



高等学校精品规划教材

自动控制原理

吴秀华 等 主编

ZIDONG KONGZHI YUANLI



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

高等学校精品规划教材

自动控制原理

主 编	吴秀华	杨兵力	刘振宇	张兴福	
副主编	刘美菊	邹秋滢	石敏惠	孙晓杰	王 俊
参 编	杨 萍	潘 飞	许占文		
主 审	付立思				



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 简 介

本书是《高等学校精品规划教材》之一。本书共分8章。主要介绍自动控制系统的基本概念；线性控制系统在时域和复频域中的数学模型及其动态结构图的建立和化简；阐述线性控制系统的时域分析法、根轨迹分析法、复频域分析法以及校正和设计的基本方法；介绍非线性控制系统中常见的非线性特性对系统性能的影响和常用的相平面、描述函数分析方法。另外针对目前工程计算和实践应用的需要，增加了 MATLAB 软件在控制系统中应用的一些初步内容，以利于相关教学的需要。

本书可作为非控制类的工科或农科高等院校相关专业基础课教材，也可供从事相关专业的技术人员阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

自动控制原理/吴秀华等主编. —北京：中国水利水电出版社，2006

高等学校精品规划教材

ISBN 7-5084-3552-4

I. 自... II. 吴... III. 自动控制理论—高等学校—教材 IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 009701 号

书 名	高等学校精品规划教材 自动控制原理
作 者	吴秀华 等 主编
出版 发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www. waterpub. com. cn E-mail: sales @ waterpub. com. cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16 开本 17.25 印张 409 千字
版 次	2006 年 2 月第 1 版 2006 年 2 月第 1 次印刷
印 数	0001—4000 册
定 价	26.00 元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

在今天的社会生活中,自动化技术和设备无所不在,为人类文明进步做出了重要贡献,同时自动控制理论也得到了空前发展,已经形成完善而深厚的理论体系。

目前,在一些非控制类工科高等院校,或者一些农业高等院校中,出于课程体系和实际生产实践的需要,相继开设了自动控制原理课程,且逐渐成为专业基础课,为适应这些院校的教学要求和教学需要,特编写此书。本书是《高等学校精品规划教材》之一。

本书根据非控制类工科和农科的相关专业对本理论体系的要求,把重点放在基本概念和基本原理的讲述和理解应用上,尽量做到深入浅出。通过阅读本书,使学生能够正确理解有关控制理论的基本概念,掌握分析自动控制系统性能的基本方法,并初步具备设计较简单的自动控制系统的的能力。本书共分8章:第1章为自动控制系统概述;第2章为控制系统的数学模型,主要针对控制系统的微分方程和传递函数作较详细的阐述,使学生在理解基本概念的基础上能够熟练掌握这两种控制系统数学模型的建立以及转换过程;第3章为控制系统的时域分析,鉴于多数院校在此课程的前续课中均开设了电路理论或信号与系统的课程,相关内容在本章中不再重复太多,主要讨论了低阶系统阶跃响应的动静态性能指标,重点叙述了控制系统稳定性的判断方法和稳态误差的计算;第4章为根轨迹法,讲述系统分析方法中的根轨迹法的概念和根轨迹图的绘制原则,以及运用根轨迹法分析系统性能的过程和方法;第5章为频率分析法,重点叙述了频率特性的定义,各典型环节频率特性以及开、闭环控制系统的频率特性,阐述应用频率特性对控制系统进行分析的方法;第6章为控制系统的设计和校正,把频率法校正作为基本内容,叙述了串联校正、反馈校正、复合校正的基本概念和方法;第7章为非线性系统分析,介绍了非线性的基本种类和目前对非线性系统进行分析的基本方法,描述函数法和相平面法,并对非线性控制器及其应用作了论述;第8章针对目前工程计算的常用软件 MATLAB 在控制系统分析和仿真中的应用作了简要介绍,以利于教学的需要和学生的自学。

此书按70学时左右编写。不同院校可根据需要舍弃某些章节的讲授,如若40~50学时左右可讲授前6章主要内容。全书可配备7~8个实验,根据具体实验条件而定。

参加本书编写的单位有:沈阳农业大学、西北农林科技大学、山西农业大学、沈阳建筑大学等。

本书的编写人员有:吴秀华、杨兵力、刘振宇、张兴福、刘美菊、邹秋滢、石敏惠、孙晓杰、王俊、杨萍、潘飞、许占文。全书由付立思教授任主审。

由于作者水平有限,书中错误或不妥之处在所难免,敬请广大读者不吝指正。

作 者

2006年1月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
§ 1-1 引言	1
§ 1-2 自动控制	4
§ 1-3 反馈控制原理	8
§ 1-4 自动控制系统的组成	10
§ 1-5 自动控制系统的类型	11
§ 1-6 自动控制系统的分析设计方法	14
小结	15
习题	15
第 2 章 自动控制系统的数学模型	19
§ 2-1 控制系统微分方程的建立	19
§ 2-2 非线性微分方程的线性化	25
§ 2-3 拉普拉斯变换及其应用	29
§ 2-4 传递函数	40
§ 2-5 动态结构图	49
小结	60
习题	61
第 3 章 控制系统时域分析	65
§ 3-1 典型输入函数和时域性能指标	65
§ 3-2 一阶系统的时域分析	68
§ 3-3 二阶系统及高阶系统的时域分析	69
§ 3-4 控制系统的稳定性分析	75
§ 3-5 控制系统的稳态误差分析	83
小结	93
习题	94
第 4 章 根轨迹法	97
§ 4-1 根轨迹法的基本概念	97
§ 4-2 根轨迹的基本绘制法则	100
§ 4-3 广义根轨迹	114

