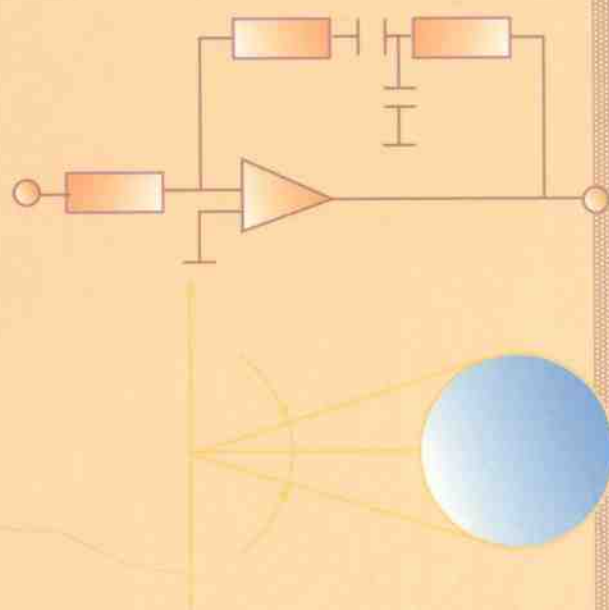


ZIDONG KONGZHI
JICHU

水利水电工程(专科起点本科)专业系列教材

主 编 白家骢



自动控制基础

中央广播电视大学出版社

水利水电工程（专科起点本科）专业系列教材

自动控制基础

主编 白家骢

中央广播电视大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

自动控制基础 / 白家骢主编. —北京: 中央广播电视大学出版社, 2003.12

(水利水电工程 (专科起点本科) 专业系列教材)

ISBN 7-304-02497-6

I. 自… II. 白… III. 自动控制理论-成人教育: 高等教育-升学参考资料 IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 120266 号

版权所有, 翻印必究

水利水电工程 (专科起点本科) 专业系列教材

自动控制基础

主编 白家骢

出版·发行: 中央广播电视大学出版社

电话: 发行部: 010-68519502 总编室: 010-68182524

网址: <http://www.crtvup.com.cn>

地址: 北京市海淀区西四环中路 45 号

邮编: 100039

经销: 新华书店北京发行所

策划编辑: 旷天鉴

责任编辑: 张苏明

印刷: 北京集惠印刷有限公司 印数: 0001~3000

版本: 2003 年 11 月第 1 版 2003 年 12 月第 1 次印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 13.75 字数: 315 千字

书号: ISBN 7-304-02497-6/TH·54

定价: 20.00 元

(如有缺页或倒装, 本社负责退换)

水利水电工程（专科起点本科）专业系列教材

课程建设委员会

顾 问 陈肇和

主 任 刘汉东

副主任 段 虹 蒋克中 董幼龙

委 员 （按姓氏笔画排列）

王 圻 牛志新 白家骢 白新理 任 岩

孙东坡 孙明权 刘洪建 许士国 李国庆

陈南祥 陈德新 陆桂明 张立中 赵 瑜

赵中极 郭雪莽 陶水龙 徐建新 高辉巧

酆小平 解 伟

前 言

本书根据 2002 年 4 月中央广播电视大学会同河南省广播电视大学在郑州召开的电大专升本课程“自动控制基础”教学大纲编写,是中央广播电视大学开放教育水利水电工程(本科)专业选修课教材。

本教材以讲授古典控制理论为主,共分 8 章,从自动控制系统的基本概念入手,讲述自动控制系统数学模型的建立,时域法、根轨迹法、频率法等分析方法,系统的校正,非线性控制系统的描述函数分析,离散系统分析。

