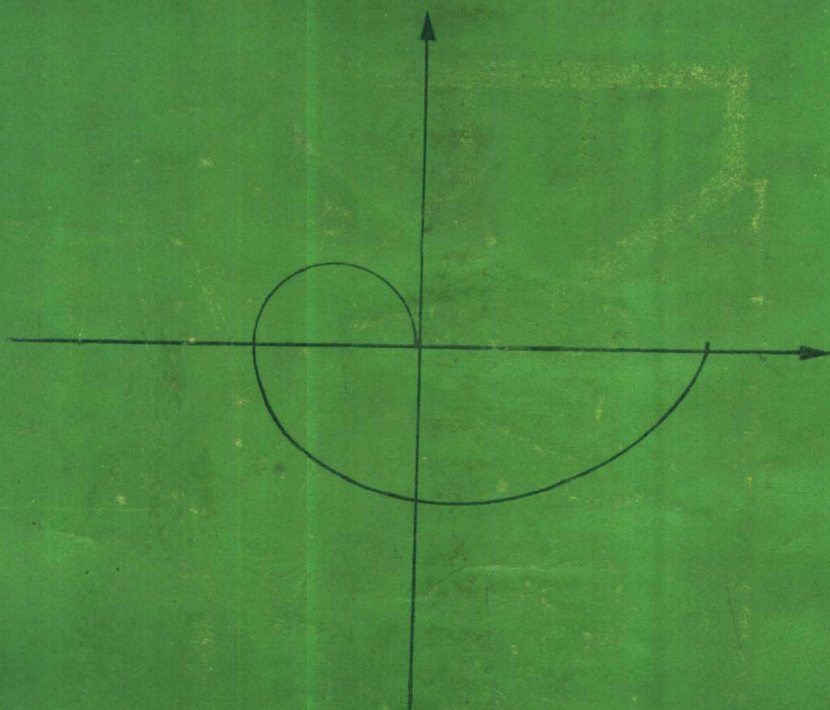


自动控制系统

(美)B C·KUO 著

靳敏译

(上)



武汉市自动化研究所情报室

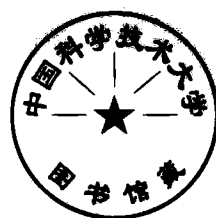
一九八〇年

自 动 控 制 系 统

(美) B C·KUO 著

靳 敏 译

(上)



武汉市自动化研究所情报室

一 九 八 〇 年

序

本书第一版发表于1962年，其特点是突出了采样—数据与非线性控制系统的章节，而控制系统的分析与设计完全是经典的论述。

1967年发表的第二版有两个重要变动：即编入了状态变量的用法，并将离散数据系统与连续数据系统结合起来。第二版删去了非线性系统的章节，使这部分内容的某些读者大失所望。在当初修订时，作者担心用有限的篇幅不可能说清楚非线性系统的问题。

第三版仍然作为高年级控制系统教材的入门书。虽然现代控制理论在过去的十年内有了很大的发展，但如何为控制系统的入门书选择适当的现代教材仍是十分困难的任务。问题之所以复杂就在于很难向尚未获得学位的大学生讲清一些有关现代控制理论新发展的内容。控制系统的独特之处就在于工业中许多实际问题仍然是用经典方法解决的。尽管现代控制理论的某些技巧是更有效而且能解决更复杂的问题，但在实际应用中经常遇到许多限制。不过，应该认识到，作为一个现代的控制工程师，无论对经典控制方法或现代控制方法均须有所了解。在解决实际问题时，现代控制方法可以使眼界大开。在讲授控制系统理论时，作者的意见是，应兼顾初级与中级水平。因此，本书对经典方法与现代控制理论是等同视之的。

近几年来，出版了不少涉及现代控制理论的入门书籍。有些作者企图把经典控制与现代控制统一论述，但严格审核一下，他们大部分都没有成功。虽然，这个目标是深受欢迎的，但从目前的水平出发，可能没有什么好办法。在有关新理论和新技巧提出之前，这个目标可能是实现不了的。控制系统理论实际上可以当成一门试用许多不同方法解决控制问题的学科。这些不同的解决方法可以彼此加以比较和权衡，但不可能统一起来。本书是分别阐述经典方法和现代方法的，但是只要有可能，就对两种方法加以比较，并权衡其优缺点。两种方法均用许多例子加以说明。

许多已出版的控制系统教科书由于没有编入适当的实际例子而受到批评。造成这种局面的一个原因可能是许多教科书的作者是理论家，缺乏实际经验从而无法举出实际生活的例子。另一个原因是控制系统领域内大多数实际问题是相当复杂，很少有适合入门水平的例子可以介绍。为了简化问题以适合教材中的严密定理和设计技巧，常删去了许多实际东西。无论如何，大多数学生在选修控制系统高年级课程时，并不是追求毕业这个头衔，他们的知识必须能用于新的职业。对于这些学生和准备选读这门课程的学生来说，最重要的就是对实际的控制系统究竟是什么应有切身感受。为此，作者在本书内多处介绍了许多实际例子，课外作业也企图为本书提供更多的实际问题。

