

反馈控制理论

夏德铃 主编



# 反馈控制理论

.8224  
484

哈尔滨工业大学出版社

73.8224  
484

# 反 馈 控 制 理 论

夏德铃 主编

哈 尔 滨 工 业 大 学 出 版 社

2100/08

## 反馈控制理论

夏德铃 主编

\*

哈尔滨工业大学出版社出版发行

哈尔滨工业大学印刷厂印装

\*

开本 787×1092 1/16 印张 20.125 字数 459,000

1984年12月第1版 1984年12月第1次印刷

印数 1—20,000

书号 15341·10 定价 3.50元

# 前 言

本教材是根据一九八二年于西安召开的高等工业学校自动化类教材编审委员会通过的工业电气自动化专业教学计划、一九八三年于福州召开的高等工业学校自动化类教材编审委员会通过的反馈控制理论教学大纲，并参考了全国高等学校工业自动化专业教育委员会一九八二年于北京召开的自动控制理论教学讨论会提出的课程教学安排意见而编写的。

教材的主要内容是古典反馈控制理论，仅在系统的数学描述、稳定性等方面适当地加入了状态空间法的概念。全书共计八章，内容为线性、非线性及特殊线性系统理论。

编写本教材时考虑了以下几个问题。

(一) 编者认为本门课程是具有一般方法论性质的理论基础课，重点在于学习分析和设计反馈控制系统的基本理论及基本方法。应使学生对基本的数学原理有一个坚实的理解，对于推动理论的实际物理问题有一般的了解，至于应用理论及方法去分析和设计反馈控制系统，则是后继课程的任务。这是编写本教材的一个基本观点。

(二) 基于“精选内容，保证基础”的原则，本教材力求将古典反馈控制理论中的基本理论和基本方法介绍得比较透彻，但又不盲目地追求体系的完整性。这样可以避免内容庞杂，篇幅过大。

(三) 西安会议制定的工业电气自动化专业教学计划，将本门课程安排在第三学年上学期（即第五学期）进行教学。这时学生已学完了电工原理课，电子技术基础课仅学习了模拟电路部分，电机及拖动基础课尚未开始学习。本教材在内容选取、讲授方法上考虑了这一情况。

(四) 近年来基础课和技术基础课加入了较多的新内容，学生在学习本课程前，对积分变换、传递函数、状态方程、方框图、信号流图、时域响应及频率响应等都已有一定的基础知识。所以本教材在这些内容上，除必要者外，尽量不与先行课程重复，或者将概念及方法深入一步。这些内容的讲授，教师可根据学生的具体情况，灵活掌握，不必受教材的约束。

(五) 考虑到与后继课程的配合，本教材对具体反馈控制系统的数学模型建立、实际系统的分析和设计方面没给以过多的篇幅。另外，按西安会议和福州会议精神，离散系统控制理论编入本教材，但可在微型计算机控制技术课程中讲授，或在本课程中讲授。

(六) 应尽可能创造条件，培养学生使用计算机分析和设计自动控制系统的 ability。本教材在实验等方面考虑了这一点。

(七) 为了培养学生的自学能力，本教材中的许多数学推演过程不必都在课堂讲授，编写时考虑了便于学生自学这一特点。

(八) 使用本教材讲授第一至第七章，包括实验和习题课在内，大约总学时数为

100学时。

本教材由北京轻工业学院夏德铃同志主编，参加本教材编写工作的还有北京轻工业学院胡家耀、陕西机械学院万伯任、邓政端，哈尔滨工业大学冉树成等同志。北京轻工业学院曾颖、雷贺宁两同志曾校对了部分原稿。

编者恳请读者提出批评和指正，以便进一步修订和完善本教材。

# 目 录

## 第一章 引 论

§ 1-1	自动控制发展简史	(1)
§ 1-2	开环控制和闭环控制 (反馈控制)	(8)
§ 1-3	反馈控制系统的类型	(6)
§ 1-4	反馈控制理论概要	(7)
§ 1-5	反馈控制系统中的术语和定义	(8)

## 第二章 线性系统的数学模型

§ 2-1	线性系统的输入-输出描述	(11)
§ 2-2	非线性数学模型的线性化	(15)
§ 2-3	典型环节的数学模型	(16)
§ 2-4	方框图	(24)
§ 2-5	信号流程图	(31)
§ 2-6	线性系统的状态变量描述	(36)
习题		(42)