§ 4-4 根轨迹分析法	120
小结	123
习题	124
第 5 章 频域分析法	127
§ 5-1 频率特性	127
§ 5-2 典型环节的频率特性	132
§ 5-3 控制系统的开环频率特性	141
§ 5-4 频域稳定判据	148
§ 5-5 控制系统的频域性能分析	159
小结	164
习题	164
第 6 章 自动控制系统的设计与校正	168
§ 6-1 控制系统的设计步骤和性能指标	168
§ 6-2 基本控制规律	172
§ 6-3 常用串联校正网络	176
§ 6-4 常用的串联校正方法	186
§ 6-5 反馈校正	194
§ 6-6 复合校正	197
小结	200
习题	200
第 7 章 非线性控制系统分析	204
§ 7-1 控制系统的非线性特性	204
§ 7-2 相平面分析法	207
§ 7-3 描述函数法	220
§ 7-4 非线性控制器及其应用	227
小结	240
习题	240
第 8 章 MATLAB 语言与自动控制系统设计	243
§ 8-1 MATLAB 语言简介	243
§ 8-2 经典控制系统分析的常用命令及 SIMULINK 仿真软件简介	249
小结	259
习题答案	260
参考文献	266

第 1 章 绪 论

自动控制在现代工业、农业、国防和科学技术方面起着十分重要的作用，应用自动控制能使空间技术、现代武器和自动驾驶等方面得以飞速的发展，使机器设备和管理机构高速高效地运行；生产过程的自动化能提高产品的质量，增加产品的数量，改善劳动条件。

自动控制属于高新技术学科，自动控制系统遍及各类工程领域，“系统”的概念已渗透到社会生活的各个方面。“自动控制原理”是自动控制学科有关专业的核心课程，它是讨论各类自动控制系统共性问题的一门技术科学。学习并掌握好自动控制技术，对于加快我国现代化的建设有着十分重要的意义。本书以工程系统为背景，介绍自动控制的基本原理以及控制系统的数学描述、分析与综合的基本理论和方法。

本章从工程实例出发，介绍自动控制的基本概念、基本方式和自动控制系统的分类与基本要求，重点是自动控制系统的基本组成原理，核心是反馈控制原理。同时回顾了控制理论学科的发展历程。

§ 1-1 引 言

在生产力发展的过程中，人类总是不断地认识世界和改造世界，不断地提高劳动生产率。经过一个漫长的历史时期，逐步地用机器代替人工劳动实现了机械化和自动化，开辟了人类对生产活动有意识控制的新纪元。自动控制是科学技术发展到一定阶段的产物，是社会进步的一个象征。它是一门介于多个学科之间综合性的高新技术学科，并渗透到各类工程领域和现代社会生活的各个方面，在信息科学中占有重要的地位。

自动控制作为一种重要的技术手段，能解决哪类性质的工程问题？能承担什么样的技术任务呢？

任何技术设备、机器和生产过程都必须按照预定的要求运行。例如，要想使发电机正常供电，就必须保持其输出电压恒定，尽量不受负荷变化和原动机转速波动的影响；要想使数控机床加工出高精度的零件，就必须保证其刀架的位置准确地跟随指令进给；要想使热处理烘炉提供合格的产品，就必须严格的控制炉温等。其中发电机、机床、烘炉就是工作的机器设备；电压、刀架位置、炉温是表征这些机器设备工作状态的物理参量；而额定电压、进给的指令、规定的炉温，就是对物理参量在运行过程中的要求。

通常，在自动控制技术中，把这些工作的机器设备称为被控对象，把表征这些机器设备工作状态的物理参量称为被控量，而对这些物理参量的要求值称为给定值或希望值（或参考输入），则控制的任务可概括为：使被控对象的被控量等于给定值。

自动控制就是在没有人直接参与下，利用控制装置操纵被控对象，使被控量按照预定的规律变化的过程。例如：

(1) 往复式轧钢机的控制。它是通过轧辊频繁地正反向转动来完成对钢材正反向轧制

任务的。需要控制的设备为轧钢机的轧辊，它就是该系统的受控对象，而控制装置为轧钢机的主传动控制装置。根据生产工艺过程要求，主传动电动机必须频繁地正反转，即快速地起动并调整到所要求的转速，进行正向轧制；然后快速制动和反向起动并调整到所要求的转速，进行反向轧制；再快速制动和反方向起动，如此循环，反复轧制至钢材的尺寸满足一定要求为止。如果不用自动控制而改用人工操作，除了极大地加重工人的劳动强度外，还由于生产节奏无法加快，不可避免地将造成钢材或轧辊的等待现象。一个轧制往复过程若空等待 1s，一台轧钢机一年就要少轧几万吨钢。

