

自动控制工程基础

(量仪专业用)

无锡市职工大学
图书资料章

上海机械学院

一九八〇年七月

045162

前

言

本讲义是量仪专业试用教材。

本书第一章至第四章主要选自汤玉琬老师编写的《自动调节》一书，这是本课程的主要部分，这四章叙述了经典控制理论的基本概念和原理，重点放在线性与反馈控制系统理论部分；第五章主要选自吴焕及老师编的《自动调节补充讲义》一书，本章主要介绍了连续系统的状态空间分析法，最后简要介绍了连续系统的可控性与可观测性问题，这些都是现代控制理论的基础；书末附有习题。

其它控制理论，如采样控制、非线性控制、控制系统的综合与设计以及现代控制理论等等，因专业特点及学时数有限的原因，本讲义不予介绍，感兴趣的同学可参阅其它有关书籍。

为了赶上77级同学使用，本书打、校、印十分仓促，加之本人学识浅薄，尤其在对原稿的更动之处，疏漏失误可能很多，不及一一订正，除概属本人之责外，还望量仪专业同学们提出批评指正。



10310292

任教者

1980年8月

基藏

目 录

前言

第一章 自动调节的基本概念.....	1-1
§1. 自动调节系统的构成原理.....	1-1
一、什么是调节.....	1-1
二、人工调节.....	1-2
三、自动调节.....	1-4
四、自动调节的基本术语.....	1-7
五、自动调节系统的方块图表示和组成部分.....	1-8
§2. 自动调节系统的动态过程和质量指标.....	1-9
一、系统的动态和静态.....	1-9
二、系统的动态过程.....	1-10
三、自动调节系统的质量指标.....	1-11
§3. 基本调节规律.....	1-13
一、位式调节(双位与三位调节).....	1-13
二、比例调节.....	1-16
三、比例积分调节.....	1-18
四、比例积分微分调节.....	1-20
第二章 自动调节系统的数学描述.....	2-1
§1. 用微分方程描述动态过程.....	2-1
§2. 用拉氏变换解微分方程式.....	2-6
一、拉氏变换的定义和典型函数的拉氏变换.....	2-7
二、拉氏变换的基本定理.....	2-12
三、应用拉氏变换求解自动调节系统的动态过程.....	2-26
§3. 用传递函数描述动态过程.....	2-37
一、传递函数的定义和运算性质.....	2-38

二、计算电路传递函数的简化方法—算子阻抗法·····	2-42
三、典型环节的传递函数和单位过渡函数·····	2-48
四、系统的传递函数·····	2-64
五、方块图及其变换·····	2-73
六、用梅逊公式求系统的传递函数·····	2-79
§4. 用频率特性描述动态过程·····	2-81
一、频率特性的定义及其求法·····	2-82
二、用频率特性表示动态过程·····	2-85
三、频率特性曲线·····	2-90
四、频率特性曲线的绘制·····	2-92
第三章 自动调节系统的稳定性·····	3-1
§1. 稳定的概念·····	3-1
§2. 稳定的条件·····	3-2
§3. 劳斯稳定判据·····	3-5
一、劳斯稳定判据的应用程序·····	3-6
二、劳斯阵列的特殊情况·····	3-11
§4. 奈氏稳定判据·····	3-13
一、应用开环幅相特性研究系统稳定性·····	3-13
二、应用开环对数频率特性分析系统稳定性·····	3-20
§5. 滞后系统的稳定性·····	3-22
一、用劳斯判据分析滞后系统稳定性·····	3-22
二、用奈氏判据分析滞后系统稳定性·····	3-26
第四章 自动控制系统的质量分析·····	4-1
§1. 稳态误差的计算·····	4-1
一、误差信号·····	4-1
二、稳态误差·····	4-3
三、对典型信号不存在稳态误差的条件·····	4-6
§2. 用根轨迹分析自动控制系统的动态质量·····	4-10
一、根轨迹的基本概念·····	4-11

二、绘制根轨迹的基本法则·····	4-15
三、利用根轨迹评价系统的动态质量·····	4-33
§3. 用开环对数频率特性曲线判断系统动态品质·····	4-38
第五章 控制系统状态空间分析法·····	5-1
§1. 矩阵的基本概念·····	5-3
一、矩阵和行列式的定义·····	5-3
二、矩阵的代数运算·····	5-7
三、逆矩阵·····	5-11
四、矩阵的微分与积分·····	5-16
§2. 连续系统的状态空间分析·····	5-17
一、由微分方程导出状态空间表达式·····	5-17
二、由传递函数导出状态空间表达式·····	5-26
三、矩阵的特征值及矩阵方程的变换·····	5-30
四、定常系统齐次状态方程的解及状态转移矩阵·····	5-34
五、定常系统非齐次状态方程的解·····	5-38
六、状态空间方程与传递矩阵的关系·····	5-42
七、多变量系统的脱耦—状态空间法应用示例之一·····	5-44
八、状态变量反馈系统—状态空间应用示例之二·····	5-47
§3. 连续系统的可控性与可观测性·····	5-50
一、什么叫可控性和可观测性·····	5-50
二、连续系统状态完全可控的条件·····	5-51
三、连续系统输出向量完全可控的条件·····	5-57
四、连续系统完全可观测的条件·····	5-59
习题·····	-1-

第一章 自动调节的基本概念

毛主席教导我们：“人的认识，主要地依赖于物质的生产活动，逐渐地了解自然的现象、自然的性质、自然的规律性、人和自然的关系”，自动调节就是在物质的生产过程中发展起来的一门科学。

本章将介绍自动调节系统的构成原理和有关的一些基本概念。

§1 自动调节系统的构成原理

一、什么是调节

在生产实践过程中，人们发现，为了生产能够正常地进行，往往需要对表征生产进行情况的物理量加以控制，使其保持不变或按一定的规律变化。

如图 1-1 是一个电炉，在生产过程中用电阻丝通电的办法使炉温上升，并根据生产工艺的要求使之保持在某一温度上，炉温过高或过低都不能满足生产工艺的要求。因此，在这个例子中，电炉温度就是表示生产过程进行情况的物理量，为了使生产过程能够正常进行，还必须使其保持不变。

