B. 测量传感器 C. 反向器 D. 调节换能器 E. 信号放大器

5. 在调节技术中, “测量环节”(传感器)的任务是什么?

- A. 采集被控制的量
 B. 采集实际值, 经给定值与实际值比较, 并驱动电路中设备
 C. 转换被控制量给设定值
 D. 测量实际值与给定值之间的差值
 E. 可以减少误差范围

6. 在调温设备中, 如果要满足条件: 当温度低于 18℃ 时加热器接通, 当温度高于 22℃ 时加热器关断时, 选哪种调节器适合?

- A. P 调节器 B. I 调节器 C. PD 调节器 D. PID 调节器 E. 两点调节器

7. 在图 1-21 所示的闭环控制结构中, 用数字 1、2、3 标出的位置, 下表中哪一行的调节概念是正确的?

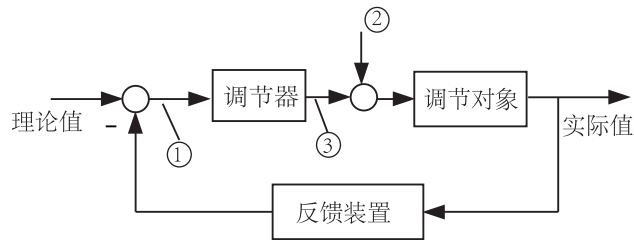


图 1-21 闭环控制结构

	①	②	③
A	干扰量	调节差值	调节量
B	被控制量	干扰量	调节差值
C	调节差值	调节量	控制量
D	调节量	输入量	控制量
E	调节差值	干扰量	控制量

8. 对于两点控制, 以下说法中哪种是正确的?

- A. 它通常具有积分特性
 B. 它也被称为“断续控制”

- C. 它可以对全部扰动进行控制
 D. 在扰动量出现时被调量有延时
 E. 这种调节会使系统调节滞后变化
9. 两点控制适用于以下哪种场合?
 A. 转速 B. 温度 C. 位置 D. 亮度 E. 流量
10. 对被调节的控制系统而言, 以下选项中哪个说法是正确的?
 A. 不允许出现振荡现象
 B. 不允许出现调节误差
 C. 调节速度是最重要的指标
 D. 稳定性是最重要的指标
 E. 负反馈越深越好
11. 调节偏差的意义是什么?
 A. 是给定参数与被调参数之间的差值
 B. 是反馈量与实际值之间的差值
 C. 是被调参数与理论值之间的最大差值
 D. 是被调参数与调节参数间的负差值
 E. 是调节器的精度控制的等级
12. 如图 1-22 所示, 哪个是调节时间, 哪个是超调量?
 A. T_1 与 X_3 B. T_3 与 X_2 C. T_2 与 X_3 D. T_3 与 X_3 E. T_1 与 X_1

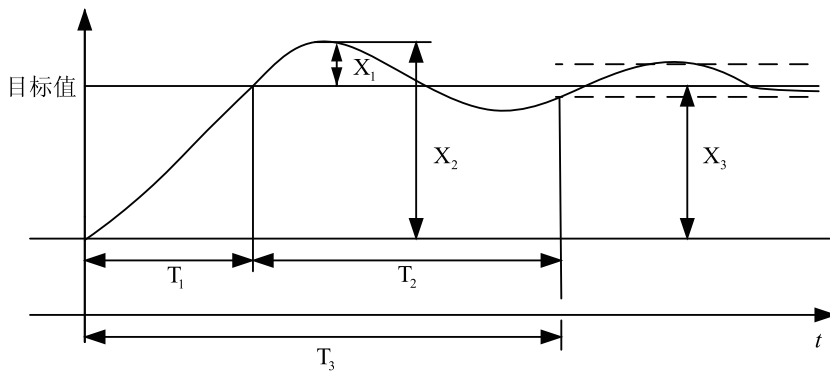


图 1-22 调节过渡曲线

二、思考题

1. 什么是自动化, 什么是自动控制?
2. 开环控制与闭环控制有什么不同?
3. 开环控制和闭环控制各自的优缺点是什么?
4. 闭环控制系统的基本结构图是怎样的?
5. 如何评价自动控制系统的优劣?
6. 说明温度控制、电机转速控制各有什么不同? 他们的被控装置特点是什么?
7. 分别写出转速 (图 1-23)、温度 (图 1-24)、光控 (图 1-25)、水位 (图 1-26)、

