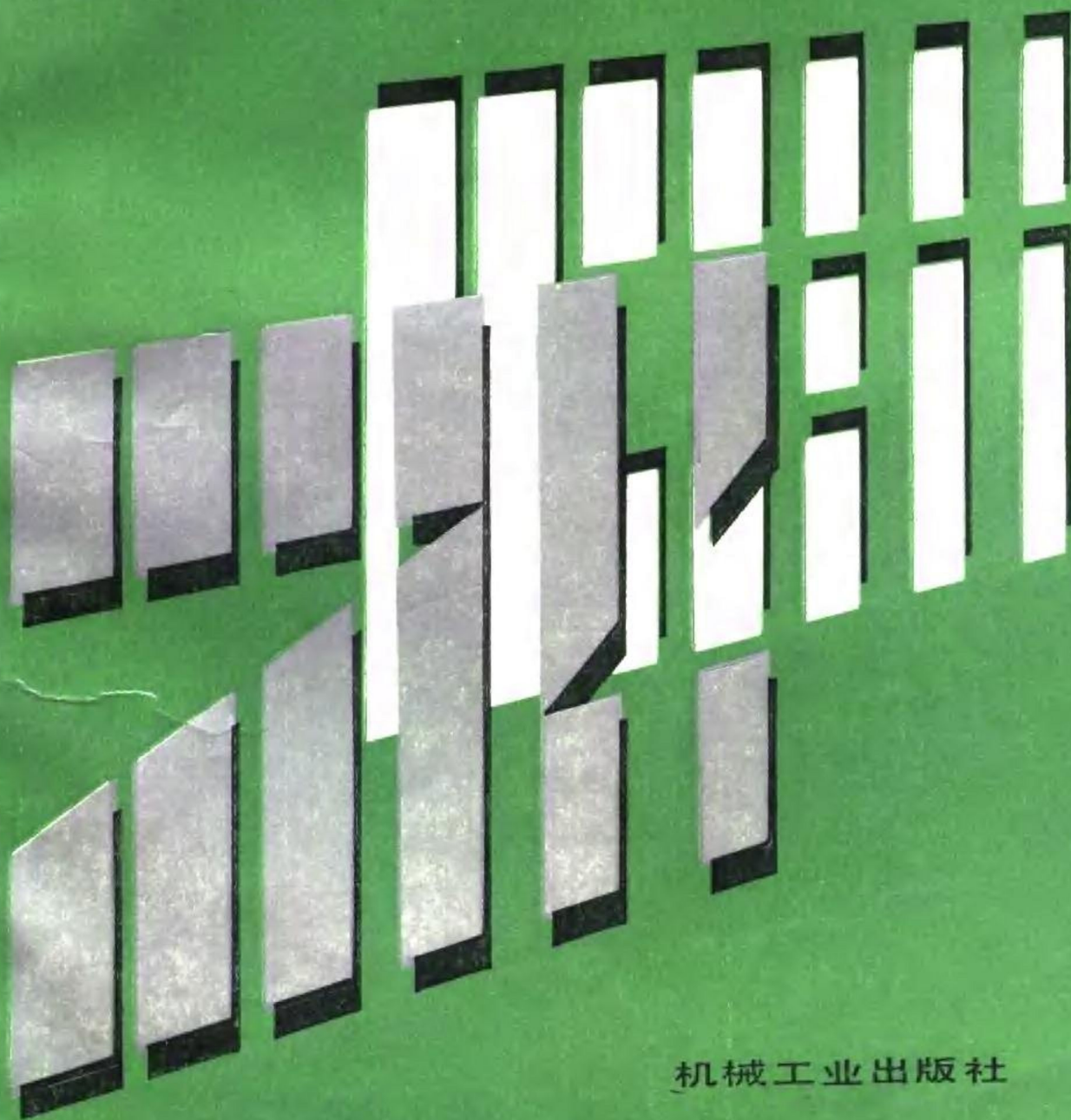


职工高等工业专科学校试用教材

自动控制原理

王智兴 主编



机械工业出版社

1129 09
职工高等工业专科学校试用教材

自动控制原理

王智兴 主编



机械工业出版社

(京)新登字 054 号

本书介绍高等专科学校学生应掌握的自动控制的基本理论,主要是经典控制理论。内容包括控制系统的一般概念、线性控制系统的数学模型、系统分析的时域法、根轨迹法和频率特性法、应用频率特性法校正系统、非线性系统的基本概念和分析方法、采样控制系统的分析。还简单介绍了状态方程的概念和电子计算机辅助设计方法。书中选编了一些习题,以帮助读者运用基本理论。本书在叙述中着重讲清物理概念而避免过多的数学推导,以图使读者能更好掌握基本概念和方法。

本书是职工高等工业专科学校工业电气自动化专业的教材,也可供相应专业的高等专科学校、电视大学师生及有关的工程技术人员参考。

自动控制原理

王智兴 主编

责任编辑:林静贤 韩雪清 责任印制:卢子祥

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

四川省金堂新华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092 1/16·印张 28·字数 688 千字

1987年11月北京第1版·1994年10月成都第7次印刷

印数 33 051—37 550·定价: 17.60 元

ISBN 7-111-00879-0/TP·61(课)

前 言

本书是根据教育部1983年11月无锡会议审定的职工高等专科学校工业电气自动化专业自动控制原理教学大纲、1984年6月机械工业部教材编辑室主持审定的教材编写大纲而编写的试用教材。

本书主要讲述古典控制理论。在介绍古典控制理论时，研究对象以线性连续系统、研究方法以频率特性法为重点。

为了适应职工大学对教材的要求，在编写本书时，尽量避免过多的数学推导，力求讲清基本概念，注意加强基本理论和方法的应用。

本书各章内容分工如下：

第一章对自动控制的有关名词定义等作了介绍，为讨论自动控制理论提供常识性的基础。

第二章讨论控制系统的数学模型，这是为了实现具体物理量的抽象化和为理论分析提供基础和工具。数学模型主要是微分方程和传递函数，还介绍了状态方程和选学的信号流程图。

第三章到第五章分别用时域法、根轨迹法、频率特性法分析计算线性连续系统在结构参数已定条件下的稳定性、稳态性能和暂态性能。第三、五章还介绍了选学的电子计算机的辅助设计。

