



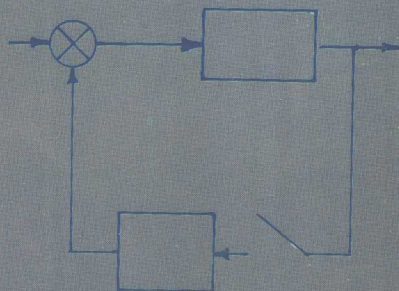
中央广播电视大学教材

自动控制原理

(修订版)

ZI DONG KONG ZHI
YUAN LI

孙虎章 主编



中央广播电视大学出版社



自动控制原理

(修订版)

孙虎章 主编

中央广播电视大学出版社

(京)新登字 163 号

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理/孙虎章主编. —2 版(修订版). —北京:
中央广播电视大学出版社, 1994. 11

ISBN 7-304-01137-8

I. 自… II. 孙… III. 自动控制理论-电视大学-教材
IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(94)第 14913 号

自动控制原理

(修订版)

孙虎章 主编

中央广播电视大学出版社出版

社址:北京市复兴门内大街 160 号 邮编:100031

北京第二新华印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行

开本 787×1092 1/16 印张 17 千字 389

1984 年 1 月第 1 版

1994 年 10 月第 2 版 2001 年 10 月第 10 次印刷

印数 113101~124100

定价:18.80 元

ISBN 7-304-01137-8/TP·57

前 言

自动控制作为技术改造和技术发展的重要手段，在我国社会主义现代化建设中得到了广泛的应用。

工业生产设备的自动化，能够改善劳动条件、提高产品质量、增加产量，显著地提高企业的经济效益。

军事装备的自动化，可以提高武器的速度、精度和战术技术性能。

在许多人们无法接近的场合，自动控制将是唯一的技术手段。

自动控制原理是一门技术科学（即应用理论），其研究的对象是自动控制系统，研究的中心问题是控制过程的动态规律性，而学科的主要内容为数学模型、工程分析计算方法和系统一般规律。

自动控制原理是自动化仪表、元件、控制装置和系统等工程专业的专业基础理论。

本书是根据中央广播电视大学电气工程类专业教学大纲编写的试用教材修订而成的。书中介绍了经典线性理论、部分非线性理论以及采样系统理论，均为最基础的内容。书中各章附有适量的习题，以帮助巩固基础知识和训练分析、计算能力。

本书在保持原教材理论体系和章节结构的基础上，着重在保证基础、注重应用、删繁就简、理顺系统方面作了若干变动和充实。

参加本书编写的有原北京航空学院的孙虎章（第一、五、六章）、汪声远（第二、七章）、陆桂芳（第三、八章）、祁慧珍（第四章）及申功璋（习题及答案）。孙虎章负责全书的修订工作。

在编写过程中，学习并汲取了兄弟院校教材的部分内容。

中央广播电视大学主持了本书的审定工作，主审为高金源（北京航空航天大学教授），审定组其他成员有：罗大庸（长沙铁道学院教授）、张学孚（湖南广播电视大学副教授）、陶琳（中央广播电视大学高级工程师）、王岩（中央广播电视大学副教授）。

编 者

1994年8月

主持教师：陶琳

主 编：孙虎章

编 者：汪声远 祁慧珍 陆桂芳 申功璋

目 录

第一章 自动控制的一般概念	(1)
§ 1-1 自动控制的任務	(1)
§ 1-2 自动控制的基本方式	(1)
§ 1-3 对控制系统的性能要求	(7)
习题	(9)
第二章 控制系统的数学模型	(11)
§ 2-1 列写微分方程的一般方法	(11)
§ 2-2 非线性方程的线性化	(13)
§ 2-3 传递函数	(15)
§ 2-4 动态结构图和典型环节	(21)
§ 2-5 结构图的等效变换	(25)
§ 2-6 系统传递函数	(36)
附录 拉普拉斯变换及线性微分方程求解	(39)
习题	(49)
第三章 时域分析法	(54)
§ 3-1 典型响应及性能指标	(54)
§ 3-2 一阶系统分析	(57)
§ 3-3 二阶系统分析	(59)
§ 3-4 系统稳定性分析	(68)
§ 3-5 系统稳态误差分析	(74)
习题	(85)
第四章 根轨迹法	(89)
§ 4-1 根轨迹与根轨迹方程	(89)
§ 4-2 绘制根轨迹的基本法则	(92)
§ 4-3 闭环零、极点分布与系统阶跃响应的关系	(103)
§ 4-4 系统阶跃响应的根轨迹分析	(107)
习题	(113)
第五章 频率法	(116)
§ 5-1 频率特性	(116)
§ 5-2 典型环节的频率特性	(120)
§ 5-3 系统开环频率特性	(132)

