



试飞员培训系列教材

中国飞行试验研究院组织编写
陈 怿◎总主编

自动控制原理

左军毅 张怡哲 蒋康博 编

航空工业出版社

试飞员培训系列教材



中国飞行试验研究院组织编写

陈 怿 总主编

自动控制原理

左军毅 张怡哲 蒋康博 编

航空工业出版社

北 京

内 容 提 要

本书比较全面、系统地介绍了自动控制理论的基本概念、基本原理以及控制系统的分析与校正方法。作为飞行员培训系列教材之一,本书能为后续飞行控制系统等课程的学习打下必要的基础。全书共分6章,分别介绍了自动控制系统的基本概念、线性系统的数学模型、控制系统分析与设计的时域法、根轨迹法、频域法,同时还包含现代控制理论中状态空间法的有关基本概念。

全书对相关知识的介绍比较全面,但适当降低了理论难度,对概念的讲解力争做到深入浅出,通俗易懂。本书可供厂所、部队等单位从事自动控制类的各专业工程技术人员参考,也可作为非自动化类专业学生的教学用书。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理/左军毅,张怡哲,蒋康博编. --北京:航空工业出版社,2018.3
试飞员培训系列教材
ISBN 978-7-5165-1486-3

I. ①自… II. ①左… ②张… ③蒋… III. ①自动控制理论—教材 IV. ①TP13

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第330973号

自动控制原理

Zidong Kongzhi Yuanli

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑2号院 100012)

发行部电话:010-84936597 010-84936343

三河市华骏印务包装有限公司印刷

全国各地新华书店经售

2018年3月第1版

2018年3月第1次印刷

开本:787×1092 1/16

印张:13.5

字数:308千字

定价:42.00元

《试飞员培训系列教材》总审委会

主 任：吴华强 王治渤
副 主 任：张智慧 张虹秋
成 员：袁 东 王建军 邓小宝 舒成辉 屈霁云 樊 力
朱 宇 郭 文 钟德均 魏荫璋 乔金堂

《试飞员培训系列教材》总编委会

主 任：陈 怿
常务副主任：郭平凡
副 主 任：邓友明 张景亭 赵 鹏 冯晓林
成 员（按姓氏笔画排序）：
于 琦 万方义 马明明 王生楠 左军毅 朱清华
张宏林 张怡哲 张胜利 张晓敏 陆 洋 陈仁良
周友明 侯玉宏 姜 健 袁昌盛 贾晓鹏 徐锦法
郭正旺 唐正飞 蒙泽海 霍培锋

《试飞员培训系列教材》编写办公室

主 任：秦超敏
副 主 任：张 建 邹建国 张德元 史晋蕾
成 员：高 健 秦启武 蒋康博 李新建 刘 旭 叶 忱
欧 杰 李金梅

前 言

随着工农业生产的发展和科学技术的进步,自动控制技术已经广泛应用于制造业、农业、交通运输业、国防军事领域以及社会生活的各个方面,并成为推动各领域技术革新的源动力之一。尤其是在航空领域,随着主动控制技术的提出以及飞行器系统自动化、智能化程度的日益提高,自动控制在飞行器系统中发挥的作用越来越重要,并成为支撑飞行器研制的关键技术。同其他领域的工程技术人员一样,飞行器设计工程师以及从事飞行试验的人员都需要掌握一定的自动控制基础知识。

自动控制原理是试飞员理论培训教学计划中规定的基础课程,本书正是为适应试飞员培训的特殊要求而编写的教材。学习本书的内容能为后续飞行控制系统等课程的学习打下必要的基础。

本书以经典控制理论为主,对自动控制理论的基本概念、基本原理以及控制系统的分析与校正方法做了较为系统的介绍。内容共分6章。第1章介绍了控制系统的一般性概念、控制系统的组成、发展历史以及对控制系统的基本要求等;第2章介绍了经典控制理论涉及的几种常用数学模型,包括建模的方法、建模的数学工具以及几种数学模型之间的转换等;第3~第5章分别介绍了经典控制理论的三种分析、设计方法,分别对应于时域法、复域法(根轨迹法)和频域法;最后一章