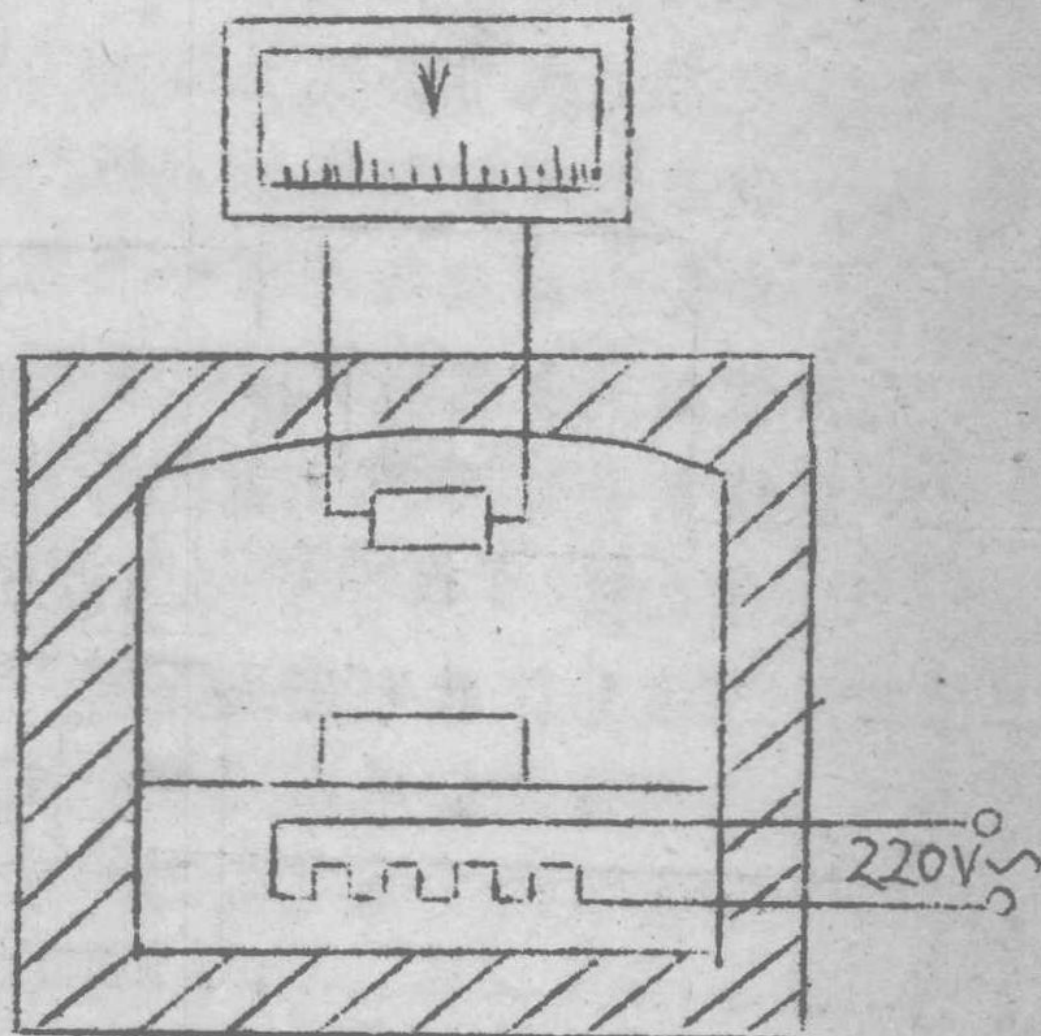


图 1-1

在生产过程中很多外来因素要影响表示生产进行情况的物理量，如果不采取任何措施这个物理量不能保持不变或按一定规律变化。例如图 1-1 的电炉就不能保持炉温不变，很多外来因素如电网电压波动、炉内工件数量的变化、环境温度的变化等都能影响到炉内温度。

为了使表示生产过程进行情况的物理量，保持不变或按要求的规律变化，必须设法通过一定方式来抵消或削弱各种外来因素的影响。能够抵消或削弱各种外来因素的影响，使表征生产过程进行情况的物理量，保持不变或几乎不变或按给定规律变化的过程就称之为调节。

二、人工调节

如果对某一物理量的调节是在有人直接参加下完成的，就称为人工调节。

图 1-1 的电炉温度就可以用人工进行调节，如图 1-2 所示。图中的两只反向并联的可控硅，是用来调节加到电阻丝上的电压的。我们已经知道，当可控硅阳极上加一个小于转折电压的正向电压时，可控硅不导通，在控制极再加上一个正相触发信号可控硅就会导通，触发信号去掉后仍维持导通，直到可控硅阳极电压反相时为止；如果可控硅阳极上加一个负电压，控制极有正相触发信号也不会导通。

