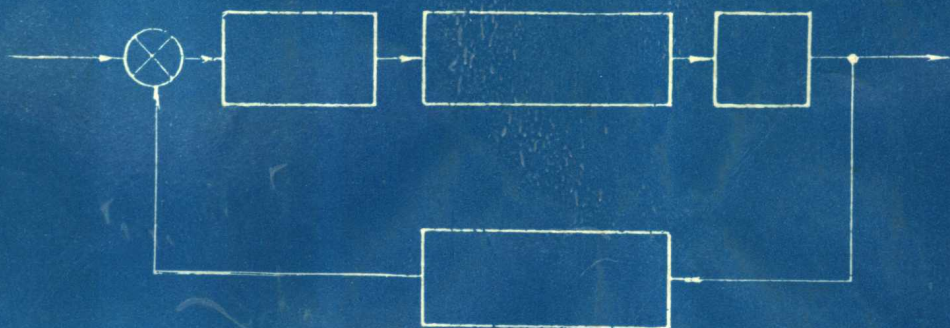
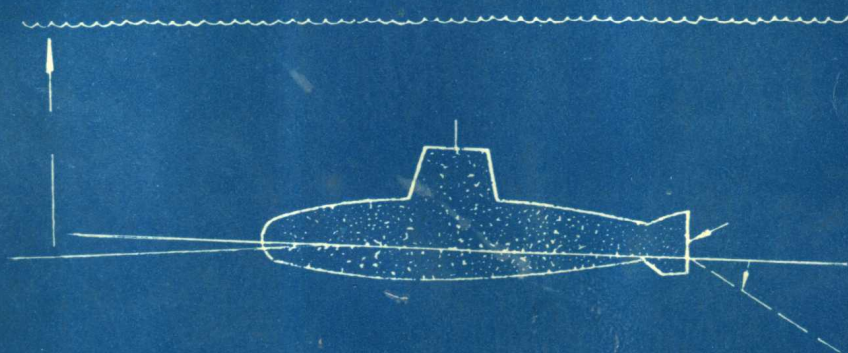


控制系统工程设计

荆兆寿 刘 胜 编著

哈尔滨船舶工程学院出版社



控制系统工程设计

荆兆寿 刘 胜 编著

哈尔滨船舶工程学院出版社

782012

(黑)新登字第9号

内 容 简 介

本书共分9章,介绍了控制系统的一般技术指标及设计步骤,系统分析设计的数学方法,误差分析,典型负载分析,数学模型的建立,系统的工程设计,多变量系统的频域设计以及控制系统的调试等。

本书可作为大专院校自动控制、工业电气自动化、导航及仪表等专业的教学参考书,对从事自动控制的工程技术人员亦有参考价值。

控 制 系 统 工 程 设 计

荆兆寿 刘胜 编著

责任编辑 朱春元

哈尔滨船舶工程学院出版社出版
新华书店首都发行所发行
毕升电脑排版有限公司排版
哈尔滨工业大学印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 14.5 字数 340 千字

1993年9月 第1版 1993年9月 第1次印刷

印数:1—2000册

ISBN 7-81007-307-9/TP·16

定价:9.00元

前 言

自动控制系统在国民经济和现代化建设中占有重要的位置。本书是根据自动控制、工业电气化自动化、陀螺导航与仪表专业教学计划安排而编写的。

本书侧重介绍了线性连续控制系统特别是随动系统和调节系统的工程设计方法,专业基础课程有《电机与拖动》、《模拟电子技术》、《自动控制原理》、《自动控制元件》等。全书共分九章。第一章介绍了反馈控制系统及其特点,一般性技术指标要求及设计步骤,第二章介绍了控制系统设计中用到的教学方法—频谱分析与统计分析方法;第三章讲述了控制系统的误差分析;第四章是控制系统的典型负载分析;第五章介绍了建立被控对象数学模型的方法;第六章、第七章讲述了随动系统和调节系统的工程设计方法;第八章介绍了多变量控制系统的设计;第九章介绍了控制系统的调试与试验。

本书可作为大专院校本科生《控制系统设计》课程的教学参考书,对于从事控制工程的工程技术人员也有一定的参考价值。本书是在作者从事多年自动控制系统工程设计实践和为本科生讲授《自动控制系统设计》讲义的基础上修改充实而完成的。本书第一、四、七、九章由荆兆寿执笔,第五、八章由刘胜执笔,第二、三、六章由荆兆寿、刘胜合作执笔。由于作者水平有限,错误与不当之处在所难免,敬请读者批评指正。