## 第三章 自动控制系统的时域响应

§ 3-1	典型输入信号	(45)
§ 3-2	线性定常系统的时域响应	(47)
§ 3-3	一阶系统的响应	(52)
§ 3-4	二阶系统的响应	(54)
§ 3-5	高阶系统的响应	(62)
§ 3-6	卷积积分及其应用	(63)
§ 3-7	线性系统的稳定性	(65)
§ 3-8	劳斯-赫尔维茨稳定判据	(69)
§ 3-9	稳态误差	(76)
§ 3-10	反馈和顺馈复合控制	(91)
习题		(92)

## 第四章 根 轨 迹 法

§ 4-1	关于根轨迹的基本概念	(96)
-------	------------	------

§ 4-2	绘制根轨迹的基本规则	(97)
§ 4-3	参数根轨迹和多回路系统根轨迹	(109)
§ 4-4	正反馈回路和非最小相位系统的根轨迹	(112)
§ 4-5	利用根轨迹法分析系统的暂态响应	(117)
§ 4-6	迟后系统的根轨迹	(123)
习题		(129)

## 第五章 频率特性法

§ 5-1	频率特性	(132)
§ 5-2	频率特性和时域暂态响应的关系	(137)
§ 5-3	典型环节的频率特性	(145)
§ 5-4	系统开环频率特性的绘制	(151)
§ 5-5	乃奎斯特稳定判据	(157)
§ 5-6	二阶和高阶系统时域响应与频域响应之间的关系	(167)
§ 5-7	闭环频率特性	(171)
习题		(177)

## 第六章 自动控制系统的校正

§ 6-1	关于控制系统校正的概念	(180)
§ 6-2	超前校正与迟后校正	(181)
§ 6-3	常用校正装置及其特性	(185)
§ 6-4	根轨迹法在系统校正中的应用	(192)
§ 6-5	频率特性法在系统校正中的应用	(204)
§ 6-6	关于线性系统校正方法的小结	(213)
习题		(215)

## 第七章 非线性系统的分析

§ 7-1	关于非线性系统的基本概念	(217)
§ 7-2	谐波线性化与描述函数	(219)
§ 7-3	典型非线性特性的描述函数	(220)
§ 7-4	用描述函数分析非线性系统	(228)
§ 7-5	相平面法的基本概念	(236)
§ 7-6	绘制相轨迹的方法	(238)
§ 7-7	由相轨迹求暂态响应	(243)
§ 7-8	奇点与极限环	(244)
§ 7-9	非线性系统的相平面分析	(246)
习题		(252)

## 第八章 采样控制系统

§ 8-1	采样控制	(255)
§ 8-2	采样过程及采样定理	(256)
§ 8-3	采样信号保持器	(259)
§ 8-4	Z变换	(262)
§ 8-5	脉冲传递函数	(274)
§ 8-6	采样控制系统的稳定性分析	(278)
§ 8-7	采样系统的稳态误差	(282)
§ 8-8	采样系统的暂态响应与脉冲传递函数零、极点分布的关系	(284)
§ 8-9	采样控制系统的校正	(288)
§ 8-10	最少拍采样系统的设计	(295)
习题		(300)
附录一		(301)
附录二		(305)
参考书目		(306)
英中文词汇对照表		(308)



# 第一章 引 论

在现代的工业、农业、国防和科学领域中，自动控制技术得到了极为广泛的应用。

所谓自动控制，就是采用控制装置使被控制的对象（如机器设备或生产过程）自动地按照给定的规律运行，使被控制对象的一个或数个物理量（如电压、电流、速度、位置、温度、流量、化学成份等）能够在一定的精度范围内按照给定的规律变化。

将自动控制技术用于生产，可以提高劳动生产率、改进产品质量、降低生产成本、改善劳动条件和加强企业管理。将自动控制技术用于国防领域，可以提高部队的战斗力，促进国防现代化。自动控制技术在探索新能源、发展空间技术和改善人民生活等方面都起着日益重要的作用。

