

# 自动控制原理

王鸿歌 吴礼民 宋宝佛 编著

14573/2-1

中南工业大学出版社

# 自动控制原理

王鸿歌 吴礼民 宋宝佛 编著

中南工业大学出版社

【湘】新登字 010 号

自动控制原理

王鸿歌 吴礼民 宋宝佛编著

责任编辑:谭平

\*

中南工业大学出版社出版发行  
湖南大学印刷厂印装  
湖南省新华书店经销

\*

开本:787×1092 1/16 印张:21.75 字数:533千字  
1995年8月第1版 1995年8月第1次印刷  
印数:0001—1100

\*

ISBN7-81020-764-4/TP·056

定价:19.50元

本书如有印装质量问题,请直接与生产厂家联系解决

本书是根据 1987 年中国有色金属总公司所属高等院校五专业质量考核会议自动化组讨论通过的“自动控制原理”课程基本要求编写的,可作为高等院校工业电气自动化专业、工业自动化仪表专业等专业的“自动控制原理”教材,也可供有关科研及工程技术人员参考,学时为 96~100 学时。

本书在编写过程中,依据该课程的基本要求,力求写成一本理论体系清晰、理论联系实际、物理概念清楚和数学描述适当的便于复习和自学的教材,书中每章后均附有习题,供使用者选做和练习。

本书 1、2、3 章由中南工业大学自控系吴礼民执笔,4、7 章由自控系王鸿歌执笔,5、6、8 章由自控系宋宝佛执笔。

该书编写过程中,得到自控系和教研室有关同志大力支持,仅此致谢。

限于编者水平,错误不当之处在所难免,敬请读者批评指正。

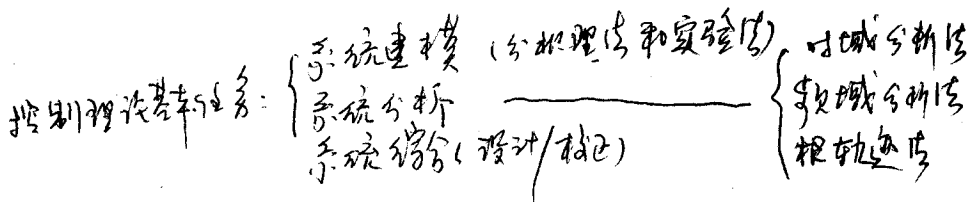
编者 1994 年 5 月

$$\frac{d f(x)}{d t} = \dot{f}$$

## 目 录

|                        |       |
|------------------------|-------|
| 第1章 自动控制的一般概念          | (1)   |
| 1.1 引言                 | (1)   |
| 1.2 开环控制与闭环控制          | (3)   |
| 1.3 自动控制系统分类及举例        | (9)   |
| 1.4 控制系统的组成及对控制系统的基本要求 | (14)  |
| 小 结                    | (19)  |
| 习 题                    | (20)  |
| 第2章 控制系统的数学模型          | (21)  |
| 2.1 引言                 | (21)  |
| 2.2 控制系统的运动方程          | (22)  |
| 2.3 非线性运动方程的线性化        | (35)  |
| 2.4 传递函数               | (41)  |
| 2.5 控制系统的方框图及其等效变换与化简  | (46)  |
| 2.6 信号流图               | (61)  |
| 2.7 控制系统的传递函数          | (70)  |
| 2.8 脉冲响应               | (72)  |
| 小 结                    | (76)  |
| 习 题                    | (77)  |
| 第3章 线性控制系统的时域分析        | (82)  |
| 3.1 典型输入信号             | (82)  |
| 3.2 一阶系统的时域分析          | (83)  |
| 3.3 二阶系统的时域分析          | (88)  |
| 3.4 高阶系统的时域分析          | (113) |
| 3.5 线性系统的稳定性与稳定判据      | (120) |
| 3.6 稳态误差               | (131) |
| 习 题                    | (145) |
| 第4章 根轨迹法               | (149) |
| 4.1 根轨迹法的基本概念          | (149) |
| 4.2 绘制根轨迹的一般规则         | (151) |
| 4.3 闭环零、极点分布与系统性能指标    | (164) |
| 4.4 根轨迹法在反馈系统分析中的应用    | (167) |
| 4.5 根轨迹法在反馈系统校正中的应用    | (169) |
| 习 题                    | (176) |
| 第5章 频率特性法              | (179) |
| 5.1 频率特性               | (179) |

|       |                          |       |
|-------|--------------------------|-------|
| 5.2   | 频率特性的图示方法 .....          | (181) |
| 5.3   | 典型环节的频率特性 .....          | (183) |
| 5.4   | 系统的开环频率特性 .....          | (188) |
| 5.5   | 频域稳定判据 .....             | (194) |
| 5.6   | 控制系统的相对稳定性 .....         | (204) |
| 5.7   | 开环系统 Bode 图的基本性质 .....   | (207) |
| 5.8   | 系统时域性能指标估算 .....         | (215) |
| 5.9   | 闭环频率特性绘制 .....           | (217) |
|       | 习 题 .....                | (222) |
| 第 6 章 | 控制系统的频率法校正 .....         | (227) |
| 6.1   | 概述 .....                 | (227) |
| 6.2   | 串联超前校正 .....             | (228) |
| 6.3   | 串联迟后校正 .....             | (233) |
| 6.4   | 串联迟后-超前校正 .....          | (236) |
| 6.5   | 反馈校正 .....               | (242) |
|       | 习 题 .....                | (247) |
| 第 7 章 | 非线性控制系统分析 .....          | (249) |
| 7.1   | 概述 .....                 | (249) |
| 7.2   | 描述函数法 .....              | (252) |
| 7.3   | 相平面分析 .....              | (264) |
|       | 习 题 .....                | (288) |
| 第 8 章 | 离散控制系统 .....             | (292) |
| 8.1   | 离散控制系统的基本概念 .....        | (292) |
| 8.2   | 信号采样和 Shannon 采样定理 ..... | (297) |
| 8.3   | 保持器 .....                | (301) |
| 8.4   | Z 变换 .....               | (303) |
| 8.5   | 离散系统的数学模型 .....          | (308) |
| 8.6   | 改进的 Z 变换 .....           | (314) |
| 8.7   | 离散系统的稳定性 .....           | (316) |
| 8.8   | 离散系统的稳态误差 .....          | (319) |
| 8.9   | 离散系统动态性能分析 .....         | (322) |
| 8.10  | 离散系统的校正 .....            | (326) |
|       | 习 题 .....                | (337) |