对现代控制理论中的一些重要概念做了简要的介绍,包括系统的状态空间模型、多变量线性系统的运动、系统的能控性和能观性、系统的稳定性分析等内容。每章结尾都配有少量典型习题(附答案),以方便读者对基本概念及原理的理解和掌握。

本书在内容安排上参考了卢京潮教授主编的《自动控制原理》(清华大学出版社,2013年)以及周雪琴和张洪才教授编写的《控制工程导论》(西北工业大学出版社,2009年)。这两本著作长期被选为西北工业大学的本科生教材,堪称经典。在此向几位教授表示感谢。

参加本书编写的人员还有本课题组的几位研究生,他们是仲于江、王宏伟两位博士生以及田敬、颜斌华、陈晓丹、邹航四位硕士生。研究生们工作态度非常认真,本书中大多数带坐标的曲线都是他们通过编写 MATLAB 代码生成的,精度比一般示意图高,这给本书增色不少。

本书的出版得到了中国飞行试验研究院试飞员学院叶忱、周建新等的帮助,以及航空工业出版社的大力支持,作者也向他们表示感谢。

由于编者水平有限,书中难免会存在一些不妥之处,恳请广大读者、同行批评指正。

目 录

第 1 章 自动控制系统概述	1
1.1 引言	1
1.2 自动控制和自动控制系统的基本概念	1
1.2.1 自动控制问题的提出	1
1.2.2 基本控制方式	3
1.3 闭环自动控制系统的基本组成	5
1.4 控制系统举例	6
1.5 自动控制系统的分类	8
1.6 自动控制理论的发展	10
1.7 对控制系统性能的基本要求	12
1.8 本课程的研究内容	13
本章小结	14
第 2 章 控制系统的数学模型	15
2.1 引言	15
2.2 控制系统的时域数学模型	15
2.3 拉普拉斯变换	18
2.3.1 拉普拉斯变换的定义	18
2.3.2 拉普拉斯变换的性质	21
2.3.3 利用部分分式展开法求拉氏反变换	22
2.4 控制系统的复域数学模型	25
2.4.1 传递函数的概念	25
2.4.2 典型环节	28
2.5 结构图等效变换和梅逊公式	30
2.5.1 结构图	30
2.5.2 结构图等效变换	32
2.5.3 梅逊公式	36
2.6 控制系统的传递函数	38
2.6.1 开环传递函数	38



2.6.2 闭环传递函数	38
本章小结	40
第3章 线性系统的时域分析与校正	44
3.1 时域法概述	44
3.2 一阶系统的时间响应及动态性能	45
3.2.1 一阶系统的数学模型	45
3.2.2 一阶系统的单位脉冲响应	46
3.2.3 一阶系统的单位阶跃响应	47
3.2.4 一阶系统的单位斜坡响应	48
3.2.5 线性系统的重要性质	48
3.3 二阶系统的时间响应及动态特性	48
3.3.1 二阶系统的数学模型	49
3.3.2 典型二阶系统的单位阶跃响应	50
3.3.3 二阶系统的单位脉冲响应和单位斜坡响应	57
3.3.4 改善二阶系统动态性能的措施	58
3.3.5 主导极点和高阶系统的降阶	61
3.4 线性系统的稳定性分析	62
3.4.1 稳定性的概念	63
3.4.2 系统稳定的充分必要条件	63
3.4.3 劳斯判据	64
3.5 线性系统的稳态误差分析	67
3.5.1 误差与稳态误差的定义	67
3.5.2 单位反馈系统的稳态误差	70
3.5.3 干扰信号作用下的稳态误差	73
3.6 线性系统的时域校正	75
3.6.1 反馈校正	75
3.6.2 复合校正	77
第4章 线性系统的根轨迹分析法	84
4.1 引言	84
4.2 根轨迹法的基本概念	84
4.2.1 根轨迹的定义	84
4.2.2 根轨迹与系统性能的关系	85