流量（图 1-27）和位置控制系统（图 1-28）的被控装置、传感器和控制方法各是什么？

8. PI 调节器的作用是什么？

9. 试分析图 1-23、图 1-24、图 1-25、图 1-26、图 1-27 和图 1-28 中的实验控制系统，其中输入量、被控制量（输出量）是什么？干扰因素有哪些？

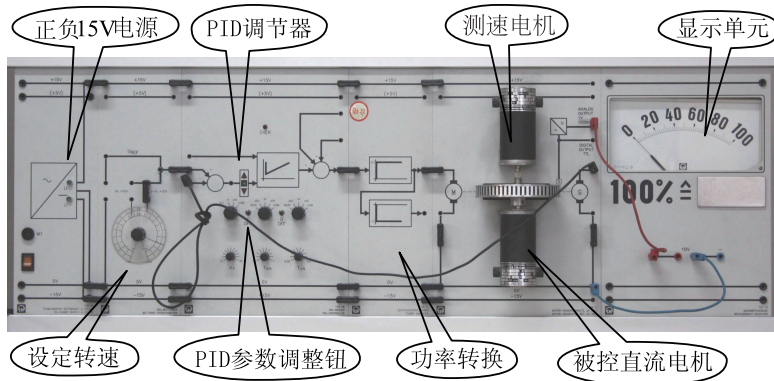


图 1-23 直流电机转速模拟控制实验系统

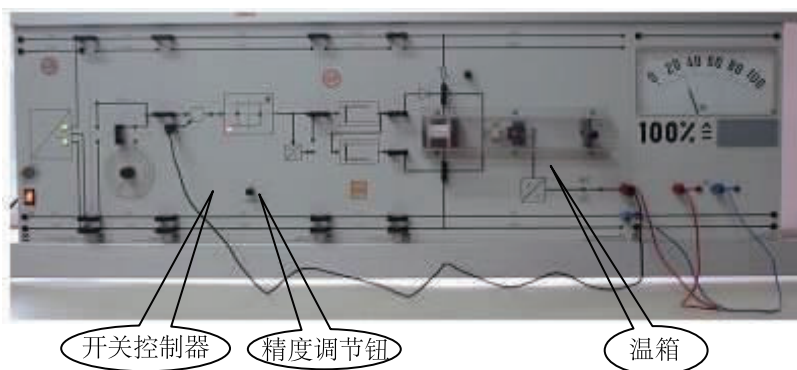