本章将概括地介绍反馈控制的发展简史和基本概念，并对本课程的内容作一简介，使学生对反馈控制理论课程的性质和任务有一个基本的了解，以便更主动地学习以下各章节。

## § 1-1 自动控制发展简史

自动控制理论中最基本的概念是**反馈**：利用一个机器（或过程）偏离所希望的运行状态的偏差，来对该机器（或过程）进行控制，使其回到所希望的运行状态。

人们对反馈控制的利用可以追溯到十七世纪。当时在古老的钟表机构、水轮及风力机械中就采用了原始的速度调节装置。但并未引起广泛的注意。直到产业革命时期，能源的开发和动力的发展对自动控制提出了迫切的要求，自动控制技术才开始起重要作用。最著名的例子是瓦特（James Watt）所发明的蒸汽机飞球离心调节器（图1-1）。

在离心调节器中，瓦特利用飞球来维持汽机恒速：当汽机速度增加时，飞球升高，使汽阀的开口减少；反之，当汽机速度降低时，飞球下降，使汽阀开口增大。在使用过程中发现，在有些条件下，汽机的速度不但不能稳定于所期望的数值附近，反而会产生剧烈的振荡。这就提出了自动控制中的一个重要问题——系统稳定性问题。

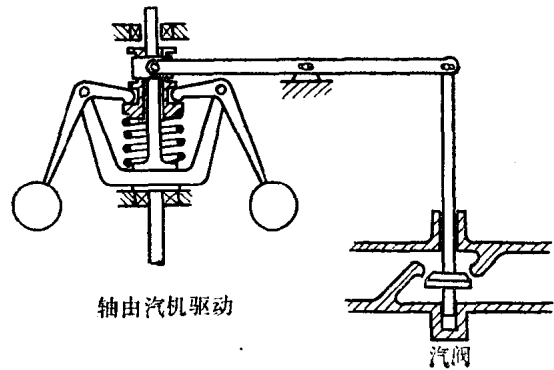


图 1-1 飞球调节器

1868年，马克斯威尔(J.C.Maxwell)

解释了这种不稳定现象，并提出了一种判别低阶系统稳定性的代数判据。1895年，两位数学家劳斯（Routh）及赫尔维茨（Hurwitz）独立地发现了两种代数判据，可以判断高

阶线性定常系统的稳定性。

直到1940年，自动控制系统的的设计主要考虑稳态响应的准确度和稳定性，而把暂态响应的要求放到次要位置。

第二次世界大战期间，军事工业中伺服机械的发展要求提高控制系统的准确跟踪及补偿能力。当时发现，设计这种系统所需要的理论已经在通信工程领域中得到了发展。伯莱克 (H.S.Black) 发明的负反馈放大器理论，乃奎斯特 (H.Nyquist) 提出的频率响应理论为设计具有高质量的暂态和稳态响应的伺服系统提供了有力的分析工具。

1948年依万斯 (W.R. Evans) 提出了根轨迹法。这是研究控制系统的另一种简便有效的方法，是对频率法的补充。在某些情况下，根轨迹法比频率法更简便和直观。至此，控制理论发展的第一阶段基本完成，形成了建立在频率法和根轨迹法基础上的**古典控制理论**。

在这一时期，自动控制理论和技术得到迅速的推广。许多科学家进行了大量的工作。控制工程被列为工科大学的正式课程，有关的教科书也陆续出版。一些制造厂开始生产控制系统所用的元、器件。在战后年代控制工程中所获得的广泛成就引起了一种愿望，即将控制原理推广到更复杂的系统和更广泛的领域。这时维纳 (N.Wiener) 发表了一篇有代表性的著作，首先提出了**控制论**这一名词。他指出了控制工程和通信工程的密切关系，强调了信息和反馈的普遍意义，预言控制论不仅可用于物理系统，而且可以推广到生物系统、乃至经济领域和社会过程中去。当时，这只是一种大胆的设计，还远未达到成熟的阶段。然而，这种设想却暴露了古典控制理论的局限性，促进了控制理论的新的的发展。

首先，古典控制理论主要用于线性定常系统，即可以采用常系数线性常微分方程描述的系统。其次，它通常只用于单输入、单输出的反馈系统。对于存在多输入、多输出的复杂系统，应用古典理论就非常困难。其三，古典控制理论采用的是一种外部描述法，它只讨论系统的输入与输出之间的关系，而忽视了系统的内在特性。然而在不同情况下，需要研究系统的内在特性。最后，古典控制理论的设计方法基本上是一种猜试法，不能提供最优控制特性。