第六章讨论线性连续系统根据提出的性能要求、利用频率法对系统进行校正的方法。

第七章是采样控制系统的基本概念和分析计算，主要是时域法。

第八章介绍非线性系统的基本知识和分析的初步方法。

本书在每一章的后面都编写了本章小结和一定数量的习题以供读者练习。

书末的附录包括三个部分。为了计算时应用方便，附录一列出了拉氏变换的基本关系式和拉氏变换表。为了实验课的需要，附录二介绍了控制系统模拟的基本概念和方法。最后作为状态方程的补充，附录三介绍了状态方程的一些解法。书中打星号的章节为选读内容。

本书由鞍钢职工工学院副教授王智兴主编。初稿第一、二章由沈阳低压开关厂职工大学方昊燮编写，第三、五、六章及附录由王智兴编写，第四、七、八章由沙洲职业工学院钱根如编写。审定前后由王智兴统一作了修改和整理。

书稿由河北工学院沈安俊副教授主审，河北工学院孟昭忠老师协助主审详细认真地审阅了原稿，并提出了很多宝贵意见。上海第二工业大学杜正秋副教授和其他参加审稿会的同志也都认真阅读书稿和提出意见。对此表示衷心的感谢。

本书作为职工高等工业专科学校工业电气自动化专业的教学用书，也可供高等专科学校、电视大学相应专业的师生及有关工程技术人员参考。

由于编写者的水平所限，书中一定会存在很多不当之处，希望读者在阅读后给予批评指正。

编者

一九八六年九月

目 录

<p>第一章 控制系统的基本概念 1</p> <p> § 1-1 概述 1</p> <p> § 1-2 开环控制和闭环控制 3</p> <p> § 1-3 闭环控制系统的基本要求、 组成和分类 7</p> <p> 小 结 11</p> <p> 思考题 12</p> <p>第二章 控制系统的数学模型 13</p> <p> § 2-1 控制系统数学模型的基本概念 13</p> <p> § 2-2 线性系统的运动方程式 14</p> <p> § 2-3 控制系统的状态方程式 21</p> <p> § 2-4 线性系统及典型环节的传递 函数 29</p> <p> § 2-5 控制系统的传递函数 41</p> <p> § 2-6 系统的方框图变换 49</p> <p> * § 2-7 信号流图 65</p> <p> 小 结 75</p> <p> 习 题 76</p> <p>第三章 控制系统的时域分析 80</p> <p> § 3-1 时域分析的基本概念 80</p> <p> § 3-2 控制系统的典型输入 81</p> <p> § 3-3 对控制系统时域性能的 基本要求 83</p> <p> § 3-4 线性系统稳定性的概念 85</p> <p> § 3-5 代数稳定判据 87</p> <p> § 3-6 控制系统的稳态误差 97</p> <p> § 3-7 一阶系统的时域响应 108</p> <p> § 3-8 二阶系统的阶跃响应 113</p> <p> § 3-9 闭环传递函数具有零点的二阶 系统的阶跃响应 124</p> <p> § 3-10 高阶系统暂态特性的分析 127</p> <p> * § 3-11 用数字计算机求解系统的 时域响应 129</p> <p> 小 结 139</p> <p> 习 题 140</p> <p>第四章 控制系统的根轨迹分析 143</p>	<p> § 4-1 根轨迹的基本概念 143</p> <p> § 4-2 根轨迹的绘制法则 148</p> <p> § 4-3 用根轨迹分析系统的暂态特性 164</p> <p> § 4-4 开环零、极点的变化对根 轨迹的影响 173</p> <p> 小 结 179</p> <p> 习 题 179</p> <p>第五章 控制系统的频域分析 182</p> <p> § 5-1 频率特性的基本概念 182</p> <p> § 5-2 典型环节的频率特性 189</p> <p> § 5-3 系统开环频率特性的绘制 204</p> <p> § 5-4 奈魁斯特稳定判据 215</p> <p> § 5-5 用开环对数频率特性判定系统的 稳定性 225</p> <p> * § 5-6 用数字计算机确定和求取系统的 稳定性和稳定裕量 239</p> <p> § 5-7 开环频率特性与系统稳态误差 243</p> <p> § 5-8 利用开环对数频率特性分析系统的 暂态特性 245</p> <p> § 5-9 闭环频率特性 257</p> <p> 小 结 272</p> <p> 习 题 273</p> <p>第六章 控制系统的校正 275</p> <p> § 6-1 系统校正的基本概念 275</p> <p> § 6-2 串联超前(微分)校正 285</p> <p> § 6-3 串联滞后(积分)校正 296</p> <p> § 6-4 串联滞后超前(积分微分)校正 302</p> <p> § 6-5 反馈校正 310</p> <p> 小 结 326</p> <p> 习 题 327</p> <p>第七章 非线性系统 329</p> <p> § 7-1 非线性系统的基本概念 329</p> <p> § 7-2 非线性系统的线性化 333</p> <p> § 7-3 描述函数法 336</p> <p> * § 7-4 相平面法 350</p> <p> 小 结 363</p>
---	--

习题	363	§ 8-9 采样系统的暂态特性	408
第八章 采样控制系统	365	• § 8-10 采样系统的频率特性	413
§ 8-1 采样控制系统的基本概念	365	小结	417
§ 8-2 采样过程和采样定理	369	习题	418
§ 8-3 采样信号的复现	374	附录	421
§ 8-4 z 变换	376	一、拉普拉斯变换	421
§ 8-5 z 反变换	386	二、控制系统的模拟	425
§ 8-6 采样系统的脉冲传递函数	391	三、线性系统状态方程的解法	433
§ 8-7 采样系统的稳定性	400	参考文献	441
§ 8-8 采样系统的稳态误差	405		

第一章 控制系统的基本概念

§ 1-1 概 述

随着科学技术的迅速发展，自动控制技术在人类活动的各个领域中的应用得越来越广泛和深入。它的水平已成为衡量一个国家生产和科学技术先进与否的一项重要标志。自动控制作为自动化的强有力的技术手段，对促进我国的四化建设、科学技术进步和提高企业素质将起着越来越重要的作用。

自动控制就一般理解来说，就是设备、仪器的工作或生产过程在没有人的直接参预下，利用控制装置实现按人的预期要求而进行自动的控制和调节。简单举个例子，人工控制路灯的开闭是根据人们观察路上亮暗程度去操作的。如果采用光敏元件和一些附属器件，就可以自动根据路面上光线的强弱去打开或关闭路灯，而不再需要人的直接参预，实现了自动控制。

