

自动控制原理

(修订版)

上册

南京航空学院 西北工业大学 北京航空学院 合编
胡寿松 主编

国防工业出版社

内 容 简 介

本书系《自动控制原理》一书的修订版，比较全面地阐述了自动控制的基本理论。全书共分十一章。上册八章，介绍经典控制理论；下册三章，介绍现代控制理论。

本书精选了原版中各章的内容，保留了原书的基本特色，加强了对基本理论的阐述，增加了数字机辅助计算，全面改写了现代控制理论部分，使其相对完整而又易为工程技术人员所接受。此外，本书还增加了例题和习题的数量，以帮助读者进一步深入理解与运用基本理论。

本书上册包括线性定常控制系统的基本理论、非线性系统理论和采样系统理论三部分。下册包括线性系统理论、最优控制理论、状态估计与参数辨识三部分。

本书主要作为高等工业院校自动控制类各专业的教科书，亦可供从事自动控制和工业自动化的各专业技术人员自学与参考。

自 动 控 制 原 理

(修 订 版)

上 册

南京航空学院 西北工业大学 北京航空学院 合编

胡寿松 主编

责任编辑 陈子玉

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092 1/16 印张31 1/4 732千字

1984年6月第一版 1984年6月第一次印刷 印数：00,001—21,000册

统一书号：15034·2739 定价：3.80元

前 言

本书初版自1979年问世以来,曾受到广大有关读者的欢迎,被许多兄弟高等院校选作为《自动控制原理》课程的教科书或主要参考书。这对于我们来说,无疑是一种极大的鼓舞和鞭策。回想起来,当初编写本书的目的,是为了满足高等院校教学及广大科技人员学习和参考的迫切需要。但是,由于编写时间仓促以及水平所限,因此在选材和编写方面,还存在着一些不妥之处。许多热情的读者,在阅读本书的过程中,给我们提出了中肯的评论和指正,使我们获得了很大的裨益。实际上,一本好的教科书,必须经过成型——使用——修改——再使用等过程才能真正成熟起来。经过数年的教学实践,我们进一步总结了使用本书的经验,同时又进行了若干社会调查,通过认真地讨论和准备,根据航空工业部制订的《自动控制原理》教学大纲,对本书进行了修订。

在修订本书的过程中,我们继续保留并突出了原版的基本特色:叙述深入浅出,注重物理概念的阐述,理论联系实际,保持技术内容的系统性、完整性和先进性,并且便于读者自学。与原书相比,这一次修订版精选了各章内容,调整了某些章节的次序,舍弃了一些次要内容,加强了对基本内容的阐述,全面改写并充实了现代控制理论部分,使其相对完整而又易为工程技术人员所接受。考虑到今后数字计算机在自动化技术中的应用将越来越普及,此次修订时还增加了用数字计算机进行辅助计算和对控制系统进行分析的内容。对于学过计算方法和算法语言的读者,这一部分内容可以不列入教学计划,直接供上机时使用,以丰富实验课内容。此外,为加强实践性环节,在修订版中,我们增加了不少习题,适当提高了若干习题的难度,补充了一些概念性和综合性的习题,供各院校开设习题课之用。

修订版上册为经典控制理论,共八章,包括线性定常控制理论的基本理论、非线性系统理论和采样系统理论三部分。其中,第一章概述;第二章控制系统的数学模型;第三至第六章介绍分析和设计线性定常控制系统的时域分析法、根轨迹法和频率响应法;第七章阐述非线性系统理论,说明相平面法和描述函数法在分析非线性系统中的应用;第八章讨论采样系统理论,并对采样系统和数字机控制系统的校正和设计方法作了比较全面的介绍。

修订版下册为现代控制理论,共三章,包括线性系统理论、最优控制理论和状态估计与参数辨识三部分。其中,线性系统理论为第九章,主要介绍状态空间法、线性系统的可控性与可观测性、状态反馈与状态观测器以及稳定性理论;第十章为最优控制理论,主要讨论函数极值的古典理论、泛函极值问题、极小值原理及其应用、具有二次型性能指标的连续系统的最优控制问题、动态规划法;第十一章为状态估计与参数辨识,主要阐述最优估计理论、最优滤波理论以及系统辨识概念。

这本书的修订工作是集体完成的。其中,前言及第三、四、六章由胡寿松编写;第一、二章由田林编写;第五章由林代业编写;第三至五章中有关数字机分析的内容,由姜长生编写;第七章由程鹏编写;第八章由胡干跃编写;第九、十章由徐缤昌、林其璈

和周凤歧编写；第十一章由陈新海编写。全书由南京航空学院胡寿松主编、北京工业学院徐和生主审。在审稿过程中，徐和生同志提出了不少宝贵的修改意见。此外，在本书修订过程中，还得到了航空工业部及各主管院校有关同志的大力支持。在此，我们一并表示衷心的感谢。

由于我们水平所限，在修订过程中仍然可能存在不少错误和不妥之处，希望广大读者继续不吝指正。

编 者

1983年8月

目 录

第一章 自动控制的一般概念	1	5-5 稳定裕度	255
1-1 引言	1	5-6 闭环频率特性	258
1-2 自动控制的基本方式	2	5-7 系统时域指标估算	277
1-3 自动控制系统的分类及组成	6	5-8 传递函数的实验确定法	285
1-4 对控制系统的基本要求	11	习题	287
1-5 其它控制方式	15	第六章 线性系统的校正方法	294
习题	16	6-1 引言	294
第二章 控制系统的数学模型	21	6-2 常用校正装置及其特性	297
2-1 数学模型的建立及线性化	21	6-3 频率响应法校正	310
2-2 线性系统的传递函数	23	6-4 根轨迹法校正	324
2-3 结构图	41	6-5 复合控制校正 (重要)	334
2-4 信号流图	55	习题	342
2-5 反馈控制系统的传递函数	67	第七章 非线性系统理论	346
习题	70	7-1 非线性问题概述	346
第三章 时域分析法	77	7-2 常见非线性因素对系统 运动特性的影响	351
3-1 引言	77	7-3 相平面法基础	358
3-2 一阶和二阶系统的分析和计算	79	7-4 非线性系统的相平面分析	368
3-3 高阶系统的时间响应	106	7-5 描述函数	384
3-4 稳定性分析	109	7-6 用描述函数分析非线性系统	392
3-5 稳态误差计算	118	习题	406
3-6 高阶系统的数字机分析法	132	第八章 采样系统理论	410
习题	140	8-1 引言	410
第四章 根轨迹法	146	8-2 信号的采样和复现	415
4-1 根轨迹方程	146	8-3 z 变换与 z 反变换	423
4-2 根轨迹绘制的基本法则	151	8-4 脉冲传递函数	437
4-3 广义根轨迹	167	8-5 采样系统的稳定性	448
4-4 系统性能的分析与估算	177	8-6 采样系统的稳态误差	455
4-5 根轨迹的数字机分析	190	8-7 采样系统动态性能的估算	461
习题	207	8-8 采样系统和数字机控制系统的 校正与设计	471
第五章 频率响应法	211	习题	487
5-1 引言	211	参考文献	493
5-2 频率特性	211		
5-3 典型环节和开环系统频率特性	219		
5-4 奈奎斯特判据	248		