(2) 工业加热炉的控制（以热处理炉为例）。生产工艺过程要求控制炉温为设定值（例如 400℃），并且在各种扰动（如电源电压波动、热负荷变化等）作用下只允许很小的偏差（例如 0.5℃）。这时受控对象为热处理炉，被控量为炉温。如果不用自动控制而由人工操作，控制精度很难保证，产品质量也将受到影响。

(3) 雷达高射炮的控制。其目的是打击来犯的敌机，因此必须使雷达天线随时跟踪飞机的运动并测出敌机的方位和仰角，将这些数据经过计算机加工运算和处理后发出指令，控制高射炮的炮身转动系统和射击装置，使高射炮随时瞄准敌机并给予毁灭性地打击。瞄准的精度要求很高，其角度误差只能以分计。特别是现代的军用飞机速度很快，高射炮的炮身又很重，如果不用自动控制而用人工操作，根本就无法满足现代战争的需要。

(4) 空间飞行器飞行姿态的控制。空间飞行器是火箭、导弹和人造地球卫星的通称。它们的飞行控制系统是相类似的，现以人造地球卫星为例。通常将人造地球卫星视为刚体，因此对它的控制包括两部分：控制人造地球卫星质心运动的轨道控制和控制人造地球卫星飞行姿态的姿态控制。对于大多数人造地球卫星而言，卫星的运行轨道是由运载火箭的制导系统来保证的，因而在卫星上只有姿态控制系统。所谓卫星的姿态控制就是对卫星绕质心的运动进行控制，以确保其飞行所要求的姿态。例如：卫星上主要能源是太阳能电池，为了保证它能正常地工作，必须保持卫星相对于太阳的姿态；通信卫星是电话和广播电视的中继站，它的窄波束天线的波束必须以一定的对地精度指向地球上预定的目标区域。可见人造地球卫星的姿态控制是以高水平的自动控制技术为前提的。尖端技术更需要高品质的自动控制，自动控制系统已成为空间飞行器的重要组成部分。

要使受控对象的被控量变化并不难，难的是使它按预定的规律变化，面临的主要问题有下列两个方面：

(1) 受控系统的特性难合人意。“系统”的概念已渗透到现代社会的各个领域，其含义也是非常广泛的。凡是由若干部件相互作用而构成的并具有特定功能的整体，都可叫做系统。控制系统就是由受控对象和控制装置按照一定方式连接而成的有机整体。而且系统的概念具有相对性：系统的每一组成部分均可视为一个系统，为了和整体的系统相区别通常称之为子系统，一个系统又可以是更大系统的子系统。例如受控对象本身可视为一个系统，在控制系统中它又是一个子系统，称为受控子系统简称受控系统。

系统一般可分为静态系统和动态系统两大类。从物理的角度看，它们的本质区别在于是否含有储能（或储存信息）的元器件。静态系统不含有储能元件，因而描述静态系统各变量之间的关系只需用代数方程，如纯电阻网络和理想的比例运算放大器就属于这类系统。而含有储能（或储存信息）的元器件的系统则称为动态系统，又叫做动力学系统。实

际的控制系统均属于动态系统，而静态系统只是实际系统的一种理想化结果。动态系统的特点是：由于其存在储能（或储存信息）的元器件，如质量、弹簧、转动惯量、电感、电容、存储器或寄存器等，因而描述系统各变量之间的关系必须用微分（或差分）方程；系统的运动呈现惯性的特点，在外界输入信号作用下系统的响应不可能立即完成而需要有个过程（称为过渡过程），而过渡过程的特性取决于系统的结构和各元器件的特性。由于受产品结构、材料、生产工艺条件等限制，通常受控系统的元器件的特性难合人意，若不采取措施加以校正，则系统的被控量就难以甚至无法按照预定的规律变化。

(2) 存在各种扰动阻碍系统的被控量按照预定的规律变化。作用于系统的输入信号可分为两大类：一类是有用的输入信号，它决定系统被控量的变化规律，通常称其为参考输入信号；另一类为扰动（或干扰）信号，简称扰动，它们将阻碍系统被控量按照预定的规律变化，因此扰动是一类有害的信号。系统的扰动包含两部分：由系统外部因素造成的扰动（例如电源电压的波动、电动机负载和环境温度的变化、飞行中气流的冲击等）叫做外部扰动，简称外扰；由系统内部因素造成的扰动（例如所使用元器件的老化、磨损和特性的变化等）叫做内部扰动，简称内扰。在实际系统中扰动总是不可避免的，而且其变化规律往往是难以预计的，甚至扰动的形式也是未知的。