# 第 1 章

## 自动控制的一般概念

### 1.1 引言

自动控制技术和自动控制理论是人们在同自然界进行斗争中，在生产实践和科学实验活动中产生和发展起来的。几千年来，我国人民在自动控制技术方面有过卓越的贡献。早在两千年前，我国就发明了开环自动调节系统——指南车，北宋哲宗元祐初年(公元 1086——1089 年)，我国又发明了闭环自动调节系统——水运仪象台。直到 19 世纪，英国、俄国等资本主义国家内，才开始将自动控制技术应用到近代工业中去。此后，特别是第二次世界大战期间和战后时期以来，随着近代工业技术的发展，自动控制技术也获得了突飞猛进的发展。所有这些就是控制理论产生的客观基础。同时，随着其它学科如数学、力学、物理学等的发展，才有可能把自动控制技术中具有共同的普遍规律抽象出来，形成控制理论。因此，控制理论的形成，只是近几十年的事。控制论的诞生，一般认为是与美国科学家诺伯特·维纳的著作《控制论——关于在动物和机器中控制和通讯的科学》(1948 年)联系在一起的。我国著名科学家钱学森的著作《工程控制论》(1954 年)所阐明的基本理论和观点，奠定了工程控制论的理论基础。控制理论一旦形成，又反过来对自动控制技术产生了巨大的影响和推动作用。可以毫不夸张地说，现代科学技术的发展，当代所有的技术革命，都直接与控制理论联系在一起。

所谓自动控制是指在无人参与的情况下，通过控制器使被控制对象或过程自动地按照预定要求运行。导弹能够正确命中目标；航天飞行器在远离地球七千万公里之遥的火星实现准确的软着陆；人造卫星能按预定轨道运行并准确地返回地面；无人驾驶飞机按预定航迹自动飞行和降落；全面采用电子计算机控制和监视的核电站，在运行过程中能随电网负荷的变动而自动调整功率输出；在工业生产过程中，对诸如温度、压力、流量、湿度、频率等自动地维持恒定不变；乃至日常生活中使用的电冰箱、自动洗衣机、恒温电熨斗等等，都是自动控制技术在国民经济各个领域的具体应用：

由于各种各样的自动控制系统表现出不需要人直接参与，而能控制被控制对象的某些物理量按照预定的规律变化这一共同的根本特点，因而，自动控制在国民经济各部门广泛应用中表现出独特的优点和重要作用。

第一，自动控制通常比人工控制动作更迅速、更准确、更可靠，因而可以极大地提高劳动生产率和产品质量，改善劳动条件。对武器系统而言，则提高了武器系统的精度，改善了武器系统的性能，增强了武器系统的威力。

第二，对一切恶劣生产条件下(如剧毒、高温、真空、强幅射等恶劣环境条件)的生产设备和生产过程，以及导弹、火箭等人们无法介入的场合，无法采用人工控制，则自动控制成为唯一的、必不可少的控制手段。

第三，自动控制可以把人从乏味、呆板的、机械性重复劳动(包括体力劳动和脑力劳



动)下解放出来,去从事创造性劳动,去从事只有人才能完成的更复杂、更重要的工作。当自动控制深入到工农业生产、交通运输、武器系统、服务性劳动,以及经济活动的各个领域,当电子计算机和机器智能等自动控制手段在人们活动的各个领域把人装备起来时,人将成为更有作为、更高超的人!这是正在为建设有中国特色的社会主义、为实现四化而努力奋斗的中国科技工作者的伟大目标和光荣任务。随着科学技术的发展,随着自动控制技术与控制理论的日益完善,这一目标正在逐步变为必将变成现实。

《自动控制原理》是一门技术科学。它是控制工程技术的总结,即从工程技术提炼到工程技术的理论,即技术科学。20世纪40年代末正式诞生的控制论,已成功地应用于工程系统、生物系统、经济系统、乃至社会系统,因而派生出了工程控制论、生物控制论、经济控制论、社会控制论等技术科学。从这个意义上说,《自动控制原理》是工程控制论中最成熟的基本理论部分、原理部分。自动控制原理研究的对象是自动控制系统。研究的中心问题,是自动控制系统在控制过程中的性能问题,或者说是自动控制系统的“精度”问题。

根据自动控制技术与自动控制理论发展的不同历史阶段,自动控制原理的内容相应地可分为“古典控制理论”与“现代控制理论”两大部分。

古典控制理论的内容,是以传递函数为基础,主要研究单输入-单输出线性定常控制系统的分析和设计问题。这部分理论形成于本世纪50年代,已在恒值控制系统、随动系统分析与设计等工程实践中得到广泛应用,经受了实践的考验,理论已经成熟。

现代控制理论产生于50年代末、60年代初,在古典控制理论的基础上,随着航天工程、武器系统、复杂的现代工业过程控制等工程实践的需要,以及科学技术的发展,特别是电子计算机技术和现代应用数学研究的发展,现代控制理论得以迅速发展。现代控制理论以状态空间法为基础,主要研究多输入-多输出、时变、非线性、高精度、高效能等控制系统的分析和设计问题。最优控制、最佳滤波、系统辨识、自适应控制等理论都是这一领域研究的主要课题。

古典控制理论与现代控制理论相互有联系,又有很大区别,两者各有其优点和局限性。古典控制理论的局限性表现在:限于线性定常系统,限于单输入-单输出系统,综合系统时采用试探法,不可能一次得出满意的结果。现代控制理论在数学工具、理论上突破了古典控制理论的局限性,解决了古典控制理论所不能解决的许多工程实践问题和理论问题,且在理论上更严密。但现代控制理论也有其局限性,比如它依赖于对系统精确的数学描述方法,当实际系统信息不完全时,就不便于应用。这时由于传递函数方法与经验密切联系,应用起来反而有其便利之处。从工程应用的观点来看,两者各有优点和局限性,因而现代控制理论不能取代古典控制理论。在工程应用中,应把两种方法结合起来使用,才能不断推动自动控制理论的应用和发展。