为了适应开放式远程教育的需要,教材中每章之前设置了“学习指导”,每章之后设置了“本章小结”和“习题”。此外,还加入了“旁白”等助学内容,以便学生自学。

本书由华北水利水电学院白家骢主编。其中,第一、二章由白家骢编写,第三章由楚清河编写,第四、六章由孙美凤编写,第五、七章由王玲花编写,第八章由邱道尹编写。

本书由郑州大学沈宪章教授、冯东青教授,华北水利水电学院刘忠义教授等专家审定,沈宪章教授为主审。审定专家对本教材进行了认真的审阅,并给予热情的指导和帮助,责任编辑张苏明做了大量工作,编者在此一并致谢。

由于我们水平有限,书中错误和不当之处在所难免,欢迎指正。

编 者

2003 年 6 月

内容提要

本书是电大专升本水利水电工程专业“自动控制基础”课程的教材，以古典控制理论为主介绍自动控制的基本理论及工程分析和设计方法。全书共分 8 章，包括自动控制系统的基本概念，自动控制系统的数学模型，时域分析法，根轨迹法，频率分析法，自动控制系统的校正，非线性系统的描述函数分析，线性离散系统等内容。

本书还可供从事水利水电工程自动控制系统设计、运行等方面的技术人员参考。

目 录

第一章 自动控制系统的基本概念

1.1 概述	1
1.2 闭环控制和开环控制	2
1.3 对自动控制系统性能的要求	7
1.4 自动控制系统的典型输入信号	8

第二章 自动控制系统的数学模型

2.1 自动控制系统微分方程的建立	13
2.2 非线性特性的线性化	15
2.3 传递函数	17
2.4 典型环节及其传递函数	20
2.5 控制系统的方块图	28
2.6 信号流图	34
2.7 自动控制的数学基础——拉氏变换	37

第三章 时域分析法

3.1 自动控制系统暂态响应的性能指标	47
3.2 一阶、二阶系统的单位阶跃响应	49
3.3 高阶系统的时域分析	57
3.4 自动控制系统的稳定性	60
3.5 自动控制系统的稳态误差	66
3.6 用计算机求解系统的暂态响应	70

第四章 根轨迹法

4.1 自动控制系统的根轨迹	78
4.2 根轨迹绘制规则	81

4.3	零度根轨迹	92
4.4	控制系统的根轨迹分析	94
第五章 频率响应分析法		
5.1	频率特性	99
5.2	典型环节的频率特性	103
5.3	开环频率特性的绘制	110
5.4	奈奎斯特稳定判据	115
5.5	用开环对数频率特性判断闭环系统的稳定性	122
5.6	开环对数频率特性与时域响应的关系	125
第六章 自动控制系统的校正		
6.1	系统校正的基本概念	132
6.2	串联超前校正	135
6.3	串联滞后校正	143
6.4	串联滞后-超前校正	150
6.5	反馈校正	155
第七章 非线性系统的描述函数分析		
7.1	非线性控制系统	159
7.2	描述函数	163
7.3	非线性系统的描述函数分析	171
第八章 离散控制系统		
8.1	概述	179
8.2	Z 变换	181
8.3	用 Z 变换解差分方程	187
8.4	脉冲传递函数	188
8.5	z 平面内的稳定性分析	196
8.6	离散系统的暂态和稳态分析	199
参考文献		212

第一章 自动控制系统的基本概念

学习指导

要 求:

1. 掌握自动控制系统的定义, 了解现代控制理论的发展史;
2. 重点掌握闭环控制系统的概念;
3. 了解自动控制系统的性能包括稳定性、暂态性能和稳态性能 3 部分。

学习方法:

本章介绍了自动控制系统的一些概念, 学习时一定要结合实例反复思考, 以求掌握有关内容。

1.1 概 述

自动控制是指在生产过程中, 对某些被控制的物理量(如转速、电压、温度、水位等), 通过机械或电气装置代替人的控制, 使之维持预期的水平或按一定规律变化。被控制的设备或环节叫做被控制对象(如水轮机、发电机、锅炉); 实现控制作用的装置叫做控制器; 被控制对象和控制器组合成的整体, 称为自动控制系统。