§ 5-4 乃奎斯特稳定判据和对数频率判据	(139)
§ 5-5 闭环频率特性与系统阶跃响应的关系	(147)
§ 5-6 开环频率特性与系统阶跃响应的关系	(152)
习题.....	(156)
第六章 控制系统的校正	(160)
§ 6-1 系统的设计与校正问题	(160)
§ 6-2 串联校正	(162)
§ 6-3 反馈校正	(167)
§ 6-4 复合控制	(170)
§ 6-5 系统串联校正的理论设计	(174)
习题.....	(180)
第七章 非线性系统分析	(183)
§ 7-1 非线性系统动态过程的特点	(183)
§ 7-2 典型非线性特性及其对系统动态过程的影响	(185)
§ 7-3 描述函数	(189)
§ 7-4 描述函数法及系统分析	(196)
§ 7-5 非线性系统性能的校正	(204)
习题.....	(210)
第八章 采样系统分析	(213)
§ 8-1 采样过程与采样定理	(213)
§ 8-2 信号复现与零阶保持器	(216)
§ 8-3 z 变换与 z 反变换	(218)
§ 8-4 脉冲 (z) 传递函数	(231)
§ 8-5 采样系统的性能分析	(243)
习题.....	(251)
附录 部分习题答案	(255)

第一章 自动控制的一般概念

本章将从控制任务、控制方式及控制过程等方面阐述自动控制系统的基本特点，从而给本课程研究的对象和问题提供一个较为明确的认识。

§ 1-1 自动控制的任务

自动控制作为重要的技术手段，能够解决哪类性质的工程问题，承担什么样的技术任务？

任何技术设备、机器和生产过程都必须按要求运行。例如，要想发电机正常供电，其输出电压必须保持恒定，尽量不受负荷变动的干扰；要想数控机床加工出高精度零件，其刀架的进给量必须准确地按照程序指令的设定值变化；要想热处理炉提供合格的产品，其炉温必须严格地按规定操纵，等等。

其中发电机、机床、热处理炉是工作的主体设备，而电压、进给量、炉温则是表征这些设备工况的关键参数，那么额定电压、设定进给量、规定的炉温就是在设备运行中对工况参数的具体要求。按照特定的要求操纵工况参数，即机器设备运行的实质。

将被操纵的机器设备称作受控对象，将表征其工况的关键参数称作被控量，而将对这些工况参数所希望所要求达到的值称作给定值（或希望值、参考输入），则操纵任务可抽象为：使受控对象的被控量按给定值变化。

如果这个任务不是直接由人工承担，而是靠控制装置来完成，即：在没有人直接参与的情况下，利用控制装置操纵受控对象，使被控量按给定值变化，则称自动控制。

运行中，被控量以时间函数 $c(t)$ 表示，给定值以 $r(t)$ 表示，使受控对象满足

$$c(t) \approx r(t)$$

就是自动控制任务的数学表达式。

而受控对象和控制装置的总体称自动控制系统。

控制装置又是如何操纵受控对象以完成自控任务的呢？是否存在一些普遍性特点？

§ 1-2 自动控制的基本方式

由于控制装置是用来取代人的一部分工作的，因此，分析一下人在进行某项工作任务中所经历的主要过程以及所具有的基本功能，对寻求自动控制的方法无疑是有益的。

为了有效地进行某项工作，人们总是要经常了解工作的进展和实际结果，摸清干扰工作正常进行的主要因素和条件，这个功能称之为调查或观察；

然后将得到的各方面情况进行分析对比，看看实际结果与预期目标相差多少，并统观全

局作出新的判断和安排，这个关键功能称之为分析决策；

接下去应该是根据新的安排下达执行。执行的效果如何，需要再调查、再分析，循环往复直至工作任务结束。

工作中各种功能及其相互联系见方块图 1-1，图中各功能机构和工作对象均以方块表示，箭头方向则表明各部分的作用关系。

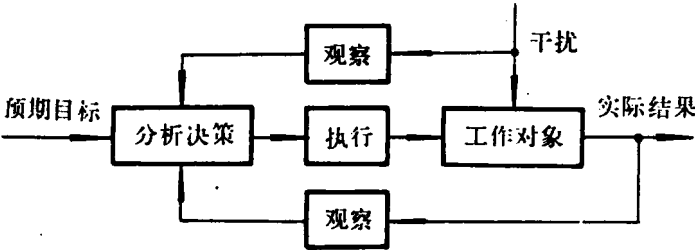


图 1-1 人工功能图

如果用技术装置和工程语言代换图 1-1，工作对象即受控对象，实际结果即被控量，预期目标则相当于给定值（或参考输入）。而功能方块——观察、分析决策——分别以测量、计算取代，则得自动控制原理方块图 1-2。