图 1-24 温度模拟控制实验系统

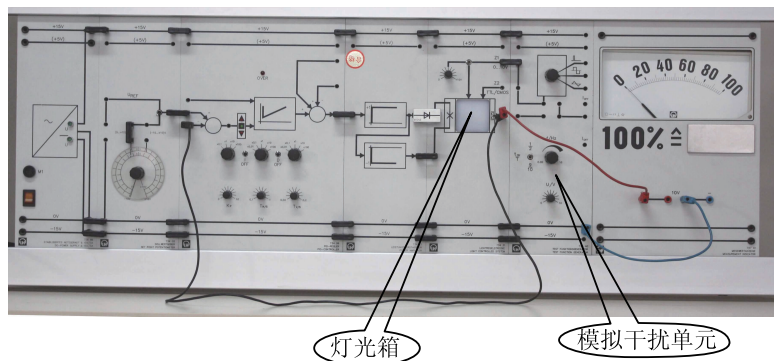


图 1-25 灯光强度模拟控制实验系统

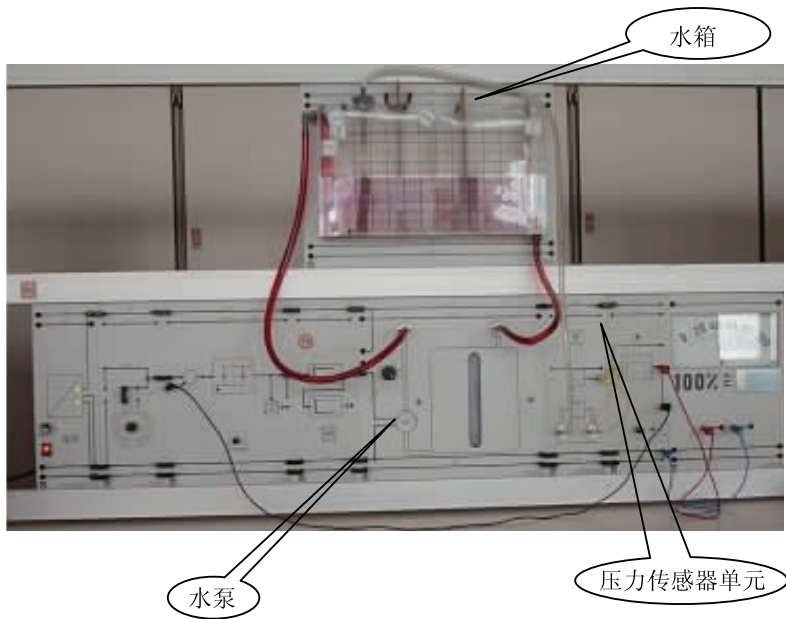


图 1-26 水位模拟控制实验系统

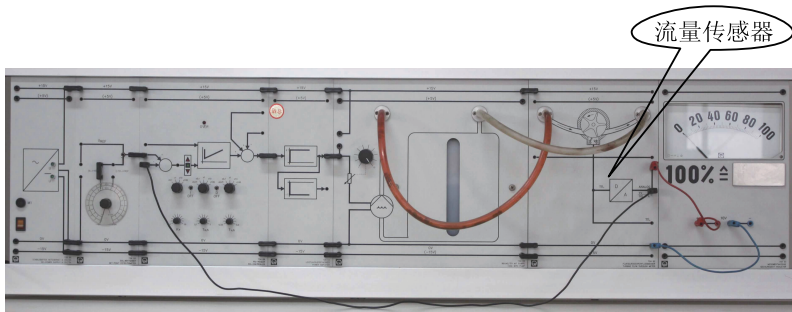


图 1-27 流量模拟控制实验系统

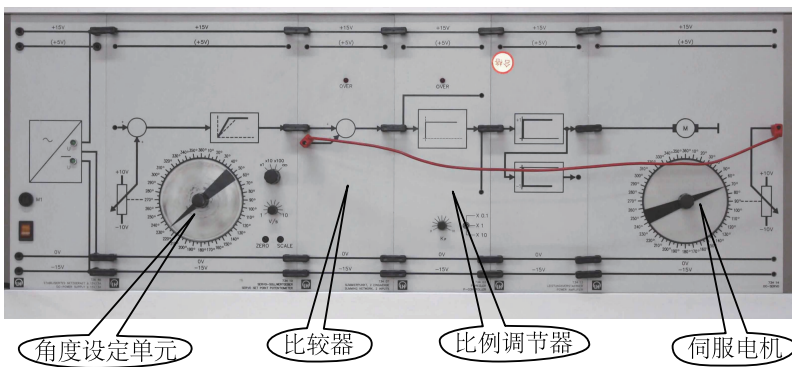


图 1-28 位置（伺服电机）模拟控制实验系统