为了适应各种更广泛、更复杂的控制要求，一种建立在线性代数的数学基础之上的**现代控制理论**迅速地发展起来。这种理论所采用的状态变量法不仅能提供外部信息，而且能提供系统状态变量的信息。这种方法的一大优点是其通用性强。无论对于线性或非线性系统，定常或时变系统，单变量或多变量系统，它都是一种有效的方法。这种方法虽然需要繁琐费时的计算，但便于应用计算机。控制理论的新发展恰好发生在数字计算机广泛应用的时期，这并非偶然。

现代控制理论的发展是控制工程中的一个新的阶段，是一个跃变。它综合应用控制技术 (control)、通信技术 (communication) 和计算技术 (computation) 的成就，开辟了一条通向各种广阔领域的通路。

许多科学家认为，由控制技术、通信技术和计算技术所组成的**信息工程**向生产、社会、经济、生物、宇航等各个领域的迅速发展，是现代科学技术发展中的一个重要方面，它将导致各个领域的重大变革。可以预见，在我国的现代化进程中，信息工程也必

将发挥巨大的作用。

## § 1-2 开环控制和闭环控制（反馈控制）

为完成一定任务的一些部件按一定规律组合成一个有机的整体，称之为系统。能够对被控制对象的工作状态进行自动控制的系统称为自动控制系统。它一般由控制装置（控制器）和被控制对象所组成。

自动控制系统有两种最基本的组成方式，即开环控制和闭环控制方式。

**开环控制**是一种最简单的控制方式，其特点是，在控制器与被控制对象之间只有正向作用而没有反馈作用，即系统的输出量对控制量没有影响。开环控制系统的示意方框图如图1-2所示。

在开环系统中，对于每一个参考输入量，就有一个与之相对应的工作状态和输出量。系统的精度取决于元、部件的精度和特性调整的精度。当系统的内扰和外扰影响不大并且控制精度要求不高时，可以考虑采用开环控制方式。

**闭环控制**的特点是，在控制器和被控制对象之间不仅存在着正向作用，而且存在着反馈作用，即系统的输出量对控制量也发生直接影响。输入信号和反馈信号之差，称为偏差信号。偏差信号作用于控制器上，使系统的输出量趋向于给定的数值。闭环控制的实质，就是利用负反馈的作用来减小系统的误差，因此又称闭环控制为**反馈控制**，其示意方框图如图1-3所示。

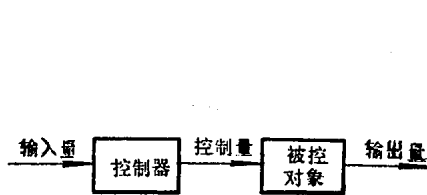


图 1-2 开环控制系统

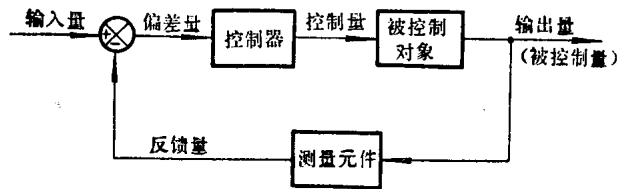


图 1-3 闭环控制系统

反馈控制是一种基本的控制规律，它具有自动修正被控制量偏离给定值的作用，因而可以抑制内扰和外扰所引起的误差。在组成系统的元、器件精度相对不高的条件下，采用反馈控制也可以达到较高的控制精度，因此应用很广。

下面我们通过几个实例，进一步讨论开环控制和闭环控制的特点。

图 1-4 是一只运算放大器的外部接线图。 $u_o$ 是输出电压，受输入电压 $u_i$ 控制。分析运算放大器时，往往假设：

- (1) 运算放大器的输入阻抗  $r_i \rightarrow \infty$ ，输出阻抗  $r_o \rightarrow 0$ ；
- (2) 放大器无零漂，并且不计失调电压和失调电流；
- (3) 输入电压在一定范围内，使放大器工作在线