4.2.3 根轨迹方程	86
4.2 常规根轨迹的绘制法则	88
4.3 广义根轨迹	99
4.3.1 参数根轨迹	99
4.3.2 零度根轨迹	101
4.4 利用根轨迹分析系统性能	102
本章小结	106
第 5 章 线性系统的频域分析方法	109
5.1 频率特性的基本概念	109
5.1.1 频率特性的定义	109
5.1.2 频率特性的图形表示法	111
5.2 幅相频率特性	112
5.2.1 典型环节的幅相特性曲线	112
5.2.2 开环系统幅相特性曲线的绘制	117
5.3 对数频率特性	119
5.3.1 典型环节的对数频率特性曲线	119
5.3.2 开环对数频率特性曲线	123
5.3.3 由对数幅频特性曲线确定传递函数	125
5.4 频域稳定判据	126
5.4.1 奈奎斯特稳定判据	126
5.4.2 对数稳定判据	132
5.5 稳定裕度	134
5.6 利用开环对数频率特性分析系统的性能	136
5.6.1 开环频率特性指标与时域指标之间的关系	136
5.6.2 三频段理论	138
5.7 闭环频率特性和性能指标	140
5.8 线性系统频率法校正	141
5.8.1 串联 PID 校正	142
5.8.2 超前校正	145
5.8.3 滞后校正	149
5.8.4 滞后-超前校正	153
5.8.5 按希望特性校正	156
本章小结	159

第 6 章 现代控制理论概述	163
6.1 状态空间法的基本概念	163
6.2 线性定常系统状态空间表达式的建立	165
6.2.1 根据系统工作机理建立状态空间表达式	165
6.2.2 根据微分方程或传递函数建立状态空间表达式	167
6.2.3 由结构图建立状态空间表达式	168
6.3 由状态空间方程求传递函数阵	169
6.4 线性系统的运动	171
6.5 线性系统的能控性和能观性	174
6.5.1 能控性及其判据	175
6.5.2 能观性及其判据	176
6.6 极点配置	177
6.6.1 状态反馈与极点配置	177
6.6.2 输出反馈与极点配置	178
6.7 李雅普诺夫稳定性分析	179
6.7.1 李雅普诺夫关于稳定性的定义	180
6.7.2 李雅普诺夫第一法	182
6.7.3 李雅普诺夫第二法	183
6.8 最优控制问题	187
6.8.1 最优控制的基本概念	187
6.8.2 最优控制问题的类型	190
6.9 自适应控制的概念	191
6.9.1 自适应控制的定义	191
6.9.2 自适应控制的实现方式	192
本章小结	194
部分习题参考答案	197
参考文献	203

第 1 章 自动控制系统概述

1.1 引言

自动控制理论是研究自动控制系统的组成、进行系统分析和设计的一般性理论，也是研究自动控制过程共同规律的技术科学。学习和研究自动控制理论是为了探索自动控制系统中有关变量的运动规律，以及按照人们的期望改变这种运动规律的可能性与途径，为设计高性能的自动控制系统提供理论依据。

随着科技的进步，自动控制技术和自动控制理论已经广泛应用于工农业生产、国防军事以及社会生活的各个领域，并成为推动各领域技术革新的源动力之一。特别是近 30 年来，飞速发展的计算机技术像一个巨大的助推器，推动着自动控制技术正在以前所未有的速度向着更广阔、更深入的应用领域迈进，同时也使得自动控制技术所能完成的任务更加复杂，水平大大提高。以发射绕月飞船为例，要把重达数吨的飞船准确送入预先计算好的轨道，并一直保持它的姿态正确，要保持它的太阳能电池板面向太阳以获取能量，要保持它的无线电天线一直指向地球以传回数据，要保持它的探月传感器始终指向月球，要保持飞船内的温度、压力（压强）不变，要使它携带的大量科学仪器自动、正常地工作等都需要依赖高水平的自动控制技术来实现。

自动控制技术的应用不仅使生产过程实现自动化，提高了劳动生产率和产品质量，降低了生产成本，提高了经济效益，改善了劳动条件，而且在人类征服大自然、探索新能源、发展空间技术、认识微观世界等方面都具有十分重要的意义。对现代工程技术人员和科技工作者来说，掌握一定的自动控制理论知识是十分必要的。