自动控制系统
的组成

在水电站中, 除水轮发电机的频率(转速)控制外, 还有电压控制等, 它们都是典型的自动控制的例子。无论在工厂, 还是在农村, 在工农业生产的各个领域, 如交通、运输, 特别是在航天技术方面, 自动控制起着越来越重要的作用。

自动控制理论在 20 世纪三四十年代开始形成, 主要从解决反馈系统的稳定性和动态特性的分析和设计, 发展而成古典的控制理论, 其数学工具是通过拉氏变换建立系统传递函数, 采用时域法和频率法, 主要对单输入、单输出线性系统进行分析和设计。古典控制理论发展较成熟, 物理概念强,

能直观地解决工程控制问题,得到了广泛应用。

随着控制系统的日益复杂,计算机技术的飞跃发展,在处理多输入多输出系统、时变系统、非线性系统等方面的问题时,古典控制理论已经不能胜任,解决系统辨识、系统最优估算、系统最优控制、系统自适应控制等方面的问题更需要新的控制理论,于是在 20 世纪 60 年代以后,建立了以状态空间为主的现代控制理论。现代控制理论发展的同时,古典控制理论在解决上述问题也得到发展。根据教学大纲规定,本书主要讲解古典控制理论,现代控制理论的知识请读者自行关注。

自动控制理论所研究的内容可分为两个方面:首先学习在已知系统结构和参数的条件下对系统的性能进行分析、计算,从而判别该系统的稳定性、稳定误差、动态特性;然后学习对系统进行设计,即按照对自控系统性能的要求,在已知被控制对象的结构和参数的情况下,设计控制器,实现系统的性能要求。显然,前者是后者的基础,后者是对前者的发展和应用。

无论实际存在的各式各样的控制系统,其被控对象的结构和参数及其相应的控制器类型是多么不同,但将其表达为系统动态特性的数学表达式却有可能归结为某些典型的环节或组合,都能归入自动控制理论研究的范畴。可见,自动控制理论是水电站工程师必备的基础知识。

1.2 闭环控制和开环控制

1.2.1 定义

图 1-1(a) 是水轮机频率的人工调节控制简图,假如机组处于单机带负荷状态,由人来控制机组的转速。在人的头脑中先有一个给定值,即额定频率(如 50 Hz)。系统的实际输出值,即实际频率,由频率表进行监视。机组和所带负荷是被控制对象,双手和阀门是控制器。用户的负荷发生变化会对输出值产生影响,这通常称为外扰;系统中的某些环节,如水轮机、发电机、阀门自身的参数发生变化,也会影响输出值,这通常称为内扰。内扰和外扰统称为扰动。由于扰动的作用,使输出值的实际频率发生变化,偏离了给定值。由人的眼睛反馈给大脑,大脑做出判断,动手改变阀门的开度,通常采用增加或减少流量的方法,保持机组的实际频率(即系统的输出值)与额定频率(给定值)相等或在允许的误差范围内。这种控制系统叫人工反馈控制系统,可用方框图表示,如图 1-2 所示。