与前两版比较，这次新版有如下特点：

- 1、同时强调了经典与现代控制理论。
- 2、编入采样数据和非线性系统。
- 3、有实际系统的例子和课外作业。

本书选用教材是作者在厄巴纳—香潘、伊利诺斯大学多年任教时所用的控制系统高年级教材的总结。不过，本书的写作方式适于自学与参考所用。

第一章介绍了控制系统的基本概念。论述了反馈和反馈效应。第二章介绍了数学基础和预备知识。内容有拉普拉斯变换、 z -变换、矩阵代数和变换方法的应用。第三章讨论了传递函数和信号流程图。第四章介绍了动态系统的状态变量法,初步提出了可控性与可观察性的概念与定义。这些概念在后面的线性控制系统的设计和分析中均用上了。第五章讨论了物理系统的数学模型。这里,着重介绍机电系统。举例说明了实际常用的典型传感器和控制系统。因为控制系统和装置的种类繁多,介绍不可能作到很全面。第六章介绍了控制系统的时间响应,既运用了经典方法又利用了现代方法。指出了时域内一些简单的设计须知。第七、八、九章涉及稳定性,根轨迹和控制系统的频率响应。

第十章讨论了控制系统的设计,所用方法基本上是经典的。第十一章包括一些最佳控制的内容。作者认为:如果时间宽裕,可以向尚未获得学位的大学生讲授。本书教材超过了一学期应包括的内容。

编写本书的一个棘手之处就是内容的取舍。为了使内容不至于过于冗长,在最后定版时,删去了草稿中的一些题目,其中有离散数据系统的信号流程图方法和时域分析、李亚普诺夫第二定律、描述函数的分析,状态平面的分析和一些实现最佳控制的课题。作者认为,这些材料可以为教科书增加色彩,但却提高了书价。

作者向伊利诺斯大学校长W.L.Everiff(荣誉教授),E.C.Jordan, O.L.Gaddy与E.W.Ernst诸教授对本书的鼓励与关心致以诚挚的感谢。作者也向弗吉尼亚大学的Andrew.Sage博士以及伊利诺斯大学的G.Singh博士所提的宝贵建议表示谢意。特别要感谢Jane Garlton女士出色地打印了原稿并大力协助了校对工作。

Benjamin.C.Kuo

自动控制系统

目 录

1、引言

1.1控制系统	(1)
1.2什么是反馈和反馈效应	(4)
1.3反馈控制系统的种类	(8)

2、数学基础

2.1引 言	(11)
2.2复变量概念	(11)
2.3拉普拉斯变换	(13)
2.4利用部分分式展开的拉普拉斯逆变换	(16)
2.5用拉普拉斯变换求解线性常微分方程	(19)
2.6矩阵基本理论	(21)
2.7矩阵代数	(25)
2.8z—变换	(31)

3、传递函数和信号流程图

3.1引 言	(39)
3.2线性系统的传递函数	(39)
3.3线性系统的脉冲响应	(41)
3.4方框图	(44)
3.5信号流程图	(49)
3.6信号流程图基本性质综合	(51)
3.7信号流程图定义	(51)
3.8信号流程图代数	(53)
3.9信号流程图结构举例	(54)
3.10信号流程图的一般增益数学公式	(58)
3.11用于方框图的一般增益数学公式	(62)
3.12离散数据系统的传递函数	(63)

4、动态系统的状态变量特征化

4.1状态概念的简述	(71)
------------	------

4.2状态方程和动态方程	(72)
4.3状态方程的矩阵表示	(74)
4.4状态转移矩阵	(76)
4.5状态转移方程	(78)
4.6状态方程与高阶微分方程的关系	(82)
4.7相变量规范形式的变换	(84)
4.8状态方程与传递函数的关系	(87)
4.9特征方程、特征值及特征向量	(91)
4.10A矩阵的对角化(相似变换)	(92)
4.11约当规范形式	(96)
4.12状态图	(100)
4.13传递函数的分解	(108)
4.14变换为模态形式	(112)
4.15线性系统的可控性	(115)
4.16线性系统的可观察性	(123)
4.17可控性、可观察性与传递函数的关系	(127)
4.18非线性状态方程及其线性化	(129)
4.19线性离散数据系统的状态方程	(132)
4.20离散数据系统的z变换解法	(135)
4.21离散数据系统的状态图	(137)
4.22采样数据系统的状态图	(140)
4.23线性时变系统的状态方程	(142)
5、物理系统的数学模型	
5.1引言	(145)
5.2电网络的方程	(145)
5.3机械系统的元件模型	(147)
5.4机械系统的方程	(159)
5.5控制系统的误差检测装置	(164)
5.6转速表	(172)
5.7控制系统的直流马达	(173)
5.8两相感应马达	(177)
5.9步进马达	(179)
5.10张力控制系统	(185)
5.11边缘—导引系统	(186)
5.12有传动延迟的系统	(190)
5.13自动寻日系统	(191)

第一章 引言

1.1 控制系统

近些年来,自动控制系统在促进现代文化和技术的发展方面占据了越来越重要的地位。在新式家庭生活中,为了更舒适地生活,利用取暖系统和空气调节系统的自动控制来调节家里的温度和湿度。在工业方面,自动控制系统有许多用途,诸如机械产品的质量控制,自动化,机床控制现代空间技术和武器系统、计算机系统、交通系统和机械人等。甚至于像仓库盘存的控制、社会和经济系统的控制以及环境与水文学系统的控制之类的问题都可用自动控制理论加以解决。

基本的控制系统概念可以用图1的简单方框图说明。系统的目标是使调节信号通过控制系统的部件以指定的方式对变量C进行控制。

更通俗地讲,被控制的变量是系统的输出,调节信号是输入。举一个简单例子,在控制汽车的驾驶方向时,两个前轮的方向可以看作为被控制变量C,即输出。驾驶盘的位置是输入,即调节信号e。此例中、被控制的过程或系统就是驾驶机构,包括整个汽车的动力学。但是、如果把汽车的速度作为控制目标。那么施加在加速器上的压力大小是调节信号,而速度是被控制变量。