1.2 自动控制和自动控制系统的基本概念

1.2.1 自动控制问题的提出

在生产和科学实践中，往往要求一台机器或者一套设备按照人们希望的规律运行，但由于种种原因，它们的实际工作状态一般不会自动地和人们希望的运行规律相一致，因此需要施加控制。例如，要想使运载火箭准确入轨，就必须准确控制飞行过程中火箭的姿态和轨迹；要想让 3D 打印机打印出高质量的零件，就必须控制其喷头按照预定规律移动；要想让机器人代替人去从事某些劳动，就必须控制其动作方式等。

控制可以通过人工方式实现（称为人工控制），也可以通过设计一套装置来自动完成。我们把在没有人直接参与的情况下，利用控制装置使被控对象（如机器、设备或生产过程）的一个或数个物理量（如电压、电流、速度、位置、温度、流量、化学成分等）自动

地按照预定的规律运行（或变化）的这一过程称为自动控制。把能够对被控对象的工作状态进行自动控制的系统称为自动控制系统。

图 1-1 是人工水位调节系统。控制的目的是使水箱水位始终保持在期望值上。该系统中，水箱是被控制的设备，水箱水位是被控制的物理量。当实际水位低于或高于期望值时，就需要对进水流速进行适当调节；当水位达到期望值且进水流速和出水流速相等时，水箱的水位就处于平衡状态。在人工控制方式下，操作者首先将期望的水位记忆在大脑中，再用眼睛观察实际水位，并将期望水位与实际水位在大脑中进行比较，通过一个简单的减法计算得到偏差；然后根据偏差的正负极性和大小做出决策，确定进水阀门的调节方向与开度，最后用手调节进水阀门，使水位尽量与期望水位一致。只要水位偏离了期望值，操作者就要重复上述调节过程。

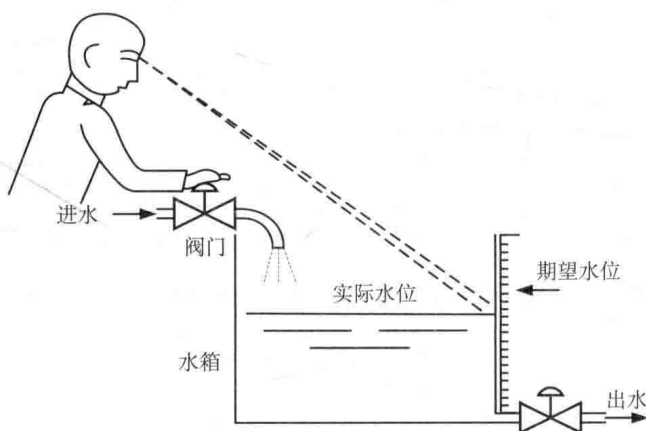


图 1-1 水位的人工控制过程

在扰动变化较慢的场合，采用人工控制是能够完成任务的。但对扰动变化较快的系统，人可能跟不上扰动的变化而达不到控制的目的。另外，在一些特殊场合，例如，在高温、真空、原子反应堆、深太空环境中进行控制，人就不宜直接参与了。而且在某些场合，即使人工控制能够满足要求，但工作十分繁重和枯燥，工作条件极差。为了改善劳动条件，提高生产效率和产品质量，有必要利用自动控制装置去代替人进行控制。

图 1-2 是实现水箱水位自动控制的一种方案。图中的浮子相当于人的眼睛，对实际水位进行测量；连杆和电位器相当于人的大脑，将实际水位与期望水位进行比较，给出偏差的大小和极性；电动机和减速器相当于人的手，调节阀门开度，对水位实施控制。在正常情况下，实际水位等于期望值，电位器的滑臂处于零电势处， $u_e = 0$ 。当水位低于期望值时，浮子下降，带动电位器滑臂向上移动，输出电压 $u_e > 0$ ，经放大器放大后成为 u_0 ，使直流电动机正向旋转，以增大进水阀门开度，从而使水位回升。当水位高于期望值时，执行相反的调节过程，直到水位回归期望值。由此可见，无论何种干扰引起水位出现偏差，该系统都能自动进行调节，最终使实际水位等于期望值。