第一章 自动控制的一般概念

1-1 引言

自动控制技术及其应用 自动控制技术广泛地应用于工农业生产、交通运输、国防和宇航等各个领域。随着生产和科学技术的发展,自动控制技术所起的作用越来越重要,自动化的水平也越来越高。

所谓自动控制,是指在没有人直接参与的情况下,利用控制装置使被控制对象(如机器、设备或生产过程)的某一物理量(或工作状态)自动地按照预定的规律运行(或变化)。例如,化工生产过程中反应塔的温度或压力能够自动地维持恒定不变,数控车床按预定程序自动地切削工件,跟踪雷达和指挥仪组成的防空系统使火炮自动地瞄准目标,无人驾驶飞机按预定航迹自动飞行、降落,人造地球卫星在预定轨道上运行并准确回收等等,都是应用自动控制技术的结果。

在国民经济各部门中,由于广泛地应用了自动控制技术,因此在改善劳动条件、提高产品质量和劳动生产率、实现企业管理自动化等各个方面,取得了明显的效果。在宇宙航行、导弹制导等科学技术领域中,自动控制技术具有特别重要的作用。特别是近二十多年来,电子计算机已成为自动控制技术不可分割的重要组成部分,并为自动控制技术的发展和應用开辟了广阔的新天地。

自动控制系统 自动控制系统是指能够对被控制对象的工作状态进行自动控制的系统。它一般由控制装置和被控制对象组成。被控制对象(简称被控对象)是指要求实现自动控制的机器、设备或生产过程。例如,飞机、锅炉、机床以及化工生产过程等。控制装置则是指对被控对象起控制作用的设备总体。例如,有用来测量温度、压力或飞行姿态等物理量的测量设备;有对位移、速度、压力或电压等物理量进行变换和放大的变换、放大设备;有操纵飞机舵面偏转的舵机、操纵反应塔流量的阀门等操纵设备。

我们所见到的自动控制系统,其功用及组成是多种多样的,结构有简有繁。它可以是只控制一个物理量,如温度、压力、电压的简单系统,也可以是包括一个企业、机构全部过程的大系统;可以是一个具体的工程系统,也可以是抽象的社会系统、生态系统或经济系统等。

自动控制理论 自动控制理论是研究自动控制共同规律的技术科学。它的发展初期,是以反馈理论为基础的自动调节原理,随着生产和科学的进步,现已发展为一门独立的学科——控制论。控制论包括工程控制论、生物控制论和经济控制论。工程控制论主要研究自动控制系统中的信息变换和传送的一般理论及其在工程设计中的应用。而自动控制原理仅仅是工程控制论的一个分支。它只研究控制系统分析和设计的一般理论。根据自动控制技术发展的不同阶段,自动控制原理相应分为“经典控制理论”和“现代控制理论”两大部分。

经典控制理论是指五十年代末期所形成的理论体系，它主要是研究单输入-单输出线性定常系统的分析和设计问题，其理论基础是描述系统输入-输出关系的传递函数。多年来，经典控制理论在工程实践中得到了成功的应用。

现代控制理论是六十年代初期，为适应宇航技术发展的需要而出现的新理论。现代应用数学的研究和电子计算机的应用大大地推进了它的发展。目前，现代控制理论正向大系统理论和人工智能理论等方面深入发展。

现代控制理论主要是研究具有高性能、高精度的多输入-多输出、变参数系统的分析和设计问题，如最优控制、最优滤波、自适应控制等。描述系统的方法是基于系统状态这一内部特征量的状态空间法。

值得指出，现代控制理论的发展，虽然解决了经典控制理论所不能解决的许多理论问题和工程问题，但这绝不意味着经典控制理论已经过时。相反，在自动控制技术的发展中，由于经典控制理论便于工程应用，今后还将继续发挥其理论指导作用，而现代控制理论则可以补其不足。两者相辅相成，才能不断推动自动控制理论和应用的发展。

1-2 自动控制的基本方式

自动控制系统可以按照多种方式组成。

开环控制 开环控制是指控制装置与被控对象之间只有顺向作用而没有反向联系的控制过程。因此，开环控制系统的输出量不对系统的控制作用发生影响。目前用于国民经济各部门的一些自动化装置，如自动售货机、自动洗衣机、产品生产自动线、数控车床以及交通指挥的红绿灯转换等，一般都是开环控制系统。

图 1-1 所示电加热炉是一个开环控制系统。炉子是被控对象，炉温是要求实现自动控制的物理量，称为被控制量（或输出量）。电阻丝的开关 K 受时间继电器控制，按照预先规定的时间（称为输入信号）接通或断开电源 E ，对炉温进行控制，使其保持在希望值的一定范围内。开关 K 和电阻丝对被控制量起控制作用，故总称为控制装置。开关 K 的接通或断开时间，一般是参照在正常情况下炉温可以达到希望值的经验数据来确定的。这时，实际炉温可能稍高于或稍低于希望炉温，但仍能满足恒温要求。然而，如果工作条件变化了，例如炉门的开闭次数有所增加，则炉温散失情况会超出事先估计的范围，实际炉温将不再等于希望炉温，而出现偏差。这种使被控制量（炉温）偏离希望值的因素（炉门开闭）称为对系统的扰动（或干扰）作用。由于开环控制的特点是控制装置只按照给定的输入信号对被控对象进行单向控制，而不对被控制量进行测量并反向影响控制作用，这样，当炉温偏离希望值时，开关 K 的接通或断开时间不会相应改变，因此，这种开环控制系统不具有修正由于扰动而出现的被控制量与希望值之间偏差的能力。