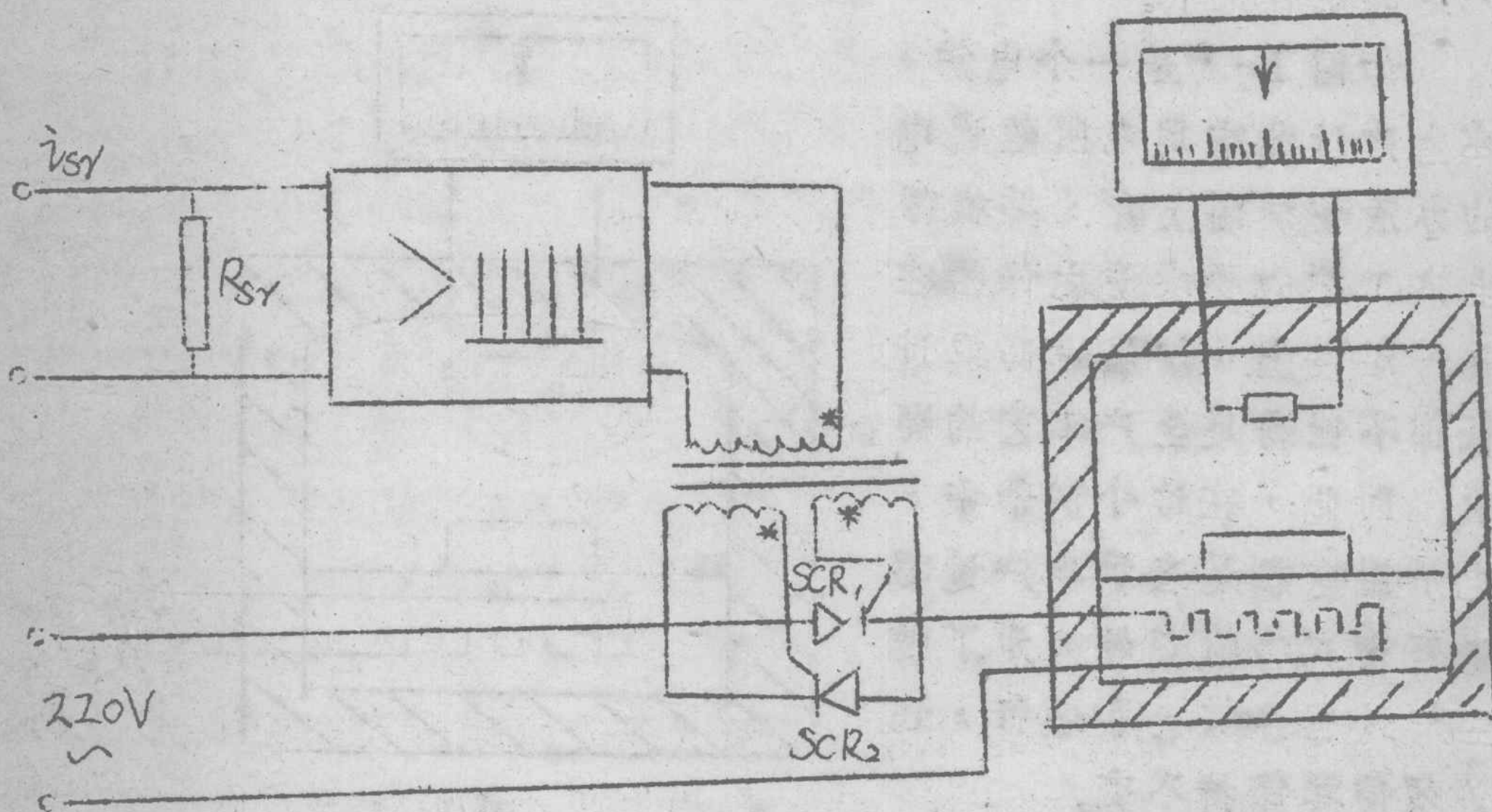


图 1-2

利用可控硅的这种性质就可进行交流调压。

如果放大触发电路在交流电压过零后的 α 角度处开始出现触发脉冲，则可控硅 SCR_1 和 SCR_2 的导电情况如图 1-3 所示。在交流

正半周相角为 α 时，放大触发电路开始出现触发脉冲，在两个可控硅的控制极上都有正的触发信号，但 SCR_2 阳极上加的是反向电压，所以只有 SCR_1 导通；在交流负半周时当触发脉冲出现后，因 SCR_1 阳极上加的反向电压，只有 SCR_2 导通。

当可控硅截止时无电流流过电阻丝，只有可控硅导通时才有电流流过电阻丝。因此，只要能控制触发脉冲出现的时间就能控制加到电炉上电压的平均值。只要 α 角能由0到 π 连续变化，就能使加到电炉上的电压也由0到最大连续变化，达到调节交流电压的目的。

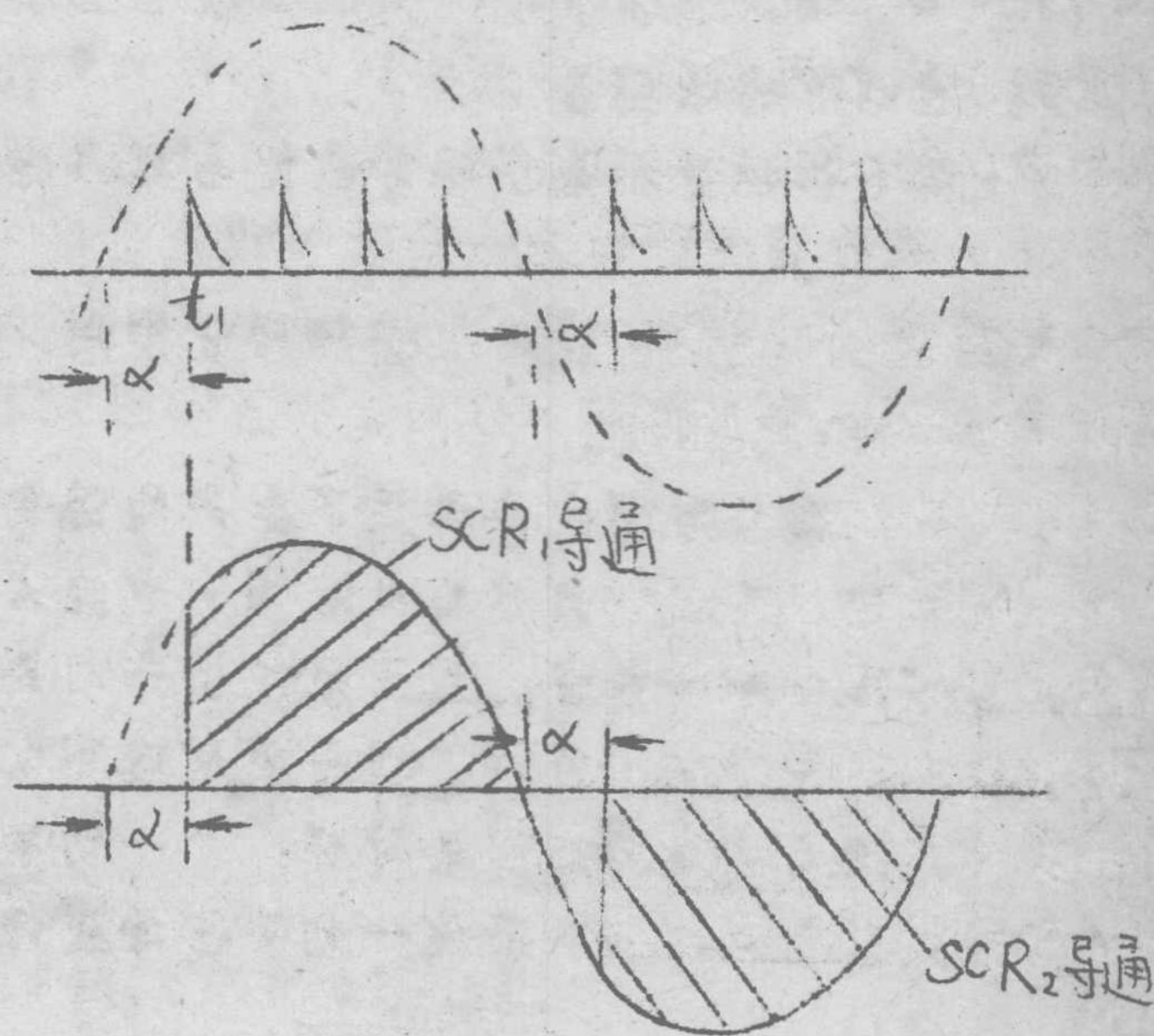


图 1-3.