在自动控制中，把所需要控制的设备、仪器或生产过程及其被控制的物理量分别称为控制对象（或受控对象）及被控制量，如上例中的路灯及其亮暗。为实现对控制对象的自动控制而应用的各种器件总称为自动控制装置或简称控制器，如上例中的光敏元件和其它器件。自动控制装置包括各种起检测、控制、执行等作用的器件和装置。

由自动控制装置和控制对象组成一个完整的系统，就称为自动控制系统。为了说明自动控制系统的有关术语，举个简单系统的例子。

图 1-1 为一个直流发电机电压自动调节系统，自动控制的目的是实现电压的恒定。图中 G 为直流发电机，它由原动机带动保持恒速旋转。当励磁绕组 B 加电压通电流建立磁场后，发电机有端电压 u 。电位器 W 称为给定装置，由它来提供电压 u_g ，发电机电压将取决于 u_g ，故 u_g 称为给定电压或统称为给定量，又可称为系统的输入量。从发电机引出端电压，经检测装置得到反映端电压值的电压 u_f ，它反馈到输入端，与给定电压进行比较， u_1 称为反馈电压或统称反馈。经比较器对 u_g 和 u_f 进行比较，取其差值 u_2 ，再经放大去控制励磁电流，在此 $u_2 = u_g - u_f$ ，即反馈电压与给定电压取相反极性，故称这种反馈方式为负反馈。磁场励磁电流建立磁场，使发电机产生端电压 u ， u 即为被控制量，或称为系统的输出量。在发电机转速、负载恒定时，发电机的输出电压完全由给定电压 u_g 确

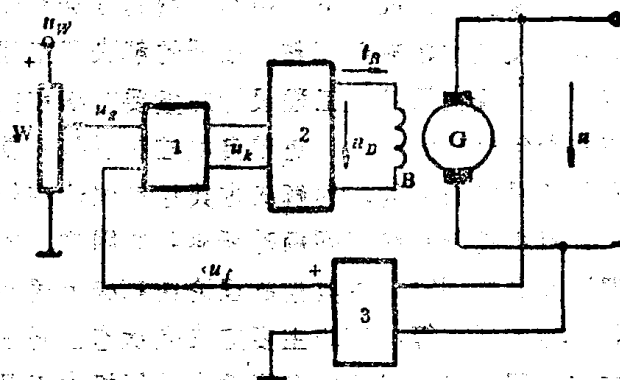


图 1-1 发电机电压自动调节系统

1—比较器 2—放大器 3—检测装置

定电压 u_g 确定。在发电机转速、负载恒定时，发电机的输出电压完全由给定电压 u_g 确

定。这个系统的恒压作用在于，当发电机的转速或负载变化时（这种转速或负载的作用称为扰动或干扰。扰动量也可看作是系统的输入量），将自动调节发电机的励磁电流力求维持发电机的端电压不变。例如负载增加，使发电机端电压下降，从而反馈电压 u_f 减小。在给定电压 u_d 不变的条件下，将引起差值电压 u_e 的增大。因此励磁电流将上升，力图使 u 上升以恢复其原值。当然，这个系统在扰动作用下不能完全保持输出为恒值，但能自动控制以减少扰动的影 响。这个系统的预期要求是在扰动作用下保持输出电压恒定，或者说要求电压保持为与给定电压对应的数值。因此，也可以这样说，自动控制的基本任务就是克服各种扰动的影 响，使被控量等于或跟随给定量。

在现代社会中，不但各种工业部门普遍采用自动控制技术，在农业、交通运输、通讯、宇航以至武器、家用电器等也都广泛应用自动控制。因为自动控制系统不但能减轻人的体力劳动程度进而减轻人的脑力劳动程度，并能做到人体无法做到的工作。如在控制的精确性、快速性等方面，或在复杂的、危险的环境下的工作等方面。随着控制装置和控制系统的发 展，自动控制技术在国民经济中的作用将越来越大。

自动控制系统可以由电气装置组成，也可以是由机械或其它的装置组成，还可以是一个物理、化学的反应过程的控制。因此参预控制的物理量可以是电量、机械量、热量等等。为了分析自动控制系统的工作并进行设计计算，就需要建立一套统一的理论。自动控制理论就是把自动控制系统的具 体物理量抽象化，然后对控制系统进行分析、计算、设计的普遍性理论。

虽然自动控制装置和自动控制系统很早就 在一些部门中得到应用，但作为一门学科，自动控制理论只是在本世纪的三、四十年代才开始形成，随着生产和科学技术的发展和需要，自动控制理论也在不断地发展和完整。

在本世纪三、四十年代开始，由于生产上单机自动化的需要，以解决反馈系统的稳定性和工作特性的分析与设计问题为主，发展形成了古典控制理论。古典控制理论的数学工具是以拉氏变换为基础建立起来的传递函数，它的主要方法是频率特性法和根轨迹法，主要研究单输入、单输出的线性时不变控制系统的分析和设计方法。古典控制理论比较直观，物理概念比较强，发展比较成熟完整，很好的解决了工程化和实用化的问题。因此在工程上得到广泛的应用，到现在仍然是工程设计的重要方法和控制理论发展的基础。

在六十年代开始以后，随着自动控制系统的复杂化和宇航技术发展的需要，随着计算机技术发展所提供的可能，为解决古典控制理论在处理多输入多输出系统、时变系统、非线性系统、计算机控制系统等问题时所遇到的困难，发展形成了现代控制理论。当然，随着现代控制理论发展的同时，古典控制理论在解决上述问题方面也取得了进展。现代控制理论的数学工具是矩阵理论等，它的主要方法是状态空间法即时域法，主要研究多变量系统的分析和设计方法。现代控制理论以电子数字计算机为工具，可以解决复杂系统的综合设计问题，它还可以反映系统的内在关系，不但能更好的揭示控制系统的本质特性，还为系统的设计综合提供了有利的方法。现代控制理论的发展是以古典控制理论为基础的，而古典控制理论在发展中 也引入了现代控制理论的一些概念和方法，目前各有自己的适当应用，又在发展中起着相互促进的作用。