根据教学大纲的要求,本书主要介绍成熟的古典控制理论,阐明自动控制的基本概念,以传递函数为基础,主要研究单输入-单输出线性定常反馈控制系统分析与综合的一般理论和方法,在阐述线性连续系统理论的基础上,介绍非线性系统和采样系统的分析方法。

如前所述,自动控制原理是一门技术科学,而不是工程技术。理论与实践既有联系,又有区别,学习自动控制原理时要特别注意以下几点:

第一,自动控制理论毕竟是一般性理论,如果没有工程技术的实际知识和实践经验,就缺少完全理解和彻底掌握自动控制理论的基础,因而就不能应用一般理论去解决工程技术中的实际问题。因此,学习自动控制理论的读者,至少应该熟悉一个具体领域的工程实际问题,



才能对这一学科中的基本命题、方法和结论有深刻的理解。

第二,一种理论是否正确,是否有生命力,是否值得深入地去研究它,不仅要看它的推理是否正确,或者说从形式逻辑上看它是否成立,更重要的是看它的前提是否正确,命题本身是否反映了工程实践中的客观需要,是否抓住了主要矛盾。工程实践是检验任何技术科学理论的最后标准。所以我们学习自动控制理论时,首先要注意的是某一理论的前提,命题的客观含义和所得结论对工程实践的意义。

第三,自动控制原理作为研究自动控制系统分析与综合的一般理论,它的理论性很强,系统性很强,前后各部分内容之间联系紧密。因此学习过程中,要不断复习前面学过的部分,注意前后内容间的联系,连贯起来进行思考,才能从整体上正确掌握有关理论。

实践是检验真理的唯一标准。实践早已证明,自动控制理论在各领域工程实践中发挥了重要作用,并将在我国四化建设中发挥越来越大的作用。为了适应这一形势,从1977年以来,国内电类专业、非电类专业大学本科生、专科生、硕士研究生及大多数工程技术人员和科学工作者,都把自动控制原理作为必修课程。而工业自动化专业,则把它作为必修的专业主干课程,予以高度重视。只要高度重视和认真掌握上述学习方法,我们就一定能掌握当代工程技术人员和科学工作者知识结构中必不可少的这一基础知识——自动控制理论。

## 1.2 开环控制与闭环控制

我们通过举例介绍有关自动控制与自动控制系统的基本概念及有关专业术语,同时,介绍自动控制的两种基本方式——开环控制与闭环控制,并对这两种控制方式进行比较。

我们先来研究一个简单的开环直流电动机转速控制系统,其原理示意图如图1.1所示。

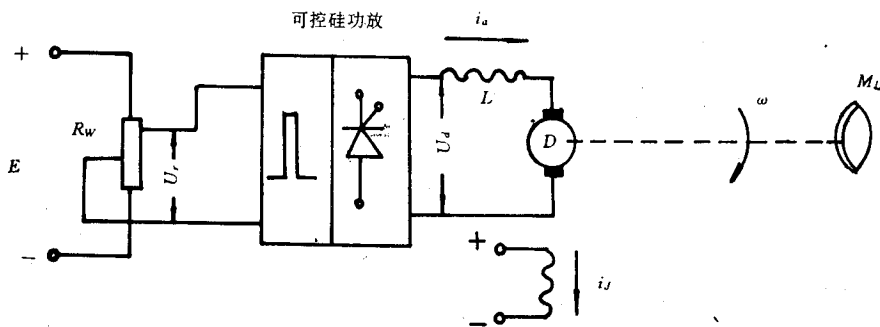


图 1.1 电动机的开环控制

$M_L$ —负载力矩  $\omega$ —负载角速度  $U_a$ —电动机电枢电压

$i_a$ —电动机电枢电流  $i_f$ —电动机励磁电流  $U_r$ —电位器给定电压

该控制系统是这样组成的:一台带负载的直流电动机  $D$ , 其电枢电压来自可控硅功率放大器的整流输出  $U_a$ , 而该整流输出电压的大小由给定电位器的  $R_w$  的给定电压  $U_r$  来调节。这个系统的工作原理是, 如果要求负载以某一恒定转速运转, 只要电位器  $R_w$  给出一个相应于该恒定转速的给定电压  $U_r$ , 可控硅功率放大器的触发电路便产生一串与电压  $U_r$  对应的、具有一定相位的触发脉冲去控制可控硅的导通角, 从而控制可控硅功率放大器的输出电压  $U_a$  (即电枢电压  $U_a$ )。由于电动机  $D$  的励磁绕组加的是恒定励磁电流  $i_f$ , 因此, 对应一定的电枢电压  $U_a$ , 电动机便以相应的角速度  $\omega$  带动负载运转。当要求负载以另一恒定速度运转时, 只要相应地调节给定电压  $U_r$  值即可。

“系统”是控制理论中的一个重要概念。系统的定义是：由相互制约的各个部分组织成的、具有一定功能（达到一定目的或完成一定任务）的一个整体。这个定义指出了系统的三个基本特征：（1）整体性；（2）相关性；（3）目的性。为了进行控制而构成的系统叫做控制系统。图 1.1 所示系统就是要求负载以某一恒定转速运转的、由相互关联的给定电位器、可控硅功率放大器、带载直流电动机等部件组成的控制系统。

“系统”是一个很广泛的概念，包括我们所感兴趣的可以作为一个有机整体来研究的所有事物。“系统”又是一个相对的概念，由于研究的目的不同，对某一组元素的总体，有时被当作一个系统，有时也可以把总体中的一部分当作一个系统，只要它符合系统的三个特征即可。由总体中的一部分构成的系统，称为子系统。例如一部自动机器是一个系统，一条自动生产线是一个系统，一座自动化工厂也是一个系统；一个企业是个系统，一个企业体系是个系统，一个经济协作区是个系统，一个社会组织也是一个系统；有小系统，有大系统，也有把一个国家作为对象的巨系统。有工程的系统，有生物体的系统，也有既非工程、又非生物的系统——经济系统、社会系统。本课程仅研究工程系统。