放大触发电路就是控制触发脉冲出现的相角 α 用的，当放大触发电路的输入电流 i_{sr} 小也就是放大触发电路输入电压 $i_{sr} \cdot R_{sr}$ 小时， α 角大，加到电阻炉上的平均电压小；反之当输入电流大时， α 角小，加到电阻炉上的平均电压大。

有了上述调压装置就可以对电炉温度进行人工调节了。工人师傅通过热电阻和显示仪表观察炉温，一旦发现炉温不符合工艺要求，就操纵调压装置来改变电炉的加热电压，使炉温恢复到要求的数值。

上来。例如当炉温高于希望保持的温度时，可减少调压装置的输入电流，使加到电炉上的平均电压减少，以便炉温下降；反之，如果炉温低于希望保持的数值，则增加调压装置的输入电流，使加到电炉上的平均电压升高，以便炉温上升。

因为上述调节过程是在有人直接参与下完成的，所以这样的调节过程称为人工调节。在人工调节中，人起了主导的作用，人通过显示仪表观察炉温，一旦发现炉温有变化，便通过大脑思维作出判断，然后增加或者减少调压装置的输入电流，使炉温恢复到原来的数值。归纳起来，在人工调节中，人起了以下三个作用：

1. 观察被调节的物理量；
2. 将被调节物理量希望保持的数值与观测得到的实际值进行比较；
3. 根据比较的结果，发出正确的调节作用，使被调节的物理量恢复到希望保持的数值上。

人工调节虽然在一定程度上满足了生产的需要，但是随着生产的发展，对调节过程提出的要求越来越高，单凭人的一些感觉器官已不能很好的完成调节的任务。为了适应生产的要求，必须解决人工调节与精度之间的矛盾，解决了这一矛盾就可以使调节的手段向前发展一步，正如毛主席所指出的那样：“一切事物中包含的矛盾方面的相互依赖和相互斗争，决定一切事物的生命，推动一切事物的发展”。

为了解决人工调节和精度之间的矛盾，能否设计出一些仪器和装置来代替人工调节中人所起的作用呢？根据这一想法在实践中产生了自动调节。

三、自动调节

能够使表征生产过程进行情况的物理量自动的保持恒定或按一定规律变化的就称之为自动调节。我们仍以图 1-1 的电炉为例，说明自动调节是怎样进行的。

为了能对图 1-1 的电炉温度进行自动调节，就必须用一些仪器和装置代替人工调节中人所起的三个作用。图 1-4 就是能对电炉温

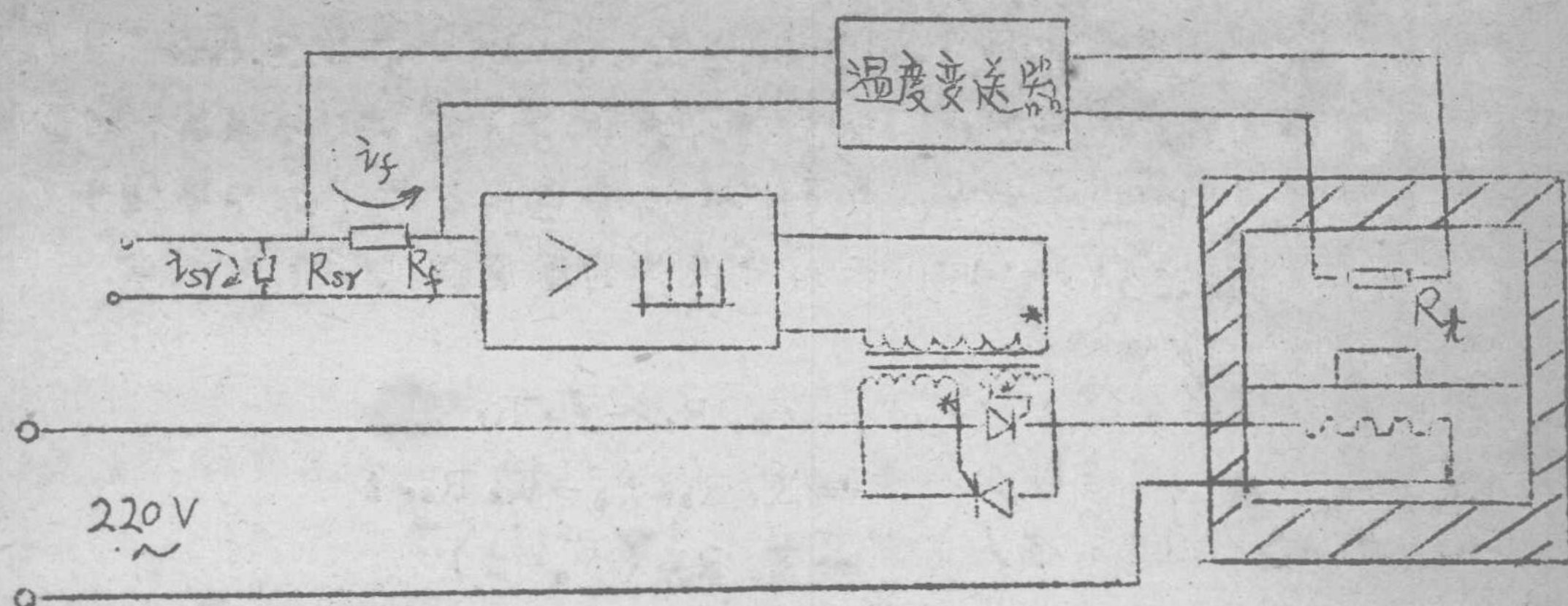


图 1-4

度进行自动调节的方案之一。

为了能对电炉的温度进行自动测量，可在电炉内放置一个热电阻，温度不同时热电阻的电阻不同，热电阻的阻值与温度之间有一一对应的关系。知道热电阻的阻值，也就间接的知道炉内温度了。但是直接用热电阻的阻值判断炉内温度很不方便，于是又用了一台温度变送器。温度变送器的任务是将热电阻的阻值变换成直流的毫安电流。设电炉的温度变化范围为 $0 - t, ^\circ\text{C}$ ，则可以用适当设计变送器的方法，使炉温与变送器输出电流之间的函数关系为：

$$i_f = K_t \cdot t$$

式中：

i_f 是变送器输出的直流电流 (mA)