此外，系统又涉及各类工程技术领域，遍布现代社会生活的各个方面，它们的物理属性又各不相同，例如有工业控制系统、军事系统、经济系统、生物系统、社会系统……。工业控制系统又包括电气系统、机械系统、液压系统、气动系统、电气传动系统、过程控制系统等。

因此，自动控制理论学科以及本课程具有下列两个特点：

(1) 自动控制理论研究的是自动控制系统运动的一般规律和分析、设计的基本方法。研究的对象是各类控制系统；研究的问题是如何根据被控对象和环境的特性，通过对系统运动信息的采集、加工和处理，形成适当的控制作用，使系统在各种扰动因素作用下能够正常地工作并具有预定的功能；研究的基本方法是对各类物理属性迥异的控制系统加以抽象与概括，抓住其本质特征和影响系统特性的主要因素，略去次要因素，用数学方程或表达式对系统加以描述（该数学方程或表达式称为系统的数学模型），并总结出分析与设计自动控制系统的基本理论和方法，以指导工程实践。

控制系统的设计是一项较复杂的工作，要考虑多方面的因素。既要考虑技术要求，又要考虑该系统的社会意义、经济性、可靠性和使用维护的方便性等方面的要求。这里只限于讨论设计的技术性部分，即用数学方法寻找一个能满足技术要求的控制系统，通常把这项工作叫做系统的综合。书中所说的系统设计，严格地说是指系统的综合，但在习惯上，往往将设计与综合视为同义词而不加以区分。

因此本课程的特点是从“共性”角度讨论自动控制系统运动的一般规律和普遍适用于各类系统的分析与设计的基本方法。这对于未接触过具体系统的读者来说会感到抽象，建议学习时应与具体的控制系统以及例题和习题结合起来，以便通过“个性”来理解和掌握“共性”，并以“共性”为指导来加深对“个性”的了解。

(2) 自动控制理论讨论的中心问题是控制系统的性能。自动控制理论讨论的内容，可简单地概括为关于自动控制系统的基本组成原理以及控制系统的数学描述、分析和设计的

基本方法，而核心在于后者。因此从本质上说，本课程是一门方法论的技术基础课。讨论的重点是分析与设计自动控制系统的基本理论和基本方法。讨论的出发点和归宿点始终围绕自动控制的功能（使系统的被控量按照预定的规律变化）。而系统所具有的自动控制功能的优劣程度可用控制系统的性能来描述，它包括定性性能和定量性能两个部分。因此本课程讨论的中心问题是控制系统的性能。也就是说：在系统分析时，系统已经确定，讨论的中心问题是系统的结构和参数与系统性能的关系，以及改善和提高系统性能的途径；在系统设计时，从对系统性能的要求出发，讨论的中心问题是如何确定合适的系统结构与参数（或控制算法），使系统在技术经济指标综合评价的意义下较好地满足对系统性能的要求。

§ 1-2 自 动 控 制

1. 人工控制与自动控制

(1) 人工控制 (Manual Control)。就是在人直接参与的情况下，利用控制装置对机器设备或生产过程进行控制，使其输出量按特定规律变化，并达到预期状态或性能要求的过程。

例如，金工实习时，利用普通车床对零件的车、钻等加工，每一个环节都有人的直接参与，最后才能达到加工要求。

(2) 自动控制 (Automatic Control)。就是在没有人直接参与的情况下，利用控制装置对机器设备或生产过程进行控制，使其输出量按特定规律变化，并达到预期的状态或性能要求的过程。

例如，利用数控机床或数控加工中心加工零件时，只要设定加工顺序，选择加工刀具，设置加工时间，然后就可自动完成加工过程。实际中，对温度、压力、流量、浓度以及运动过程中的位移、速度、加速度等都可实现自动控制。

2. 自动控制的种类

(1) 反馈控制 (Feedback Control)。将控制系统的输出量通过某种方式反馈到系统的输入端，与输入量进行比较，然后作用于控制器，从而控制被控对象，使输出量按特定规律进行变化的控制。它是自动控制的基本形式。