比较后不难看出，自动控制和人工控制的共同特点是：都需要对输出量进行测量，并

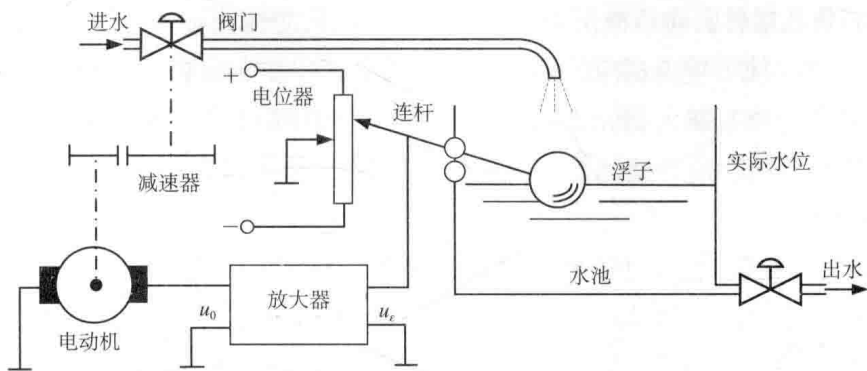


图 1-2 一种水位自动控制系统原理图

将其反馈到输入端和期望值进行比较以得到偏差；都需要用偏差去修正系统的输出，从而达到减小或消除偏差的目的。这种“测量偏差并用以纠正偏差”的原理是反馈控制的基本原理，利用反馈控制原理组成的系统称为反馈控制系统。

1.2.2 基本控制方式

基本控制方式主要有三种，即开环控制系统、闭环控制系统和复合控制系统。对于某一具体系统，采取何种控制方式，应根据具体的用途和控制目标而定。

(1) 开环控制

系统中，信号从输入端到输出端的传递是单向的，没有形成封闭回环的控制方式称为开环控制。在开环控制中，不存在从输出端到输入端的反馈通道，因而输出量不会对输入量产生影响。

图 1-3 所示的是直流电动机转速开环控制系统。图 1-3(a) 中，直流电动机是被控对象，电动机的转速 ω 是被控量，电压 u_r 是参考输入，电动机负载转矩 M_a 为干扰。系统的任务是控制它励式直流电动机以恒定的速度带动负载运行。实现原理是通过调节电位器来获得系统参考输入(给定量) u_r ，经过放大环节变换后得到电动机的电枢电压 u_a ，使直

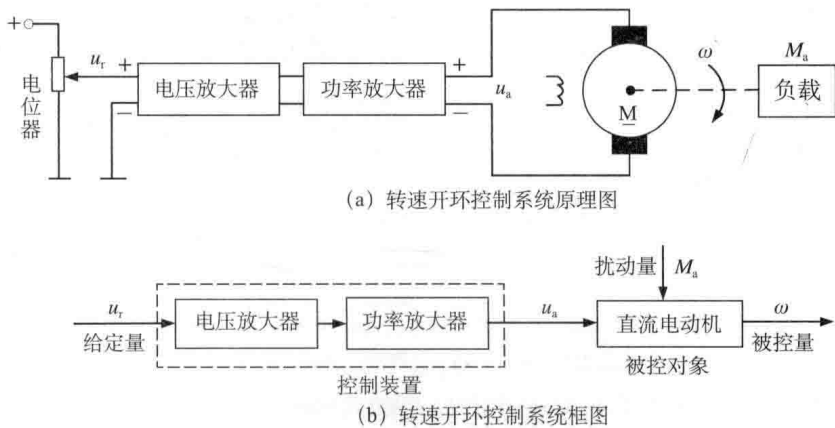


图 1-3 直流电动机转速开环控制系统

流电动机带动负载运转。在负载恒定的条件下,电动机的转速 ω 与电压 u_r 成正比。显然,只要改变输入量 u_r 便可获得相应的转速 ω 。系统中只存在输入量 u_r 对输出量 ω 的单向控制作用,而输出量 ω 对输入量 u_r 却没有任何影响,即控制装置与被控对象之间只有顺向控制作用而没有反向联系,因此该系统属于开环控制系统。图1-3(b)是直流电动机转速开环控制系统的框图。