现代控制理论的研究内容大致包括以下几个方面：

系统辨识 对未知系统数模和参数的测定估计的理论。

系统最优估算 对系统未来状态进行预测即实时估计的理论。

系统最优控制 研究系统最优运行的控制规律的理论。

系统适应控制 研究在系统参数等变化时，用系统辨识方法按最优控制规律对系统进行实时控制的理论。

当然，现代控制理论正在不断发展，各个分支也在不断深入和扩展，并将得到更多的应用。从七十年代开始，随阿波罗工程而发展起来的大系统理论，也可以看作是现代控制理论的一个发展。它是研究各种各样规模庞大、结构复杂、功能综合、因素众多的大系统的分析和综合方法的理论。由于近年来计算机和现代应用技术的迅速发展，大系统理论也将不断向前推进。

本教材根据教学大纲的规定，是研究古典控制理论的。对现代控制理论，只在第二章数学模型的讨论中，介绍一些状态空间法的基本知识。

自动控制理论讨论的内容可分为两个方面：一是在已知系统的结构和参数的条件下，分析计算系统的工作特性；另一是按照对控制系统的性能要求，设计出符合这个要求的系统，即确定它的结构和参数。前者是后者的基础，而后者是控制理论的应用目的。但由于设计要涉及很多方面的因素，而在控制理论的教材中是无法一一包含的，故本教材只能讨论系统设计中的一部分内容即控制系统的校正。系统校正就是在系统的结构和控制对象的参数是已知的条件下，按系统性能要求设计控制器的类型和参数。

§ 1-2 开环控制和闭环控制

前一节已经提到，自动控制的基本任务是：使受控对象的被控制量，克服扰动的影响，力求等于或跟随给定量。为了实现这个目的，自动控制系统要采用一定的结构形式，例如可以是开环或闭环控制的结构方式。在实际中，大多采用的是闭环控制系统。因此，这一节将举例说明闭环控制系统的结构、工作的基本特点及有关的名词和概念。但为了更好地说明问题，开始先讨论开环控制方式，并利用开环控制和闭环控制的对比，看出它们的应用和工作特点。

一、开环控制

在由控制器和受控对象所组成的控制系统中，如果系统的输入通过控制器的作用可以控制受控对象的输出，而输出对输入、控制器却没有任何影响，即控制信息只能从输入单方向传递到输出的控制方式称为开环控制。

以图 1-2 的可控硅供电电动机调速系统为例。用电位器 W 取出的电压 u_g 作为系统的给定输入，以电动机 D 的转速 n 作为系统的被控制量即输出。 u_g 通过触发装置 C 和可控硅装置 S 实现对电动机转速 n 的控制。触发装置、可控硅装置等组成控制器。输入通过控制器作用于受控对象以控制输出，而电动机的转速则对控制器不产生任何影响，这样的系统就属于开环

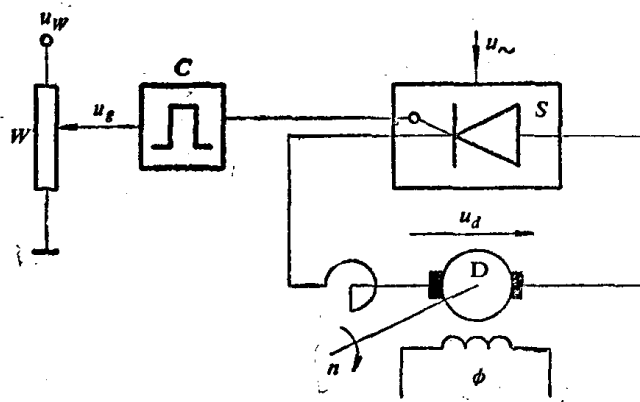


图1-2 可控硅供电电动机开环调速系统

于受控对象以控制输出，而电动机的转速则对控制器不产生任何影响，这样的系统就属于开环

控制方式。按控制的要求，一定的 u_g 对应于一定的 n 。但由于电动机的转速 n ，要受到轴上负载、电动机磁场、可控硅装置的交流电源电压等的变化的影响，故不能完全达到这个要求。这些对转速有影响的变化量，就是系统的干扰量或扰动量。

可以把上述系统抽象化，利用结构方框图表示如图1-3。为简单起见，扰动只表示电动机的负载。一般把扰动也看作是系统的一种输入，故可称为扰动输入，但在不致引起误会的情况下，通常简称给定输入为输入，而称扰动输入为扰动。从方框图可再次看出开环控制的特点，输入通过控制器控制输出，而输出对控制器不起作用。因此在给定输入一定，输出受扰动影响而变化时，控制器不能起控制作用。

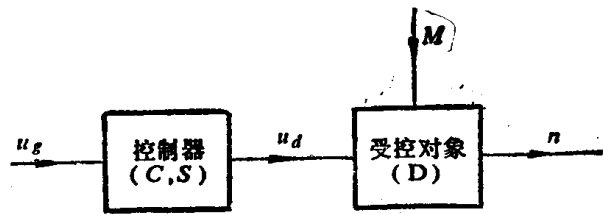


图1-3 开环控制的结构方框图

u_g —给定输入 M —扰动输入 n —输出 C —触发装置 S —可控硅 D —电动机

开环控制具有结构简单、成本低、工作易稳定等优点。开环控制在一些数控机床中得到应用，而属于开环控制性质的前馈控制将在第三章中讨论。

二、闭环控制

如果改进开环控制，设法把输出受扰动影响而变化的信息传递到控制装置中去，使控制器根据这个信息进行控制以消除扰动的影响，那么就能更好地完成自动控制的任务。这种不仅存在着给定输入经控制器对输出进行控制，还有输出也参预控制作用的系统，就是闭环控制。将输出信息传递到输入方面的作用称为反馈。因此，闭环控制就是除了输入控制外，还有输出量经反馈到输入端的控制作用。一般闭环控制都采用负反馈，即输出反馈量与输入量的极性是相反的。故实际加到控制器上的是输入与输出反馈量的差值，这个差值称为偏差。因而闭环控制也称为反馈控制或偏差控制。闭环控制的基本思想就在于：当系统给定输入后，利用输出反馈量来得出偏差，而偏差通过控制器起控制作用，力图减小偏差而使输出接近、等于或跟随输入，以实现自动控制的目的。概括起来，自动控制系统就是进行检测偏差、纠正偏差的工作。

现举例说明闭环控制的工作和特点。如前述的开环控制电动机调速系统，如用测速发电机测定转速并转换为电压值后，反馈到输入端如图1-4所示，就构成了闭环控制。图中增加的放大器 K 是为了放大偏差信号。在连接给定输入和反馈量时要注意极性，以保证负反馈作用。在实际工作中，可以用下述方法来鉴别极性，先不接入反馈，用一个很小的给定电压（必须远比正常给定电压值为小），使电动机转动，然后测定反馈电压的极性以确定正确的连接。或者把反馈端进行触接，若触接时电动机转速下降，则按此连接为正确。