在许多情况下,几个变量同时由一些输入进行控制。这些系统就叫多变量系统。

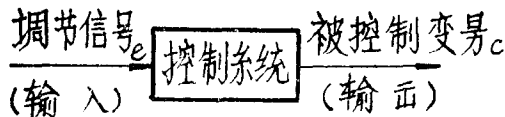


图 1—1 基本的控制系统

开环控制系统 (非反馈系统)

“自动化”这一词意味着控制系统中多少有些名堂。一般来说,通过自动化,系统就能够对各种工作状态进行调节,而且能对一类输入作出良好的响应。但是,不是任何一类控制系统都具有自动化的特点的。自动化是这样实现的:把输出变量反馈回去并与命令信号进行比较。如果系统没有反馈结构时,就称为开环系统,这是最简单和最经济的控制系统。但非常遗憾,开环控制系统缺乏精确性和通用性,只能用于最简单的应用中。

例如,考虑家庭取暖炉的控制。我们假定炉子仅装有计时器以控制炉子的接通和断电时间。为了调节温度至适当值,操作者必须估计炉子应持续接通的时间,以便设置计时器。当超过预置时间时,炉子就断电。然而,室内温度有时偏离预定值,这是估计误差造成的。显然,这类控制是不精确的和不可靠的。不精确的一个原因就是操作者可能没有掌握炉子的准确性能。另一个原因是没有控制门外的温度,而门外的温度对门内的温度有一定的影响。这说明了开环控制系统性能的主要弊病,即系统不能适应环境条件的变化或外界扰动。在炉温控制的例子中,有经验的人可把室内温度控制在预定值,但如果在炉子通电期间内,门或窗

子间隙地打开或关上，那么开环控制就不能准确地调节室内的最终温度。

电子洗衣机是开环控制的另一个典型例子，因为洗衣机的工作时间完全由人来决定或估计。一个真正的自动电子洗衣机应该设法连续地检查衣服的清洁程度。并在达到指定清洁度时关机。

虽然使用开环控制系统有局限性，但它们仍旧是闭环控制系统的基本部件。一般，开环控制系统的部件用图1—2的方框图表示。一个输入信号或命令 r 加到控制器上，控制器的输出作为调节信号 e ；调节信号再调节被控制过程并有可能成功地驱动被控制变量 c 至预定值。



图1—2 开环控制系统的方框图

闭环控制系统（反馈控制系统）

要实现更准确和更适用的控制，开环控制系统缺少一个由输出至系统输入的通路或反馈。为了获得更准确的控制，被控制信号 $c(t)$ 必须反馈回去并与参考输入相比较，同输出和输入之差成比例的调节信号必须送至系统以纠正误差。如前所述的有一至多个反馈回路的系统就称为闭环系统。人的行为可能是目前最复杂和高級的反馈控制系统。一个人的行为可以看成有许多输入和输出的控制系统，可以完成高度复杂的功能。

为了说明人的行为如同一个反馈控制系统，我们把取走桌上一个东西作为目标。当人正要取走这样东西时，大脑给手臂发出信号以执行这个任务。眼睛作为检测装置，连续地将手的位置反馈回去。手与东西的距离是误差，当手碰到东西时，此误差显然为零。这是一个典型的闭环控制例子。但是，如果要求一个人取走东西，而他又是盲人，他只能估计东西的正确位置，很有可能摸不到这样东西。因为眼睛瞎了，反馈回路断了，盲人只能成为一个开环控制系统。图1—3的方框图介绍了取走东西的这种行为。

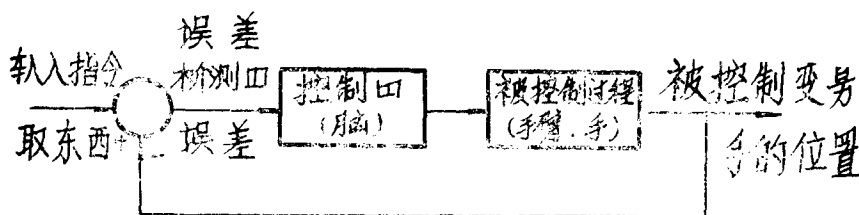


图1—3 相当于闭环控制系统的人的行为的方框图

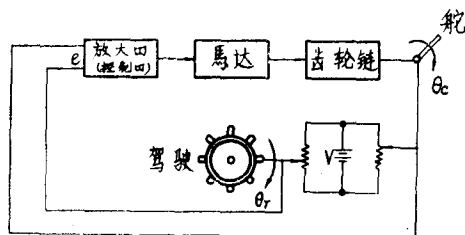


图1—4 操舵系统

图 1—4 介绍另一个闭环控制系统的例子，即船用操舵系统的方框图。在这种情况下，控制目标是舵的位置，参考输入由驾驶盘送入。驾驶盘和舵的相对位置的误差信号就是用来调节控制器和马达的信号。当舵最后调到指定参考方向上时，误差检测器的输出为零。假设，驾驶盘的位置突然转动 R 单位，如图 1—5 (a) 所示是一个时间信号。舵的位置作为时间的函数，取决于系统的特性，可能出现如图 1—5 (b) 所示的一种典型响应。因为所有物理系统均有电气与机械惯性，舵的位置不能立即对阶跃输入作出响应，但最终会逐渐向预定位置移动。在稳定之前，响应经常相对于最终位置进行摆动。显然，希望操舵控制有一个非振荡响应。