(2) 极值控制 (Extremum Control)。使控制系统的输出量按某种控制规律达到极值状态的控制。

(3) 伺服控制 (Servocontrol)。又称为随动控制或跟踪控制。它是使控制系统的输出量以一定精度快速跟踪输入量变化的控制。

例如，火炮控制、导弹的制导、宇宙飞船的发射和空间运行、雷达跟踪、飞机的自动驾驶等。多以机械位移、速度、加速度（或旋转角位移、角速度、角加速度）为输入量、输出量。

(4) 过程控制 (Process Control)。使生产过程中的过程参数（具有较大滞后性）温度、压力、流量、物位、成分、浓度等按照某种特定规律而变化的控制。

(5) 变频控制 (Frequency Conversion Control)。以变频电动机或交流电动机加上变

变频器作为系统的驱动机构，使控制系统的输出量按照频率变化适应电网电压变化，从而达到更高精度的控制。

例如，变频恒压供水、变频节水灌溉、变频空调、变频洗衣机、变频冰箱、变频电视，其核心技术是变频调速技术，目的是为了节能、节约资源。

(6) 模糊控制 (Fuzzy Logical Control)。把控制系统中的具有模糊变化规律的被控量按照精确规律来变化的控制。

(7) 最优控制 (Optimization Control)。使控制系统的综合性能指标达到最优化的控制。

(8) 智能控制 (Intelligent Control)。使控制系统的整个工作过程具有人的某些智能的控制。

(9) 鲁棒控制 (Robust Control)。它是一种开关控制。即只需合上电源开关，整个控制系统克服参数变化，按照软、硬件结合后的控制规律进行工作的控制。

(10) 随机控制 (Stochastic Control)。控制系统的输出量按照随机规律而变化的控制。

(11) 自适应控制 (Self-reacting Control)。控制系统能够改变其自身参数甚至结构，使其在对象特性或环境条件大幅度变化时仍具有良好性能的控制。

(12) 自学习控制 (Auto-learning Control)。控制系统的输出量具有自动学习能力的控制。

(13) 神经网络控制 (Nerve Network Control/NN Control)。把控制系统按信息处理网络结构分成若干个神经元而进行的控制。

3. 自动控制技术的研究内容

(1) 自动控制理论 (Automatic Control Theory)。可以分为经典控制理论、现代控制理论以及大系统理论和智能控制理论。

1) 经典控制理论 (Classical Control Theory)。它是以传递函数为基础，研究单输入、单输出控制系统 (SISO 系统) 的分析和设计问题的控制理论。它包括：

线性控制理论：数学模型、时域分析、频域分析、根轨迹分析、综合校正等。

非线性控制理论：典型非线性特性、相平面分析法、描述函数法等。

采样控制理论：Z 变换、脉冲传递函数、稳定性分析、动态特性分析等。

2) 现代控制理论 (Modern Control Theory)。它是应用状态空间分析法来分析多输入、多输出控制系统 (MIMO 系统) 的稳定性及性能指标的理论。

它包括线性控制理论、非线性控制理论、最优控制理论、随机控制理论、自适应控制理论、自学习控制理论等。

它的内容包括：系统运动状态的描述、系统的可控性和可观性、系统的稳定性分析、最优控制、系统辨识、系统的自适应控制及机器人、自学习系统等。

3) 大系统理论和智能控制理论 (Big System Theory & Intelligent Control Theory)。它是研究集中——分散系统 (又称分散系统，DCS——Distributed Control System) 和人工智能系统的理论。

(2) 自动控制系统的的设计。它包括：

- 1) 电力拖动系统。电力拖动基础、电力电子技术。
- 2) 电气控制系统。电气控制技术。
- 3) 过程控制系统。过程控制技术、自动化仪表。
- 4) 计算机控制系统。单片机原理及接口技术、计算机控制技术。

(3) 自动控制系统的仿真。

(4) 自动控制系统的现场调试。

(5) 自动控制系统的可靠运行。

4. 自动控制的信号形式

模拟信号 (Analog signals) —— 模拟控制系统。

数字信号 (Digital signals) —— 数字控制系统。

模拟数字信号 (Analog—digital signals) —— 采样控制系统。

5. 自动控制技术的应用

自动控制技术广泛应用于工业、农业、国防和科学技术等领域以及社会生活的各个方面。

(1) 军事工业。雷达高射炮系统、中远程导弹系统、美国的国家导弹防御体系等。

(2) 航空航天工业。飞机的雷达指挥系统、卫星、火箭、宇宙飞船、空间站等。

(3) 制造业。数控机床、数控加工中心、工业调节器、自动化仪表、智能机器人、轧钢机的开关控制系统、纺织工业中的成分自动检测与成分含量的自动控制、食品生产中的质量控制等。

(4) 生物工程。作物遗传育种中的品质控制、动物遗传育种中的性状控制等。

(5) 医药卫生。制药过程中的成分检测与控制以及包装的自动化生产线、激光检测、胃镜、机器人手术、CT 检测等。

(6) 家电工业。全自动洗衣机、自动控温冰箱、变频慧眼空调、数字电视等。

(7) 交通业。城市路况监测系统、十字路口车流量监测及指示灯控制系统等。

(8) 通信业。通话录音、来电显示、双模手机等。

(9) 农业。

1) 农业机械。联合收割机滚筒转速的自动检测与控制、喂入量的自动检测与控制；精密播种机播种过程中重播和漏播的控制等。

2) 节水农业。变频恒压供水；变频滴、喷、渗灌节水机具等。

3) 设施农业。温室的温度、湿度、CO₂ 等控制；温室中作物的水、肥营养控制等。

4) 养殖业。饲养室内的温度、湿度、有害气体浓度的自动检测与控制以及自动给水、供料的过程等。

(10) 社会科学方面。国民经济宏观调控体系、价格宏观调控体系、银行信贷利率调控体系、国家证券监督体系、国家人口控制体系等。

6. 自动控制理论的发展概况

自动控制理论是研究关于自动控制系统的组成、分析和设计的理论，是研究自动控制系统中控制的共同规律的科学。

自动控制理论的任务是研究自动控制系统中变量的运动规律和改变这种运动规律的可

能性和途径，为建立高性能的自动控制系统提供必要而充实的理论根据。

随着生产和科学的发展，自动控制理论已经发展成为一门独立的科学——控制论。

钱学森在他的《工程控制论》（修订版，钱学森、宋健编著）序言中认为“……20 世纪上半叶的三大伟绩是相对论、量子论和控制论，可以称为三项科学革命，是人类认识客观世界的三大飞跃。”