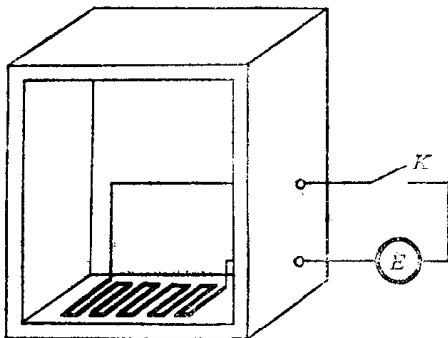


图1-1 电加热炉



图1-2 开环控制的方块图

开环控制系统可用图 1-2 所示方块图表示。图中，控制装置与被控对象分别用方块表示。系统中感兴趣的物理量，如电流、电压、温度、力等，称为信号。信号的传递方向用箭头表示。进入方块的箭头表示输入信号（也称输入量）。离开方块的箭头表示输出信号（也称输出量）。控制系统的输出量就是被控制量。它的希望值一般是系统输入信号的函数。

在开环控制中，对于系统的每一个输入信号，必有一个固定的工作状态和一个系统输出量与之对应。例如，一定的时间间隔对应于电阻丝的一个通电和断电状态以及相应的炉温值。这种对应关系调整越准确，元件的参数及性能变动越小，开环系统的工作精度便越高。但是，由于开环控制的抗扰动能力差，因此它的使用有一定的局限性。

闭环控制 闭环控制是指控制装置与被控对象之间既有顺向作用，又有反向联系的控制过程。闭环控制是自然界中一切生物控制自身运动的基本规律，也是工程自动控制的基本原理。它可以实现复杂而准确的控制。

人本身就是一个具有高度复杂控制能力的闭环系统。例如，人可以用手准确地去拿放在桌上的书、笔等物。这个出现于日常生活中的习以为常的现象，正好体现了闭环控制的原理。当人去拿书时，大脑送出一个信号令手执行任务。这时，眼睛连续观测手的位置，并将这个信息送入大脑。然后，由大脑判断手对于书的偏差，并根据其大小发出命令控制手臂移动，使偏差减小。只要这个偏差存在，上述过程就要反复进行。一旦手拿到书，偏差减小为零，人便完成了用手拿书的控制过程。在此，手是被控对象，手的位置即为被控制量，控制目的是使手的位置与书的位置一致，控制作用是通过眼睛、大脑和手臂来实现的。人作为一个闭环控制系统可用图 1-3 所示方块图表示。

通常，我们把输出量送回到输入端并与输入信号比较的过程称为反馈。若反馈的信号是与输入信号相减而使偏差值越来越小，则称为负反馈；反之，则称为正反馈。图 1-3 中，由于眼睛不断观测手的位置并反应到大脑进行判断，产生了手与大脑之间的反向联系即反馈。然后，大脑根据偏差控制手臂移动使偏差减小，形成了负反馈控制。显然，负反馈控制是一个利用偏差进行控制并最后消除偏差的过程，因此也称为按偏差的控制。同时，由于有反馈存在，整个控制过程是闭合的，因此负反馈控制也称闭环控制。

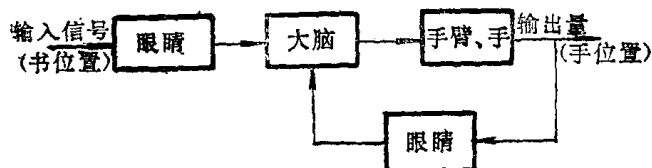


图 1-3 人作为闭环系统的方块图

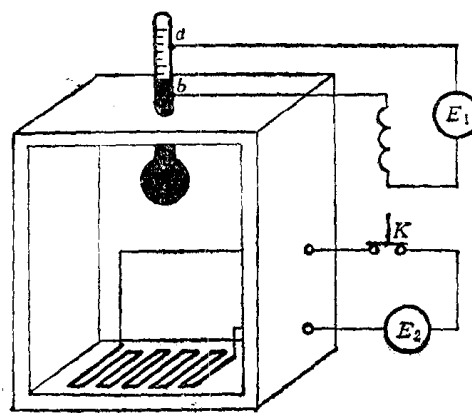


图 1-4 电加热炉闭环系统

在工程实践中，为了实现对被控对象的闭环控制，系统中必须配置具有人的眼睛、大脑和手臂功能的装置，用来对被控制量进行连续测量和反馈，并进行按偏差的控制。这些装置分别称为测量装置、比较装置、放大装置和执行机构，并统称为控制装置（控制器）。

一种可以自动修正炉温偏离的电加热炉如图 1-4 所示，它是一个闭环控制系统。电阻丝电源的通断由接触式水银温度计控制，水银温度计的两个触点 a 和 b 接在常闭继电器的线圈电路中，它们随着水银柱的升降而接通或断开，从而控制继电器触点 K ，以便切断或接通电阻丝电源 E_2 。例如，若炉温高于希望值，则由于水银柱升高，触点 a 和 b 接通，使继电器启动触点 K 而切断电阻丝电源 E_2 ，停止加热。调整水银温度计触点的位置，可以改变炉温的希望值。

闭环控制的电加热炉可用图 1-5 所示方块图表示。图中，炉温（被控制量）由温度计测量并与希望值进行比较，一旦出现偏差，即通过继电器和电阻丝对炉温进行控制，以消除偏差，保持恒温。在此，炉子是被控对象，控制装置由温度计、继电器和电阻丝组成。与开环控制的电加热炉相比，由于采用了接触式水银温度计，可以不断地对炉温进行测量和比较，从而根据炉温的实际偏离进行控制，提高了抗扰动的能力。

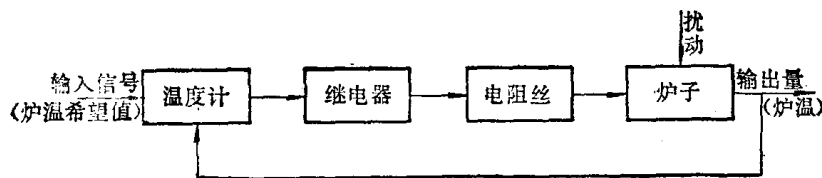


图1-5 电加热炉系统方块图

在闭环控制中，被控制量一般是由测量装置测量并反馈到输入端，然后由比较装置将它与输入信号进行综合而得到偏差（或误差）。有时，测量与综合作用是由同一个装置完成的，因此，往往把测量装置和比较装置合称为误差检测器。一个闭环控制系统的典型方块图表示在图 1-6 中。图中，用“ $\otimes$ ”表示误差检测器，“-”号则表示负反馈。

必须指出，只有按负反馈原理组成的闭环系统才能实现自动控制的任务。例如，在电加热炉闭环系统中，负反馈能使炉温对于希望值的偏离逐渐减小，而正反馈则相反，将使炉温偏离越来越大，从而不可能达到自动控制的目的。