K_t 是比例系数 (mA/ $^\circ\text{C}$)

t 是电炉温度 ($^\circ\text{C}$)

因此，电炉温度通过热电阻和温度变送器用电流自动的表示出来。

因为电炉的实际温度用电流表示出来了，那么电炉希望保持的温度也应当用电流表示出来。如果电炉希望保持的温度为 $t_0, ^\circ\text{C}$ ，则表示希望保持温度的电流 i_{sr} 为：

$$i_{sr} = K_t \cdot t_0$$

为了能对炉温进行自动调节，必须使希望保持的温度和电炉的实际温度能自动地进行比较。为了便于比较起见，可将表示希望保

持温度和实际温度的电流分别用两个电压表示。因此，可使电流 i_{sr} 和 i_f 分别通过两个阻值相同的电阻 R_{sr} 和 R_f ，在电阻 R_{sr} 和 R_f 上的电压降就分别表示了希望保持的温度和电炉的实际温度。这两个温度分别用电压表示后，只要将这两个电压反极性的串联起来，所得到的电压差值，将正比于希望保持的温度和实际温度之差。设这一差值为 V_ε ，则

$$\begin{aligned} V_\varepsilon &= i_{sr} R_{sr} - i_f R_f \\ &= K_\varepsilon R_{sr} t_0 - K_\varepsilon R_{sr} t \\ &= K_\varepsilon R_{sr} (t_0 - t) \end{aligned}$$

为了能根据比较的结果自动地发出调节作用，在线路中还必须包括有能根据 V_ε 的大小和符号，适当的改变可控硅导通角调整加到电阻上电压平均值，使炉温向希望保持的数值恢复的装置。这部分装置就是图 1-4 中的放大触发装置和反相并联的两只可控硅。

有了这些装置后，工人师付在人工调节中所起的三个作用，都用仪器和装置代替了，对电炉的温度可以进行自动调节。其调节过程可以分两种情况加以讨论

1. 当炉温大于希望保持的温度时：

当炉温的温度，由于外来因素的影响，超过希望保持的温度时，则 $V_\varepsilon = K_\varepsilon R_{sr} (t_0 - t) < 0$ ，放大触发电路停止工作，不发出触发脉冲，可控硅截止，不向电炉供给电能，电炉温度开始下降，趋向希望保持的温度。

2. 当炉温低于希望保持的温度时：

当炉温低于希望保持的温度时，自动比较的结果使电压

$$V_\varepsilon = K_\varepsilon R_{sr} (t_0 - t) > 0$$

放大触发电路开始工作。 V_ε 越大说明炉温低于希望保持的温度越多，而 V_ε 越大放大触发电路使可控硅导通角度也越大，加到电炉上的平均电压越大，结果使炉温加速上升，接近希望保持的温度。

应当指出的是图 1-4 的线路永远不能使电炉温度与希望保持的温度相等，而只能使炉温接近希望保持的温度。因为炉温与实际温度相等时 $V_\varepsilon = 0$ ，可控硅不导电，炉温不能保持原来温度不变而是

开始下降，炉温一下降则 $V_E > 0$ ，可控硅又开始导通向电炉提供电能，炉温要一直下降到由电网吸收的能量与电炉所耗散的能量平衡为止。

上面以电炉温度调节作为例子说明了进行自动调节的基本原理。基于上述原理，只要能自动的测量被调节的物理量，自动的将被调节物理量希望保持的数值与实际数值进行比较，并能根据比较的结果发出适当的调节作用，就可以对任意的物理量进行自动调节。

四、自动调节的基本术语：

为了以后研究问题方便，下面介绍一些自动调节中常用的基本术语。

为了能够使表征生产进行情况的物理量自动的保持恒定或按一定规律变化，必须将一些设备、仪表和装置等按一定方式组合起来。能够对某一物理量进行自动调节的设备、仪表和装置的整体，就称之为自动调节系统。

自动调节的任务在于使某一物理量保持恒定或按一定的规律变化，所以在自动调节系统中一定有须要对某一参数进行调节的机器或设备。在自动调节系统中，需要对其某一参数进行调节的机器或设备，就称之为调节对象。

调节对象中需要进行调节的参数称之为被调量，被调量一般是时间的函数，记为 $x(t)$ 。

自动调节系统中，被调量应当保持恒定或按给定规律变化，所以对被调量的变化应严加控制。控制被调量变化规律的信号称为控制信号或给定值。控制信号也是时间函数，记为 $g(t)$ 。

在自动调节系统中，总是希望被调量和控制信号严格相同。但有的系统因受本身构成原理的限制，被调量和给定值不能相等；也有的系统因受外来因素的影响，被调量在短时间内将偏离控制信号。当控制信号和被调量不相等时，控制信号和被调量之间的差值称之为偏差信号，记为 $\varepsilon(t)$ 。

在自动调节系统中，总有若干外来因素妨碍被调量按控制信号变化。系统中，妨碍被调量按控制信号变化的外来因素称之为干扰

信号，干扰信号一般用 $f(t)$ 表示。

五、自动调节系统的方块图和基本组成部分

由图 1-4 的炉温自动调节系统的例子可以看出，自动调节系统总是由若干环节按一定规律组合起来的。在研究自动调节系统时，我们注意的是每一环节输入、输出信号和它们之间的相互关系，以及各环节之间的联接方式等。为了更明显的将我们所注意的这些关系表示出来，可以将组成自动调节系统的每一个环节都用方块表示，每一环节的输入和输出信号及其传递方向则用带箭头的直线表示，箭头的方向表示信号的传递方向。各环节都用方块表示后，自动调节系统各组成部分的输入、输出信号，以及它们之间的关系都明显的表示出来了。用一些彼此连接起来的方块表示一个自动调节系统时，就称为是自动调节系统的方块图。