哈尔滨船舶工程学院的李殿璞教授、赵希人教授仔细审阅了全书,并提出了许多宝贵意见,作者在此表示感谢。

编著者

1993年3日于哈尔滨

目 录

第一章 绪 论	1
§ 1-1 概 述	1
§ 1-2 反馈控制系统的一般性技术指标	10
§ 1-3 系统设计计算的内容和步骤	12
第二章 控制系统分析与设计中的数学方法	14
§ 2-1 频谱分析概述	14
§ 2-2 统计分析方法	31
第三章 控制系统的误差分析	49
§ 3-1 引 言	49
§ 3-2 控制系统的原理误差	51
§ 3-3 控制系统中的元件误差	61
§ 3-4 控制系统设计中的误差分配原则	68
第四章 控制系统的负载和干扰模型	70
§ 4-1 系统典型负载的分析	70
§ 4-2 典型系统的综合负载分析	73
§ 4-3 随机干扰负载模型	78
第五章 控制系统建模的工程方法	86
§ 5-1 引 言	86
§ 5-2 几种典型环节的动态特性	86
§ 5-3 控制对象的理论建模	89
§ 5-4 时域法辨识系统	99
§ 5-5 频域法辨识系统	105
§ 5-6 相关分析法辨识系统	112
§ 5-7 最小二乘法辨识系统模型	118
第六章 随动系统设计	123
§ 6-1 系统的稳态设计	123
§ 6-2 系统的动态设计	139
§ 6-3 提高系统品质的其它措施	155
第七章 调节系统设计	163
§ 7-1 调节系统的特点	163
§ 7-2 抑制干扰的理论方法	163
§ 7-3 调节规律分析	165
§ 7-4 调节规律设计与实现	173

第八章 多变量控制系统的频域设计	182
§ 8-1 概 述.....	182
§ 8-2 多变量系统设计要求.....	190
§ 8-3 解耦系统的分析设计.....	191
§ 8-4 稳定性判据.....	193
§ 8-5 对角优势阵的实现.....	202
第九章 控制系统的调试与试验	206
§ 9-1 概 述.....	206
§ 9-2 系统调试的一般步骤与方法.....	207
§ 9-3 控制系统的调试实例.....	215
§ 9-4 振荡原因分析.....	221
主要参考文献	226

第一章 绪 论

§ 1-1 概 述

随着科学技术的发展,控制系统在促进和发展现代生产技术方面起着越来越重要的作用。事实上,在我们日常的生产实践和生活中的每个方面都会遇到某些类型的自动控制系统。例如,温度和湿度自动调节系统;产品质量控制系统;自动装配线;机床控制;飞行器和船舶控制;电力系统自动控制和机器人乃至办公室自动化系统等等。关于自动控制系统的原理,已经在专门的课程中进行了深入的研究与论述,虽然是从理论方面来研究自动控制系统的内在运行机理,但它却是指导我们去分析、认识和设计自动控制系统的理论基础。然而,实际的自动控制系统是具体的,千差万别的。如何根据一个控制系统所要达到的控制目标,根据被控对象的实际特点和动力学性能去设计综合一个自动控制系统,有它自身的共同的规律需要我们去研究和掌握。

本课程主要介绍反馈控制系统的基本设计方法。因为在生产实践中大量被应用的控制质量比较高的大多是反馈控制系统。它有些什么特点呢?我们简略地讨论一下。

一、开环控制系统(无反馈系统)和闭环控制系统(反馈控制系统)

我们将用以完成一定的任务的一些元件、部件和装置的有机组合称为系统。图 1-1 给出了开环控制系统框图。



图 1-1 开环控制系统的方框图

这类系统的工作过程是将输入信号或指令 r 输入控制器,控制器根据输入的信号或指令输出一个激励信号 e ,作用于控制过程,将被控制量调节到希望值。这种开环控制系统是最简单最经济的控制系统。开环控制系统缺乏精确性和适应性。例如,用定时器来控制家用暖风机,用定时器来控制洗衣机的洗衣时间,当定时器所调定的时间一到则系统完成了控制过程。这时房间里的温度或所洗的衣服是否清洁,控制器是不管的。被调节的房间温度,还会受到环境温度、门窗是否打开等因素的影响;被洗的衣服的清洁程度要受到洗衣粉质量及衣服原来清洁程度的影响。这些影响因素,固然可以由操作人员的经验和熟练程度来弥补,但一些外界干扰因素往往是随机的,事先无法定量知道,这就导致开环控制系统会产生比较大的误差。这种缺乏精确性和对环境、干扰的适应能力,使得开环控制系统只能应用于一些简单的场合。

图 1-2 是闭环控制系统的原理框图。它的控制过程是将输入命令信号和输出值之差作为误差信号送到控制器,控制器根据误差信号输出信号给被控过程。例如,一个人伸手拿桌子上的一本书,大脑先发生指令给手臂,手接到命令后伸向书,而眼睛则在随时检测手与书之间的相对位置,然后把信息反回大脑,直到手拿到了书为止。如果在拿书时把人的眼睛蒙上,那么人只能靠原先观察到的信息伸出手去试探。这相当于反馈通道断开的情况。