所谓自动控制系统，是指不需要人直接参与，利用控制装置使被控制对象自动地按预定要求运行的整个系统。它一般由控制装置和被控制对象两大部分组成。被控制对象（简称被控对象或对象）是指要求实现自动控制的机器、设备、生产过程等。例如，上例中的带载电动机，机床、锅炉、飞机、导弹、化工生产过程等。控制装置（简称控制器）是对被控对象施加适当的控制作用来完成要求的任务的设备的组合。

在图 1.1 电动机转速控制系统中，带载电动机是要求实现自动控制的设备，就是该系统的被控制对象。该系统中除了被控对象之外其余各部分的组合（包括给定电位器、可控硅功率放大器等的组合）叫做控制器。于是该控制系统（以后简称系统）可用系统方框图图 1.2 表示。

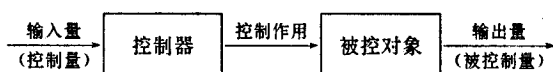


图 1.2 控制系统方框图

图中，控制器和被控对象分别用方框表示。系统中人们感兴趣的物理量，如转速（其他如温度、流量、压力、电流、电压等）称为信号，信号的传递方向用箭头表示（箭头的方向表示了系统各部分之间相互制约的联系）。进入方框的箭头表示输入量（输入信号）。离开方框的箭头表示输出量（输出信号）。在上例电动机转速控制系统中，把控制电动机转速的给定电压  $U$ ，称为系统的控制量，是系统输入量之一。而需要控制的负载角速度  $\omega$  称为系统的被控制量，就是系统的输出量。从控制的观点来看，被控制量是一个极重要的物理量。因为控制的目的是要向着对人们有利的方向改变系统的运动规律，因此表征系统运动状态的物理参量——输出量（或状态参量）就是被控制量。自动控制的任务就是控制一个系统的某些物理量（这里就是被控制量）按照人们指定的规律变化。因此被控制量的变化规律在控制过程中要加以严格控制，使之向着对人们有利的方向变化，以完成既定的控制任务。被控制量（系统输出量）的变化规律，反映了控制系统的运动规律，反映了系统在控制过程中的性能，是我们研究的重点。而控制量则是用来改变系统运动规律的物理参量，它代表了系统要求完成的控制任务，即它控制被控制量按要求的规律变化。控制量的设定值通常与被控制量的预期值相对应。从控制论的观点来看，世界是由能量、物质、信息这三种成分组成的。自动控制系统中的控制作用，以及系统在各部分之间的相互联系、相互作用，都是以一定的物质形式或能量形式出现、用以传递信息的载体——信号来联系的，这类联系的主导因素是信息，即关于系统及各组成部分的状态的消息、情报或数据。我们重视

的是信号中所包含的信息，而信息的物质形式或能量形式是次要的。从这个意义上说，控制量（控制信号）包含了系统所要执行的预期任务的信息；而被控制量（被控制信号）包含了系统实际完成任务的信息。

自动控制系统的性能，在很大程度上取决于控制器为了产生控制作用所接受的信息来源。这个信息来源，除了来自系统外部的控制量（控制输入信号）以外，还可能来自系统输出端的被控制量。把从系统输出端的被控制量获得的信息，通过适当的方式（通过某种中间环节，或称反馈环节）再回送到系统的输入端的信息传送方法称为反馈。传送反馈信息的载体称为反馈信号。换句话说，自动控制系统的性能，在很大程度上取决于是否采用反馈。因此，自动控制的基本方式（自动控制系统的结构）也就按是否有反馈而分为两大类：开环控制与闭环控制。

从图 1.1 所示系统可以看出，该控制系统只是根据给定的控制量进行控制，而被控制量在全部控制过程中对控制是不产生任何影响。因而对于被控制量相对其预期值可能出现的偏差，该系统不具备修正能力。显然属于开环系统。

### 1. 开环控制

凡被控制量只受控于控制量，而对控制量不能反施影响的一类系统称为开环控制系统。换句话说，一个控制系统，在其控制器的信息来源中，只有控制量的信息，而不包含来自被控制量的反馈信息，则称为开环控制系统。其方框图如图 1.2 所示。

从图 1.2 可以清晰地看出，对于一个确定的输入量，总存在与之对应的描述系统确定工作状态的输出量。输出量的控制精度将取决于系统中各元件、部件的参数稳定性。因此，要使开环系统具有规定的控制精度，系统各元件、部件的参数值在工作过程中必须严格保持在事先校准的量值上。

开环控制的根本弱点在于，对于未知扰动所造成的偏差不具备修正能力。定义妨碍控制量对被控制量按预期要求（期望值）进行正常控制的物理量为扰动量。凡是能使输出量偏离预期要求（输出量的期望值）的因素，都称为扰动（或干扰）。扰动来自系统内部称为内扰；扰动来自系统外部则称为外扰。来自系统外部的扰动量也是系统的一种输入量，称为扰动输入量，以区别于输入量之一的控制量。

在上例电动机转速开环控制系统中，带载电动机在运转过程中有很多干扰因素会引起系统实际输出转速（被控制量）偏离其期望值，如负载力矩变化，电源电压波动，元件参数的漂移，对被控制是有重大影响的环境因素的变化等，都将在被控制量（系统实际输出转速）与由控制量决定的期望转速之间引起偏差，而无法达到保持带载电动机以某一恒定转速（期望转速）运转的目的。因此，当扰动量存在时，要保持系统实际输出转速等于或近似等于期望转速，完成控制任务，就必须采取措施抵消或削弱扰动因素的影响。这种消除扰动因素对系统的影响从而保持被控制量按预期要求变化的过程，称为控制过程。对于图 1.1 所示的开环系统，这种控制过程可以通过人的参与来完成。如根据电动机转轴上的实际转速与期望转速间的偏差的大小，通过人手动调整电位器  $R_w$  的控制电压  $U_c$  的量值，以消除转速偏差。具体调整过程是，若扰动因素使实际转速超过期望转速，则调整电位器降低控制电压  $U_c$ ，使实际转速降低至期望转速；若实际转速低于期望转速，则需调整电位器增大控制电压，以使实际转速升高到期望值。在上述控制过程中，人完成了使系统输出端的被控制量通过适当方式影响控制量的反馈作用。也就是通过人眼观察到实际转速的变化，并通过大脑与期望转速进行比较、判断，然后按正确方向手动调整电位器的控制电压，使电动机的实际转速恢复到期望