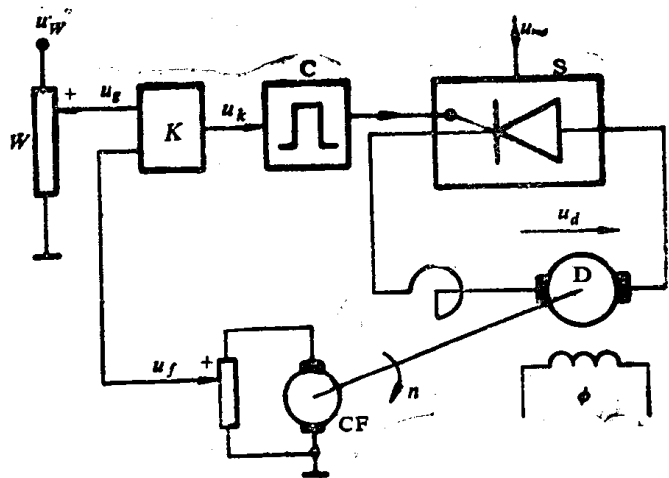


图1-4 采用转速负反馈的闭环调速系统

在此把系统接成正反馈是不允许的。

图示系统的输入为给定电压 u_g ，输出为电动机转速 n ，负载或电源电压波动等为扰动。利用测速发电机负反馈电压 u_f 与给定电压 u_g 相比较，检测到偏差。偏差电压 $\Delta u = u_g - u_f$ ，即为放大器 K 的输入，然后利用放大器、触发装置、可控硅装置等控制器控制整流电压 u_d 。整个控制装置应在偏差增大时使 u_d 增高，即控制 u_d 的变化使有利于偏差的减少，从而达到纠正、消除偏差的目的。下面具体说明转速闭环控制系统是如何减小或消除由于扰动影响而引起的转速变化。

当系统给定电压 u_g 一定时，经反馈而取出的电压 u_f 与给定电压综合比较后得一偏差电压 Δu ，它经控制装置建立整流电压 u_d ， u_d 使电动机维持某一转速 n 而稳定运行。若负载发生变化，如当负载增加，则必影响电机转速而使 n 下降。随之 u_f 减少、 Δu 增加，这将使整流电压 u_d 上升，从而使电动机转速回升。同样，若负载减少，转速上升，系统将使 u_d 下降，转速回降。这样，闭环反馈控制就大大减小了由扰动影响而引起的转速变化。

闭环调速系统用结构方框图表示可如图1-5。它构成一个闭合的回路，这也说明了开环、闭环控制名称的由来。图中 \otimes 代表信号综合记号，综合的信号上注以符号表出它们的代数和关系，负反馈信号用减号，一般加号常可省略不标。

一般闭环控制系统的结构方框图可如图1-6所示。闭环控制系统的信号传输路径有两条。由输入经控制器到受控对象的输出，称为正向通道或前向通道；由输出经反馈装置传送到输入端，称为反向通道或反馈通道。

为了进一步分析闭环控制的特点及与开环控制相比较，可以用定量计算系统的稳态特性（或称静特性），来说明反反馈的作用。稳态特性就是在一定的给定输入时，系统稳定运行时的输出工作特性。在调速系统中，稳态特性就是机械特性。即在一定的给定电压时，系统稳定运行中，电动机的转速与负载的关系。计算稳态特性时，为了简化，假定电动机的磁场，可控硅交流电源电压是恒定的，所有控制装置、反馈装置、受控对象等的输入输出量关系是线性的。推算稳态特性的方法是：按系统工作顺序，分别列出系统中各元件本身的稳态物理量关系方程式。然后利用相互连接关系，消除中间变量得出输出量与输入量、扰动量的稳态关系方程式。推算过程如下：

(1) 输入端 给定电压为 u_g ，反馈电压为 u_f ，根据负反馈关系可得偏差电压

$$\Delta u = u_g - u_f \quad (1-1)$$

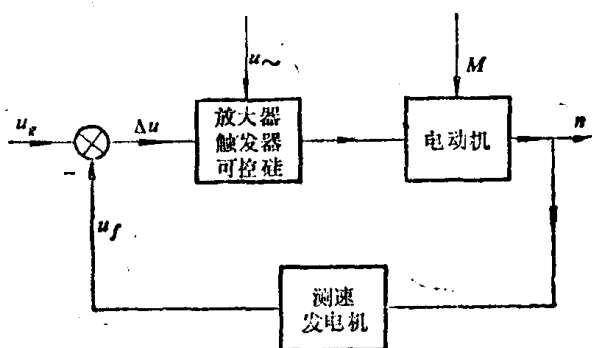


图1-5 闭环调速系统的结构方框图

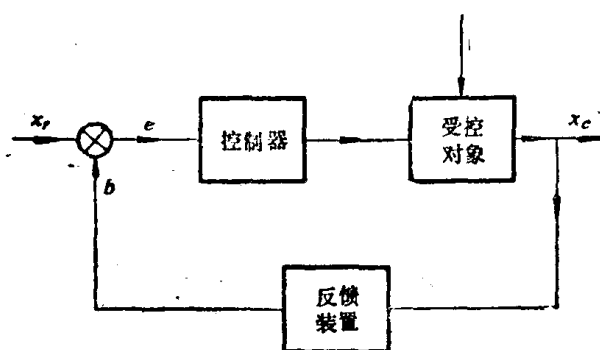


图1-6 闭环控制系统的结构方框图

x_r —给定输入 e —偏差 r —扰动输入 x_c —输出
 b —反馈量

(2) 放大器 设放大器的放大倍数为 K_p ，它的输入为偏差电压 Δu ，输出是控制电压 u_k ，则根据放大器的特性，可得

$$u_k = K_p \cdot \Delta u \quad (1-2)$$

(3) 触发装置和可控硅装置 已知稳态运行时，触发装置和可控硅装置合起来可看作是一个放大器，设它的放大倍数为 K_s ，装置的输入为控制电压 u_k ，输出是电动机的端电压 u_d ，故有

$$u_d = K_s \cdot u_k \quad (1-3)$$

(4) 电动机 根据电机学原理，直流电动机的稳态电压平衡式为 $u_d = e_d + i_d R$ ，而 $e_d = c_e \phi n$ ，故可得电动机的转速方程为