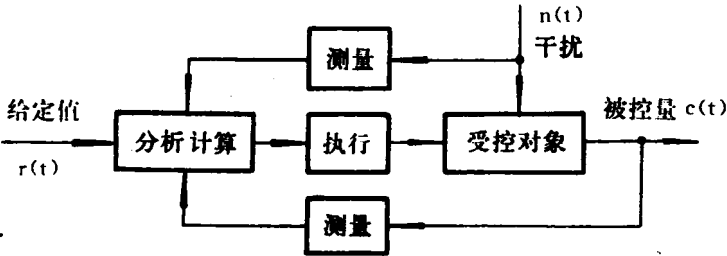


图 1-2 自动控制原理方块图

图中除受控对象外，其它功能部分必须由控制装置承担，故控制装置应该具备测量、计算、执行三种基本功能，这需要配置相应的部件来实现。实际控制系统中，测量部件即各种工业仪表及传感器；计算部件即各种比较线路、模拟运算装置和单板机、单片机或者是控制机；执行部件则为交、直流伺服电动机、电磁铁、作动筒和气、液压马达。

另外，由图中可看出，参与控制的原始信号有三个，即被控量 $c(t)$ 、给定值 $r(t)$ 及干扰 $n(t)$ ，这是控制的主要依据。

基于上述分析，下面提出三种基本的控制方式，即按给定值操纵和按干扰补偿的开式控制以及按偏差调节的闭式（反馈）控制。

一、按给定值操纵的开式控制

这种控制方式的特点是，需要控制的是受控对象的被控量 $c(t)$ ，而控制装置只接受给定值

$r(t)$ 信号,如图 1-3 所示。系统中,信号源给定值经计算、执行部件及至受控对象而转变为被控量系单向传递,故又常称开式控制。

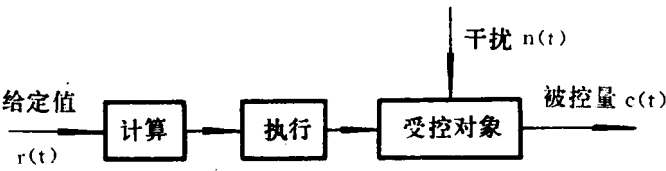


图 1-3 按给定值操纵的系统原理方块图

这种控制系统具有明显的缺陷,当受控对象受到干扰或运行中某些部件的特性参数发生变化,则会直接影响被控量,且无法自行纠正,因此系统的控制精度难于保证。当然,如果系统的部件特性相当稳定,基本不受干扰影响,也还是可用的。如一些自动化生产线、数控机床、自动切割机等常用这种控制方式。

二、按干扰补偿的开式控制

其原理方块图见图 1-4。这种控制方式的特点是,需要控制的仍是受控对象的被控量,而控制装置接受的是(破坏正常运行的)干扰信号 $n(t)$ 。利用干扰信号产生控制作用,以及时补偿干扰对被控量的直接影响,故称按干扰补偿式。而干扰经测量、计算、执行诸部件及至受控对象变换为被控量,也是单向传递,故亦称开式控制。

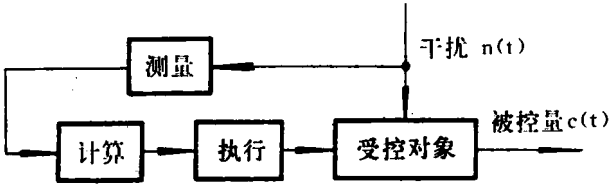


图 1-4 按干扰补偿的系统原理方块图

由于测量的是干扰,故只能对可测干扰进行补偿,不可测干扰以及受控对象、各功能部件内部参数变化对被控量的影响,系统自身仍无法控制,因此控制精度受到限制。存在强干扰而且变化比较剧烈的场合常用这种控制方式,如龙门铣刀的转速控制、稳压电源等。

三、按偏差调节的闭式控制

其原理方块图见图 1-5。这种控制方式的特点是,需要控制的是受控对象的被控量,而控制装置测量的是被控量和给定值,并计算二者的偏差。只要被控量偏离了给定值,无论是干扰影响还是内部特性参数变化引起的或是给定值主动变动,系统均能自动纠正,故称按偏差调节式。显然,这种系统从原理上提供了实现高精度控制的可能性。