图 1-4 炉温自动调节系统的方块图可画成图 1-5 的形式，图中的 $\otimes$ 表示二个物理量进行比较。

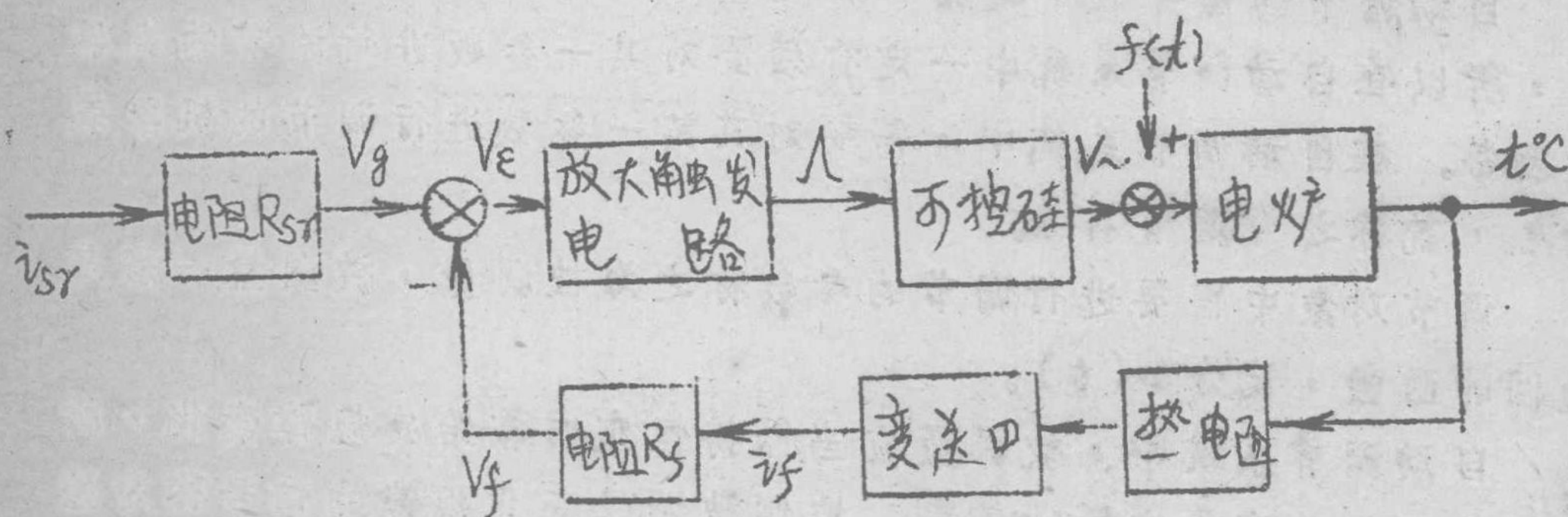


图 1-5

图 1-5 中放大触发电路的作用，是将偏差信号转换成脉冲的相移，其作用的实质是对偏差信号进行运算和转换。在自动调节系统中都有对偏差信号进行运算与转换的装置，这部分装置统称为调节器。

图 1-5 中的可控硅的作用，是根据放大触发电路来的触发脉冲

相角的大小，改变对炉温起调节作用的交流电压平均值。因此，可控硅的作用是将放大触发电路发出的脉冲转换成对炉温起调节作用的电压。在自动调节系统中，能将调节器的输出信号转换成对调节对象起调节作用的这部分装置统称为执行器。

图 1-5 中的热电阻、温度变送器 and 电阻 R_f 的作用是将炉温转换成调节器（放大触发电路）能接受的电压信号。在自动调节系统中，能将被调量转换成调节器能接受的信号的装置，统称为测量变送单元。