$$n = \frac{u_d - i_d R}{c_e \phi} \quad (1-4)$$

式中 R ——主回路总电阻；

c_e ——电动机磁感应常数；

i_d ——电动机电枢电流。

(5) 测速发电机 根据测速发电机原理，电机端电压与转速成正比，再计及端接电位器的分压比，可设测速发电机反馈电压 u_f 与转速的比例系数为 α ，则得

$$u_f = \alpha \cdot n \quad (1-5)$$

根据式(1-1)~(1-5)，消除中间变量 Δu 、 u_k 、 u_d 、 u_f 各值，最后可得转速负反馈调速系统的稳态方程为

$$\begin{aligned} n &= \frac{K_p K_s u_g - i_d R}{c_e \phi \left(1 + K_p K_s \frac{\alpha}{c_e \phi} \right)} \\ &= \frac{K_p K_s}{c_e \phi (1 + K)} u_g - \frac{R}{c_e \phi (1 + K)} i_d \\ &= n_{0s} - \Delta n_s \end{aligned} \quad (1-6)$$

式中 $K = K_p K_s \frac{\alpha}{c_e \phi}$ 为闭环系统的开环放大倍数或开环增益。它是当断开反馈时，从输入经放大器、触发装置、可控硅装置、电动机直至测速发电机到反馈输出为止的各元件放大倍数或增益的乘积，即总增益；

$n_{0s} = \frac{K_p K_s}{c_e \phi (1 + K)} u_g$ 为闭环系统理想空载转速；

$\Delta n_s = \frac{R}{c_e \phi (1 + K)} i_d$ 为闭环系统的稳态转速降。

利用图1-2的系统，根据相似的推导方法，可以求得开环控制系统的稳态方程为

$$\begin{aligned}
 n &= \frac{K_s}{c_s \phi} u_g' - \frac{R}{c_s \phi} i_d \\
 &= n_{0p} - \Delta n_h
 \end{aligned}
 \tag{1-7}$$

式中 $n_{0p} = \frac{K_s}{c_s \phi} u_g'$ 为开环系统理想空载转速；

$\Delta n_h = \frac{R}{c_s \phi} i_d$ 为开环系统稳态转速降。

比较式 (1-6) 和 (1-7) 中的稳态转速降可知，在相同的负载电流时，可得

$$\Delta n_b = \frac{1}{1+K} \Delta n_h$$

如果选取足够大的闭环系统的开环增益 K ，即若 $K \gg 1$ ，则 $\Delta n_b \ll \Delta n_h$ 。因而闭环系统就可以大大提高对负载扰动的抗扰能力，降低稳态转速降，提高系统的控制精度。

但是比较稳态转速降应在 $n_{0b} = n_{0h}$ 的条件下进行，由式 (1-6) 和 (1-7) 可以看出，为了使上述条件满足，必须使

$$\frac{K_p K_s}{c_s \phi (1+K)} u_g = \frac{K_s}{c_s \phi} u_g'$$

若 $u_g = u_g'$ 就必有 $K_p = 1+K$ ，故当 K 很大时，就得有足够大的 K_p ，这就是闭环系统增加放大器的原因。或者，如不增加放大器，就得大大提高 u_g ，即在 $K_p = 1$ 时，就得使 $u_g = (1+K) u_g'$ 。这种关系，无非说明一个概念，即在采用了负反馈以后，所以能降低稳态转速降，是靠大大提高给定或控制电压来达到的。或者说，给定电压必须在克服负反馈电压后，仍能使控制装置保持足够的控制电压。当然，这里所举的例子是存在稳态偏差的系统，上述分析也只是针对这种情况说的，这类系统称为有差控制系统。也可以使系统在稳态时完全消除偏差，这类系统称为无差控制系统。无偏差控制的工作原理将在第三章中讨论。

在调速系统中，调速范围是重要的性能指标。可以证明，在额定转速相同的条件下，闭环系统的调速范围 D_b 与开环系统的调速范围 D_h 有下列关系

$$D_b = (1+K) D_h$$

在 $K \gg 1$ 时， $D_b \gg D_h$ 。

由此可见，由于采用了负反馈，闭环控制系统比开环控制系统有更高的稳态控制精度。不仅如此，负反馈还在减小系统参数变化和非线性对系统性能的影响，改进系统过渡过程的性能等方面起着很大的作用。因此，负反馈闭环控制方式是自动控制技术中的主要形式。当然，负反馈的存在也能引起系统的振荡的加强，使系统增加了复杂性。

在实际应用中，还存在局部闭环加开环的各种复合控制系统。本教材是讨论负反馈闭环控制系统的，但它的基本理论和基本概念是有普遍意义的。

§1-3 闭环控制系统的基本要求、组成和分类

一、闭环控制系统的基本要求

为了确定对闭环控制系统的要求，就要先了解系统工作的控制过程。由于实际系统一般都包含有惯性或贮能元件，因此当系统的给定或扰动输入发生变化时，系统的输出量不能立即按预定的要求达到对应值，而需要一个过渡过程。通常在控制系统中，把被控制量(输出)

和控制量(输入)的相对关系不随时间而变化的平衡状态称为系统的稳态或静态。把被控制量(输出)和控制量(输入)的相对关系随时间而变化的不平衡状态称为系统的暂态或动态。过渡过程就是系统由暂态转为稳态的过程,这些概念和电路课程中所讨论过的是完全一致的。

系统在暂态时,由于反馈的存在,不仅具有纠正偏差的能力,而且也会使系统具有振荡倾向。若控制器和受控对象之间,由于各元件特性、参数配合不当,系统有可能发生持续或发散振荡,这时系统就达不到稳态,称这种系统是不稳定的。因此,为了保证系统的正常工作,对系统的第一个要求是系统必须是稳定的。不稳定的系统既然无法正常工作,当然也谈不上系统的工作性能了。

如果系统是稳定的,那么系统的性能还可以分为两个方面来讨论。一个是系统在暂态中的性能,它将由一些具体指标来评价,称为暂态性能指标。一个是系统在稳态中的性能,主要是系统在稳态运行时的稳态精度。