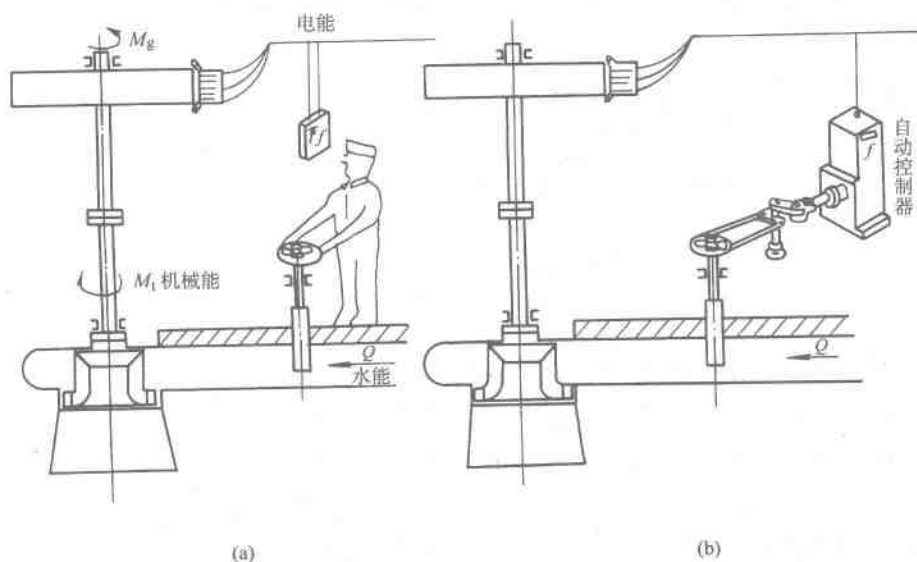


图 1-1 水轮机频率调节简图

(a) 人工反馈控制; (b) 自动反馈控制



图 1-2 人工反馈控制方框图

从图 1-2 中可以看出, 控制是受给定值和输出值双重作用的, 称为闭环控制。闭环控制系统即是反馈控制系统。

图 1-1 (b) 是水轮机频率调节自动控制系统的简图。系统的额定频率为给定值, 实际输出值由测定元件监视, 由自动控制器代替了人的大脑和手。当系统在扰动作用下, 实际频率偏离额定频率时, 自动控制器通过比较、放大, 命令执行元件去增大或减小阀门的开度, 维持被控制对象——机组和所带负荷的频率等于给定的额定频率, 或者使其误差在允许范围内。其方框图如图 1-3 所示。

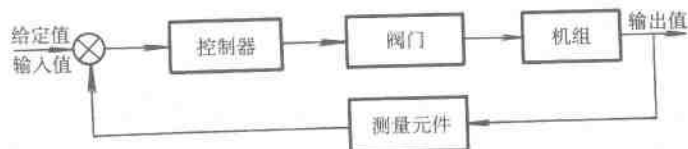


图 1-3 自动反馈控制系统方框图

从上述两例中可以看出, 闭环控制系统是由某些功能相似的环节组成的, 其方框图如图 1-4 所示。

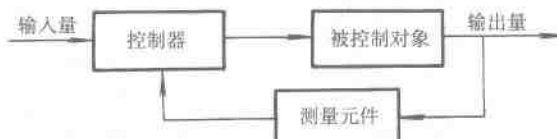


图 1-4 闭环控制系统方框图

控制器的输入信号是系统的输入量和测量元件信号两者的误差。输入量是给定值, 即期望值; 测量元件信号是输出信号本身或是它的函数。当输出信号发生误差时, 控制器就改变被控制对象的工作参数, 以维持输出量为期望值, 最终消除误差。可见闭环控制系统具有发现误差、消除误差的功能。此外, 闭环控制可以减少由于系统各环节自身的参数变化对输出的影响, 使元件的制造成本降低; 由于采用了自动反馈控制, 不仅减轻了人的劳动强度, 更重要的是提高了控制精度和可靠性, 促进了生产的发展。由于反馈可能使系统的振荡性加剧, 因而也使分析系统更复杂。

若控制只受给定值的作用, 而与系统的输出无关, 则称为开环控制。溢流闸门和冲沙闸门的控制都是开环控制的例子。只要有给定信号, 即闸门开启 (或关闭), 而无需对输出信号 (即流量) 进行测量, 也不用检验误差和消除误差。图 1-5 为开环控制的方块图, 其信号为单方向传递, 形成开环。

开环控制只受输入控制, 不受输出控制。



图 1-5 开环控制系统方框图

由于开环控制的输出不起反馈作用, 对于每一个给定值或输入量, 系统就有一个输出与之对应, 在没有内部和外部干扰 (即扰动) 的作用下, 这种系统还是可以工作的。如果发生了扰动, 则破坏了开环控制系统的输入和输出的对应关系。这时必须事先知道扰动的变化规律, 在输入量实现顺馈控制才行。