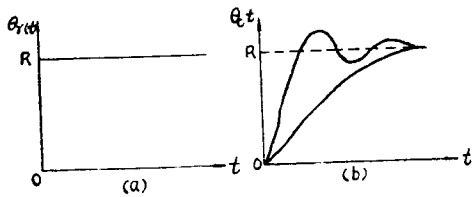


图 1—5 (a) 操舵系统的阶跃位移输入
(b) 典型的输出响应

闭环控制系统的基本部件与方框图表示于图 1—6 中。一般，一个反馈控制系统的结构不见得限于图 1—6 这种方式。复杂系统中，可能有多个反馈回路和元件方框。

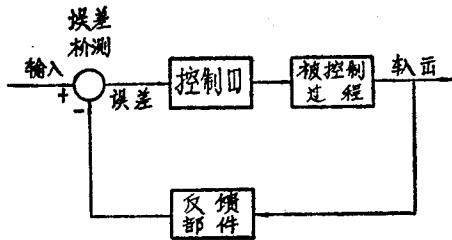


图 1—6 一个反馈控制系统的基本部件

图 1—7 (a) 说明一个卷绕过程的张力控制系统的部件。从动卷盘上的材料可能是一卷纸或电缆，这些纸或电缆送至诸如切纸机或印刷机之类的加工部分，然后再卷至另一卷盘上。这种情况下，控制系统将材料或纸幅的张力维持在预定值以避免诸如撕裂，过紧或打折等问题。

为调节张力，将纸幅拉下来绕过一个加重卷筒，从而形成一个半环状，卷筒装在轴臂上，能够自由地上下运动。卷筒和轴臂合称为导纸辊。

当系统工作时，纸幅以恒定的速度正常地运行。导纸辊的理想位置是水平面，此时，纸幅的张力等于导纸辊重量 W 的一半。从动卷盘上的电子制动器产生约束性的转矩以便导纸辊在任何时候保持在水平面。

在实际操作时，由于外界的扰动，纸幅材料的不均一和不规则，以及从动卷盘有效直径的减少，导纸辊不能维持于水平面，除非采取某种方式适当地检测导纸辊位置并控制约束性制动器的转矩。

为纠正导纸辊位置的误差，用一个角度检测器测量角度偏移，并通过控制器用一个与误差成比例的信号控制制动器。图 1—7 (b) 的方框图表明了系统部件间的联结。

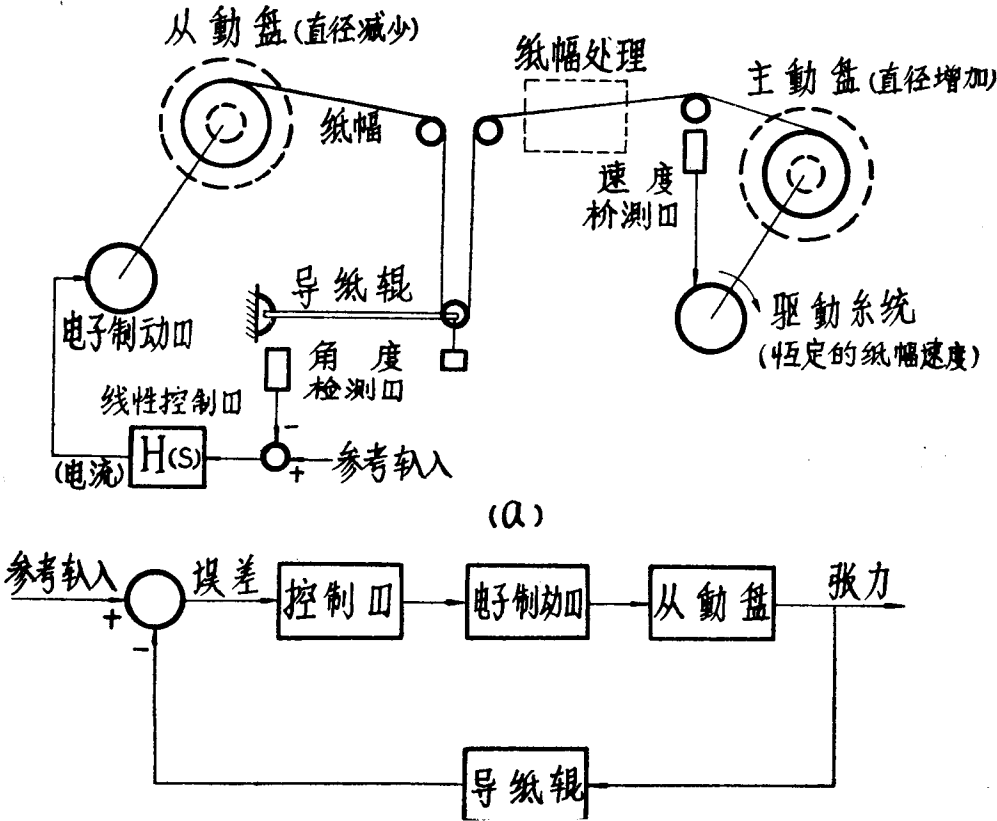


图 1—7 (a) 张力控制系统
(b)张力控制系统中基本部件与相互连结 的示意方框图

1.2什么是反馈和反馈效应？

反馈的概念在控制系统中占有重要的地位。在1.1节中，我们论证了反馈是一 闭环控制系统的主要条件。没有反馈，控制系统就不能获得大多数实际应用所要求的精确性和 可靠性。然而，从更严密的观点出发，反馈的定义和意义比1.1节的几个例子更加 深刻，并更难于论证。实际上、使用反馈的理由远远不止是将输入与输出进行比较以减少误差。减少系统的误差仅仅是反馈对系统带来的许多效果之一。我们现在要证明反馈对稳定性、带宽、总增益、阻抗和灵敏度等系统品质特性也有影响。