控制论的中心思想是通过信息的传递、加工处理和反馈来进行控制。在建立控制论的很短时期内，便迅速渗透到许多科学技术领域，大大推动了近代科学技术的发展，并从而派生了许多新兴的边缘科学。

例如，工程控制论——利用控制论研究工程系统的控制问题；生物控制论——运用控制论研究生命系统的控制与信号处理；经济控制论——研究经济计划、财贸信贷等经济活动及其控制；社会控制论——运用控制论研究社会管理与社会服务等；人口控制论——利用控制论研究人口系统的变化规律及其控制。此外，还有仿生学、系统工程等。

自动控制理论源于自动控制技术。因此，自动控制理论的形成远比自动控制技术的应用晚。

自动控制理论的发展概况如下：

(1) 古代罗马，家用水管系统中应用反馈原理构成的水位控制装置。

(2) 2000 年前，中国发明了指南针。

(3) 1086~1089 年，中国的苏颂和韩公廉发明了反馈调节装置——水运仪象台。

(4) 1787 年，英国人 Jams Watt 发明了蒸汽机离心调速器，并用于蒸汽机上进行转速控制。

(5) 1868 年，英国物理学家 James Clerk Maxwell 首先解释了 Watt 转速控制系统中出现的稳定性问题，通过线性微分方程的建立与分析，指出了振荡现象的出现同由系统导出的一个代数方程（即特征方程）的根的分布密切相关，从而开辟了用数学方法研究控制系统运动的途径。

(6) 1877 年，英国数学家 E. J. Routh，1895 年德国数学家 A. Hurwitz 各自独立地建立了直接根据代数方程（特征方程）的系数判断系统稳定性的准则，即代数判据（Routh—Hurwitz 判据）。

(7) 1892 年，俄国数学家李雅普诺夫用严格的数学分析方法全面论述了稳定性问题，从而形成了李雅普诺夫稳定性理论（即李雅普诺夫第一定理和第二定理）。

(8) 1927 年，美国 Bell 实验室的电气工程师 H. S. Bleck（布莱克）在解决电子管放大器的失真问题时首先引入反馈的概念，这就为自动控制理论的形成奠定了概念上的基础。

(9) 1925 年，英国物理学家、电学家、电气工程师 Oliver Heaviside 把 Laplace 变换应用到求解电网络的问题上，创立了运算微分，不久就被应用到分析自动控制系统的问题上，并取得了显著的成就。这就为从微分方程分析自动控制系统到应用传递函数分析自动控制系统奠定了基础，从而成为时域分析法的一个奠基性工作。

(10) 1932 年，美国物理学家 H. Nyquist 运用复变函数理论方法建立了以频率特性为基础的稳定性判据——Nyquist 判据，从而奠定了频率响应分析法的基础。随后，20 世纪

30 年代末 H. W. Bode、40 年代初 N. B. Nichols (尼柯尔斯) 进一步发展了频率响应分析法。

(11) 1948 年, 美国科学家 W. R. Evans (伊万斯) 提出了根轨迹分析法, 并于 1950 年进一步应用于反馈系统的设计, 形成了根轨迹法。

(12) 20 世纪 40 年代末 50 年代初, 频率响应法和根轨迹法被应用于研究采样控制系统和简单的非线性控制系统。同时, 人们把理论上和应用上的成就总结成原理并推广到生物控制机理、神经系统、经济领域及社会过程等非常复杂的系统。其中, 美国数学家 N. Wiener (维纳) 于 1949 年出版了划时代著作《控制论》对控制理论作了系统的阐述。

(13) 20 世纪 50 年代中期, 空间技术的发展迫切要求建立新的控制原理以解决一类复杂的控制问题。

1956 年, 苏联科学家庞特里亚金提出了极大值原理; 美国数学家 R. Bellman (贝尔曼) 创立动态规划, 这两个成果为最优控制提供了理论工具。

1959 年, 美国数学家 R. E. Kalman (卡尔曼) 提出了著名的卡尔曼滤波器, 1960 年又提出可控性和可观性的概念。

20 世纪 60 年代初, 一套以状态空间法、极大值原理、动态规划、卡尔曼滤波器为基础的分析和设计 MIMO 系统的新原理和方法——现代控制理论已基本确定。

(14) 1970 年以来, 随着技术革命和大规模复杂系统的发展, 自动控制理论又向大系统理论和智能控制理论发展。

大系统理论研究的是非常复杂的集中——分散系统 (DCS) 控制规律。

智能控制理论的研究是以人工智能为研究方向, 探索自然界更为深刻的运动机理。当前的研究方向有自适应控制、模糊控制、人工神经网络控制和混沌理论等, 并产生了许多研究成果。