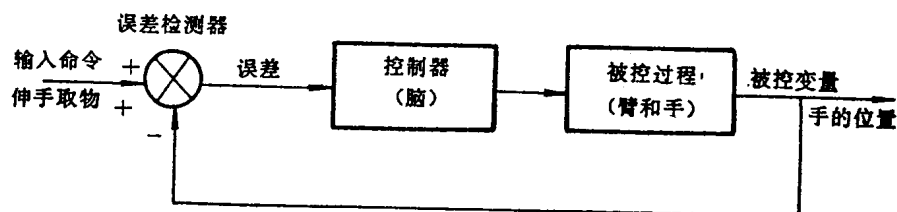


图 1-2 人作为一个闭环控制系统的方框图

图 1-3 所示为船舶航向舵随动系统。被控对象是航向舵,被控制量是舵转角。

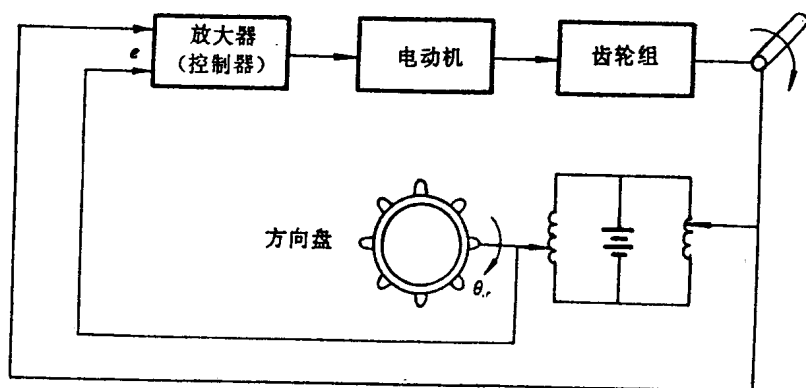


图 1-3 舵的控制系统

输入命令信号是由方向盘发出的,由电位器将方向盘转角转化成主令电压量。另一只电位器则检测出舵角,主令电压和反馈电压之差即代表了误差信号,再经放大器放大驱动电动机经齿轮组带动舵转动,舵转动的方向是使误差信号减小直至为零。这时被控量与主令信号一致,达到希望值。显然,如果系统响应足够快,舵角可以连续跟踪方向盘的变化。当存在水流作用或其他干扰企图改变舵角时,系统会自动地克服这些干扰因素,保持舵角与方向盘的协调。

图 1-4 是反映控制系统的基本结构框图。比较复杂的控制系统可能会有多个反馈回路,我们称之为多回路系统。

闭环控制系统的优点是明显的:第一,它连续不断地检测输入与输出的误差,用它来进行控制。第二,它可以把回路增益做得很高,使误差很小,这就意味着输出非常接近希望

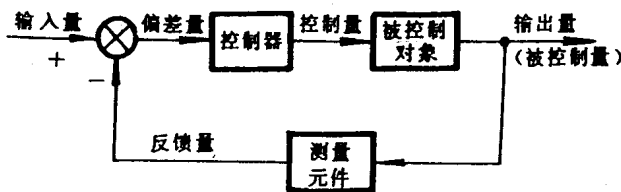


图 1-4 反馈控制系统的基本环节

值。第三，它能克服回路内的一些干扰，有对环境的适应性。这类控制系统广泛应用于工业、国防、空间技术和海洋工程中。

二、反馈的作用

一般地说，只要系统变量之间存在闭合的因果关系，反馈就是存在的。反馈的存在，对控制系统有深刻的影响。考察图 1-5 所示的最基本的反馈系统框图。图中 R 是输入， C 是系统输出， E 是误差，它的基本关系式是：

$$\Phi(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} \quad (1-1)$$

式(1-1)可以揭示出反馈对系统的总增益、稳定性、灵敏度、外部扰动噪声等的影响。

1. 反馈对总增益的影响

式(1-1)表明，当 $H(s) = 0$ 时，即无反馈时，系统的增益是 $G(s)$ ；而当 $H(s) \neq 0$ 时，即有反馈时，系统的增益是 $G(s)/(1 + G(s)H(s))$ 。式(1-1)描述了负反馈的情况，在反馈的情况下，当 $|1 + G(s)H(s)| > 1$ 时使系统增益降低，当 $|1 + G(s)H(s)| < 1$ 时，反馈使系统增益提高，而当正反馈时，反馈使系统增益提高。若考虑到 $G(j\omega)H(j\omega)$ 都是频率的函数，则不论正、负反馈都有可能会出现某个频段 $|1 + G(j\omega)H(j\omega)| > 1$ 或 $|1 + G(j\omega)H(j\omega)| < 1$ 的情况。

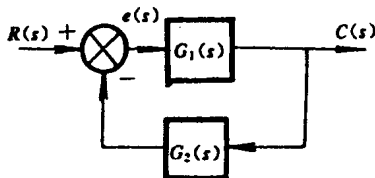


图 1-5 基本的反馈控制系统

2. 反馈对稳定性的影响

在式(1-1)中，若 $G(s)H(s) = 1$ ，则 $\Phi(s) = \infty$ ，系统不稳定。这说明反馈可以使本来稳定的系统变得不稳定。但也可以利用反馈使一个不稳定的系统变得稳定。如图 1-6 所示那样，内回路是一个不稳定的反馈系统，我们再加一个带负反馈 F 的外回路后，整个系统的传递关系为

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s) + G(s)F(s)} \quad (1-2)$$

只要正确的选择 $F(s)$ ，就可以使系统稳定。

利用反馈使本来不稳定的系统变得稳定的最典型的例子是倒立摆系统。图 1-7 所示为一倒立摆系统，摆是一根质量为 m 的杆，通过铰链支撑在质量为 M 的车上，车仅能沿水平面上 y 的方向运动。应用牛顿定律有

$$I \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = VL \sin \varphi - HL \cos \varphi$$

$$m \frac{d^2}{dt^2} (L \cos \varphi) = -mg + V$$

$$m \frac{d^2}{dt^2} (y + L \sin \varphi) = H$$

$$M \frac{d^2 y}{dt^2} = u - H$$

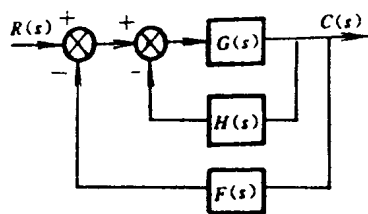


图 1-6 有两个反馈环的反馈控制系统

式中, $I = \frac{1}{3} mL^2$ 是杆对重心的转动惯量; L 是杆长的一半; V 是车作用到杆上方向朝上的垂直力;