为了了解反馈对控制系统的影响，我们必须广泛地考查这种现象。当为了控制的目的有意识地使用反馈时，很容易识别是否存在反馈。然而在许多情况下，我们原先认为是固有的非反馈系统的物理系统，当用一定方式对它进行观察时，又会出现反馈。一般来说，如果在系统的变量之间存在因一果关系的闭路，那么就存在反馈。这种观点必然会承认在大量系统

中均存在反馈，而原来这些系统是作为非反馈系统看待的。由于反馈和控制系统理论的实用性，一旦确定有上述方式的反馈存在时，不管有无物理反馈，这种广义的反馈定义使许多系统得以用系统的途径进行研究。

我们现在要研究反馈对系统品质诸方面的影响。在这方面，由于缺乏线性系统理论的必要知识和数学基础，在我们的讨论中只能采用简单的静态系统的符号。我们考虑图 1—8 所示的简单反馈系统结构，这里 r 是输入信号， c 是输出信号， e 是误差， b 是反馈信号。参量 G 和 H 可以看成恒定增益。用简单的代数表达式很容易证明系统的输入—输出关系如下：

$$M = \frac{c}{r} = \frac{G}{1 + GH} \quad (1-1)$$

用这个反馈系统结构的基本关系，我们可以揭示出反馈的某些重要效果。

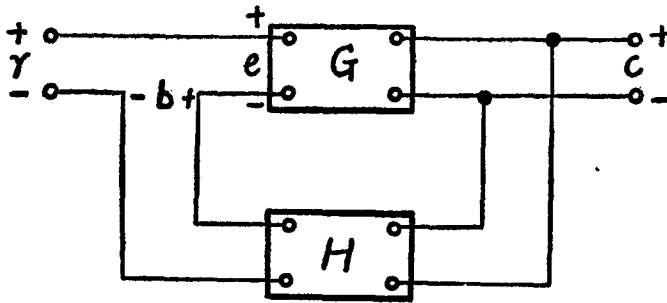


图 1—8 反馈系统

反馈对总增益的影响

如公式 (1—1) 所示，反馈对非反馈系统的增益 G 的影响是 $(1 + GH)$ 因子。图 1—8 系统中反馈的基准是负的，因为反馈信号指定为负号。 GH 量本身可能包含负号，所以反馈的总效果可能是增加或减少增益。在实际控制系统中， G 和 H 是频率的函数，所以在一个频率范围内， $1 + GH$ 的量值可能大于 1。而在另一个频率范围内，又可能小于 1。所以，在一个频率范围内，反馈可能增加系统增益，而在另一个频率范围内，又可能减少了系统的增益。

反馈对稳定性的影响

稳定性这个概念是用来描述系统是否能跟随输入命令。通俗地讲，如果系统的输出摆脱控制或无限地增加，则系统是不稳定的。

要研究反馈对稳定性的影响，我们须再一次用到公式 (1—1)。如果 $GH = -1$ ，对于任意有限的输入，系统的输出是无限大的。因此，我们说反馈能使原来稳定的系统变得不稳定。更确切地说，反馈好比一个双刃刀片，如果用得不合适，它是有害的。应该指出的是，在这里我们仅仅接触了静态情况，而一般 $GH = -1$ 决不是不稳定的唯一条件。

可以证明，反馈的优点之一就是能使不稳定的系统稳定下来。我们假设图 1—8 的反馈系统是不稳定的，因为 $GH = -1$ 。如果按图 1—9 所示再加进一个负反馈回路，则整个系统的输入—输出关系是：

$$\frac{c}{r} = \frac{G}{1 + GH + GF} \quad (1-2)$$

显然，由于G和H的性质所致，即 $GH = -1$ ，内反馈回路是不稳的。但是只要选择恰当的外部反馈回路增益F，整个系统可以作到稳定。

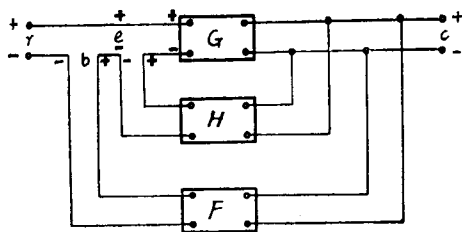


图 1—9 有两个反馈回路的反馈系统

反馈对灵敏度的影响

在设计控制系统时，灵敏度的考虑是一个重要因素。因为所有的物理元件都要随环境而变化，随时间而变，所以我们不能认为一个控制系统的参量在系统的全部工作寿命内是完全稳定的。例如，一个电动机的绕阻阻抗在运行时随马达温度的升高而变化。一般，一个优良的控制系统对这些参量的变化应该很不灵敏，而同时又能准确地响应命令。我们将要研究反馈对参量变化的灵敏度有什么影响。

参看图 1—8 的系统，我们把G当成可变的参量。整个系统的增益M对G变化的灵敏度定义如下：

$$S_g^M = \frac{\partial M/M}{\partial G/G} \quad (1-3)$$

这里 ∂M 表示G增量变化引起的M增量变化， $\partial M/M$ 和 $\partial G/G$ 分别表示M和G的百分率变化。由公式(1—1)，可以导出灵敏度函数 S_g^M ，我们得：

$$S_g^M = \frac{\partial M}{\partial G} \times \frac{G}{M} = \frac{1}{1+GH} \quad (1-4)$$