系统中,控制信号经计算、执行部件及至受控对象,然后又经测量部件反馈回来,循环往复形成闭路传递,故又称闭式控制或反馈控制。

而反馈信号必须与给定值相减,以形成偏差,这种反馈称之为负反馈(见图中负号)。负反馈闭合回路,是按偏差调节的自动控制系统在结构联系和信号传递上的重要标志。

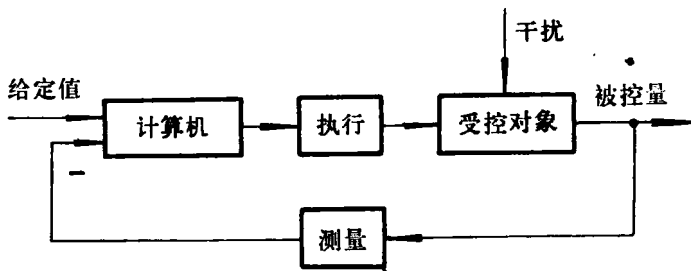


图 1-5 按偏差调节的系统原理方块图

反馈控制是自动控制系统中较高级的控制方式，在控制工程中获得了广泛的应用。

例 1-1 热处理炉温控系统的工作原理图如图 1-6 所示。试简要分析系统的控制原理，并画出系统原理方块图。

解 系统的任务是控制炉温 T_c 使其等于给定温度 T_r 。运行中炉温会受到管道煤气压力波动以及环境温度变化而飘移，这就需要通过调整管道阀门改变进入炉体的煤气流量来保持温度。另外，根据工艺要求也常常需要在运行过程中按程序变换炉温。

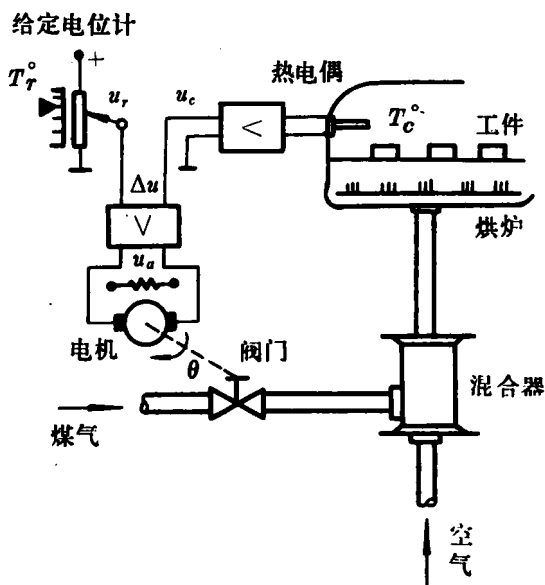


图 1-6 热处理炉温控系统原理图

最终需要控制的是炉温，故首先应明确，受控对象是热处理炉，被控量是炉温 T_c ，而煤气压力和环境温度均可视为干扰。系统中：

热电偶为测温元件，它将炉温变换为微弱电势，并经放大器输出相应的电压 u_c 。

给定电位计相当于指令机构，将要求的炉温即给定值 T_r 转换为电压 u_r 。

计算线路由 u_r 、 u_c 两电压的反接来实现，电压 $\Delta u = u_r - u_c$ ，相当于炉温的偏差。

直流电动机及传动装置为执行机构，拖动管道阀门开大关小。

由上述分析，可知系统的工作原理如下：假定炉温 T_c 恰好等于由给定电位计设定的给定值 T_r ，则经事先整定，使 $u_c = u_r$ ，即 $\Delta u = 0$ ，故电机不动，阀门保持一定开度，供

气量一定，热处理炉处于平衡工作状态。

如果管道煤气压力下降，而阀门开度一时没变，则供气量减少，炉温下降。致使热电偶的输出减弱， $u_c < u_r$ 、 $\Delta u > 0$ ，电机正转开大阀门，从而使供气量增加，炉温回升，直至又恢复到给定值， $T_c = T_r$ 、 $u_c = u_r$ 、 $\Delta u = 0$ ，电机停转，系统重新进入平衡状态，在煤气压力下降的情况下又能按规定的炉温运行。

如果根据工艺要求,从某时刻开始需要将炉温调整到另一数值,则可将给定电位计的温标联同电刷移到相应的新的位置, T_r 、 u_r 变了,而供气量一时没变、炉温没变,致使 u_c 、 u_r 不等, $\Delta u \neq 0$,电机转动调整阀门开度,改变供气量、调整炉温,直至 T_c 等于新的给定值 T_r ,系统进入平衡运行。