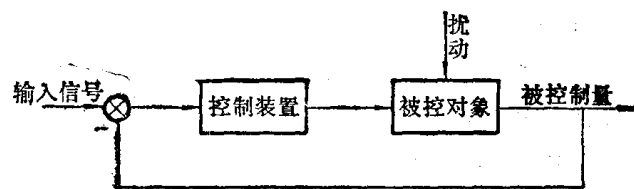


图1-6 闭环控制系统典型方块图

开环控制与闭环控制的比较 一般来说，开环控制结构简单、成本低廉、工作稳定。因此，当系统的输入信号及扰动作用能预先知道时，应采用开环控制且可取得较为满意的效果。但由于开环控制不能自动修正被控制量的偏离，所以，系统的元件参数变化以及外来的未知扰动对控制精度影响较大。

闭环控制具有自动修正被控制量出现偏离的能力，因此可以修正元件参数变化以及外界扰动引起的误差，其控制精度较高。但正由于存在反馈，闭环控制也有其不足之处，这就是被控制量可能出现振荡，严重时会使系统无法工作。这是由于被控制量出现偏离之后，经过反馈便形成一个修正偏离的控制作用。但在这个控制作用和它所产生的修正偏离的效果之间，一般是有一定时间延迟的，因此被控制量的偏离不能立即得到修正，从而有可能使被控制量处于振荡状态。如果系统参数选择不当，不仅不能修正偏离，反而会使偏离越来越大，系统无法工作。自动控制系统设计的重要课题之一，就是要解决闭环

控制中的这个“振荡”或“发散”问题。

如果要求实现复杂且精度较高的控制任务，可将开环控制和闭环控制方式适当结合起来，组成一个比较经济且性能较好的控制系统——复合控制系统。

复合控制 复合控制就是开环控制和闭环控制相结合的一种控制方式。实质上，它是在闭环控制回路的基础上，附加一个输入信号或扰动作用的顺馈通路，来提高系统的控制精度。顺馈通路通常由对输入信号的补偿装置或对扰动作用的补偿装置组成，分别称为按输入信号补偿和按扰动作用补偿的复合控制系统，如图 1-7 所示。

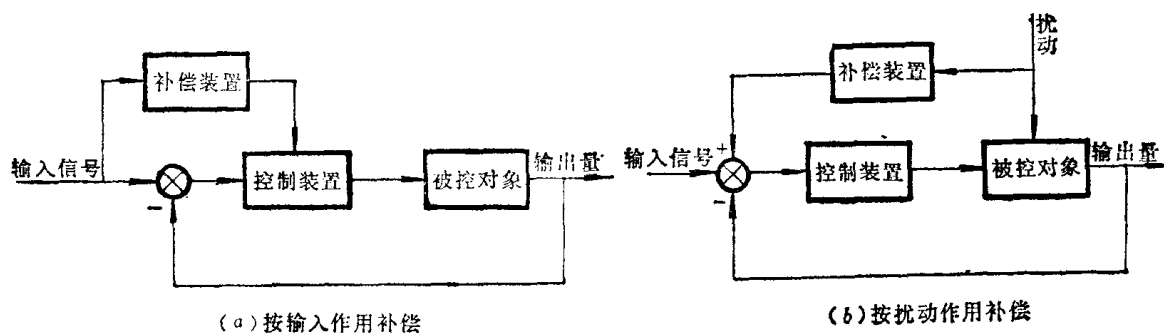


图 1-7 复合控制典型方块图

通常，按输入信号补偿的补偿装置可提供一个输入信号的微分作用，并作为顺馈控制信号，与原输入信号一起对被控对象进行控制，以提高系统的跟踪精度。按扰动作用补偿的补偿装置，能够在可测量的扰动对系统的不利影响产生之前，提供一个控制作用以抵消扰动对系统输出的影响。补偿装置按照不变性原理设计，即在任何输入下，均保证系统输出与作用在系统上的扰动完全无关或部分无关，从而使系统输出完全复现输入，具体设计方法详见本书第六章。

复合控制中的顺馈通路相当于开环控制，因此，对补偿装置的参数稳定性要求较高；否则，会由于补偿装置参数本身的漂移而减弱其补偿效果。此外，顺馈通路的引入，对闭环回路性能的影响不大，但却可以大大提高系统的控制精度，因此获得了广泛应用。目前，在许多平台随动系统、火炮随动系统、雷达站随动系统以及飞机自动驾驶仪系统中，都广泛使用复合控制线路。

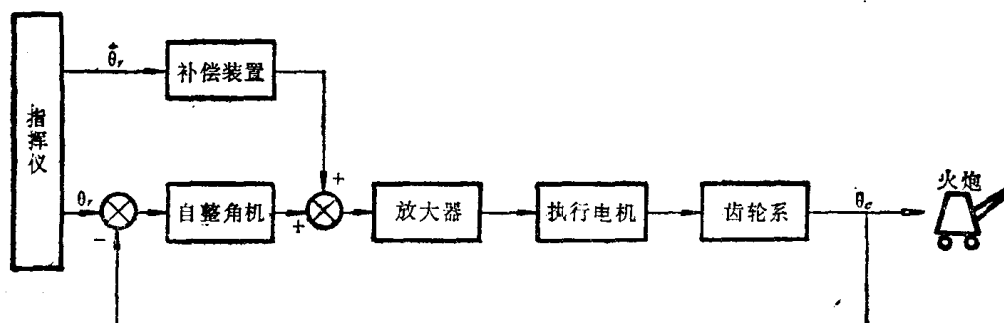


图 1-8 火炮自动控制系统

图 1-8 为火炮自动控制系统原理方块图。它是按输入信号补偿的复合控制系统。火炮对空射击时，要求炮身方位角 θ_c 与指挥仪给定的方位角 θ_r 一致。为了保证炮身能准

确跟随高速飞行的目标,提高跟踪精度,所以,从指挥仪引出方位角的速度信号 $\dot{\theta}$,通过补偿装置形成顺馈控制信号。由于方位角速度信号总要比方位角信号提前一些作用,所以只要补偿装置的参数选择合适,就能使炮身按照指挥仪的方位角信号以及所要求的角速度准确跟踪目标。