1.2.2 闭环控制系统的组成

尽管实际上众多反馈自动控制系统的控制器和被控对象存在着差异, 但从闭环控制的基本原理来看, 它们都遵循同一规律, 即出现误差, 使控制器输出指令, 改变被控制对象或过程的工作参数, 导致输出量与给定值

的差值变小或为零。这种检测误差至纠正误差的过程都是一致的。可见各种闭环控制系统在结构上具有共性，它是由几个部分组成的，每个部分或环节起着特定的作用。图 1-6 是负反馈控制系统的结构框图，从图中可以看出，该系统由以下几个部分组成。

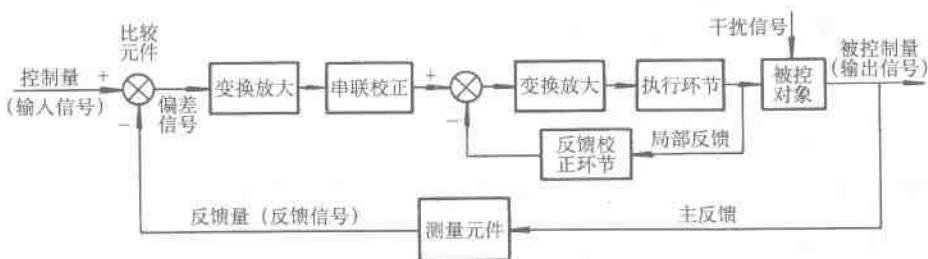


图 1-6 负反馈控制系统结构图

1. 被控对象

它是要求实现自动控制的设备或过程，其被控制的物理量，即系统的输出 x_c 。

2. 控制器

它是由下述几个元件组成的：

(1) 测量元件，将被控制量转换成与给定信号 x_r 相同的物理量，起负反馈的作用。

(2) 给定元件，由人工设定或自动装置给定信号的机构，产生预期的给定输入值。

(3) 比较元件，将输出信号与给定信号的差值作为误差信号去控制放大元件，在工作过程中又综合了反馈信号。

(4) 放大元件，将误差信号放大为控制信号，以便操纵执行机构，同时提供反馈信号给比较元件。

(5) 反馈元件，将控制信号转换为反馈信号，送至比较元件。由于它是负反馈，起抵消误差信号的作用。由负反馈信号的函数形式，还能使执行元件按某一规律工作，从而使被控制量过调节现象变弱，波动幅值和波动次数减少，因此反馈元件对控制器起着重要的作用。

3. 执行元件

执行元件按照控制信号操纵控制机构，改变被控制对象的工作参数，以纠正输出信号与给定值之间的误差。

1.2.3 闭环控制系统的分类

根据某些特点，可对各种工业自动控制系统分类。

1. 按系统的数学模型分类

(1) 线性控制系统

如果控制系统的数学模型是线性的,则称这个系统为线性控制系统,这种系统的微分方程中各项的系数是常数或是时间 t 的函数。例如:

$$a \frac{d^2 y}{dt^2} + b \frac{dy}{dt} + cy = A \frac{du}{dt} + Bu$$

$$4 \frac{d^3 y}{dt^3} + 5 \frac{d^2 y}{dt^2} + 6 \frac{dy}{dt} + 7y = 0$$

等都是线性定常系统,其各项系数均为常数。线性系统的特征是输出对输入的关系满足叠加原理。例如:

$$y(t) = y(t, u(t)) \quad (1-1)$$

$$u(t) = \alpha u_1(t) + \beta u_2(t)$$

$$\text{则} \quad y(t) = \alpha y(t, u_1(t)) + \beta y(t, u_2(t)) \quad (1-2)$$

(2) 非线性系统

用非线性方程表示的系统称为非线性系统。如:

$$y = \sin x$$

$$y = x^2$$

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + y = A \sin t$$

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + (y^2 - 1) \frac{dy}{dt} + y = 0$$