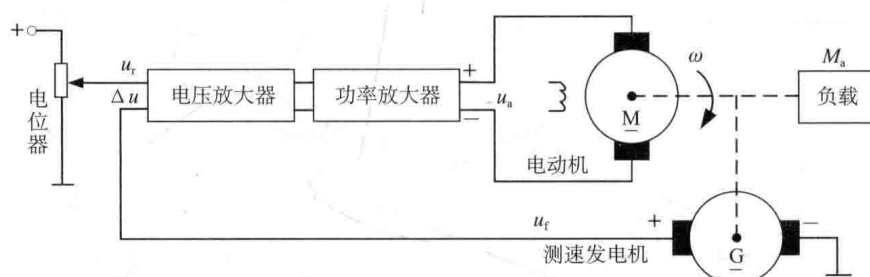
开环控制方式比较简单,控制作用直接由系统的给定值产生。系统对于可能的干扰及工作过程中特性参数的变化都没有自动补偿作用,因而控制的精度完全取决于元件及校准的精度。由于开环控制系统结构简单,在精度要求不高或扰动影响较小的场合应用较多。一些自动化的流水线、数控车床、自动售货机、按程序打浆的豆浆机、编程洗涤的洗衣机等多为开环控制系统。

(2) 闭环控制

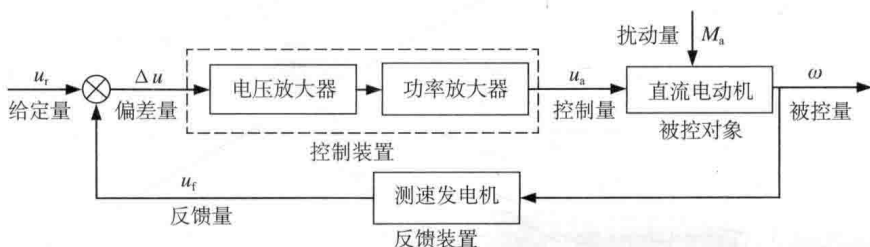
闭环控制是按照反馈控制原理实现的,控制器和控制对象之间既有顺向作用又有反向联系。

图1-4是一种直流电动机转速闭环控制系统。图1-4(a)中,测速发电机是一种传感器,负责将电动机的实际转速 ω 转换为与之成比例的电压 u_f ,再反馈到系统的输入端,与参考电压 u_r 进行比较,得到 $\Delta u = u_r - u_f$ 。由于 Δu 能间接地反映出误差的大小和极性,通常称为偏差。偏差 Δu 经放大器放大后成为控制电压 u_a ,用于控制电动机的转速 ω 。图1-4(b)是直流电动机转速闭环控制系统框图。在闭环控制系统中,把从系统输入量到输出量之间的通道称为前向通路,从输出量到反馈信号之间的通道称为反馈回路。

闭环控制的优点是能够自动修正被控量出现的偏离,可以抑制并消除元件参数变化以



(a) 转速闭环控制系统原理图



(b) 转速闭环控制系统框图

图 1-4 直流电动机转速闭环控制系统

及外界扰动引起的偏差,控制精度高;缺点是被控量可能出现振荡甚至发散等。

应当指出,闭环控制系统有正反馈和负反馈之分。若系统参考输入与反馈信号相减,则称为负反馈;若参考输入与反馈信号相加,则称为正反馈。一般的闭环控制系统都采用负反馈形式,闭环控制尤其是负反馈控制是本书讨论的重点。

(3) 复合控制

复合控制是将开环控制和闭环控制结合起来的一种控制方式,是在闭环控制方式的基础上,增加一个输入信号(可以是参考量或者干扰量)的前馈通路,对该信号实施补偿以达到精确控制的目的。复合控制分为按输入补偿的复合控制和按扰动补偿的复合控制两种,前者主要起到提高系统跟踪输入信号能力的作用;后者主要起到抑制扰动响应的作用,使系统输出尽量和作用在系统上的扰动无关。

1.3 闭环自动控制系统的基本组成

图 1-5 是一个典型负反馈控制系统的结构框图。图中的每一个方框,代表一个具有特定功能的元件。除被控对象外,控制装置通常是由测量元件、比较元件、放大元件、执行机构、校正元件以及给定元件组成的,这些功能元件各司其职,共同完成控制任务。