(15) 20 世纪中期以来, 自动控制理论不仅用于解决工程技术领域的控制问题, 而且也用于交通管理、生态控制、生物和生命现象的研究、经济科学、社会系统等领域。

§ 1-3 反 馈 控 制 原 理

反馈控制是自动控制的基本形式, 反馈控制原理是自动控制的基本原理。

1. 反馈的概念

反馈是控制论中一个极其重要的概念, 它是控制论的基础。

(1) 定义: 反馈就是把系统的输出信号直接地或经过中间变换后全部或部分地返回输入系统的过程。

(2) 作用: ①在控制系统中减小参数的变化; ②改善系统的动态特性; ③控制干扰信号的影响。

(3) 分类: 负反馈、正反馈。

1) 负反馈: 反馈回去的信号或作用与系统的输入信号或作用方向相反的反馈。它是实际工程中大量存在的反馈形式。

2) 正反馈: 反馈回去的信号或作用与系统的输入信号或作用方向相同的反馈。

2. 反馈控制的概念

这里介绍一个关于反馈控制的例子，通过这个例子的具体讲析，得到有关反馈控制的概念。

实际工程中，有关反馈控制的例子不胜枚举，例如：浮球、杠杆、阀控制的液位控制系统；电液振动台控制系统；薄膜反馈式径向静压轴承；电压闭环控制系统；恒值调速系统；恒温控制系统等。

下面，我们以电压闭环控制系统为例。

如图 1-1 所示，电压闭环控制系统由发电机、励磁绕组、电压表、变阻器、执行电动机、减速传动机构、稳压电源、放大器等组成。

工作过程：当励磁电源 U_f 和稳压电源 U_0 给定时， U_f 作用在 R_f 上产生励磁电流 I_f ， I_f 通过磁耦合激励发电机 G 使其产生端电压 U 并送给负载，同时整定值 U_0 与端电压 U 进行比较，产生一个偏差电压 U_{ab} ， U_{ab} 经过放大器的放大后，驱动执行电动机 M 并通过减速传动机构带动 R_f 的滑动头的滑动改变变阻器 R_f 的值大小，从而改变 I_f ，使发电机 G 的端电压 U 满足 $U = U_0$ 的控制规律。

控制过程：当发电机 G 的端电压 U 高于整定值 U_0 时， $U_{ab} = U_0 - U < 0$ ， U_{ab} 经过放大器放大后，驱动执行电动机 M 逆转，使变阻器 R_f 增大，从而减小励磁电流 I_f ，使发电机端电压 U 降低，从而满足 $U = U_0$ ；相反，当 $U < U_0$ 时， $U_{ab} = U_0 - U > 0$ ， U_{ab} 经过放大器放大后，驱动执行电动机 M 正转，使变阻器阻值 R_f 减小，从而增大 I_f ，使发电机端电压 U 上升，满足 $U = U_0$ 。

发电机 G 是这个系统的被控对象，发电机端电压 U 是该系统的被控量，变阻器 R_f 是该系统的控制器，通过调节变阻器 R_f 阻值的大小，控制发电机的端电压 U 按 $U = U_0$ 规律进行变化。

关于反馈控制的一些概念：

- (1) 控制器 (R_f)：实现控制目的的设备或仪器。
- (2) 被控对象 (G)：由控制器控制的对象。
- (3) 被控量 (U)：被控对象的输出量。
- (4) 整定值 (U_0)：预先设定的被控量的目标值。
- (5) 偏差 ($U_{ab} = U_0 - U$)：被控量的整定值与实际值之差值。
- (6) 闭环：传递信息的闭合通道。即获得被控量的信息后，经过反馈环节与整定值进行比较，产生偏差，该偏差又作用于控制器，控制被控对象，使其输出量按特定规律变化，这样就会形成一个传递信息的闭合通道。
- (7) 反馈控制：先从被控对象获得信息，然后把该信息馈送给控制被控对象的控制器

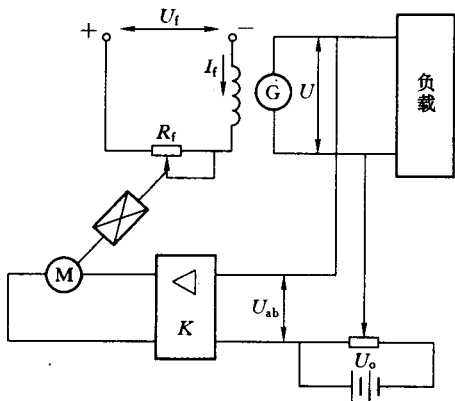


图 1-1 电压闭环控制系统原理图

的控制方法。

3. 反馈控制的过程

对于电压闭环控制系统：

$$U < U_0 \longrightarrow U_{ab} = U_0 - U > 0 \longrightarrow R_f \downarrow \longrightarrow I_f \uparrow \longrightarrow U \uparrow \longrightarrow U = U_0$$

$$U > U_0 \longrightarrow U_{ab} = U_0 - U < 0 \longrightarrow R_f \uparrow \longrightarrow I_f \downarrow \longrightarrow U \downarrow \longrightarrow U = U_0$$