非线性系统不能用叠加原理,各项系数中含有变量或其函数,且各项导数也非一次型。

线性系统是自动控制系统中最重要、最常见的一种,即使有些实际上非线性的元件,在具有稳定工作点的条件下,也可以作线性化处理。目前对线性系统的理论分析很完善,并具有普遍适用的解析方法。对于非线性系统,若不能作线性化处理,则要采用专门的非线性分析方法。

2. 按给定输入特性分类

(1) 恒定系统

系统的给定输入是常数或变化很慢的量,在发生扰动时,系统的被控制量保持在给定值或按一定的精度接近给定值。水轮机调节系统、自动电压调节系统,还有一些恒温、恒压系统均属此类。

(2) 随动系统

系统的给定输入是一个随机变化的时间函数,控制系统就是要以一定的精度使输出跟随输入的变化。如双重调节的轮叶控制系统。

(3) 程序控制系统

系统的给定输入是按一定时间函数变化的。如程序控制机床、机组启动等。

3. 按控制系统的信号分类

(1) 连续系统

系统中各元件传递的信号均是模拟量，它们是时间的连续函数。如前面所述的调温、调压系统。

(2) 离散系统

系统中至少有一个元件的信号是离散的，即是脉动信号或数码信号。计算机控制系统即属此类。

上述分类方法不尽完善，有些系统本身可能同时具备几个类型的特征。

1.3 对自动控制系统性能的要求

由于实际存在的各种自动控制系统中都有惯性元件或储能元件，当有外界扰动或改变输入给定值时，系统的输出量往往会有一个过渡过程。历经一段时间后，才能趋近给定值。所谓静态特性即是指系统的输出量和输入量（扰动或给定值）在稳态下的对应关系，它不随时间的变化而变化，只表明系统的输入和输出在平衡状态下的关系。图 1-7 为水轮机调节系统的静态特性。其输入为

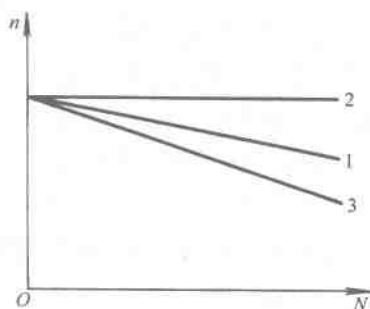
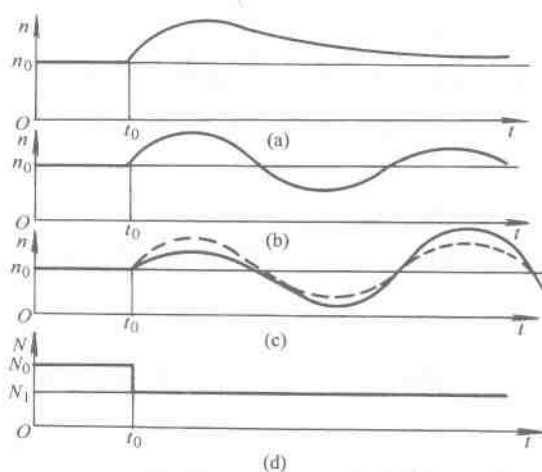


图 1-7 水轮机调节系统的静态特性

负荷 N ，输出为发电机的转速 n 。曲线 1 和 3 为有差调节曲线，曲线 2 为无差调节曲线。

动态特性是指系统在平衡状态下受到某一输入量（给定输入或扰动）作用时，其输出量（被控制量）在扰动发生后到新的平衡状态间的响应，这是系统的暂态或动态。过渡过程就是从暂态到稳态的过程。

图 1-8 是水轮机调节系统在负阶跃扰动下的动态特性。 t_0 时刻负荷由 N_0 下降至 N_1 后保持不变。 t_0 时刻以前机组转速为 n_0 。 $t > t_0$ 时，机组转速 n 呈现出随时间变化的暂态过程，由曲线 $n = f(t)$ 表示。图(a)和(b)表示的两种瞬态过程是可以稳定下来的，而(c)中的两种瞬态过程无法达到稳定。可见对自动控制系统，有下列几方面的要求：