由此式可见，增加GH，就可使灵敏度函数维持任意小，系统总保持稳定。而在开环系统中，系统的增益对G的变化就有一一对应的关系。

一般，一个反馈系统的系统增益对参量变化的灵敏度取决于参量的设置部位。读者可导出图 1—8 系统对H变化的灵敏度。

在有外部扰动或噪音时反馈的效应

所有的物理控制系统在工作时均受到某些外界信号或噪音的干扰。比如。电子放大器的热噪音电压、电动机的电刷或换向噪音。

反馈对噪音的影响主要取决于噪音由何处进入系统、不能泛泛而论。不过，在许多情况下，反馈可以减少噪音对系统性能的影响。

让我们参看图 1—10 的系统，其中r表示命令信号，n表示噪音信号。当不存在反馈时， $H=0$ ，输出c为：

$$c = G_1 \cdot G_2 \cdot e + G_2 \cdot n \quad (1-5)$$

这里 $e=r$ 、输出的信噪比定义为：

$$\frac{\text{信号产生的输出}}{\text{噪音产生的输出}} = \frac{G_1 G_2 e}{G_2 n} = G_1 \frac{e}{n} \quad (1-6)$$

显然，要增加信噪比的话，我们就要提高 G_1 的量值，或使 e 远远大于 n 。而 G_2 的变化对信噪比没有任何的影响。

当存在反馈时，由 r 和 n 同时引起的输出为：

$$c = \frac{G_1 G_2}{1 + G_1 G_2 H} r + \frac{G_2}{1 + G_1 G_2 H} n \quad (1-7)$$

将公式(1-7)和(1-5)稍加比较，可以看出公式(1-7)的输出中，噪音分量减少了 $1 + G_1 G_2 H$ ，但信号分量也减少了同样的数量。信噪比如下：

$$\frac{\text{信号产生的输出}}{\text{噪音产生的输出}} = \frac{G_1 G_2 r / (1 + G_1 G_2 H)}{G_2 n / (1 + G_1 G_2 H)} = G_1 \frac{r}{n} \quad (1-8)$$

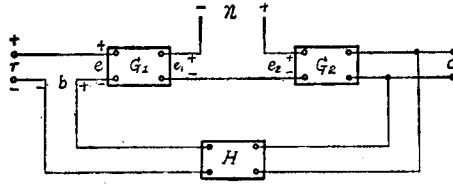


图 1-10 有噪音信号的反馈系统

这与没有反馈的情况一样。在这种情况下，反馈对图 1-10 系统输出的信噪比没有直接的影响。但是，在一定条件下，反馈还是有可能改善信噪比。我们假设在图 1-10 的系统中， G_1 增加到 G_1' 、输入 r 增加到 r' ，其它参量不变，则由输入信号单独引起的输出与没有反馈的情况一样。换句话说。

我们使

$$C|_{n=0} = \frac{G_1' G_2 r'}{1 + G_1' G_2 H} = G_1 G_2 r \quad (1-9)$$

如加大 G_1 、 G_1' ，由噪音单独引起的输出变为：

$$C|_{r=0} = \frac{G_2 n}{1 + G_1' G_2 H} \quad (1-10)$$

这小于 G_1 没有增加时 n 的输出，现在，信噪比为：

$$\frac{G_1 G_2 r}{G_2 n / (1 + G_1' G_2 H)} = \frac{G_1 r}{n} (1 + G_1' G_2 H) \quad (1-11)$$

这比没有反馈的系统的信噪比大 $(1 + G_1' G_2 H)$

一般，反馈对带宽、阻抗、瞬态响应与频率响应等性能指标也有影响。通读了本书的其它章节后，就会了解这些影响。

1.3 反馈控制系统的种类

反馈控制系统有几种分类方式，这要根据分类的目的而定。例如，按照分析和设计的方法，反馈控制系统分为线性和非线性，时变和非时变。按照系统内的信号种类，常常分为连续数据系统和离散数据系统，或者，调制和非调制系统。就系统部件的类型而言，我们经常遇到这样的名称，如机电控制系统，液压控制系统，气动控制系统和生物控制系统。控制系统常常根据系统的主要目的而分类。一个位置控制系统和一个速度控制系统各按其名称的含

义来控制输出。一般，还有许多按照系统特点来划分系统的其它方法。关键是掌握控制系统常见的分类方法，以便在着手这些系统的分析与设计之前，能统筹兼顾。

线性与非线性控制系统

这种分类是根据分析和设计的方法而进行的。严格地讲，实际上并不存在线性系统，因为所有的物理系统在某种程度上讲都是非线性的。线性反馈系统纯粹是分析者为了简化分析和设计而造就的理想模型。当控制系统的信号值限制在一定范围，在此范围内系统表现为线性特征（即迭加原理），则系统基本上是线性的。但是，当信号值超过了线性范围，根据非线性含义，系统就不能再被当作线性系统了。例如，控制系统所用的放大器经常在输出信号增大时表现出饱和效应，马达的磁场通常有饱和性质。控制系统中其它常见的非线性效应还有：齿轮连接的间隙或失灵区，弹簧的非线性，动作部件之间的非线性摩擦力或转矩等。常常有意在控制系统中引入非线性以改善系统的性能或提供更有效的控制。例如，要实现最小时间控制，就使用一个开关（乒乓开关或继电器）型的控制器。许多导弹和飞机控制系统就使用这类控制系统。例如、在导弹和飞机的位置控制中，喷嘴装在飞行器旁边以提供位置控制的反作用转矩。这些喷嘴常常被控制为全开或全闭方式，这样，在一定的时延由指定喷嘴放出固定数量的空气，从而控制了火箭的位置。