图 1-9 为谷物湿度控制系统,它是按扰动作用补偿的复合控制系统。谷物磨粉生产过程中,存在着一个出粉最多的谷物湿度,因此磨粉之前,要给谷物加水以得到给定的湿度。图中,谷物用传送装置按一定流量通过加水点,加水量可通过自动阀门控制,而对阀门的控制作用则是通过测量加水谷物的实际湿度,并在调节器中形成的,这是反馈控制过程。但在加水过程中,谷物的流量、加水前谷物的湿度以及水压等随时都有变化,它们都是对谷物湿度控制的扰动作用。为了减少其影响,提高湿度控制的精度,一方面可采取人工措施,尽量减小它们的变化;另一方面可采用顺馈控制。例如,可测量出加水前谷物的湿度,并在调节器中形成对阀门的顺馈控制作用,从而按照输入谷物的湿度相应改变加水流量。

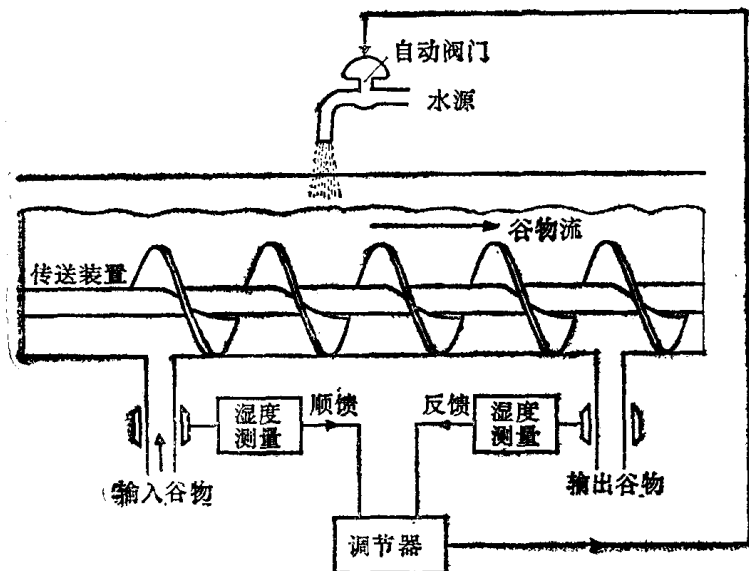


图1-9 谷物湿度控制系统

1-3 自动控制系统的分类及组成

自动控制系统的分类方法有多种。按照描述系统的数学模型不同,可分为线性系统 and 非线性系统或定常系统和时变系统;按照系统传送信号的性质,可分为连续时间系统和离散时间系统;按照系统元件类型,可分为机电系统、液压系统、气动系统、生物系统等;按照系统的功用分类,则有温度控制系统、位置控制系统等;按照系统输入信号的变化规律不同,则有随动(跟踪)系统和调节(稳定)系统之分。一般,为了全面反映自动控制系统的特性,上述各种分类方法常常组合应用。以下通过典型实例说明自动控制系统的工作原理、组成及分类。

函数记录仪 函数记录仪是一种通用的自动记录仪,它可以在直角坐标上自动描绘两个电量的函数关系。同时,记录仪还带有走纸机构,用以描绘一个电量对时间的函数

关系。

函数记录仪一般采用负反馈原理，其结构通常由衰减器、测量电路、放大装置、伺服电动机-测速机组、齿轮系及绳轮等组成，其原理示意图见图 1-10。系统的输入信号是待记录的电压，被控对象为记录笔，其位移即为被控制量。函数记录仪控制系统的任务是控制记录笔位移，使其在记录纸上描绘出待记录的电压曲线。

图 1-10 中，测量电路是由电位器 R_0 和 R_M 组成的桥式线路，记录笔就固定在电位器 R_M 的电刷上，因此测量电路的输出电压 u_p 与记录笔位移成正比。当存在输入信号 u_r 时，在放大装置输入口得到偏差电压 $\Delta u = u_r - u_p$ ，经放大后驱动伺服电动机，并通过齿轮系及绳轮而带动记录笔移动，使偏差电压减小。当偏差电压 $\Delta u = u_r - u_p = 0$ 时，电动机停止转动，记录笔也静止不动。此时， $u_p = u_r$ ，即记录笔位移与输入信号相对应。如果输入信号随时间连续变化，记录笔便描绘出随时间连续变化的相应曲线。