值上来。这样，通过人的反馈控制作用，把开环系统输出端的被控制量及其输入端的控制量联系起来，从而消除由于扰动因素在输出端造成的使被控制量偏离其期望值的偏差，实现了保持被控制量按预期要求变化的任务。这种利用反馈产生的偏差所取得的控制作用去消除偏差的控制原理，称为反馈控制原理。这种通过人的反馈控制作用，基于反馈控制原理组成的系统，可以称为人工闭环控制系统。图 1.3 是人工闭环控制系统的方框图。在该方框图中，如果用相应的仪器、设备来取代人的工作，则该人工闭环控制系统就可以变成自动闭环控制系统，简称闭环控制系统。

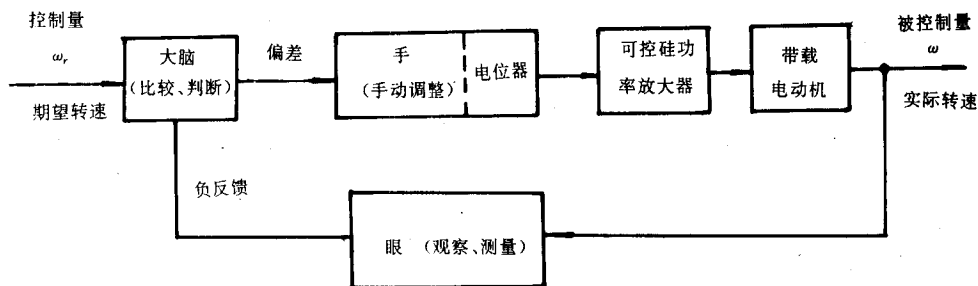


图 1.3 人工闭环控制系统方框图

## 2. 闭环控制

凡是系统的被控制量对控制作用有直接影响的系统，都称为闭环控制系统，或称为反馈控制系统。换句话说，一个控制系统在其控制器的信息来源中，包含有来自被控制量的反馈信息，则称该控制系统为闭环控制系统。其控制过程称为闭环控制或反馈控制。在闭环控制系统中，需要对被控制量不断地进行测量、变换，并反馈到系统的控制输入端与控制量进行比较，产生偏差信号，实现按偏差控制，所以，系统的闭环（反馈）控制方式又叫做按偏差控制。反馈控制是自动控制系统中最基本的控制方式，在工程中获得了广泛的应用。本书主要研究反馈控制系统。

我们仍以上面列举的电动机转速控制系统为例，说明通过仪器、设备代替人的作用，完成上述反馈控制任务的问题，以便对反馈控制获得更深入的认识。

我们用测速发电机、比较电路、伺服电机和减速器等仪器设备，代替人工反馈系统中人的观察、比较判断、手动调整等工作，即可组成一个无人参与下自动控制电动机转速、并保持转速恒定的自动闭环控制系统，如图 1.4 所示。

图 1.4 中，测速发电机（CF）完成测量实际转速（被控制量）并将转速变换为相应电压的任务，其输出电压  $U_{CF}$  正比于负载角速度  $\omega$  (rad/s)，即  $U_{CF} = K_c \cdot \omega$ 。象测速发电机这类元件称为测量元件。它代替了人眼观测实际转速  $n$  ( $n = \frac{60\omega}{2\pi}$  rev/min) 的功能。电压  $U_r$  为给定的基准电压，其值与电动机转速的期望值  $\omega_r$  相对应，是系统的控制量； $U_r$  有时也称给定值，设定值，整定量等。 $U_r$  是系统的输入量之一，为了与扰动输入量相区别，称为控制输入量。在不会发生歧义的情况下，简称输入量。我们把测速发电机输出电压  $U_{CF}$  反馈到系统输入端并与给定电压（控制器） $U_r$  在比较电路中进行比较。由于给定电压  $U_r$  就是系统的控制量，而测速发电机输出电压  $U_{CF}$  ( $U_{CF} = K_c \cdot \omega = k_c \cdot \frac{2\pi n}{60}$ ) 是与被控制量（负载转速  $n$  或角速度  $\omega$ ）成比例的反馈量，因此反馈量  $U_{CF}$  就把被控制量的信息反馈到了系统输入端，并与控制量  $U_r$  进行比较，

比较后得到的电压差  $\Delta U = U_r - U_{CF}$  称为偏差。如果偏差不为零（即  $\Delta U \neq 0$ ），则意味着电动机转速（被控制量）在扰动作用下偏离其期望值。当实际转速高于期望转速时（ $U_{CF} > U_r$ ）， $\Delta U$  是一种极性；当实际转速低于期望转速时（ $U_{CF} < U_r$ ）， $\Delta U$  是另一种极性。这个过程，类似于人眼连续观测负载转速（被控制量），把这个信息传递给大脑（反馈信息），并与期望转速进行比较，判断实际转速与期望转速间是否存在偏差及偏差的极性大小。这是构成闭环控制（反馈控制）最关键的一点。