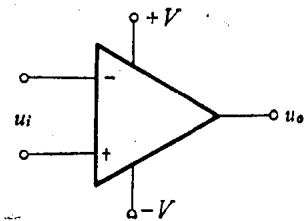


图 1-4 运算放大器接线图

性放大状态。

在以上条件下，图 1-4 所示运算放大器开环电路输入电压  $u_i$  与输出电压  $u_o$  的稳态响应的关系为：

$$u_o = Ku_i \quad (1-1)$$

式中  $K$ ——运算放大器的开环增益。

从式 (1-1) 可见，如果开环增益  $K$  保持恒值，输入  $u_i$  不变，则输出  $u_o$  也应不变。但运算放大器的开环增益  $K$  极易变化。如输入  $u_i$  不变，但  $K$  变化为  $K + \Delta K$  将使输出变化为

$$u_o + \Delta u_o = (K + \Delta K)u_i \quad (1-2)$$

两者之差为：

$$\Delta u_o = \Delta K u_i \quad (1-3)$$

以上分析说明，运算放大器开环使用时，虽然可以使输入按比例关系去控制输出，但是控制的准确度是很容易受到器件本身参数变化的影响，也就是说，由于开环增益易变，输出  $u_o$  按一定比例关系复现输入  $u_i$  的精度就不高。

为了克服上述缺点，可以采用反馈控制。图 1-5 是用运算放大器组成的跟随器。这是一个闭环控制电路。如上述假设条件不变，跟随器的输入输出关系为：

$$u_o = K(u_i - u_o)$$

或

$$u_o = \frac{K}{1+K} u_i \quad (1-4)$$

即输出受输入控制，两者也是成比例关系。

现分析在开环增益变化为  $K + \Delta K$  时，输出  $u_o$  受到的影响，显然有

$$u_o + \Delta u_o = \frac{K + \Delta K}{1 + K + \Delta K} u_i \quad (1-5)$$

从式 (1-5) 减去式 (1-4) 即得

$$\Delta u_o = \frac{\Delta K}{(1 + K + \Delta K)(1 + K)} u_i \quad (1-6)$$

将式 (1-6) 与式 (1-3) 相比较，不难看出运算放大器接成闭环电路后，其输出  $u_o$  受到输入  $u_i$  控制的准确度要提高很多，受到开环增益变动产生的误差要小得多。

图 1-6 所示为一简单贮槽液面控制系统，我们希望贮槽的液面  $h$  能在允许的偏差范围以内。 $V_1$  是液体流出阀， $V_2$  是液体流入阀。首先人们根据要求液面的高度  $h$  及  $V_1$  阀在单位时间内液体的流出量，整定好  $V_2$  阀的开启程度，以达到预定的目的。但这是个不精确的控制系统，如果  $V_1$  阀的输出流量和  $V_2$  阀的输入流量受到温度和液体浓度等因素的影响发生了变化，不能使液面控制在原来标定好的  $h$  值，超过了允许的偏差，系统也无能为力。

图 1-7 是贮槽液面自动控制系统图。不论通过阀  $V_1$  的输出流量怎样发生变化，也能维持所要求的贮槽液面  $h$  在相当准确的允许偏差之内。浮子的位置就是测量出来的液面实际高度，它与电位器的滑动触头相连。若贮槽液面稍有变动，使电位器滑动触头偏离了中心点，就立即产生一个电压  $e$ 。经过放大后，作用于调节阀  $V_2$  的拖动电机上，从而