(负) 反馈控制的目的：消除 (或减小) 被控量与整定值之间的差值，使控制作用削弱偏差的大小。

反馈控制原理图如图 1-2 所示。

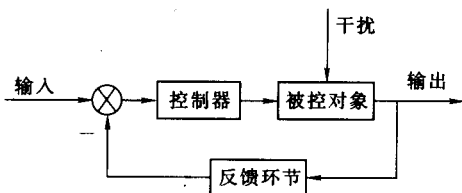


图 1-2 反馈控制原理图

反馈控制过程：给定输入量的值，通过控制器控制被控对象产生一个输出量的值，反馈环节测得这个输出量后反馈到系统的输入端，与输入量的值进行比较，产生一个偏差，作用于控制器上，控制被控对象克服干扰的影响并使输出量按特定规律变化。

§ 1-4 自动控制系统的组成

控制系统会完成一定的功能，某种特定功能的完成是由控制系统中的多个组成部分共同完成的。控制系统中的这些组成部分的作用和具体要求是各不相同的。认识和掌握控制系统的组成对于分析和设计控制系统有着重要的意义。

控制系统的组成：检测元件、整定元件、比较元件、放大元件、执行元件、校正元件、能源元件。

1. 检测元件 (又称测量元件)

(1) 作用：检测被控量或某些中间变量的值，可与相关元器件构成反馈装置。

1) 被检测的量是电量，一般用电阻、电位器、电流互感器测量。即检测元件是电阻、电位器、电流互感器。

2) 被检测的量是非电量，则用相应的传感器 (或称变送器、变换器) 将非电量转换为电量，以便于信号处理和控制在，这就是非电量的检测技术。

被检测量是温度时，检测元件是热电偶、热电阻等。

被检测量是位移、速度、加速度时，检测元件是位移、速度、加速度传感器。

被检测量是转速时，检测元件是测速发电机、光电脉冲发生器等。

被检测量是角位移时，检测元件是电位器、自整角机或旋转变压器等。

(2) 要求：检测元件性能的好坏、准确度的高低、稳定与否、及时性的快慢直接影响到整个控制系统的控制性能和精度，因此检测元件是控制系统满足控制要求并达到控制目的的基本条件和关键因素。

对检测元件的要求：①性能可靠、稳定；②准确度高，不易受外界环境影响；③所测信号中噪声极小。

2. 整定元件（又称给定元件）

(1) 作用：给出与被控量期望值相对应的输入量。

(2) 要求：①输出信号准确、稳定；②精度等级至少比控制精度高一级。

3. 比较元件（又称误差检测器）

(1) 作用：将检测元件检测到的被控量的实际值与整定元件提供的整定值进行比较，求出它们之间的偏差。

常用的比较元件有：差动放大器、机械的差动装置等。

(2) 要求：性能可靠，工作稳定，快速性好。

4. 放大元件

(1) 作用：放大比较元件的输出信号，产生足够大的功率去推动执行元件以便控制被控对象。

常用的放大元件有：电子放大器、机械放大器、液压放大器等。

(2) 要求：①工作可靠，性能稳定；②线性度好，失真率小，抗干扰能力强。

5. 执行元件

(1) 作用：直接推动被控对象，达到控制目的。

(2) 要求：动作可靠，快速性好，时滞效应微弱。

6. 校正元件

(1) 作用：改善控制系统的性能。

(2) 要求：快速性好，灵活性强。

7. 能源元件

(1) 作用：给控制器或放大元件提供能源。

(2) 要求：性能稳定，工作可靠，抗干扰能力强。

应当指出，对于实际的控制系统的一个组成部分可以起到一个或几个元件的作用，可以根据实际情况进行选择。

在设计控制系统时，首先要解决的是被控量的检测问题，即如何选择经济耐用、精度合乎要求的传感器；其次，要考虑系统的校正问题，即采用什么样的校正方式（串联、并联、反馈方式，一般采用串联方式）以及校正元件的配置等问题。

§ 1-5 自动控制系统类型

实际工程中，尽管控制系统的控制有其基本规律，然而控制系统因其工作环境、被控对象、变化规律不同，它的种类也不同，因此，介绍控制系统的类型，从而分门别类地掌握不同类型的控制系统的具体规律，对于控制系统的分析和设计也是很必要的。

(1) 按照信息传递路径的不同来分类，控制系统可以分为开环系统、闭环系统和复合系统三种类型。

1) 开环系统（又称开环控制系统、无反馈系统）。

含义：就是对控制系统的被控量（受控量、输出量、响应）不进行检测和反馈，而是根据被控对象的计算功能来实现控制作用的系统。