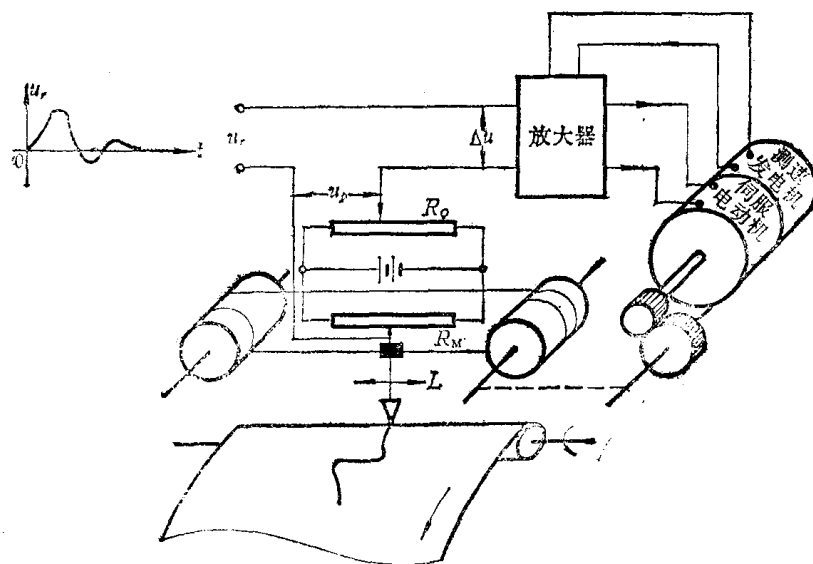


图1-10 函数记录仪原理示意图

函数记录仪控制系统方块图如图 1-11 所示。图中，测速发电机反馈一个与电动机转速成正比的电压信号，以增大系统阻尼而达到改善系统性能的目的。

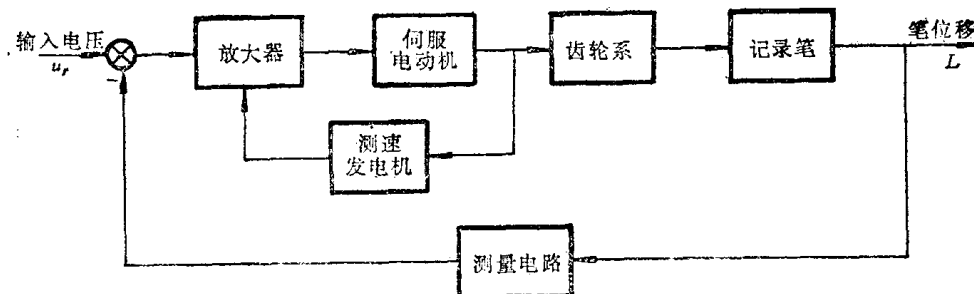


图1-11 函数记录仪系统方块图

综上所述，函数记录仪系统的功用是控制记录笔正确记录输入的电压信号。而输入信号的变化规律可以是时间的任意函数，因此这种控制系统就称为随动系统。又由于组

成函数记录仪系统的元件有电气元件、机械元件等。系统中传递的电压、位移等信号都是时间的连续信号，因此函数记录仪系统是一个连续时间的机电随动系统。

飞行模拟器的视景系统 飞行模拟器是一种能比较逼真地复现飞行器在空中飞行的状态和环境的地面设备。它通过模拟的方法，把驾驶员在操纵飞机时所能感觉到的飞机姿态、飞行运动，所能看到的各种仪表设备的指示、机外景物的形象以及所能听到的各种噪音逼真地反映出来，使驾驶员就象处在真实飞机驾驶舱中一样地操纵飞机。因此，用飞行模拟器培养飞行员，可以节约经费，缩短训练周期，而且不受场地和气象条件的限制。

飞行模拟器的视景系统的功能是采用闭路电视投影的方法向驾驶员提供外景的模拟。通常，先由视景系统的摄像机拍摄按一定比例制作的地景模型，然后投影到座舱前的电视屏幕上，给驾驶员显示出外景的真实形象。摄像机镜头相对于地景模型的运动即代表飞机的运动（更确切地说，是代表驾驶员眼睛相对地面的运动），它有六个自由度，分别模拟飞机沿 X （水平）、 Y （高度）、 Z （横向）三个方向的线运动和 δ （俯仰）、 γ （横滚）、 ψ （偏航）三个方向的角运动。摄像机在各个方向上的运动，分别由视景系统中相应的一套随动系统控制。下面以高度随动系统为例来说明其工作原理。

视景系统的各套随动系统都是数字计算机控制的系统，其中，高度随动系统的功用是控制摄像机镜头沿地景模型的垂直方向运动，以模拟飞机在飞行过程中的高度变化，其原理简图见图 1-12。图中，摄像机镜头安装在由减速器和丝杆所带动的支架 S 上，可

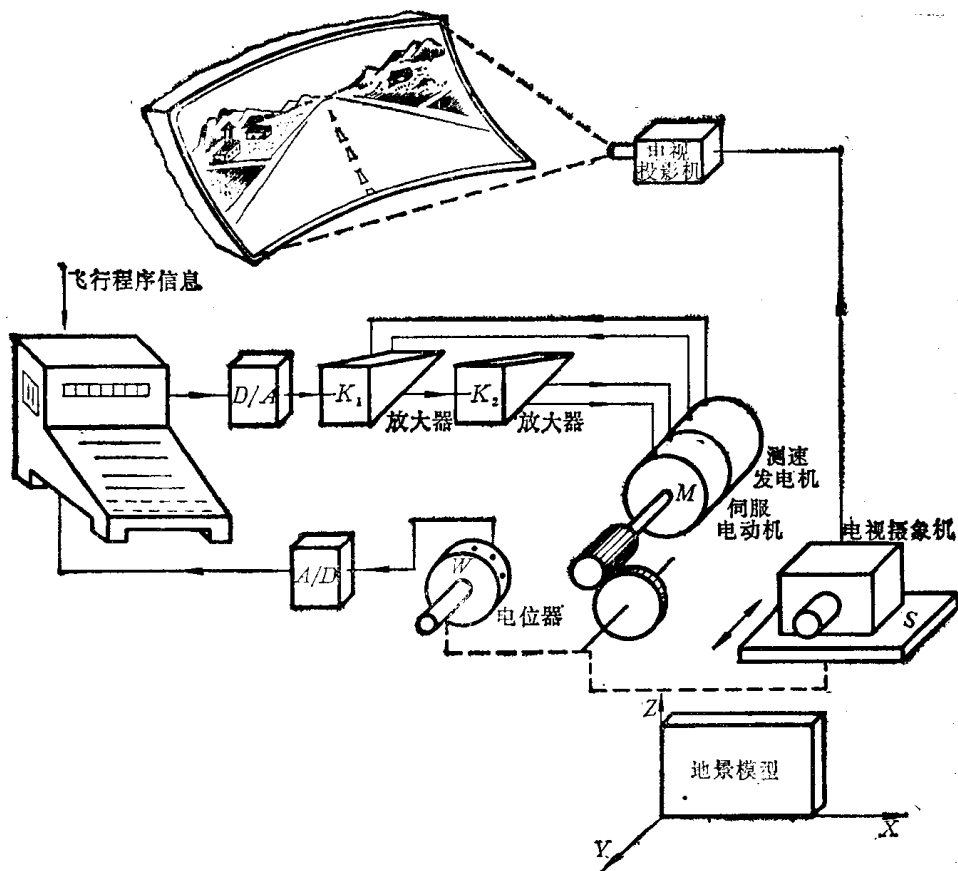


图1-12 视景系统的高度随动系统

沿 Y 方向运动,其位置受视景系统程序计算机的控制指令控制,并通过位置参考电位器 W 将位置信号反馈到计算机。视景系统程序计算机含有十二个子程序,高度随动系统控制指令的形成及位置反馈信号的处理,均在该计算机相应的子程序中进行。计算机给出的控制指令是飞行高度的变化速度,它是根据来自飞行程序的有关信息并经位置反馈信号修正后形成的。计算机输出的控制指令是不连续的数字信息,首先应通过数模转换器(即 D/A)转换为连续的物理量。然后,经直流放大器放大,驱动直流伺服电动机 M ,并通过传动机构带动摄象机支架 S 按照控制指令运动,以模拟飞行高度的变化。同时,直流伺服电动机 M 还带动位置参考电位器 W 的电刷,输出位置反馈信号,然后通过模数转换器(即 A/D)转换为不连续的数字信息,送到计算机中进行处理,用以修正控制指令,提高跟踪精度。

高度随动系统方块图如图1-13所示。被控对象是装有摄象机镜头的支架,其位置即为被控制量。它由来自计算机的控制指令进行控制,按照预定的飞行程序跟踪地景模型。在这里,输入信号的变化规律是由飞行程序所确定的,所以这种随动系统也叫程序控制系统。又由于飞行程序计算机已成为控制系统的一个组成部分,系统中传送的信息既有时间离散的数字信号,又有时间连续的模拟信号,因此,视景系统是一种离散时间的程序控制随动系统。