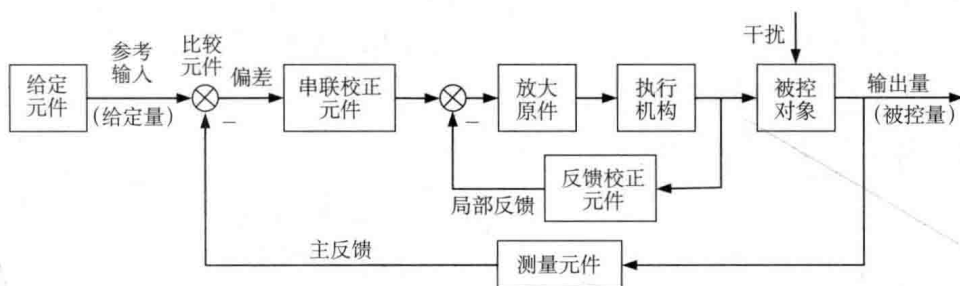


图 1-5 典型负反馈控制系统的结构框图

被控对象：要求被控制的设备或者生产过程。

给定元件：产生系统控制指令的装置，作用是生成与期望的输出量相对应的系统输入量。

测量元件：一般指传感器，其作用是测量被控量并将其转换成便于和参考输入量进行比较的形式。一般来讲，电压信号便于比较和运算，因此控制系统中的大多数测量元件都是将感兴趣的物理量转换成电压，如飞机上的加速度计等。

比较元件：其功能是将测量到的被控量的实际值与给定装置提供的参考值进行比较，求出它们之间的偏差。

放大元件：比较元件提供的偏差信号通常很微弱，必须用放大元件进行放大，以便于驱动执行机构去控制被控对象。例如，功率放大器、电液伺服阀等在某些系统中可作为放大元件。

执行机构：其功能是直接对被控对象产生控制作用，使被控量按照预定规律变化。

校正元件：作用是改善或提高系统的性能，常以串联或者反馈的方式连接在系统中。

干扰：是指妨碍控制量对被控量按要求进行正常控制的所有因素，或称为扰动。干扰可能来自系统内部，也可能来自系统外部，前者称为内部干扰，后者称为外部干扰。

输出量：又称为被控量，是指存在于被控对象或系统输出端，表征被控对象工作状态且被要求按照预定规律变化的物理量。

参考输入：又称为给定量，是指加在系统输入端的指令信号。

1.4 控制系统举例

例 1.1 发电机电压调节系统

图 1-6 给出了一个发电机电压调节系统。在该系统中，被控对象是发电机，被控量是发电机输出电压，参考输入是给定电位器设定的电压，干扰信号是负载的变化。控制系统的设计要求是：不论负载如何变化，系统都能通过自动调整发电机的激磁电压 u_2 来控制发电机的输出电压，使其和参考输入取得一致。

若系统处于平衡状态，即输出量 u 等于参考值 u_r ，则偏差 Δu 等于 0，电动机不转动。当负载增大时，由于负载效应，发电机的输出电压 u 下降，系统的平衡状态被破坏，输出值偏离期望值，使 $\Delta u = u_r - u > 0$ ，该偏差经过放大后得到 u_1 ，该电压驱动电动机转动，通过改变电位器滑臂位置增加激磁电压 u_2 ，使发电机输出电压回到参考值 $u = u_r$ ，电机停止转动，系统重新回归平衡。该系统的原理框图如图 1-7 所示。