H 是车作用到杆上朝右的水平力, 当车静止时, 杆处于垂直位置, 力 u 为零, 因此, 系统处于平衡状态, 而这个平衡位置是不稳定的。

我们考察一下加入控制力 u 以后系统的运动。取 φ 的小角度运动状态, 有 $\sin \varphi \approx \varphi$; $\cos \varphi \approx 1$ 。于是

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= a_{21}x_1 + b_2u \\ \dot{x}_3 &= x_4 \\ \dot{x}_4 &= a_{41}x_1 + b_4u \end{aligned}$$

或

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ a_{21} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ a_{41} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} 0 \\ b_2 \\ 0 \\ b_4 \end{bmatrix} u = AX + Bu$$

(1-3)

其中, $x_1 = \varphi$; $x_2 = \dot{\varphi}$; $x_3 = y$; $x_4 = \dot{y}$; $a_{21} = 3g(m+M)/L(m+4M)$; $a_{41} = -3mg/(m+4M)$; $b_2 = -3/L(m+4M)$; $b_4 = 4/(m+4M)$; X 是一个四维矢量, 其分量为 x_1, x_2, x_3, x_4 , u 为开环控制时, 仅当 A 的全部特征值为负实部时, 平衡点是渐近稳定的。 A 的特征值是下式的根:

$$\det(sI - A) = s^2(s^2 - a_{21}) = 0 \quad (1-4)$$

由于 a_{21} 是正的, 因而有一个正实数特征值, 故系统是不稳定的。

现在假设 u 是 x_1, x_2, x_3, x_4 的线性组合。

$$u = k_1x_1 + k_2x_2 + k_3x_3 + k_4x_4 \quad (1-5)$$

式(1-3)变为:

$$\begin{aligned} \dot{X} &= AX + B(k_1, k_2, k_3, k_4)X \\ &= (A + BK)X \end{aligned} \quad (1-6)$$

这时

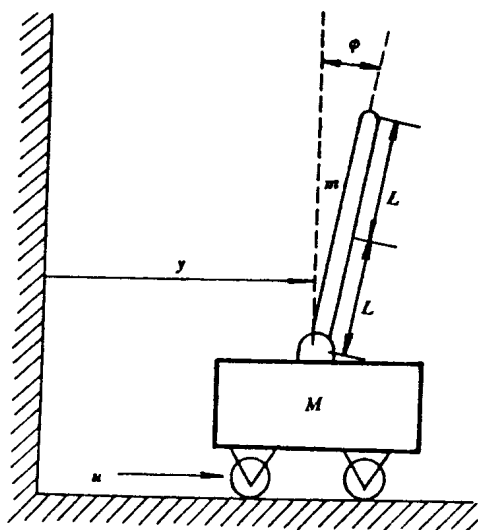


图 1-7 倒立摆系统

$$\det(sI - A - BK) = s^4 - (b_2k_2 + b_4k_4)s^3 - (b_4k_3 + a_{21} + b_2k_1)s^2 - (b_2a_{41}k_4 - b_4a_{21}k_4)s - (b_2a_{41}k_3 - b_4a_{21}k_3) = 0 \quad (1-7)$$

所有的根都具有负实部时,系统是稳定的.显然,对于任何一组 a_{21}, a_{41}, b_2, b_4 的值,总可以选择反馈系统 k_3, k_4, k_2 和 k_1 使式(1-7)中特征方程的根具有负实部.亦即,选择适当的 k_1, k_2, k_3, k_4 ,可以使系统稳定.式(1-5)称为线性状态反馈.因此,线性状态反馈总能使系统稳定.

3. 反馈对系统参数变化灵敏度的影响)

控制系统中各元件,部件的参数随着环境条件的变化和时间的推移,可能会有所变化.这些变化对系统的影响,我们希望尽可能小甚至不影响最好.引入反馈后有什么效果呢?我们考察图1-5所示的基本反馈控制系统.设 $G(s)$ 的参数可变. $\Phi(s)$ 对 $G(s)$ 变化的灵敏度定义为

$$S_G^* = \frac{\partial \Phi / \Phi(s)}{\partial G / G(s)} \quad (1-8)$$

式中, $\partial \Phi$ 表示由于 $G(s)$ 的增量引起 $\Phi(s)$ 的增量; $\partial \Phi / \Phi$ 和 $\partial G / G$ 分别表示相对增量,由式(1-1)可导出

$$S_G^* = \frac{\partial \Phi}{\partial G} \cdot \frac{G(s)}{\Phi(s)} = \frac{1}{1 + G(s)H(s)} \quad (1-9)$$

式(1-9)表明,在保持系统稳定的条件下,灵敏度函数可以用增大 $G(s)H(s)$ 的办法使之任意小.而在开环系统中,系统总增益将按1:1的关系响应 $G(s)$ 的变化.当系统由多个环节组成时,每个环节参数的变化对整个系统的影响与该环节所在位置有关.

4. 反馈对外部噪声或扰动的影响

一般来说反馈可以削弱外部扰动和噪声对系统的影响,削弱的程度与噪声进入系统的位置有关.图1-8所示为一有噪声干扰的反馈控制系统.