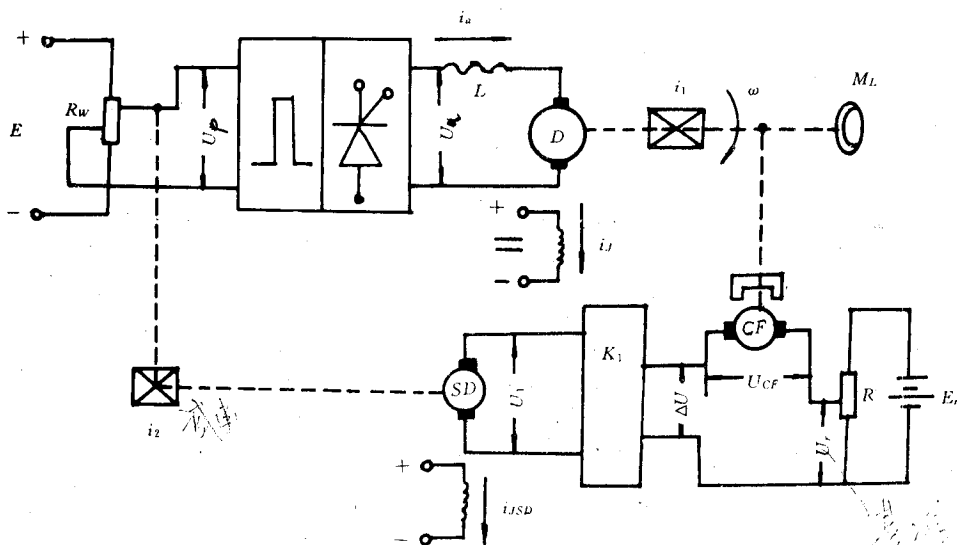


图 1.4 电动机转速的自动控制

接下来是把偏差  $\Delta U$  与伺服电机  $SD$  联系直来，伺服电机按照偏差  $\Delta U$  的极性和大小而动作，向着消除（或减小）被控制量与期望值之间偏差的方向产生正确的控制作用。通常偏差很小，电压差  $\Delta U$  很小，直接用它驱动伺服电机  $SD$  是不行的，因为  $\Delta U$  所提供的电压幅值及功率都不足以驱动伺服电机。从控制的角度看，重要的是电压差  $\Delta U$  中所包含的偏差信息，而不是它所包含能量。即我们要求的是伺服电机按照  $\Delta U$  的极性大小所提供的信息动作，产生正确的控制作用，而不一定要用  $\Delta U$  本身向伺服电机供电。根据这个观点，可以在  $\Delta U$  与伺服电机之间加一个放大器（包括电压放大级和功率放大级）。图 1.4 中的  $K_1$  代表放大器，它的输出电压的极性、大小随着偏差电压  $\Delta U$  的极性、大小而变化，完全包含了偏差的信息，并进行了电压放大，而且它的输出功率足以带动伺服电机。这样伺服电机仍按照偏差的极性、大小来转动，产生角位移，经减速器  $i_2$  移动电位器  $R_w$  的滑臂，改变电压  $U_p$  的量值。当带载电动机实际转速高于期望转速，则伺服电机移动电位器滑臂降低控制电压  $U_p$ （可使转速降至期望转速）；当实际转速低于期望转速，则伺服电机移动电位器滑臂升高控制电压  $U_p$ （以使转速升高到期望转速）。这样就获得了消除偏差的正确控制作用。这个过程类似于人的大脑判断了偏差的极性，通过手动调整电位器的过程。值得指出的是，反馈控制的目的是要消除（或减小）被控制量与其期望值之间的偏差。为此，需要测量被控制量得到反馈量，并将它反馈到系统的输入端与控制量相减（负反馈）得到偏差。我们通常把反馈量与控制量比较的过程称为反馈；把反馈量与控制量相减的比较方式称为负反馈；反之则称为正反馈。为了得到偏差，必须采用负反馈。此外，我们强调指出，根据偏差产生控制作用时，正确整定控制作用的方

向是十分重要的。正确的控制作用必须向着消除偏差的方向变化。在本例中，当被控制量高于其期望值时，伺服电机移动电位器滑臂的方向，必须整定成使被控制量降低；反之，当被控制量低于其期望值时，则必须整定成使被控制量升高。这样才能达到反馈控制的目的。所以，只有当反馈量与控制量相减得到偏差，同时据此生成正确的控制作用时，才能真正实现负反馈的功能，达到反馈控制消除偏差的目的。否则，生成的控制作用不正确，仍会出现正反馈的效果。在上述正确控制作用  $U_P$  的控制下，可控硅功率放大器的输出电压  $U_d$  的大小随之变化，进而使带载电动机  $SD$  的转速随之变化，直到消除偏差  $\Delta U$  ( $\Delta U=0$ )，电动机转速再度恢复到期望值为止。上述电动机转速的控制过程是在无人参与下自动进行的。一般定义毋需人直接参与，而使被控制量自动地按预定规律变化的控制过程为自动控制。

从上例分析可以看出，为了通过负反馈对我们感兴趣的被控制量（如上例中的电动机转速）进行自动控制，需对控制系统提出下列要求：

(1) 必须对被控制量进行测量，并将测量值（反馈量）反馈到系统的输入端与控制量相减（即负反馈）得到偏差；

(2) 对偏差进行适当放大、变换，以产生对被控对象（如上例的带载电动机）的正确控制作用；

(3) 上述控制作用应使被控制量向着消除偏差、保持期望值的方向变化。

图 1.4 电动机转速自动控制系统就是符合上述要求的反馈控制系统的例子，其方框图如图 1.5 所示。图中  $r(t)$  代表控制量或控制信号； $c(t)$  代表被控制量或被控制信号； $\epsilon(t)$  代表偏差或偏差信号； $f(t)$  代表扰动量或扰动信号；符号  $\otimes$  代表信号比较元件，称为比较点（或相加点），其中“ $-$ ”号表示对反馈信号  $Y(t)$  取负值，即负反馈，比较元件的输出是偏差信号。方框图中箭头指示方向代表信号流通方向，箭头进入方框的一侧为方框的输入端，箭头离开方框的一侧为方框输出端。对构成系统的每一个方框来说，箭头指示方向是不变的，这说明信号在控制系统中是单方向流通的，不可逆的。偏差信号至被控制信号之间的通路称前向通道；被控信号经测量装置形成反馈信号并反馈到系统输入端的通路称主反馈通道。由于控制系统中存在一个主反馈通道，因此，把整个控制系统称为反馈控制系统是很恰当的。