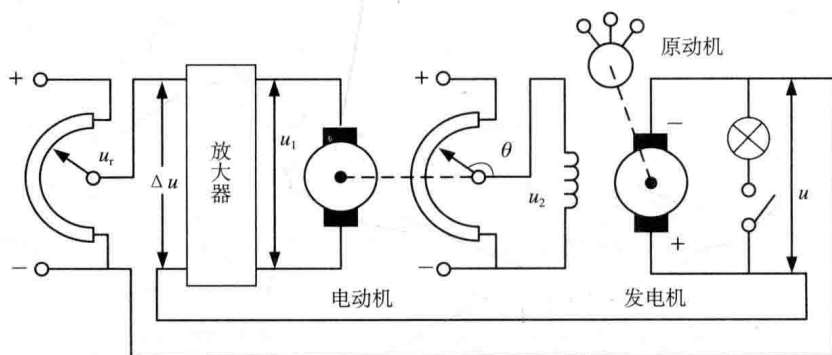


图 1-6 电压调节系统原理图

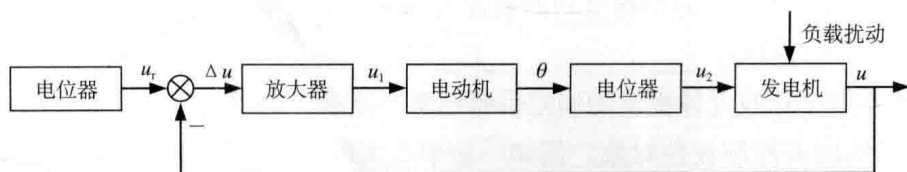


图 1-7 电压调节系统框图

例 1.2 函数记录仪

函数记录仪是一种通用的自动记录设备，它可以在纸介质上自动绘制出电压随时间的变化曲线，其原理如图 1-8 所示。系统的参考输入是待记录的电压，被控对象是记录笔，笔的位移是被控量。

图 1-8 中两个电位器组成桥式电路，记录笔固定在电位器 R_M 的滑臂上可随滑臂左右移动，电位器 R_0 的滑臂固定不动，因此桥式电路的输出电压和记录笔的位移成正比。当输入电压 $u_r = 0$ 时，记录笔位于中间位置，此时偏差电压 Δu 等于 0，系统处于平衡状态。当 u_r 缓慢变化时，桥式电路的输出电压和 u_r 不相等，此时作用在放大器输入端的偏差电压 Δu 经过放大后驱动电动机转动，并通过齿轮减速器和绳轮机构带动记录笔移动，记录笔的移动力图使偏差电压 Δu 趋于 0。当 $\Delta u = 0$ 时，电机停止转动，记录笔停止移动。如果参考输入电压连续变化，则记录笔将绘制出电压变化曲线。函数记录仪的框图如图 1-9 所示。

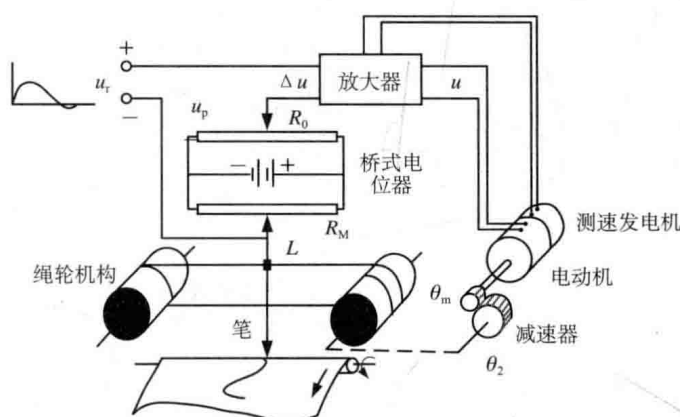


图 1-8 函数记录仪原理图

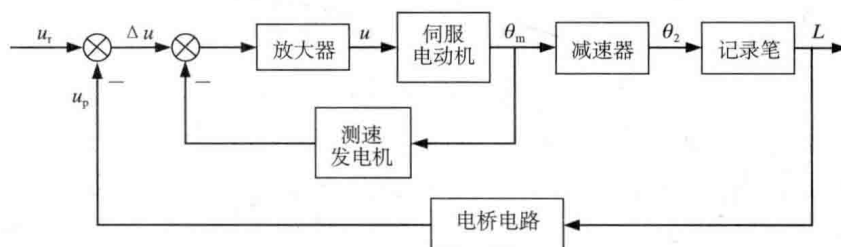


图 1-9 函数记录仪框图

例 1.3 飞机俯仰姿态控制系统

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化装置。它可以稳定飞行姿态、高度和航迹，可以操纵飞机爬升、下滑和转弯。和飞行员操纵飞机一样，自动驾驶仪控制飞机也是通过控制飞机操纵面(如升降舵、方向舵、副翼)的偏转，形成绕飞机重心的力矩，从而改变飞机的飞行姿态和轨迹。下面以比例式自动驾驶仪稳定飞机俯仰角为例对其原理进行介绍。