总起来说,系统在暂态和稳态时的性能要由系统的稳定性、快速性、准确性、抗干扰性等方面来予以综合评价。具体的分析、计算将在第三章和第五章中详细讨论。

二、闭环控制系统的组成

闭环反馈控制系统,尽管实现控制系统的技术手段不同,复杂程度各异,但是从完成检测偏差、纠正偏差这个控制过程的基本要求和原理来看却是一致的,因此,各种系统在结构上是具有共性的,它总是由若干个、按性能作用来说是相同的部分所组成。图1-7画出了负反馈控制系统的基本结构。

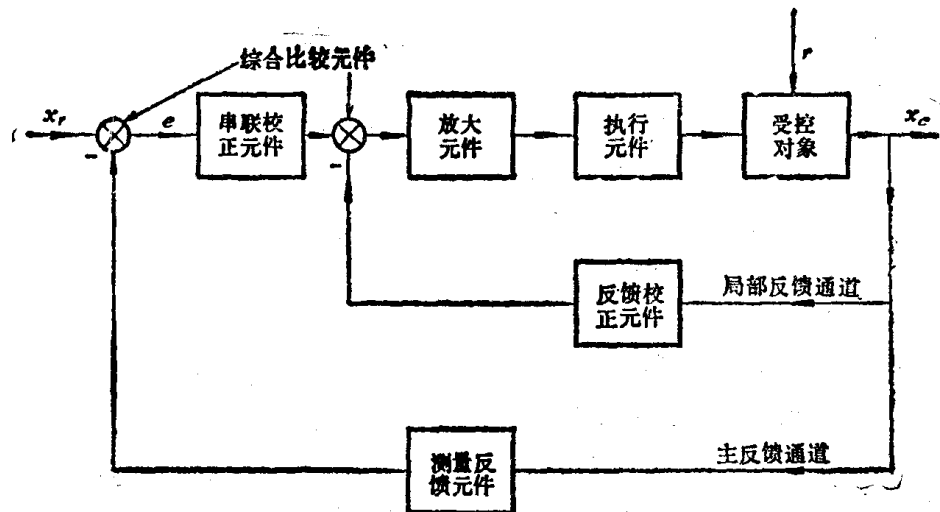


图1-7 负反馈控制系统的基本结构

图中各类元件的作用如下:

(1) 受控对象 它是要求实现自动控制的设备、仪器或生产过程。表征受控对象特征的物理量就是系统要予以控制的被控制量或输出。

(2) 测量元件 它的主要作用就是测量被控制量,并转换成与给定输入相同的物理量,以起反馈的作用。

(3) 比较元件 它的作用就是对给定输入和反馈进行比较以产生偏差信号。

(4) 放大元件 它的作用是把较弱的偏差信号进行放大或变换。

(5) 校正元件 它的作用是用来改善系统的性能。若串联在主通道中，称为串联校正元件。连接在反馈通道的，称为反馈（或并联）校正元件。

(6) 执行元件 它的作用就是按控制信号的要求来完成纠正偏差的执行工作。

当然，对一个具体控制系统，并不一定都要具备上述所有组成部分。例如可以没有局部反馈而只有一个主反馈通道的，这种系统称为单环的；有局部反馈的称为多环的。具体的物理元件有时也可能起到几个元件的作用，例如比较元件、放大元件、校正元件可能是一个物理元件。综合起来看、检测、比较、放大、校正、执行元件都是为实现自动控制而起作用，故如前面已提出过的，它们的组合统称为控制器，反馈系统也就是由控制器和受控对象所组成。

三、闭环控制系统的分类

闭环控制系统按其各自的特殊性可以进行分类。分类的方法很多，但这里就本书在今后讨论中有关的，并根据它们的工作原理、分析方法和功能的不同进行如下的分类。

1. 按给定输入特征来分

按给定输入特征也就是按系统功能应用的不同，可分为恒值系统、随动系统和程序控制系统。

(1) 恒值系统 在这种系统中，给定输入是恒值或变化很缓慢的。控制系统的基本任务就是在任何扰动下，使被控制量保持或按一定精度保持与给定对应的数值。在 § 1-2 中所举的转速负反馈调速系统的例子就是。在工业上应用很广的恒速、恒压、恒温等控制系统都属于这类。

(2) 随动系统 在这种系统中，给定输入是随机的随时间变化的函数。控制系统的基本任务就是确保或按一定精度确保输出跟随给定输入的变化，因此也称为跟踪系统。

如图 1-8 所示的为一简单的位置随动系统，这个系统的任务是控制电动机的位置，使其与输入装置的位置相对应，系统的工作原理如下：电位计 I、II 按要求设计得是完全一致的，即当它们在相同的位置时，由它们引出的电位是完全相等的。因此，如果输入装置使电位计 I 处在角度为 θ_i 的位置，电动机使电位计 II 处在角度为 θ_o 的位置，且正好使 $\theta_o = \theta_i$ 时，那么由电位计引

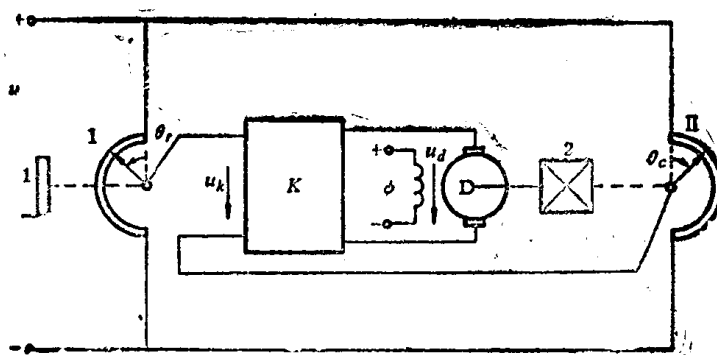


图1-8 随动系统举例示意

1—输入装置 K—放大器 2—减速传动装置 I—输入电位计
II—输出电位计

入放大器的电压 $u_k = 0$ ，经放大器输出到电动机的电压 $u_d = 0$ ，电动机将静止不动而保持 $\theta_o = \theta_i$ 的关系不变。今若改变输入装置的位置，使 θ_i 增加（或减小）到一个新的数值，这将使 $\theta_o \neq \theta_i$ 。由此而在放大器上输入电压 u_k ，并经放大在电动机两端建立电压 u_d 。设计系统时，应使电压 u_d 的极性，保证电动机向对应的 θ_o 增加（或减小）的方向旋转。这样，电动机将旋转直至 θ_o 重新和 θ_i 相等，从而使 $u_k = 0$ ， $u_d = 0$ ，电动机才能静止。由此可知，系统能够达到位置跟随的目的。