由此看出,系统通过测量炉温并计算对给定值的偏差来控制炉温,是按偏差调节的自动控制系统。

系统中除炉体及供气设备外,统称控制装置或温度调节器。

按照系统原理图中各个部分的相互联系,将每个功能部件用一个方块表示,以线段和箭头表示信号传递中各部件的输入量、输出量,将受控对象方块置于最右侧,其输出信号即被控量,而将给定值(或参考输入指令)信号置于最左端,作为系统的总输入信号(或称有用输入,以区别于干扰信号),则得系统的原理方块图如图 1-7 所示。显然,系统存在着一个负反馈的闭合回路。

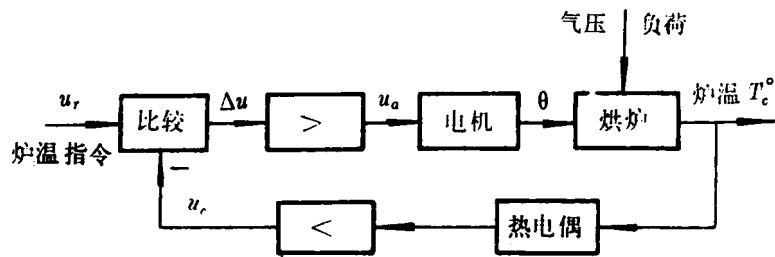


图 1-7 温控系统原理方块图

例 1-2 机械手位置随动系统

图 1-8 是系统的工作原理图。试分析系统的工作原理,并画出系统的原理方块图。

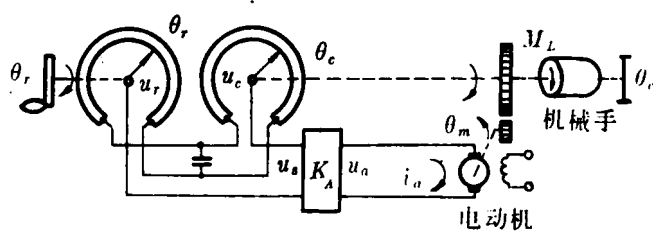


图 1-8 位置随动系统原理图

解 系统的任务是控制机械手的角位置 θ_c , 使其跟随指令转角 θ_r 同步转动, 即要求

$$\theta_c(t) = \theta_r(t)$$

首先明确如下问题:

1. 受控对象——机械手。
2. 被控量——角位置 θ_c 。
3. 给定值——指令转角 θ_r 。

4. 测量元件——转角 θ_c 及 θ_r 通过两个相同的电位计, 测量并转换为相应的电压 u_r 及 u_c 。

5. 计算比较——两个测量电位计的桥式连接, 即完成了减法运算 $u_r - u_c$ 。两电刷之间的电压 u_s , 代表了被控量 θ_c 对给定值 θ_r 的误差。比较电路常用符号 $\otimes$ 表示。

6. 执行机构——电机减速装置。

系统的控制原理: 如果机械手转角 θ_c 等于指令转角 θ_r , 则经事先整定, $u_r = u_c$, $u_s = 0$, 电机不动。系统处于平衡工作状态。

如果指令转角 θ_r 变化了, 而机械手仍处于原位, 则 $\theta_c \neq \theta_r$, $u_c \neq u_r$, $u_s \neq 0$, 从而使电机拖动机械手朝 θ_r 所要求的方向快速偏转。直至 $\theta_c = \theta_r$, 电机停转, 系统在新的位置上又处于与指令同步的平衡工作状态, 即完成了跟随的任务。

由此看出, 系统通过测量 θ_c (对 θ_r 的偏差) 来控制 θ_c , 所以仍是按偏差调节的自动控制系统。

系统的原理方块图如图 1-9 所示。同样也存在着一个负反馈的闭合回路。

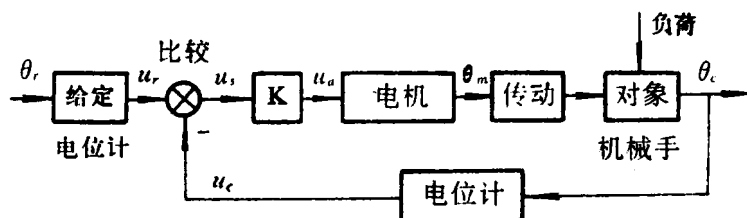


图 1-9 位置随动系统原理方块图

工程技术中, 需要某个机构 (如船闸、轧机、刀架、雷达天线、卡车前轮等) 的位置能快速精确地跟随一个指令信号动作, 都可以仿照这种随动原理来实现。

这种系统的突出特点是: 受控对象比较简单, 只相当于执行机构直接拖动的一个纯机械载荷; 指令信号根据工作需要经常变化, 甚至事先无法完全确定; 可以用功率很小的指令信号操纵功率很大的工作机械 (这只要选用大功率的功放装置和电机即可); 而且可以进行远距离控制 (指令电位计的输出 u_r 和工作机械转角 θ_c 的测量电位计输出 u_c , 只是电路上的连接关系, 二者可以相隔甚远)。