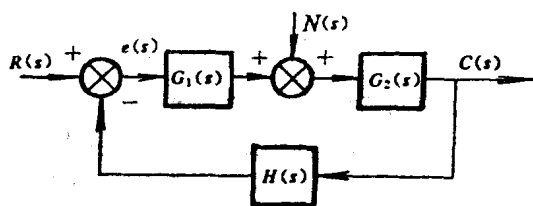


图1-8 有噪声信号的反馈控制系统

图中 $R(s)$ 表示指令信号, $N(s)$ 表示外加噪声扰动信号.没有反馈时 $H(s) = 0$, 输出 $C(s)$ 为

$$C(s) = G_1(s)G_2(s)E(s) + G_2(s)N(s) \quad (1-10)$$

其中 $E(s) = R(s)$ 输出信噪比的定义为

$$\frac{\text{信号引起的输出}}{\text{噪声引起的输出}} = \frac{G_1(s)G_2(s)E(s)}{G_2(s)N(s)} = G_1(s) \frac{E(s)}{N(s)} \quad (1-11)$$

为了增大信噪比,显然,要么增大 $G_1(s)$, 要么增大 $E(s)/N(s)$, $G_2(s)$ 对信噪比无任何影响。

有反馈时,由 $R(s)$ 和 $N(s)$ 同时作用于系统产生的输出为

$$C(s) = \frac{G_1(s)G_2(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)H(s)}R(s) + \frac{G_2(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)H(s)}N(s) \quad (1-12)$$

信噪比为

$$\frac{\text{信号引起的输出}}{\text{噪声引起的输出}} = \frac{G_1(s)G_2(s)R(s)/(1 + G_1(s)G_2(s)H(s))}{G_2(s)N(s)/(1 + G_1(s)G_2(s)H(s))} = G_1(s) \frac{R(s)}{N(s)} \quad (1-13)$$

它与无反馈时相同,这表明反馈并不直接影响图1-9所示系统的信噪比。然而,反馈的采用却在某些条件下提供了改善信噪比的可能性。式(1-13)和式(1-11)在形式上是一样的,然而实际上由于有负反馈的存在,获得同样的输出 $C(s)$,需要更大的 $G_1(s)$,例如,在图1-8的结构下, $G_1(s)$ 增至 $G'_1(s)$, $R(s)$ 增至 $R'(s)$,令有反馈作用下和无反馈时输出 $C(s)$ 相同,即令

$$C(s)|_{s=0} = \frac{G'_1(s)G_2(s)R'(s)}{1 + G'_1(s)G_2(s)H(s)} = G_1(s)G_2(s)R(s) \quad (1-14)$$

这时由噪声单独作用所产生的输出为

$$C(s)|_{R(s)=0} = \frac{G_2(s)n(s)}{1 + G'_1(s)G_2(s)H(s)} \quad (1-15)$$

现在的信噪比为

$$\frac{G_1(s)G_2(s)R(s)}{G_2(s)n(s)/(1 + G'_1(s)G_2(s)H(s))} = \frac{R(s)}{n(s)}G_1(s)(1 + G'_1(s)G_2(s)H(s)) \quad (1-16)$$

它比无反馈时的信噪比增加了 $G'_1(s)G_2(s)H(s)$ 倍。反馈对系统的带宽、阻抗、过渡过程及频率特性等均有影响。

三、两类基本的反馈控制系统

实际的反馈控制系统种类很多。有定常系统和时变系统,线性系统与非线性系统,连续控制与断续控制系统,模拟控制与数字控制系统等等。从控制的目标来看,常见的反馈控制系统有两大类,一类是随动系统,又称伺服系统;另一类是调节系统。随动系统的基本功能是控制被控对象跟踪输入信号。在跟踪输入信号的过程中要克服负载干扰及噪声扰动的影响;调节系统的基本功能是将被控对象调节或保持到某个状态。

图1-9和1-10分别给出了最简单的直流和交流随动系统原理线路图同时,也给出了它们在阶跃输入下的响应以及简单的信息传递和转化过程示意图。可以看出,随动系统总是控制输出轴跟踪、复现输入轴的位置,也有一些输入和输出物理量不同的伺服系统,例如力伺服系统。其输入可能是电压量,输出是力,力总是跟踪输入电压的变化。

图1-11所示为典型的温度调节系统原理图,图1-12为一液面调节系统原理图,图1-13为一潜艇定深调节系统示意图。

比较调节系统和随动系统,我们可以看出两者的区别与联系,它们的共同点在于都是反馈控制系统。但从各自的特点来看它们有以下几方面的差别:

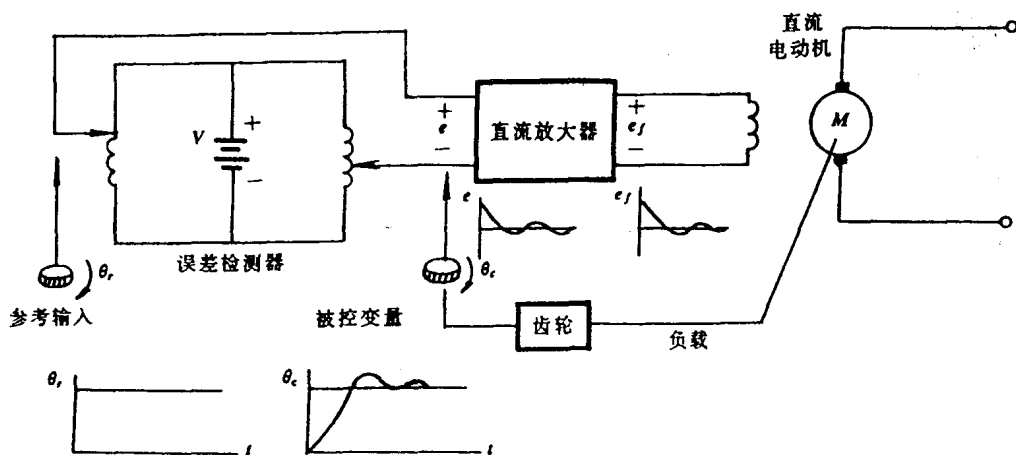


图1-9 典型直流随动控制系统原理图

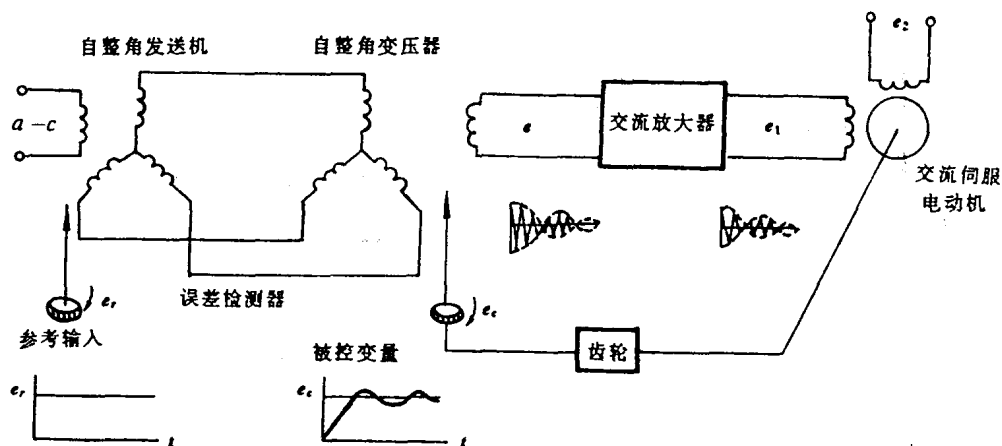


图1-10 典型交流随动控制系统原理图

1. 随动系统的输出总是复现输入，而输入多半是时变的，有的输入变化很快。例如高炮随动系统要跟踪瞄准敌机，目标运动很快。调节系统的任务是将输出调节到给定值上，虽然输入（给定值）也不是绝对不变，但其变化往往是阶段性的，例如船舵航向和潜艇定深系统，虽然航向和深度也要改变，但系统经常工作于保持航向和深度的状态。至于温度和压力调节系统则更是如此。

2. 随动系统的跟踪误差主要是由于输入信号的随机变化造成的，而调节系统的误差主要是由于干扰引起的。

3. 随动系统的输入一般事先是不知道的，而调节系统的输入一般是常值或阶段性变化的常值。

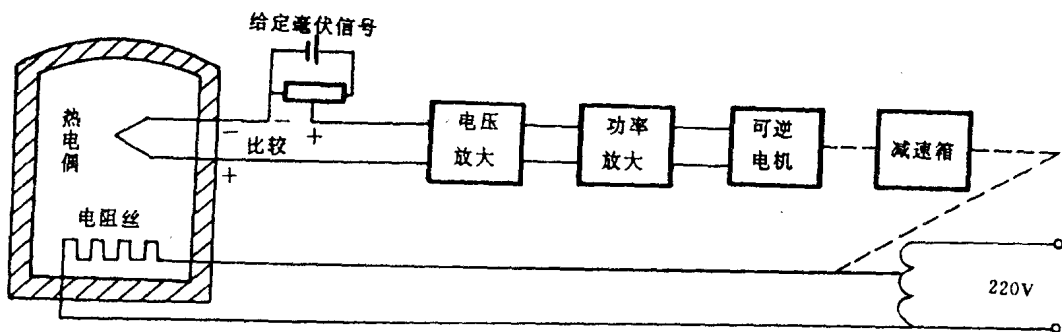


图1-11 电炉炉温自动调节系统

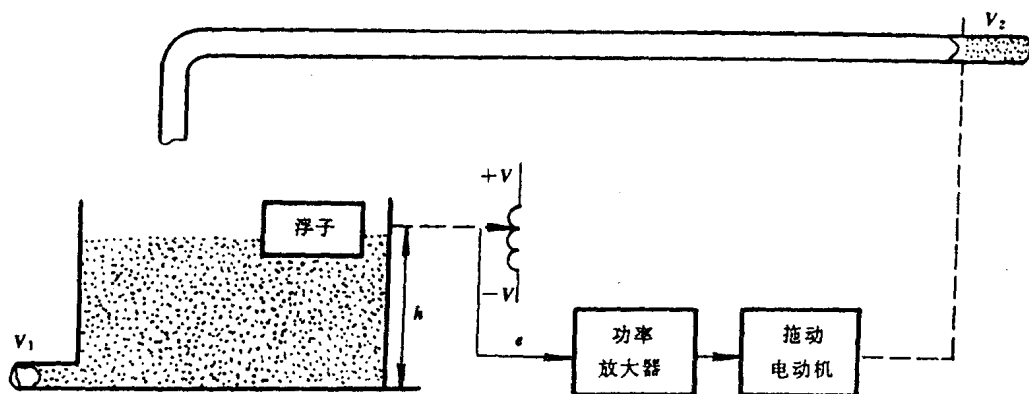


图1-12 贮槽液面自动调节系统

4. 对随动系统要求快速复现输入,因此对其过渡过程质量要求很高,调节系统要求调节精度高,而从一个状态转到另一个调节状态的过渡过程不一定很严格。

5. 随动系统执行元件主要要克服的负载是惯性和摩擦负载,而调节系统要克服的负载则是广义上的干扰负载,例如,保持航向要克服波浪和海流、风的干扰,调节温度要克服环境温度变化或热量失散和损失的干扰等。