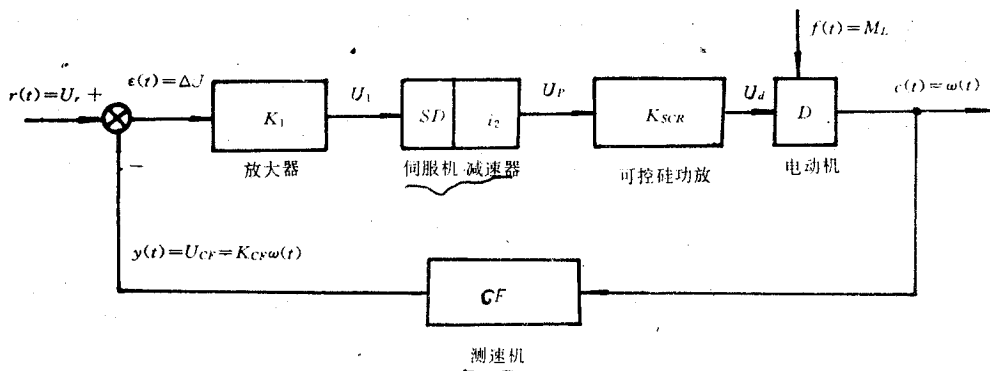


图 1.5 反馈控制系统方框图

从图 1.5 可以清楚、形象地看出，控制信号（控制量）沿着前向通道单方向流过去控制被控制量，而被控制量又被反馈到输入端通过负反馈产生偏差，继而偏差再经过适当变换去控制被控制量，于是整个控制系统就形成了一个信号流通的闭合环路，因而称为闭环控制系统，即反馈控制系统。

综上所述,利用负反馈产生的偏差,经适当变换取得正确的控制作用去消除偏差的控制原理称为反馈控制原理,又可称为按偏差控制原理。根据该原理的要求组成的控制系统即为反馈控制系统,或闭环控制系统。反馈控制系统的一个突出特点是,不管什么扰动因素引起被控制量偏离其期望值而产生偏差时,一定会产生一个相应的控制作用,而该控制作用将去消除偏差,使被控制量重新恢复到期望值上去。这里虽然没有直接测取各种扰动因素本身的信息,但是通过获取被控制量与其期望值之间偏差的信息,就间接获得了扰动对被控制量影响的信息,这是最重要的信息。因此,从反馈控制的原理上说,反馈控制系统就具有抑制任何内外扰动对被控制量影响的能力。闭环控制是自动控制系统最基本的控制方式,在工程中获得了广泛的应用。

开环控制与闭环控制的比较。

根据上述开环控制与闭环控制的基本原理,从工程实践的观点,对两者的性能、设计建造、应用范围等方面的特点,作如下简要比较评述。

在闭环控制系统中,由于采用反馈控制原理(或按偏差控制原理),因而被控制量对外部和内部扰动都不甚敏感,即有很强抗干扰能力,其中包括对系统内部元件参数变化所造成的内扰也有很强的抑制能力,这启发我们有可能采用精度不高、成本低廉的元件来构成控制精度较高的系统。而对开环控制系统来说,由于不存在被控制量到控制量的负反馈,所以对内、外干扰给被控制量造成的误差不具备自行修正的能力。因此,开环系统的控制精度便完全由采用高精度元件和有效的抗干扰措施来保证。

从系统稳定性的观点出发,开环控制系统由于不存在反馈,只要被控对象的自稳定能力好,开环系统的稳定性问题容易解决,因而不是十分重要的问题。因此,开环系统设计、建造较容易。且不必对被控制量进行测量、反馈,因而结构简单。但对闭环控制系统来说,由于存在反馈,作为含有贮能元件的动态系统,如果设计、建造、调试不当,系统参数选择、调整不当,被控制量在动态过程中很可能出现等幅振荡、变幅振荡,甚至“发散”等问题,因此稳定性问题,始终是闭环控制系统设计、建造、调试中的重要课题之一。

应当指出,开环控制系统具有结构简单、工作稳定、容易设计建造等优点。当系统控制量的变化规律能预先知道,并且系统中可能出现的干扰预先确知且能采取有效的抗干扰措施时,采用开环控制具有一定的优越性,特别是被控制量难以直接测量时,可以考虑采用开环控制方案。如自动洗衣机、自动售货机、自动车床、程序控制机床、加工模具的线切割机、自动化包装流水线、产品生产自动线、采用时基信号的交通管制系统等,都是开环控制系统的实例。只有当系统的扰动量无法事先预计的情况下,闭环控制方案才具有明显的优越性。通常一个正确设计的反馈系统比开环系统工作得更好,因此,反馈系统是自动控制中最基本的控制方式,在工程中获得了广泛的应用。如自动恒温电熨斗、各种炉温自动控制系统、电动机转速控制系统、各种用途的随动系统(X-Y自动记录仪、磁头伺服系统、仪表随动系统、火炮随动系统等)、雷达跟踪系统、导弹制导系统等等。

如果要求实现复杂且精度较高的控制任务,可在闭环控制系统结构的基础上,将开环控制与闭环控制适当结合起来,充分发挥两者的优点,组成一个比较经济且性能较好的复合控制系统。

### 1.3 自动控制系统分类及举例

随着自动控制技术的发展,出现了各种各样的控制系统。按照不同的观点描述自动控制



系统的特点时,其分类方法也有多种。常用的分类方法有三种:按系统数学模型的形式分类;按系统输入信号变化规律分类;按系统传递信号的性质分类。我们主要介绍这三种分类方法,以便初步了解系统动态性能、分析和设计方法上的特点。此外,还有其它分类方法,如按照组成系统的元件类型,可分类电气控制系统、液压控制系统、气动控制系统;按系统的功用分类,则有温度控制系统、压力控制系统、水位控制系统等等。对一个具体系统而言,为了全面反馈该系统的特点,其名称常常是这些分类的组合。

### 1. 按系统数学模型的形式分类

#### (1) 线性系统和非线性系统

在控制理论中,系统的动态特性是用微分方程来描述的。微分方程分为线性和非线性微分方程两类。凡是能够用线性微分方程描述其动态特性的系统,称为线性系统。而其动态特性必须用非线性微分方程描述的系统,称为非线性系统。通常当系统中含有非线性元件时,描述这类系统的微分方程都是非线性的,即非线性系统。