因此，一个自动调节系统，一般总是由调节器、执行器、对象和测量变送单元组成，各组成部分的关系可用图 1-6 表示。

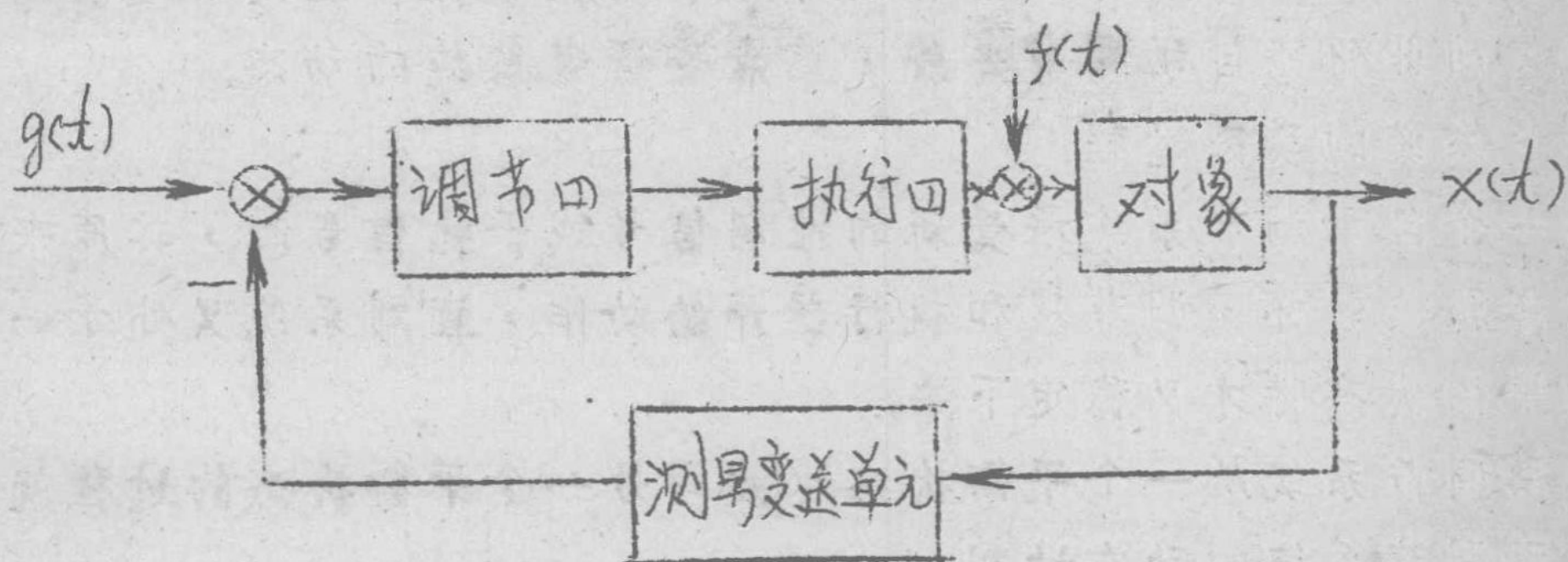


图 1-6

由图 1-6 也可看出自动调节系统有以下两个特点：

1. 由封闭的回路所组成（简称闭环）；
2. 具有负反馈。

§2 自动调节系统的动态过程和质量指标

一、系统的稳态和动态

在自动调节系统中，将被调参数不随时间而变化的平衡状态称为稳态或静态。

当一个自动调节系统的输入信号（给定和干扰）恒定不变时，在调节过程结束后，整个系统就处于相对平衡状态，系统中各参数

都保持恒定不变，这时系统就处于上述的稳态。

假若一个系统原来处于相对平衡状态即稳态，当改变给定值或干扰发生变化时，原来的平衡状态就被破坏，被调参数也要发生变化。于是产生了新的调节过程，以便使被调参数能复现新的给定值或克服干扰的影响，使系统仍处于平衡状态。在这样一段时间中，整个系统的各个环节的参数都处于变动状态之中，所以上述的这种状态称为动态。

平衡是暂时的、相对的、有条件的，不平衡才是普遍的、绝对的、无条件的。干扰总是在不断的产生不断的变化，调节作用也在不断地去克服干扰的影响，所以自动调节系统总是一直处于运动状态之中，因此研究自动调节系统，重点是研究系统的动态。

二、系统的动态过程

当一个自动调节系统承受新的控制信号或干扰信号时，其原来平衡状态就被破坏，调节器和执行器开始动作，直到系统又处于一种新的平衡状态时才又稳定下来。

自动调节系统从一个平衡状态过渡到另一个平衡状态的过程就称为自动调节系统的动态过程。

系统的动态过程形式可以是各种各样的。图 1-7 画出了系统在突变的控制信号作用下动态过程的几种可能形式。

图 1-7a 的动态过程称为非周期或单调过程。单调的动态过程有稳定的平衡点，并且 $x(t)$ 的变化速度 $\frac{dx(t)}{dt}$ 不改变符号。在不允许被调量有大的波动的情况下，可以使系统具有这种单调的动态过程。

图 1-7b 的动态过程称为衰减的振荡过程。这种类型的动态过程，被调量 $x(t)$ 经过一段时间的振荡后，最终能趋向一个新的平衡状态，自动调节系统的动态过程大部分是这种形式的。