这种能够任意操纵和跟踪的特殊系统, 常称随动系统或伺服系统。

例 1-3 带钢连轧机架轧辊的转速控制系统如图 1-10 所示。试分析系统的工作原理, 并画出系统的原理方块图。

解 连轧机在轧钢过程中, 通过各机架的带钢必须保持秒流量相等, 否则将出现拉钢或叠钢, 影响产品质量或造成故障。这就要求各机架轧辊的转速保持一定比例, 而对某机架轧辊来说, 即要求其转速恒定。

需要控制的是轧辊的转速 n , 故首先明确: 轧辊是受控对象, 其转速为被控量。

直接拖动轧辊转动的是直流电动机, 电机又是由晶闸管整流装置供电的, 故电动机承担

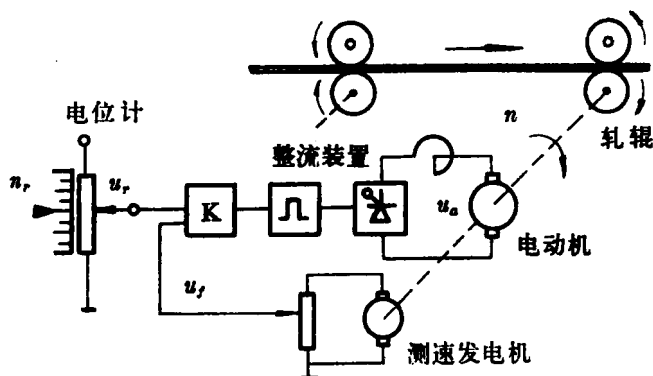


图 1-10 轧辊转速控制系统原理图

了执行的功能，整流装置相当于变换和放大部件。

要求的转速值 n_r 是通过给定电位计以电压 u_r 给定的， n_r 为给定值， u_r 相当于指令信号。

轧辊的实际转速 n 是通过同轴联动的测速发电机测量的，并以电压 u_f 输出。

n_r 和 n 的比较是由线路上 u_r 和 u_f 的相减实现的，比较电路相当于计算装置。

按照信号的传递顺序，则图 1-10 系统的原理方块图如图 1-11 所示

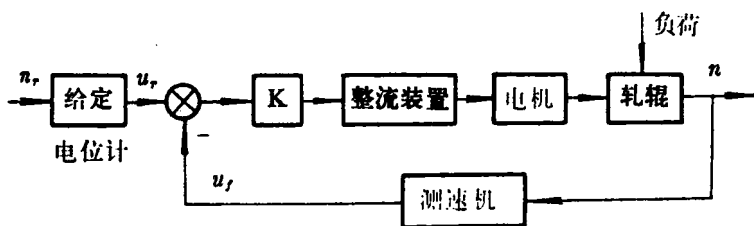


图 1-11 轧辊转速控制系统的原理方块图

如果由于负荷变化轧辊转速下降，则 u_f 随之下降， $u_r - u_f$ 上升，功放输出电压 u_a 加大，从而电动机拖动轧辊增速，补偿扰动对被控量 n 的影响。

系统的被控量是轧辊转速 n ，而测量的也是 n ，并且按 n 对 n_r 的偏差进行控制，故该系统是按偏差调节的负反馈控制系统。

§ 1-3 对控制系统的性能要求

按照基本控制方式特别是闭式的反馈控制组成的自动控制系统，是否都能很好地工作，都能在运行中准确地保持被控量等于给定值？并不一定，系统也可能工作得很不好，甚至会发生被控量的强烈摆动，使受控对象严重损坏。这将取决于受控对象和控制装置之间、各功能部件的特性参数之间是否匹配得当。

理想情况下，被控量 $c(t)$ 和给定值 $r(t)$ 时时相等，运行中完全没有误差，完全不受干扰的

影响，即 $c(t)$ 恒等于 $r(t)$ 。

而实际上，由于系统中质量、惯量、阻尼以及电路电感、电容的存在，也由于能源的功率限制，一些运动部件的加速度不会太大，速度和位移不可能突变，而要经历一个逐渐变化的过程。