#### (2) 定常系统和时变系统

描述系统动态特性的微分方程中,其所有系数都为常数,即参量不随时间而变化的系统,称为定常系统。如果系统微分方程的系数是时间的函数,则称之为时变系统。

例如,当系统的微分方程写成下列形式:

$$\frac{dY}{dt} + kY = 0 \quad (1.1)$$

$k$  是一个实常数,可以叫做弹簧常数。这是一个常系数线性微分方程所描述的系统,可称之为线性定常系统。

假如式(1.1)微分方程的系数  $k$  是系统中某个可变化参数  $v$  的函数,  $v=at$ ,  $v$  表示速度,  $a$  表示不变的加速度,则弹簧系数  $k$  就是速度  $v=at$  的函数。因此,微分方程就写成以下形式:

$$\frac{dY}{dt} + k(at)Y = 0 \quad (1.2)$$

这个微分方程的系数  $k(at)$  是时间的函数,是随着时间而变化的,微分方程是变系数线性微分方程,它所描述的系统则可称为时变系统。

#### (3) 集中参数系统和分布参数系统

我们常见的系统都是由集中参数元件(例如电阻、电容、电感、质量、弹簧、阻尼器等)组成,这类系统的动态特性只涉及时间  $t$  这样一个唯一的自变量,系统中各变量不随空间位置而变化,即这类系统的动态特性可以用常微分方程描述,这类系统称为集中参数系统。

如果系统中存在着分布参数元件(例如传输导线、天线、作为温度场研究的加温炉等等),描述系统的自变量不仅涉及时间变量,还涉及空间变量,就要用偏微分方程来描述这类系统,这可称为分布参数系统。显然,分布参数系统的分析设计比集中参数系统困难得多,在能够简化的情况下,通常都把分布参数系统简化成集中参数系统来研究,只有在不能简化的情况下,才作为分布参数系统研究。

古典控制理论研究的主要对象是线性定常集中参数系统。本书第7章将介绍非线性系统的分析设计问题。非线性系统不具备线性系统的叠加性和齐次性,即不能应用叠加原理,非线性微分方程求解很困难,因此,目前,还没有形成线性控制理论那样普遍有效的非线性系统分析设计方法。在工程上,多数非线性微分方程在一定条件下经过数学处理可转化为线性微分方程,这种方法称为非线性微分方程的线性化。通过线性化处理得到的线性(线性化)微

分方程所描述的系统，可以用线性控制理论分析、设计。

## 2. 按系统输入信号变化规律分类

在控制工程中广泛应用的反馈控制系统，往往要求被控制量保持为恒值或按某一规律变化或跟踪某一未知的时间变化信号，因此，根据控制输入信号的变化规律的不同进行分类，分别称为恒值控制系统、程序控制系统和随动系统。这种分类方法很好地反映了反馈控制系统中这三类系统在动态性能、运动规律和分析设计方法上的各自不同的特点，所以在工程界广泛采用这种分类方法。古典控制理论就是在这三类控制系统的分析、设计、研究中发展、成熟起来的，也可以说古典控制理论是以这三类系统为其工程背景的。因此在学习古典控制理论过程中，自觉联系这三类系统的工程实际问题，才能对这一学科中的基本命题、方法、结论有更深刻的理解。

### (1) 恒值控制系统

反馈控制系统的控制量为常值，从而要求其被控制量也保持为相应的常值，则称这类反馈控制系统为恒值控制系统。1.2节中举例分析的基于反馈控制原理建立的电动机转速控制系统就是典型的恒值控制系统，它的任务是维持电动机转速恒定。此外如恒温控制系统，其任务是保持被控制对象的温度等于给定的温度；液面控制系统要求在运行中容器的液面高度保持不变；发电机的电压控制系统，在发电机正常运行时，端电压应保持等于或近于期望的端电压。总之，这类控制系统的任务是维持被控制量为给定的常值。由于控制量取常值，因此，使被控制量偏离其期望值的主要因素为扰动量的存在。所以克服扰动的影响，在发生扰动时尽快使被控制量恢复到期望值，就成为这类系统设计时的主要矛盾。

### (2) 程序控制系统

控制量的变化规律是预先已知的、确定的时间函数，这类控制系统称为程序控制系统。通常预先将控制量的变化规律编制成程序，记录在程序载体（如凸轮、靠模、程序鼓、磁带、穿孔卡、穿孔带等等）上，装进输入装置中。程序载体按一定时间（或行程）顺序发出控制指令，输入装置将控制指令转换为控制输入信号，经控制系统的作用，使被控制对象的被控制量按预先确定的变化规律而动作。例如程序控制机床，热处理的加热炉的炉温控制系统，工业中的过程控制系统等。

### (3) 随动系统

这类系统的控制信号  $r(t)$  是不能预先确定的、未知的任意时间函数，要求系统的被控制量迅速、平稳地跟随其变化，并准确地复现控制信号的变化规律，则称这类反馈控制系统为随动系统或伺服系统。随动系统在工业生产和国防建设中应用极为广泛。如跟踪目标的雷达天线随动系统，火炮随动系统，舰船操舵系统，函数记录仪中记录笔控制系统，磁头伺服系统都是典型的随动系统。

图 1.6 所示为火炮随动系统原理图。火炮随动系统的任务是控制火炮跟踪敌机，以便适时开炮击中目标。通常需要两套相同的随动系统分别控制火炮的方位角和俯仰角。这里以控制火炮方位角的随动系统为例，说明随动系统的工作原理。该系统由两个旋转变压器组成测角环节，其中  $XZ_1$  叫做发送器，它的转子轴与系统输入轴相固联； $XZ_2$  叫做接受器，它的转子轴和系统输出轴相固联。 $XZ_1$  发送器转子轴的转角跟随系统输入轴按任意时间函数  $\theta_1(t)$  变化， $\theta_1(t)$  表示使炮弹与敌机在空中相遇时火炮炮口的方位角应有的数值，而敌机的方位是不能预先知道的，是时时刻刻变化着的。这个预先未知的任意时间函数  $\theta_1(t)$  就是火炮随动系统的控制信号。 $\theta_1(t)$  形成的过程是，炮瞄雷达不断跟踪敌机，把敌机方位角数据传送给指挥仪，