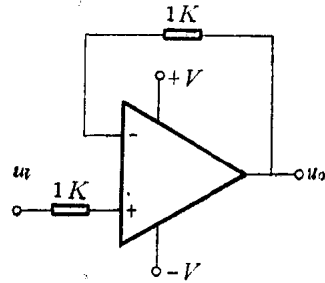


图 1-5 跟随器接线图

调节输入流量，使恢复贮槽液面。电位器滑动触头又复原到零位，电压 $e = 0$ ，电动机不再转动。

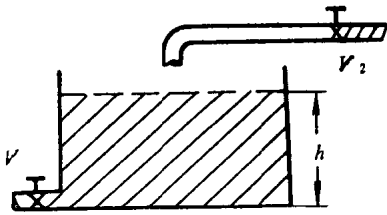


图 1-6 液面控制系统

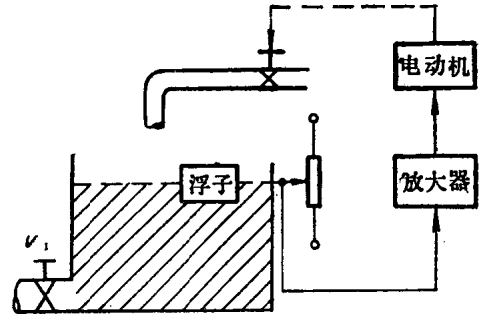


图 1-7 液面自动控制系统

图 1-8 是造纸机分部传动系统中的一部分。含有大量水分的纸张经过第一压榨辊后，去掉了一部分含水量，然后再进入第二压榨辊，再榨去一部分水分。第一和第二压榨辊分别由各自的电动机拖动。显然两个分部的压榨辊的转速必须协调，否则将会使纸张拉断或出现叠堆的现象。通过整定两个分部压榨辊的拖动电动机的转速来实现速度的协调。直流他激电动机在励磁不变的情况下，改变加于其电枢的电压可以控制其转速，因此人们能够根据实际情况将两个分部压榨辊的转速调整到完全协调的程度。

但是，有很多因素会影响电枢电压对其转速控制的精确性，例如负载和励磁发生了变化，虽然加于电枢两端的电压仍然不变，但电动机的转速亦将变化。我们将这种影响输入控制输出准确程度的因素称为扰动，实际的系统扰动是不可避免的。此种简单的开环控制系统对于扰动的不利影响是无法抑制的。

图 1-9 则是造纸机分部传动速度反馈控制系统。压榨辊拖动电动机的转速由测速发

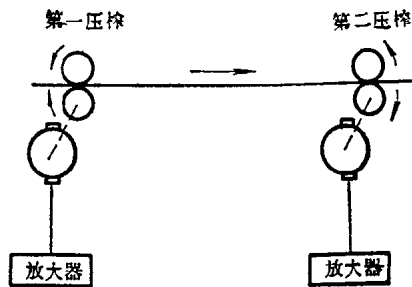


图 1-8 造纸机分部传动系统

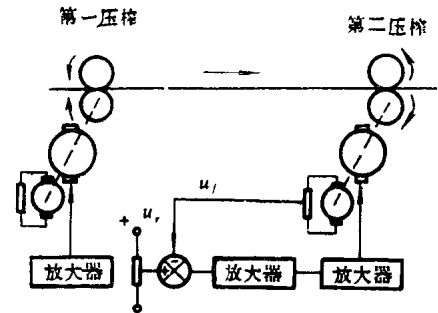


图 1-9 造纸机分部传动速度闭环控制系统

电机检测出来，并且转换为速度反馈电压 $u_f$ 。速度给定值由电位器滑动触点的电压 $u_r$ 来决定。输入 $u_r$ 与反馈 $u_f$ 在比较环节里相比较，得到偏差电压 $u_r - u_f$ ，送入前置放大器，然后再经过功率放大去控制拖动电动机的转速。只要输入电压 $u_r$ 稳定，反馈电压 $u_f$ 与电动机转速间的比例关系也稳定，经过正确的设计，此种控制系统可使输出受扰动的影响降低到能够接受的水平。

图 1-5、图 1-7 和图 1-9 所示系统称为反馈控制系统或闭环控制系统，它的主要特点是：在控制过程中对输出量（被控制量）不断地测量，并反馈到输入端与给定值进行比

较（即反馈必须是负反馈）得到偏差信号，利用放大后的偏差信号产生控制作用，这个控制作用是力图消除（或减小）误差，使输出量尽可能与给定的参考输入量相符合。

综上所述，可以对开环控制和闭环控制的特点归纳如下。

开环控制是一种简单的，无反馈的控制方式。在开环控制系统中，只存在控制器对被控制对象的单方向控制作用，不存在被控制量（输出量）对控制量的反向控制作用。系统的精度取决于组成系统的元、器件的精密度和特性调整的精确度。开环系统对外部扰动和内部参数变化的影响缺乏抑制能力。开环系统结构简单，比较容易设计和调整，可以用于输入量与输出量关系为已知，内外扰动对系统影响不大并且控制精度要求不高的情况。