通常将系统受到给定值或干扰信号作用后，控制被控量变化的全过程称为系统的动态过程，常以 $c(t)$ 表示。则系统控制性能的优劣，可以从动态过程 $c(t)$ 对 $r(t)$ 的比较中充分地、直观地显示出来。

控制精度是衡量系统技术性能的重要尺度。一个高质量的控制系统，在整个运行过程中，被控量对给定值的偏差应该是很小的。考虑到自控系统的动态过程 $c(t)$ 在不同阶段中的特点，工程上常常从稳、快、准三个方面来评价总体精度。

一、稳 指动态过程的平稳性

如果控制过程中出现被控量围绕给定值的摆动或称振荡，首先振荡应逐渐减弱，象图1-12中过程1呈发散型变化，显然是无法完成控制任务的。其次是振幅和频率都不能过大，应有所限制。

二、快 指动态过程的快速性

振荡型过程衰减很慢，或者虽然没有振荡，但被控量迟缓地趋向平衡状态，都将使系统长时间地出现大偏差，如图中2、3所示。过程的总体调节时间应有所限制，应尽快进入稳态。

稳和快反映了系统过渡态的性能，即快又稳，则过程中被控量偏离给定值较小，偏离的时间短，表明系统动态精度高，如图中过程4。

三、准 指动态过程的最终精度

即系统进入平衡工作状态后，被控量对给定值所达到的控制准确度。准，则误差小精度高，它反映了系统后期稳态的性能。

受控对象不同，对稳、快、准的技术要求也有所侧重，随动系统对快要求较高，而温控系统对稳限制严格。

同一系统，稳、快、准相互制约，提高过程的快速性，常会诱发系统强烈振荡；改善平稳性，控制过程又可能很迟缓，甚至最终精度也有所下降。分析、解决这些矛盾，将是本课程讨论的重要内容。

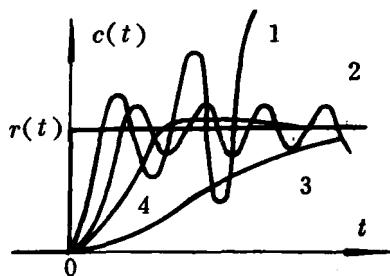


图 1-12 控制系统的动态过程

小 结

自动控制原理研究的对象是自动控制系统，主要是反馈系统。研究的中心问题是动态过程的稳、快、准。

问题又分为两个方面：

1. 给定一个控制系统，如何从理论上对其动态性能进行定性分析和定量估算。
2. 给定系统的性能要求，如何根据受控对象的特点，合理确定控制装置的部分结构、参

数？

后面章节将介绍一些实用的工程分析、计算方法，并提出若干带有普遍意义的概念和理论。

另外，通过本章学习，必须正确理解如下概念：

控制——主动干预、管理、操纵之意。

自动控制——利用控制装置操纵受控对象，使其被控量按技术要求（即给定值）运行。

自动控制系统——承担上述任务的受控对象和控制装置的总体。

受控对象——指具体的生产设备或工作机械，是自控系统的主体，其主要工况参数就是被控量。系统性能好坏，归根结底就是看这些工况参数在运行中是否符合要求。

受控对象可以是很复杂、庞大的设备，如轧机、电冶炉、发电机组、化工反应塔、船闸、发动机、机床、天文望远镜、雷达、巨轮、飞机、反应堆；也可能是很小的机构，如记录笔、录象机磁头、指针等等。

控制装置——指除受控对象之外自控系统中的其它部分。一般具有信号的测量、计算、放大和执行等功能。

三种基本控制方式——划分的依据是看系统中控制装置接受和测量的是什么信号。

只接受给定值信号 $r(t)$ ，称按给定值操纵的开式控制；

只测量干扰信号 $n(t)$ ，称按干扰补偿的开式控制；

接受、测量（或计算）的是被控量对给定值的偏差信号 $r(t) - c(t)$ ，称按偏差调节的闭式控制。闭式控制必然是负反馈控制。

一些复杂的大系统，如多机的、区域性的，常常是若干基本系统分层分块的组合控制。

一些新型的智能控制系统，也都是在基本控制方式的基础上发展出来的。如怎样使动态测量更准确、怎样对受控对象内部特性变化了解得更清楚、又怎样实现更灵活的对某些技术指标来说是最好的控制，即所谓最佳滤波和辨识、自适应控制、最优控制等，就是通过控制装置中计算机的复杂算法来实现的。