以上的区别也不是绝对的,而且两种系统也可能互相转化,例如,舰炮在军舰摇摆的情况下瞄准陆上不动的目标,其工况与调节系统类似。再如:舰船上的一些稳定系统它们虽然是将被控对象稳定在水平状态,但它们实际是驱动被控对象连续做与舰船摇摆相反的角运动,实质上是工作于随动状态。

四、本课程的主要内容

本课程主要讲述反馈控制系统的工程设计方法,对一些工程设计的共性问题,如所涉及的数学方法、模型的建立、负载分析、精度分析、仿真优化以及系统调试等做一般性的

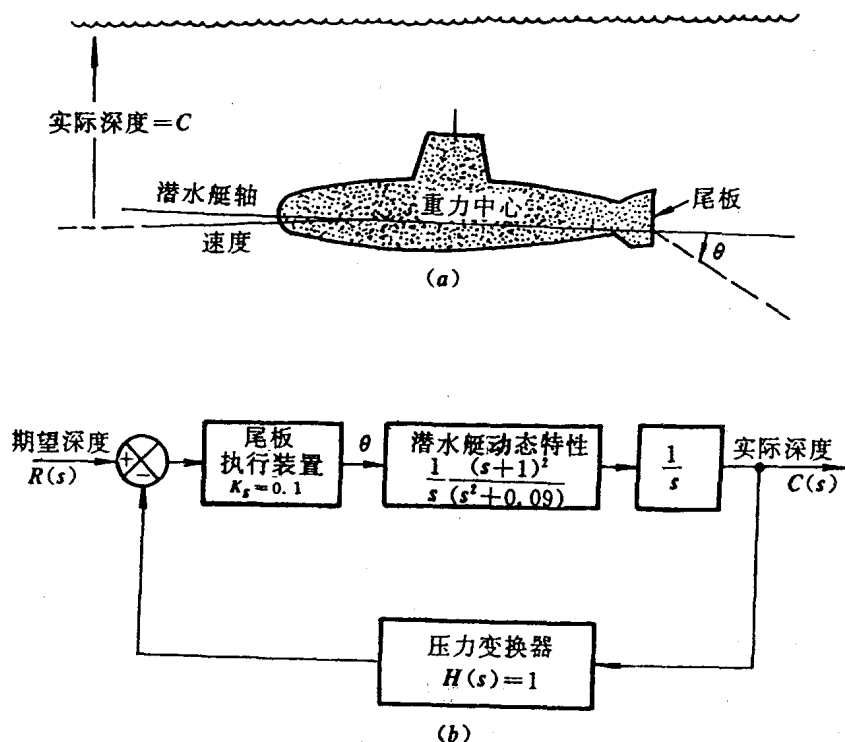


图1-13 潜艇定深控制系统

讨论,对随动系统和调节系统设计中的一些特殊问题则做了分别介绍。当然,两类系统设计中也有很多共性的问题,读者掌握以后可以互相贯通,举一反三。

需要强调的是,每种设计方法都有它的长处和局限性,在实践中还将继续发展和完善。学习时应注意掌握每种方法考虑问题的着眼点,处理问题的思路,如何将具体工程实际的要求转化成定量的计算,每种方法适应的场合等等,而不应把它们当作一成不变的教条。同时,也要看到,系统的工程设计绝不仅仅局限于理论设计计算,更重要的是工程实践(包括加工、制造、安装、调试、改进、试验等)。一个先进的合理的便于工程实现的设计方案对于指导工程实践固然有着重大意义,但系统最终成为理想可用的实际系统,还取决于工程实践的质量。

§ 1-2 反馈控制系统的一般性技术指标

工程上对控制系统的技术要求都是很具体的。这些要求规定了所要求设计的系统的各种性能指标,同时也是设计该系统的基本依据。对系统的技术要求一般以《设计任务书》或者以《技术规格书》的形式提出。由于实际控制系统有着各种不同的用途和工作环境,因而其技术要求也不尽相同。我们不可能一一定量说明对每种控制系统的技术要求。但却可以用一两个典型系统来说明这些技术要求的基本内容,同时还可以定性说明对一般控制系统的共同的技术要求。

一、对一般控制系统的共同技术要求

1. 性能品质方面的要求,例如控制精度,抗干扰能力,动态品质及响应带宽等这方面的指标对于不同的控制系统有不同的提法和定量描述。然而,只要是一个实用的控制系统,就必定会有其技术性能指标方面的具体的、定性定量的要求。