许多分析和图解技术可以用来设计和分析线性系统。但非线性系统很难从数学上处理，也没有什么一般方法可用来解决各种非线性系统的问题。

非时变和时变系统

当控制系统的参量在系统工作期间内对时间是稳定的话，我们称之为非时变系统。大多数物理系统包含的部件在某种程度上随时间而漂移或变化。如果参量的变化在工作期间内是显著的，系统就称为时变系统。例如，图 1—7 张力控制系统中，随着材料转到主动盘上，从动的盘半径随时间而减少。虽然，不存在非线性的时变仍旧是一个线性系统。但这种时变系统的分析远远比线性非时变系统的分析要复杂。

连续的数据控制系统

连续的数据系统是这样一种系统，其系统各部分的信号均是连续时变量 t 的函数。在所

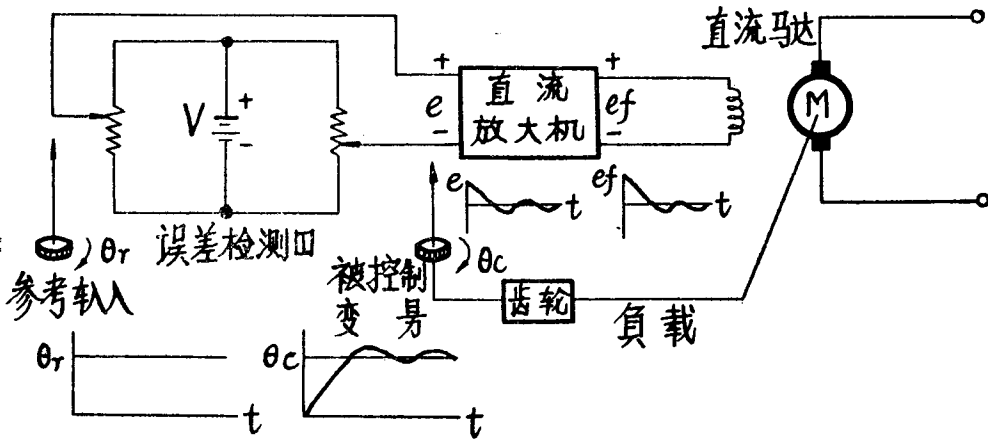


图 1—11 典型的直流闭环控制系统的方案图

有的连续数据控制系统中，信号可进一步分为交流或直流。这里，交流或直流控制系统有特定的意义，与电子工程中的交流和直流的一般意义不同。交流控制系统意味着系统的信号是用某些调制方案进行调制的。另一方面，一个直流控制系统并不意味着系统的所有信号均是直流的，因为那样就没有控制动作了。一个直流控制系统仅仅表明信号是未经调制的，但从一般的定义来看，它们还是交流的。图 1—11 是一个闭环直流控制系统的原理图。系统对一阶跃输入的典型响应示于图中。直流控制系统的典型部件是电位计，直流放大器，直流马达和直流转速表。

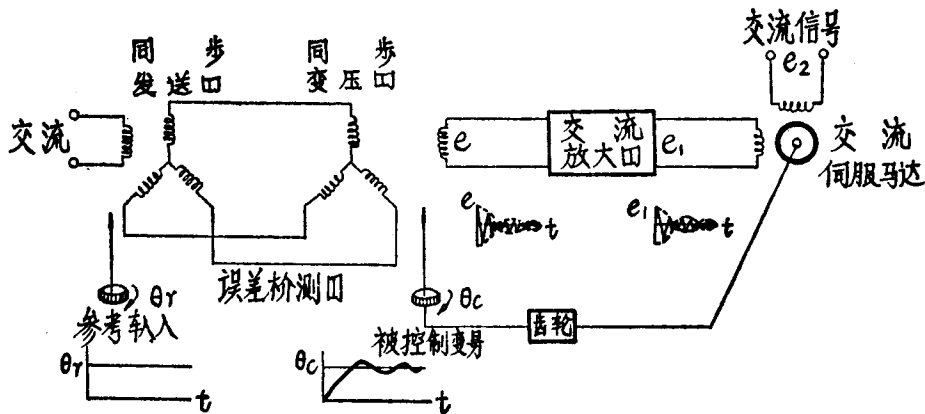


图 1—12 典型的交流闭环控制系统的方案图

图 1—12 是一个典型的交流控制系统的原理图。在这种情况下，系统的信号是被调制的，也就是说信息由交流载波信号传送。注意，如果交流系统和直流系统的控制目标是等同的话，交流系统输出的被控变量的性能与直流系统的相似。此时，被调制信号由控制马达的低通特征加以解调。交流控制系统的典型部件是同步发送器，交流放大器、交流马达，陀螺仪与加速度计。