图 1-8 水轮机调节系统的动态特性 $n = f(t)$

(a) 非周期衰减过程; (b) 振荡衰减过程;

(c) 等幅振荡 (虚线) 和扩散振荡 (实线); (d) 负荷扰动

(1) 系统应具有稳定性, 而且具备一定的稳定裕量。不稳定的系统是无法工作的, 更无法讨论它的工作性能。

对自控系统的性能要求

(2) 系统的暂态性能, 即系统的瞬态质量应符合要求。如输出量在过渡过程中的最大偏差、超调量、波动次数等特性指标, 应符合设计要求。

(3) 系统的稳态性能, 即系统的稳态精度, 主要指对系统输出量与给定值之间的误差, 应符合规定。

系统的暂态性能和稳态性能, 具体地表现出它的稳定性、准确性、速动性和抗干扰性等综合指标。

1.4 自动控制系统的典型输入信号

从图 1-8 中可知, 水轮机调节系统发生了负荷扰动之后, 系统的输出或控制量 (转速) 也是随时间变化的函数。输入函数 $N(t)$ 与输出函数 $n(t)$ 是因果关系。由于电力系统中负荷扰动是随机的, 扰动方程是多样的, 为了清楚地分析系统输出函数的动态特性, 一般将输入函数分为几种典型的函数。

1. 阶跃函数

阶跃函数的数学表达式为

$$x(t) = \begin{cases} 0 & (t < t_0) \\ x_0 & (t \geq t_0) \end{cases} \quad (1-3)$$

图 1-9 表示一个在 t_0 时刻之后保持为常量的阶跃信号。电力系统中突然增加或减少负荷,引水系统中突然打开或关闭阀门,电路中信号电压或电流的突然跳跃变化,都属于阶跃函数。

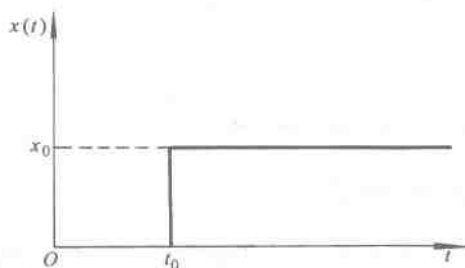


图 1-9 阶跃函数

这里假设阶跃变化是速度为无穷大的瞬时动作。这是在测试动态特性时应用最多的一种输入函数。幅值 $x_0 = 1$ 的函数叫做单位阶跃函数,用 $1(t)$ 表示。于是 $x(t)$ 也可以写成 $x(t) = x_0 \cdot 1(t - t_0)$ 。

2. 斜坡函数

斜坡函数的数学表达式为

$$x(t) = \begin{cases} 0 & (t < t_0) \\ vt & (t \geq t_0) \end{cases} \quad (1-4)$$

从图 1-10 可以看出,从 t_0 时刻开始, $x(t)$ 以恒定速度 v 变化,这种扰动量随时间按等速度变化。 $v = 1$ 的斜坡函数 $x(t) = t$ 叫做单位斜坡函数。

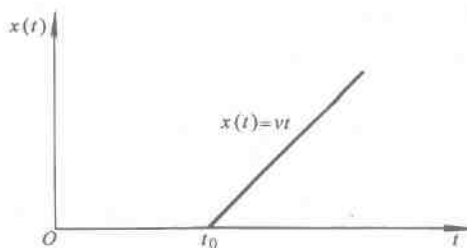


图 1-10 斜坡函数

3. 脉冲函数

脉冲函数的数学表达式为

$$x(t) = \begin{cases} 0 & (t < 0 \text{ 和 } t > \epsilon) \\ \frac{A}{\epsilon} & (0 < t < \epsilon) (\epsilon \rightarrow 0) \end{cases} \quad (1-5)$$

其图形如图 1-11 所示。