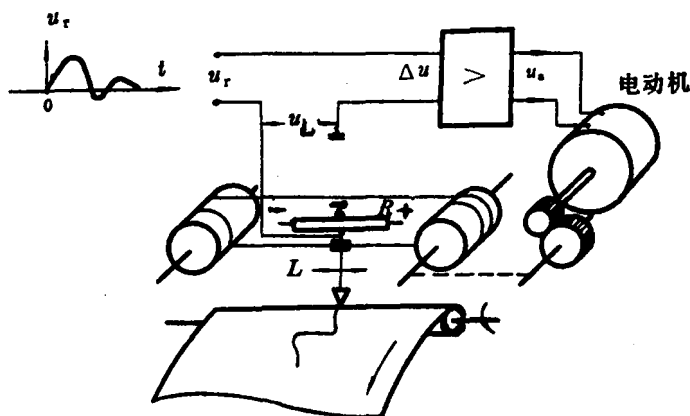
习 题

1-1 试列举日常生活中的控制系统，如电冰箱、电熨斗等，并说明其工作原理。

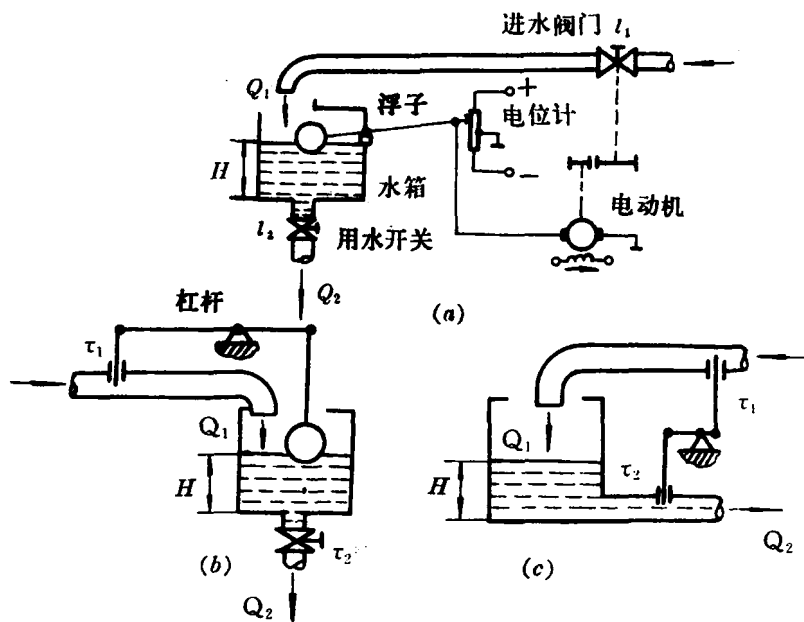
1-2 笔录仪是一种自动记录电压信号的设备，其工作原理图如下所示。其中电位计的电刷与记录笔机械相联，因此电位计的输出电压 u_L 与记录笔的位移量 L 成正比。当有被测电压信号 u_r 时，放大器输入端出现偏差电压 Δu ，经放大后驱动伺服电机，并通过传动装置带动记录笔移动，同时使偏差电压迅速减小，直至 $u_L = u_r$ ，电机停止转动，这时记录笔的位移 L 就代表了信号 u_r 的大小。若 u_r 随时间连续变化，则记录笔便在等速移动的记录纸上描绘出被测电压的变化曲线。

试画出该系统的原理方块图，并指明受控对象、被控量、参考输入及各功能部件。

1-3 水箱液位控制系统的三种方案如图所示。运行中，无论用水流量 Q_2 如何变化（由开关 I_2 操纵），希望水面高度（液位） H 保持不变。



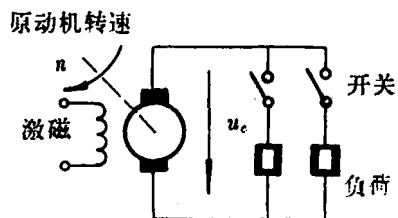
习题 1-2 图 记录仪



习题 1-3 图 液位控制系统

1. 简述各系统的工作原理。
2. 画出各系统的原理方块图，并指明受控对象、被控量、给定值和干扰。
3. 判别各系统属于何种控制方式。

1-4 一台直流发电机，在原动机转速和用电负荷变动下，希望输出电压 u_c 保持不变，试考虑两种控制方案，并画出系统的原理线路图和原理方块图。



习题 1-4 图 直流发电机