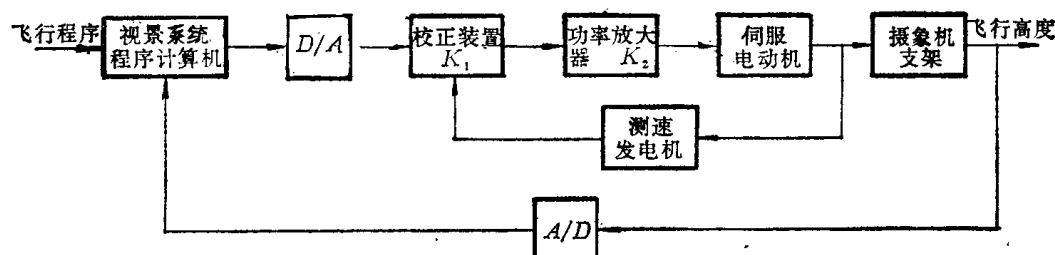


图1-13 高度随动系统方块图

飞机-自动驾驶仪系统 飞机自动驾驶仪是一种能保持或改变飞机飞行状态的自动装置。它可以稳定飞行的姿态、高度和航迹;可以操纵飞机爬高、下滑和转弯。飞机与自动驾驶仪组成的自动控制系统,称为飞机-自动驾驶仪系统。

如同飞行员操纵飞机一样,自动驾驶仪控制飞机是通过控制飞机的三个操纵面(升降舵、方向舵、副翼)的偏转,改变舵面的空气动力特性,以形成围绕飞机重心的旋转力矩,从而改变飞机的飞行姿态和轨迹。现以比例式自动驾驶仪稳定飞机俯仰角为例,说明其工作原理。

飞机的俯仰角用垂直陀螺仪测量。当飞机按给定俯仰角水平飞行时,陀螺仪电位器没有电压输出。如果飞机受到扰动,使俯仰角向下偏离给定值,则陀螺仪电位器输出与俯仰角偏差成正比的信号,经放大器放大后驱动舵机,一方面推动升降舵舵面向上偏转,产生使飞机抬头的力矩,减小俯仰角偏差;与此同时,带动反馈电位器电刷,产生与舵面偏转角成正比的信号并反馈到输入端,如图1-14所示。随着俯仰角偏差的减小,陀螺仪电位器输出信号越来越小,舵面的偏转角也随之逐渐减小,直到俯仰角恢复到给定值为止,这时,舵面也回到原来状态。

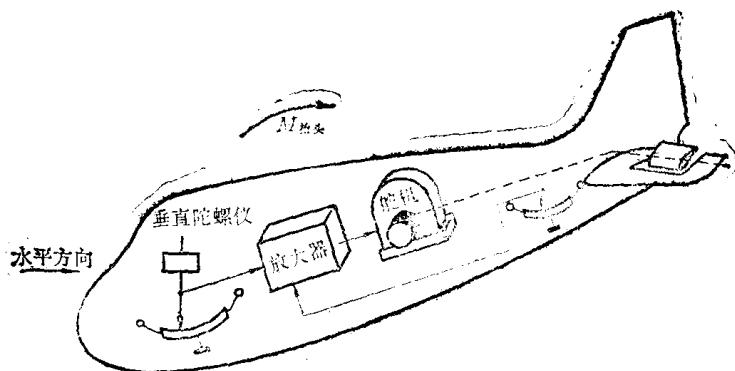


图1-14 飞机自动驾驶仪原理图

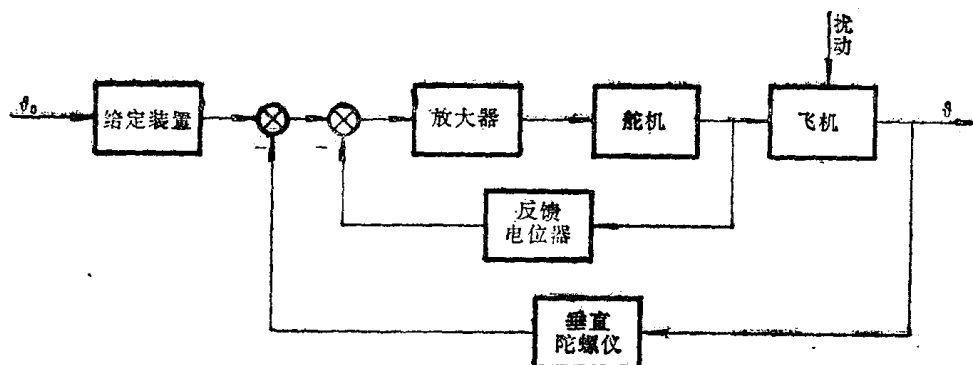


图1-15 俯仰角控制系统方块图

飞机自动驾驶仪稳定俯仰角的控制系统方块图如图 1-15 所示。系统中，被控对象是飞机，其俯仰角即是被控制量，自动驾驶仪则是控制装置。系统的输入信号是给定的俯仰角，它是一个恒定不变的常值。系统的功用是在任何外来扰动作用下，保持飞机俯仰角不变，这种系统称为调节系统（或稳定系统）。又由于系统中的电压、位移、角度等信号均是时间的连续信号，因此，飞机自动驾驶仪俯仰角稳定系统是一个连续时间的角度稳定系统。

闭环控制系统的基本组成 从上述闭环控制系统典型实例看到，尽管控制系统由不同的元件组成，系统的功用也不一样，但它们都是采用了负反馈工作原理。相同的工作原理决定了它们必然具有类似的结构。例如，它们都含有测量装置、比较装置、放大装置和执行机构。同时，我们还看到，在不同系统中，可以采用不同的元件去实现某一种相同的功能。例如，函数记录仪用电位器桥式线路作为测量装置，以测量记录笔的位移；飞机自动驾驶仪是用垂直陀螺仪作为测量装置，用来测量飞机的俯仰角。