恒值系统和随动系统在检测偏差、消除偏差的基本原理上是一致的，因此在分析研究时

共性是主要的。但由于前者输入恒定，后者输入变化，系统功能应用不同，对系统的具体结构要求也就不同。这两种系统是古典控制理论的研究对象，在讨论时为方便而又不失一般性，常以恒值系统为例分析。

2. 按描述系统的数学表达式的不同而分

系统数学表达式不同引起分析方法的不同，这里所谓的数学表达式就是指表征系统的微分方程式。关于这个问题的详细讨论，将在第二章和第七章中进行，在此仅从分类上作一简单说明。按这种分法，控制系统可分为线性控制系统和非线性控制系统两类。

(1) 线性控制系统 如系统全部由线性元件组成，它的输入、输出关系可以用线性微分方程来描述的，就称为线性控制系统。

线性控制系统的特点是它具有叠加性和均匀性（或称齐次性）。]

系统的叠加性可用图

1-9的结构方框图来说明。图中 $x_{r1}(t)$ 、 $x_{r2}(t)$ 表输入函数， $x_c(t)$ 表输出函数。所谓叠加性就是几个输入同时作用于线性系统时的输出，等于每个输入单独作用于此系统时输出的总和，用数学式表示为：]

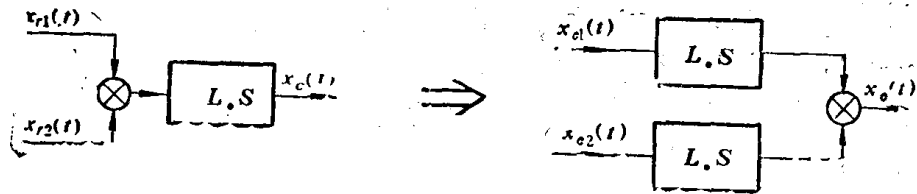


图1-9 线性系统叠加性示意方框图
L、S—线性系统

若 $x_{r1}(t) \rightarrow x_{c1}(t)$

$x_{r2}(t) \rightarrow x_{c2}(t)$

则线性系统必有

$$x_{r1}(t) + x_{r2}(t) \rightarrow x_{c1}(t) + x_{c2}(t)$$

系统的均匀性可用图

1-10的结构方框图的关系来说明。所谓均匀性就是线性系统的输入变化K倍时，相应的输出也变化K倍。用数字式表示为

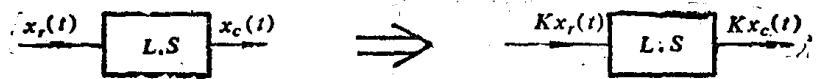


图1-10 线性系统均匀性示意方框图
L、S—线性系统

若 $x_r(t) \rightarrow x_c(t)$

则线性系统必有

$$Kx_r(t) \rightarrow Kx_c(t)$$

叠加性和均匀性是线性系统的充要条件。线性系统中每个元件也都必定是符合线性条件的。要注意，系统的线性概念和系统的输入输出的代数式是线性关系不是一个概念，例如

$$x_o(t) = ax_r(t) + b$$

输入输出的代数表达式是线性关系，但它们对应的系统不是线性系统。因为输入输出间不符合叠加性和均匀性的条件。证明可以自己作出。

线性系统一般可表达为如下的微分方程式

$$\begin{aligned}
 & a_0 \frac{d^n x_c(t)}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} x_c(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_{n-1} \frac{dx_c(t)}{dt} + a_n x_c(t) \\
 & = b_0 \frac{d^m x_r(t)}{dt^m} + b_1 \frac{d^{m-1} x_r(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_{m-1} \frac{dx_r(t)}{dt} + b_m x_r(t)
 \end{aligned}$$

如方程式中的所有系数是不随时间而变化的常数，则称此系统是线性定常系统或线性时不变系统。若系统有随时间变化的函数，则称系统是线性时变系统。本书只讨论定常系统。

(2) 非线性控制系统 若系统中存在非线性元件，它的输入、输出关系要用非线性微分方程来描述的，就称为非线性控制系统。

显然，只要系统中有一个元件是非线性的，整个系统就是非线性的。例如在电子技术课程中已讨论过的交流放大器，由于晶体管是非线性元件，故整个放大电路是非线性系统。

当然，实际的系统都或多或少地含有非线性因素。因此，在控制系统中的线性系统都是指以下两种情况的系统：一是系统中的非线性因素对系统的工作影响极小，以致可忽略不计。例如一般的电阻、电容等元件，它们的非线性因素对电路不产生明显的影响，因而可按线性电路分析讨论。另一是系统在一定的工作条件下，可用近似方法把非线性系统按线性系统处理，而这种处理引起的误差是在允许范围内的。例如在设置静态工作点、小信号输入时的晶体管放大电路，可近似为线性电路来分析计算。控制系统只是在不能满足这两种条件的情况下，才需要考虑系统按非线性方法处理。非线性系统的处理方法将在第七章中讨论。

3. 按控制系统中的信号性质来分

系统中的信号性质不同也引起对系统分析的方法不完全相同。由此可分为：

(1) 连续系统 如系统中各元件间传递输送的信号，都是时间的连续函数，则称此系统为连续系统，例如前面举过的调速系统等都是。连续系统的数学表达式就是微分方程式。连续系统也可分为线性连续系统和非线性连续系统。本书重点是分析讨论线性连续系统。

(2) 采样系统 如系统中至少有一个元件中的信号是不连续的，即是脉冲或数码信号时，则就称此系统为采样系统，采样系统也可称为离散系统或不连续系统，计算机控制系统就是采样系统的例子。采样系统的数学表达式为差分方程。当然采样系统也可以有线性、非线性之分。采样系统的表达形式和工作特点虽和连续系统不同，但基本原理和分析方法等却有一定的相似性。

小 结

控制系统的两种控制方式

开环控制 只有输入对输出的单向控制。具有结构简单、成本低，工作易稳定等优点，但不能实时控制扰动对输出的影响。

闭环控制 除了输入对输出的控制，输出经反馈也参预了控制，故能实现检测偏差、消除偏差的功能。闭环控制即反馈控制是控制理论的主要研究对象。

自动控制理论讨论的中心课题是：

1) 在系统结构和参数已知的条件下，分析计算系统的性能，即分析计算系统的稳定性、稳态特性和暂态特性。或说分析评价系统的稳定性、快速性、准确性、抗干扰性。