2. 对系统工作制(长期运行、间歇循环运行和短时运行等)方面的要求。

3. 可靠性方面的要求,包括寿命,故障率,平均无故障工作时间等。

4. 环境条件方面的要求,例如环境温度、湿度、防水、防化、防幅射、电磁兼容、抗振动、冲击、离心加速度等。

5. 对系统在结构、体积、重量、安装特点以及与其他相关系统或装置接口方面的要求。

6. 对系统经济性的要求,例如生产成本、选用元器件的通用性、标准化程度、能源消耗,维护使用条件等。

7. 对系统能源条件方面的要求,例如,电源或气源、液源的种类、规格、容量等。

二、对随动系统在性能品质方面的要求

1. 系统静误差 e_s

随动系统通常设计成无静差系统。用线性理论分析,系统在协调后静止时没有位置误差。但正如第三章所述,系统在实际工作状态下存在非线性因素,例如干摩擦,元件的误差、失灵区等因素会产生静误差,在设计指标中要提出对静误差的限制。

2. 速度误差 e_v 和正弦误差 e_m 或速度品质系统 K_v 和加速度品质系统数 K_a

当随动系统处于等速跟踪状态时,系统输出轴与输入轴之间的瞬时位置误差称为速度误差 e_v 。速度误差的量纲是位置量(角度或位移)。

当随动系统跟踪等幅等频正弦输入时,系统达到稳态后输出轴与输入轴之间的误差的幅度值称为正弦跟踪误差 e_m 。显然,正弦跟踪误差 e_m 与输入的幅度和频率都有关。在具体定量要求时,一定要明确输入幅度和频率。

速度品质系统数 K_v 是在斜坡输入时系统稳态跟踪工况下输出轴的角速度 Ω_r (或速度 V_r) 与速度误差 e_v 的比值。加速度品质系数 K_a 是在等加速度输入时系统稳态跟踪工况下输出轴的角加速度 ϵ (或线加速度 a) 与其对应的系统误差 e_s 的比值。

3. 最大跟踪角速度 $\Omega_{\max}$ (或速度 $V_{\max}$), 最低平稳跟踪角速度 $\Omega_{\min}$ (或速度) $V_{\min}$ 。最大跟踪角加速度 $\epsilon_{\max}$ (或加速度 $a_{\max}$)

最大跟踪角速度 $\Omega_{\max}$ 和最大跟踪角加速度 $\epsilon_{\max}$ 均指在系统跟踪误差不超出允许值的前提下所能达到的极限值。而最低平稳跟踪角速度则指系统匀速跟踪时所能达到的最低平稳角速度。

4. 振荡指标 M 和频带宽度 ω_b

随动系统闭环幅频特性 $\Phi(\omega)$ 的最大值 $\Phi(\omega_b)$ 与 $\Phi(0)$ (对于无静差系统 $\Phi(0) = 1$) 的比值称为振荡指标 M , $\Phi(\omega_b) = 0.707$ (对于有静差系统) 所对应的角频率 ω_b 定义为系统的带宽。

5. 系统对阶跃输入信号的响应

系统在零初始条件下, 突加输入阶跃信号, 系统在响应该阶跃信号时的最大超调量 $\sigma\%$ 、过渡过程时间 t_s 和振荡次数 N 所应限制的值。

6. 等速跟踪状态下, 负载扰动所引起的系统响应特性

系统等速跟踪时, 系统负载作阶跃或脉冲扰动的情况下, 系统的最大瞬时误差 $e_{\max}$ 和所对应的过渡过程时间 t_{tr} 均应有具体的限制。

三、对调节系统在性能品质方面的要求

调节系统的种类比较繁多, 被调节的物理量也是各种各样的。我们以调速系统为例来说明这类系统的技术要求。

1. 最高输出转速 $\Omega_{\max}$ 通常指调速系统在其调节范围内所能达到的最大输出值。当然在最大的输出下, 系统的调节精度应达到规定值。

2. 最低平稳输出转速 $\Omega_{\min}$

以上两项的比值就是调速系统的速度调节范围 D

$$D = \frac{\Omega_{\max}}{\Omega_{\min}} = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} \quad (1-17)$$

3. 对速度调节连续性与平滑性的要求。例如, 在 D 所规定的范围内是有级的调速还是无级连续调速; 被调速度是可逆的还是单向的; 是间断式工作还是连续运行等等。

4. 转速降 $\Delta\Omega$ 或静差率

转速降 $\Delta\Omega$ 是指控制信号一定的条件下, 理想空载转速 Ω_0 与额定运行时转速 Ω_r 之差, 即

$$\Delta\Omega = \Omega_0 - \Omega_r \quad (1-18)$$

静差率是指控制信号一定的条件下, $\Delta\Omega$ 与 Ω_0 的比值。即

$$\delta = \frac{\Omega_0 - \Omega_r}{\Omega_0} \times 100\% = \frac{\Delta\Omega}{\Omega_0} \times 100\% \quad (1-19)$$

对于其他类型的调节系统, 可以规定相应调节精度。

5. 阶跃输入信号下的系统响应特性

因为调速系统一般要求反应比较快, 和随动系统一样, 有最大超调量 $\sigma\%$; 振荡次数 N 以及对应偏差为 $\pm 5\%$ 或 $\pm 2\%$ 下的响应时间 t_s 。有一些系统明确规定不允许有超调。

对于一些大时间常数的被控对象, 往往提出达到调节点的最大时间不超过给定值。

6. 负载扰动下的响应特性

对负载扰动引起的过渡过程予以限制的一些技术指标。例如在一定扰动下的最大转