闭环控制是一种反馈控制，其特点是，在控制过程中对被控制量（输出量）不断进行测量，并将其反馈到输入端与给定值（参考输入量）进行比较，利用放大后的偏差信号产生控制作用，以减少或消除误差。负反馈的引入对系统的外部扰动和内部参数变化的影响有抑制作用。因此，有可能采用相对来说不太精密的成本低的元件，组成控制精度较高的闭环系统，它的控制精度很大程度上是由形成反馈的测量元件的精度来决定的。在这方面，闭环系统具有开环系统无可比拟的优点，因此应用很广。与此同时，反馈的引入使本来是稳定运行的开环系统可能出现强烈的振荡，甚至不稳定的现象。这是在采用反馈控制构成闭环控制系统时必须注意并应当解决的问题。

在有些情况下，适当地把开环控制与闭环控制结合起来，组成复合控制系统，往往能取得较好的效果。

### § 1-3 反馈控制系统的类型

根据不同的分类方法，反馈控制系统的类型可以概括如下：

#### （一）线性和非线性系统

（1）线性系统——组成系统的元件的特性均为线性的，其输出输入关系都能用线性微分方程描述。线性系统的主要特点是具有齐次性和叠加性，系统的响应与初始状态无关。

如果线性微分方程各项的系数都是与时间无关的常数，则称此种系统为定常线性系统，或称时不变线性系统。如果描述系统的微分方程的系数是时间的函数，则称为非定常线性系统或称时变线性系统。

（2）非线性系统——在组成系统的元件中只要有一个元件的特性是用非线性方程描述的，这表现在描述系统的微分方程中输出量及其各阶导数不都是一次的，或者有的项的系数是输入量的函数。非线性微分方程没有一个完整的统一的求解方法，也不能应用叠加原理。非线性系统的响应与初始状态有极大的关系。

#### （二）随动系统与自动调整系统

（1）随动系统——这种系统的特点是输入量总在频繁地变化，要求系统的输出量

能够以一定的准确度跟随输入量的变化而变化。随动系统亦称伺服系统。

(2) 自动调整系统——这种系统的特点是输入保持为常量，或者只随时间作缓慢变化，而系统的任务是尽量排除扰动的影响，以一定的准确度将输出量保持在希望的数值上。自动调整系统亦称恒值调节系统，或简称恒值系统。

### (三) 连续数据系统和离散数据系统

(1) 连续数据系统——是指系统各部分的信号都是连续函数形式的模拟量，象在§1-1中所举出的几个例子都是属于这一类控制系统。

(2) 离散数据系统——离散数据系统是某一处或数处的信号以脉冲列或数码的形式传递的系统。

如果在系统中使用了采样开关，将连续函数形式的信号转变为离散的脉冲列形式的信号去进行控制的系统，通常称为采样控制系统或脉冲控制系统。

如果使用了数字计算机或数字控制器，其离散信号是以数码形式传递的系统，则称为采样数字控制系统，亦简称为数字控制系统。由于控制对象总是模拟量的，所以这种系统中要有模-数 (A/D) 和数-模 (D/A) 转换器。

一般说来，同样都是反馈控制系统，但数字控制系统的控制精度（特别是控制的稳态准确度）要高于连续时间控制系统。这是因为数码形式的控制信号远比模拟控制信号的抗干扰能力强，当然，数字控制系统的结构也会比连续控制系统复杂。

描述连续数据控制系统的运动用微分方程，而描述离散数据控制系统则使用差分方程。

离散数据控制系统中又有线性离散系统和非线性离散系统之分。这和连续数据控制系统有线性和非线性两类的情况是一样的。

## § 1-4 反馈控制理论概要

反馈控制理论是研究反馈控制系统的理论，它的内容需要根据反馈控制系统要研究的问题来确定。

(一) 反馈控制系统需要研究的问题大致有三方面：

(1) 稳定性——稳定是任一反馈控制系统能否实际工作的必要条件，反馈控制原理至少应给出判断系统稳定性的方法，并应指出稳定性与系统的结构（或称控制规律）及参量间的关系。

(2) 稳态响应——稳态情况下，控制的准确度往往是反馈控制系统的一个重要性能指标。反馈控制原理应给出计算系统稳态响应的方法，并且指出系统控制规律及参量与稳态响应间的关系。

(3) 暂态响应——对于经常处于暂态过程或对暂态响应有一定要求的反馈控制系统，这一点特别重要。反馈控制原理需要研究系统的控制规律及参量与暂态响应的关系，并且能提供简捷（但可能是很不精确的、粗糙的）的估算暂态响应的方法。