一般说来，一个闭环控制系统均由以下基本元件（或装置）组成。

测量元件 对系统输出量进行测量，也称敏感元件。

比较元件 对系统输出量与输入信号进行加减运算，给出偏差（误差）信号，起信号的综合作用。这个作用往往是由综合电路或由测量元件兼而完成的，这时统称误差检测器。

放大元件 对微弱的偏差信号进行放大和变换，输出足够功率和要求的物理量。

执行机构 根据放大后的偏差信号，对被控对象执行控制任务，使被控制量与希望值趋于一致。

被控对象 自动控制系统需要进行控制的机器、设备或生产过程。被控对象内要求实现自动控制的物理量称为被控制量或系统输出量。

校正装置 参数或结构便于调整的元件，用于改善系统性能。

一个典型的自动控制系统的基本组成，可用图 1-16 方块图表示。图中，系统的基本元件和被控对象都用方块表示；信号的传输方向用箭头表示，该传输方向是单向不可逆的，这是由元件的物理特性所决定的；“-”号表示输入信号与反馈的信号相减，即负反馈（“+”号则表示正反馈）。

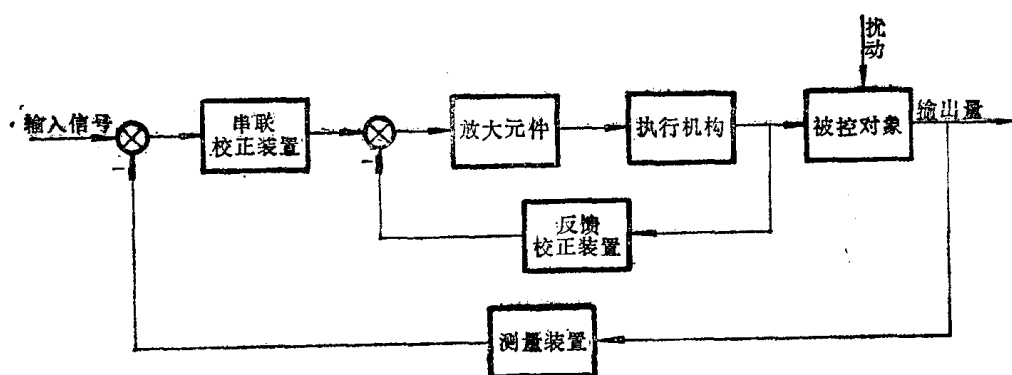


图1-16 自动控制系统基本组成

信号从输入端沿箭头方向到达输出端的传输通路称为前向通路；系统输出量经由测量装置反馈到输入端的传输通路称为主反馈通路；前向通路与主反馈通路一起，构成主回路。此外，还有局部反馈通路以及由它组成的内回路。只有一个反馈通路的系统称单回路系统，有两个以上反馈通路的系统，称为多回路系统。

一般，控制系统受有两种外作用，即有用信号和扰动，它们都可作为系统的输入信号。系统的有用输入信号决定系统被控制量的变化规律；而扰动是系统不希望的外作用，它破坏有用信号对系统输出量的控制。在实际系统中，扰动总是不可避免的，它可以作用于系统中的任何部位。电源电压的波动，环境温度、压力的变化，飞行中气流的扰动以及负载的变化等，都是现实中存在的扰动。通常所说的系统输入信号，一般是指有用信号。

1-4 对控制系统的基本要求

控制系统在没有受到外作用时，总是处于一个稳定的平衡状态，系统的输出亦保持其原来状态不变。而当系统受到外作用时，其输出必将发生相应变化。由于系统中总是包含具有惯性或贮能特性的元件，因此输出量不能立即按希望的规律变化，而是有一个过渡过程。例如，用函数记录仪记录输入电压时，若电压是突然变化的，则由于电动机等元件具有惯性，记录笔位移不会突变，而要经过一个缓慢的或摆动式的位移变化过程。又例如水平飞行的飞机，当受到垂直上升气流扰动后，自动驾驶仪将控制舵面偏转，直

到飞机恢复原来姿态。由于飞机有惯性,因此这种恢复有一个摆动过程,在这个过程中,如果飞机机身摆动次数过多或摆动振幅过大,都会给乘员以不适的感觉。每一个控制系统在不同的外作用下,都会表现出各不相同的过渡过程特性,它是衡量控制系统动态质量的重要标志。一旦过渡过程结束之后,系统就将进入新的稳定平衡状态。此时,在理想情况下,输出量应完全复现输入信号。实际上,由于结构及非线性等因素,系统输出量只能以一定准确度复现输入信号,这就会在输出量与希望值之间出现误差,称之为稳态误差,它是衡量控制系统稳态控制精度的标志。本书所研究的稳态误差,是指结构上的原理性误差,不包括非线性、模型不准确等因素引起的误差。

由上所述,在控制系统的分析设计中,为了对各种控制系统的性能进行统一的评价,通常选定几种外作用形式作为典型外作用,并相应提出统一的性能指标作为评价的标准。

典型外作用 作用于自动控制系统的外作用,其形式多种多样,既有确定性外作用,又有随机性外作用。对外作用,系统有不同的输出特性,一般称为响应特性。为了便于研究,通常选用几种确定性函数作为典型外作用。选择为典型外作用的标准是:

- (1) 在现场或实验室中,这种外作用容易产生;
- (2) 在典型外作用下,系统的性能应反映出系统在实际工作条件下的性能;
- (3) 这种典型外作用的数学表达式简单,便于理论计算。

目前,在工程设计中常用的典型外作用函数有阶跃函数、斜坡函数、脉冲函数以及正弦函数等,它们都是确定性函数。

阶跃函数 其数学表达式为

$$f(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ R & t \geq 0 \end{cases}$$

上式表示一个在 $t = 0$ 时出现的幅值为 R 的阶跃变化函数,如图 1-17 所示。在实际系统中,这意味着一个大小不变的作用,在 $t = 0$ 时突然加到系统上。

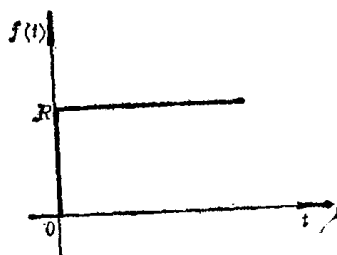


图1-17 阶跃函数

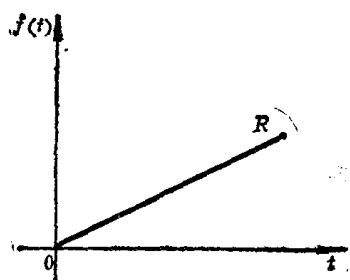


图1-18 斜坡函数

幅值 $R = 1$ 的阶跃函数,叫做单位阶跃函数,一般用 $1(t)$ 表示。于是,幅值为 R 的阶跃函数 $f(t)$ 也可写为 $f(t) = R 1(t)$ 。

$f(t - t_0)$ 表示在 $t = t_0$ 时刻出现的阶跃函数,即