实际上，并不是所有的控制系统都严格地分为交流或直流型。一个系统可能混有交流和直流部件，在系统的各个点用调制器和解调器处理信号。

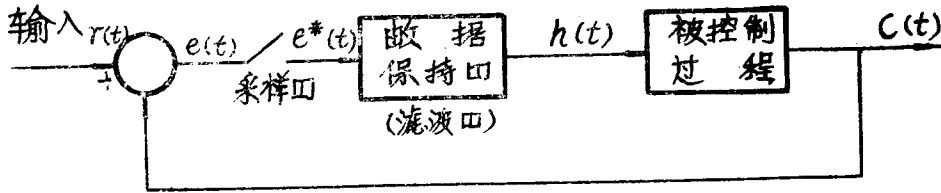


图 1—13 采样数据控制系统的方框图

采样—数据和数字控制系统

采样—数据和数字控制区别于连续数据系统之处在于：在系统某一点或几点的信号是脉冲序列或数字码的形式。通常，采样数据系统归类于一种更普通的系统，即其中信号都是脉冲数据的形式，而数字控制系统是使用数字计算机或控制器的系统。本书中，“离散数据控制系统”一词代表了两种类型的系统。

一般，一个采样数据系统是在规定的时间间隙性地接收数据或信息。例如，控制系统的误差信号只能采用间断性的脉冲形式。在这种情况下，在两个连续脉冲之间，控制系统不接受误差信号的信息。图 1—13 说明了一个典型的采样数据系统是如何工作的。连续的输入信号 $r(t)$ 加到系统上，用采样器对误差信号 $e(t)$ 采样，采样器的输出是脉冲列。采样器的采样速率可以统一，也可以不统一。控制系统内加入采样装置后有许多好处，其中最容易理解的好处是数个控制通道可以分时使用昂贵的设备。

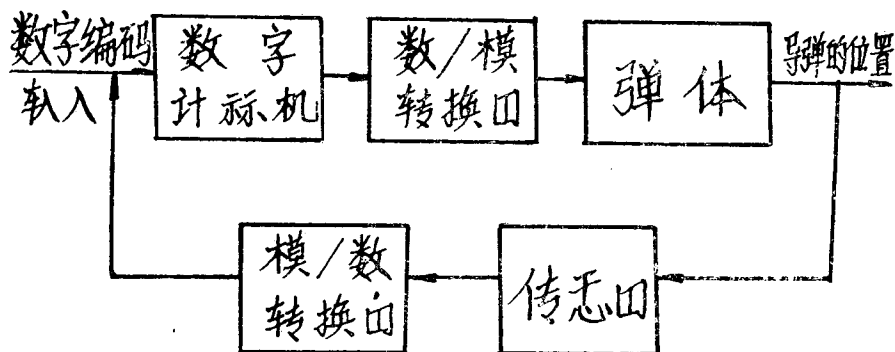


图 1—14 导弹的数字式自动驾驶仪

最近几年，由于数字计算机有很多优点，诸如体积小，使用灵活，计算机控制已越来越普及。许多航空系统的数字控制器可以包含几千个分立元件，而体积却不超过这本书的大小。图 1—14 表明一个导弹的数字式自动驾驶仪的基本部件。

第二章 数 学 基 础

2.1 引 言

控制系统的研究在相当大的程度上是依赖于应用数学。开展经典控制理论研究的数学基础有复变量理论,微分方程,拉普拉斯变换和 z -变换。而现代控制理论则要求更深的数学基础。除上述内容之外,现代控制理论还涉及矩阵、集论、线性代数、变分法与各种类型的数学程序设计等。

2.2 复变量的概念

复变量理论在控制系统的分析和设计中占有重要地位。当研究线性的连续—数据系统并使用传递函数的方法时,必须掌握复变量和复变函数的概念。

复变量

复变量 s 可看作有两个分量:实数分量 σ 和虚数分量 ω 。用图表示的话,在复平面 s 上,实数分量用横轴代表,而虚数分量用纵轴表示。换句话说,复变量总是由有 σ 轴和 $j\omega$ 轴的复平面上的一点所确定。图2—1表示复平面 s ,其中任一点 $s = s_1$,由座标 $\sigma = \sigma_1$ 和 $\omega = \omega_1$ 所确定,或简单地表示为 $s_1 = \sigma_1 + j\omega_1$

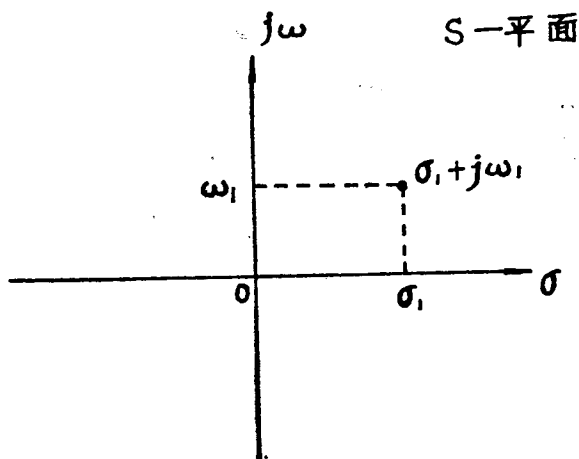


图 2—1 复平面 S

一个复变量的函数

如果,对于复变量 s 的任一值,函数 $G(s)$ 有相应值与其对应,则函数 $G(s)$ 就是复变量 s 的函数。因为 s 有实数和虚数两部分,所以函数 $G(s)$ 也用其实部和虚部表示,即为:

$$G(s) = \operatorname{Re}G + j\operatorname{Im}G \quad (2-1)$$

其中 $\operatorname{Re}G$ 表示 $G(s)$ 的实部, $\operatorname{Im}G$ 表示 G 的虚部。所以,函数 $G(s)$ 也可以用复平面 G 表