(二) 摆在反馈控制理论面前的任务，不但要为分析以上三方面的问题提供理论，

而且更重要的是寻求建造一个符合要求的反馈控制系统的思路和方法，或者说是有关设计的理论。在这方面包含着以下的含义。

给定一个对象（即被控制的系统）的数学模型，一组要求的性能指标，希望有一种简捷的方法，去解决以下问题。

(1) 决定出一种合适的控制规律，并确定下来某些可变参量。

(2) 能直接从系统方程的参数定性地估计在各种典型输入作用下控制系统的响应，而不需要求助于方程的明显解。

(3) 如果认为结果不够满意，应能指出改善的途径。

显然，藉助于微分方程这样的数学工具是无法满足上述要求的。

(三) 对于能用常系数线性微分方程描述的系统（指的是由线性元件组成的系统和线性控制规律），前述那种简捷的方法是存在的，而且不止一种。这些方法的共同特点是，不须做过多的计算，就能将反馈控制系统的性能主要特征与系统的控制规律、参量间的关系直观地表达出来。这种理论称为线性控制理论。

严格地说，线性控制理论只能用于线性系统。但实际上根本不存在绝对的线性系统，任何物理系统或多或少存在非线性因素。但在误差允许的范围内，可以将非线性特性线性化，近似地用线性微分方程去描述它，因而也能用线性系统理论去处理这些系统。当然，这是有条件的，不顾条件盲目地使用线性系统理论，将得出错误的结论。

即使对于线性系统，如果描述系统行为的线性微分方程的阶数较高时，使用线性系统理论也有难于克服的困难。亦即线性理论用于线性系统也有相当的局限性。为了解决这一矛盾，往往在建立系统数学模型时，总是在一定的条件下，慎重确定出哪些物理变量和相互关系是可以忽略的，哪些对模型的准确度有着决定性的影响，从而抓住主要矛盾，忽略次要因素去建立简化的数学模型。这样的数学模型既能在符合系统的实际情况并在合理的精度要求下，大体上描述出系统的本质，同时又能便于线性理论的使用。

至于非线性控制系统的理论，还远不如线性系统理论那样成熟和完整。非线性系统理论的这一现状主要是由非线性微分方程至今尚无一种统一的完整的求解方法所造成的。

## § 1-5 反馈控制系统中的术语和定义

本节介绍反馈控制系统中的常用术语及其定义。

图1-10是反馈控制系统的示意方框图，对其中的术语和定义给以说明。

参考输入  $r$  —— 输入到控制系统的指令信号。

主反馈  $b$  —— 与输出成正比或某种函数关系但量纲与参考输入相同的信号。只

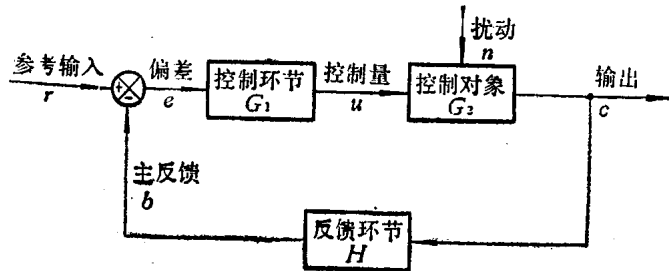


图 1-10 反馈控制系统的示意方框图



有量纲相同的信号，才能在比较点相加或相减。

偏差 $e$ ——等于参考输入与主反馈之差的信号。

控制环节 $G_1$ ——接受偏差信号，通过转换与运算，产生所需要的控制量。

控制量 $u$ ——来自控制环节，作用于控制对象的信号。

扰动 $n$ ——不希望的影响输出的一些信号。

控制对象 $G_2$ ——它接受控制量并将被控制量输出。

输出 $c$ ——反馈控制系统的被控制量。

反馈环节 $H$ ——将输出转换为主反馈信号的装置。

比较环节  $\rightarrow \begin{matrix} + \\ \otimes \\ - \\ \uparrow \end{matrix} \rightarrow$  相当于偏差检测器，它的输出等于参考输入和反馈信号之差。注意

进入比较环节信号上箭头所指的符号，它表示该信号在此相加或是相减。

以上的术语、定义和代表符号在本书中是经常要用到的，故先予以列出和说明。