图 1-7c 的动态过程称为等幅振荡过程，由于这种动态过程没有稳定的平衡状态，一般不允许系统具有这种形式的动态过程。

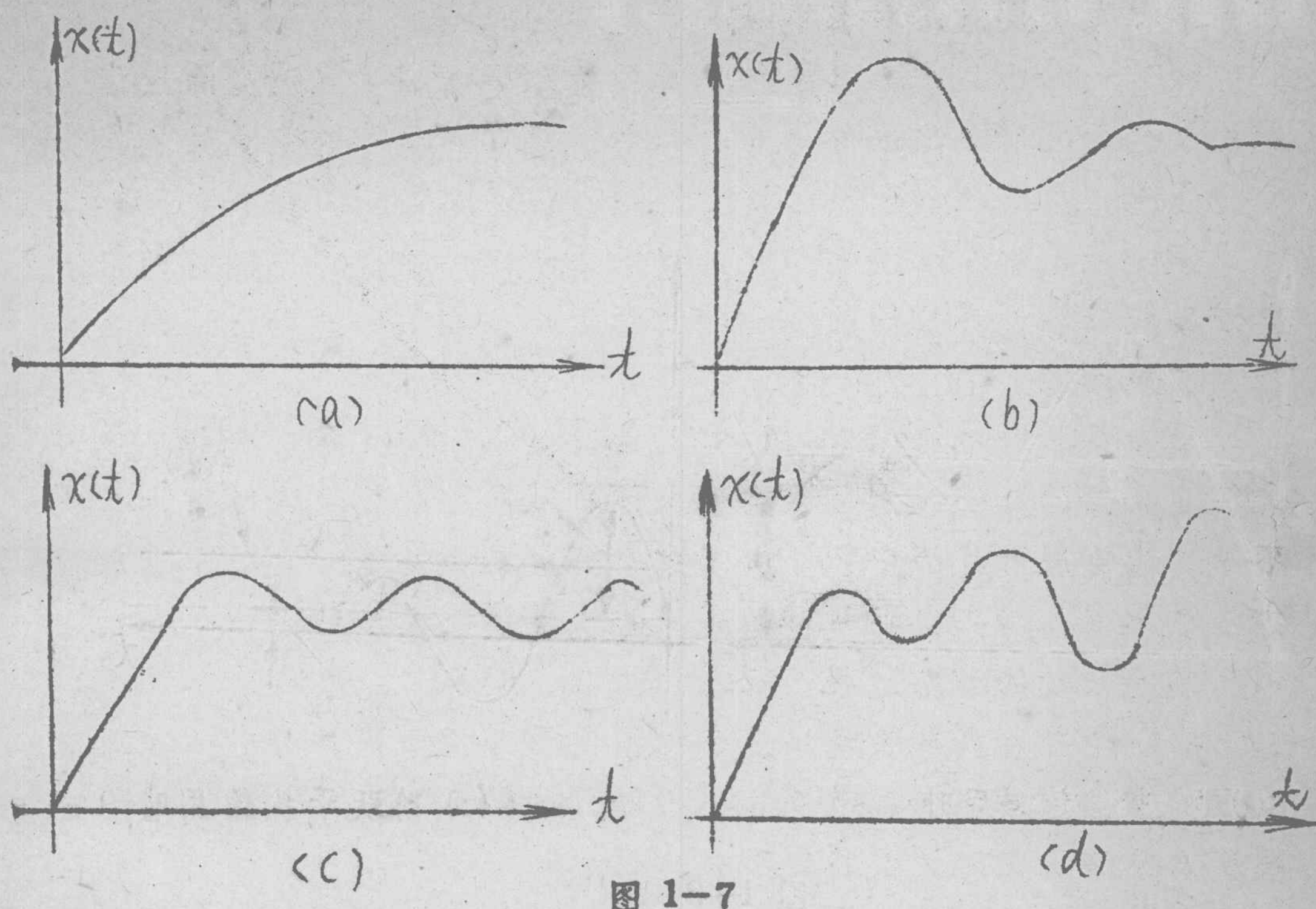


图 1-7

图 1-7d 的动态过程是发散振荡的，被调量 $x(t)$ 将逐渐增大。调节系统具有这种形式的动态过程是非常危险的，当被调量超过一定的限度，将造成生产事故。

三、自动调节系统的质量指标

自动调节系统在稳态和动态中的工作性能，称为系统的质量。一个系统在稳态和动态中的工作性能，可以用由突变输入信号（阶跃输入信号）引起的动态过程形式，和动态过程结束后被调量复现输入信号的精度来衡量。能衡量动态过程形式和输出信号复现输入信号精度的几个参数，就称为系统的质量指标。

假设系统由阶跃信号引起的动态过程如图 1-8 所示，则系统的质量指标是：

1. 超调量

在振荡过程中，第一个峰值 B ，与稳态值 D 之比的百分数，称

为超调量。如以符号 σ 表示超调量，则

$$\sigma = \frac{B_1}{D} \times 100\%$$

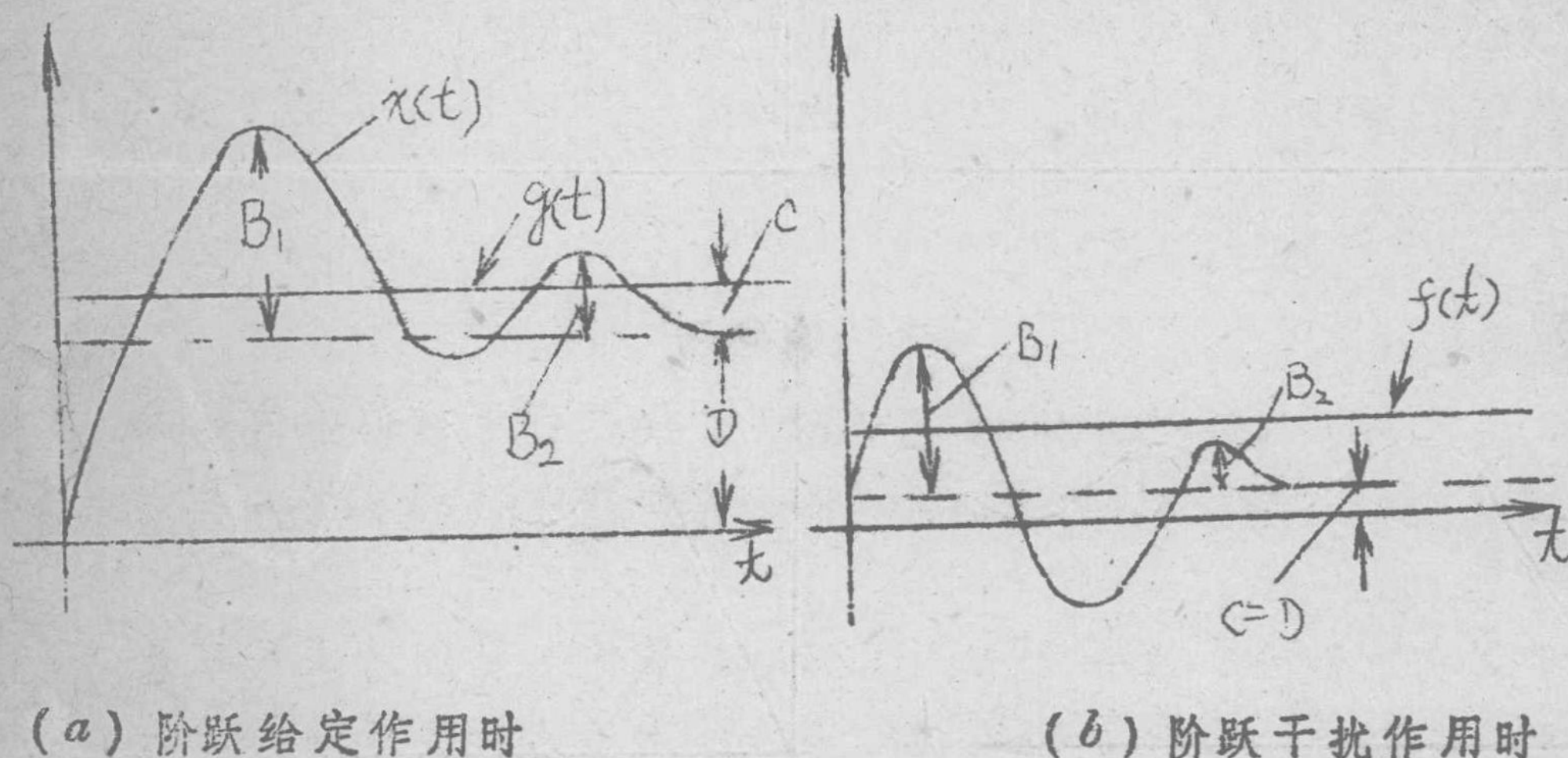


图 1-8

超调量 δ 表示动态过程的振荡程度， δ 越大动态过程振荡得越厉害。

2. 衰减比

在振荡过程中，第一第二两个峰值 B_1 与 B_2 的比值称为衰减比，如以符号 S 表示衰减比，则

$$S = \frac{B_1}{B_2}$$

衰减比通常以 $n:1$ 的形式表示，即

$$S = \frac{B_1/B_2}{1} = \frac{n}{1}$$

衰减比表示振荡的动态过程衰减的快慢，衰减比越大，动态过程衰减得越快。在工业自动调节系统中一般希望衰减比在 $4:1 \sim 10:1$ 之间。

3. 调节时间