

系统控制与设计

彭侠夫 侯兴凯 叶瑰昀 编著

哈尔滨工程大学出版社

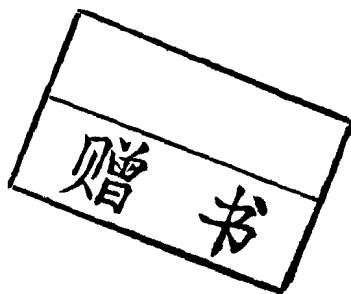
TP13

P50

425773

系统控制与设计

彭侠夫 侯兴凯 叶瑰昀 编著



00425773

哈尔滨工程大学出版社

2026/26

内 容 简 介

本书以自动控制理论为基础,介绍了控制系统的工程设计方法。全书共有七章,内容包括:控制系统的一般技术指标及设计步骤、误差分析、系统元部件选择及稳态计算、数学建模、系统综合、典型系统举例、系统调试等。

本书可作为高等院校自动控制、工业电气自动化、检测技术及仪器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。

系统控制与设计

彭侠夫 侯兴凯 叶瑰昀 编著

责任编辑 张植朴

哈尔滨工程大学出版社出版发行

新华书店经销

黑龙江省幼师印刷厂印刷

*

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 17.625 字数 397 千字

1997 年 4 月第 1 版 1997 年 4 月第 1 次印刷

印数:1~1000 册

ISBN 7-81007-765-1

TP·56 定价:18.80 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、工业自动化、检测技术及仪器仪表专业教学计划安排而编写的。编写该书的目的是为了培养学生综合运用所学理论,掌握控制系统工程设计的特点和基本方法,并经过实践环节的训练,使学生初步具备设计控制系统的的能力。

本书侧重介绍了线性连续控制系统,特别是随动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。全书共分七章,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;第二章讲述了控制系统的误差分析;第三章介绍了控制系统的稳态计算;第四章讨论了系统建模方法;第五章介绍了控制系统的综合;第六章、第七章介绍了典型举例和系统调试。

本书结合教学实践对原教材《控制系统工程设计》进行了大幅度删减,并增添和补充了适当的新内容,可作为高等院校本科生《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。

本书第一、三、五章由彭侠夫编写,第六、七章由侯兴凯编写,第二、四章由叶瑰昀编写,全书由彭侠夫主编。哈尔滨工程大学李福义副教授审阅了该书全部底稿,并提出了许多宝贵意见。在本书的编写过程中,金鸿章教授、荆兆寿教授、刘胜教授给予了许多有益的帮助,在此表示感谢。

由于作者水平所限,本书在内容和文字表达方面肯定有很多不足之处,作者诚恳地希望广大读者提出宝贵意见。

编著者

1996年12月于哈尔滨

目 录

第一章 绪 论	1
第一节 概 述	1
第二节 一般性的技术要求	7
第三节 系统的设计计算内容和步骤	9
第二章 控制系统的误差分析	11
第一节 引 言	11
第二节 控制系统的原理误差	13
第三节 控制系统中的元件误差	24
第四节 控制系统设计中的误差分配原则	30
习 题	31
第三章 控制系统稳态设计	33
第一节 引 言	33
第二节 系统负载和干扰模型	34
第三节 测量元件的选择	45
第四节 执行电机的选择	51
第五节 放大装置的选择	62
习 题	78
第四章 控制系统的工程建模方法	79
第一节 引 言	79
第二节 几种典型环节的动态特性	80
第三节 控制对象的机理建模方法	80
第四节 系统辨识建模方法	98
习 题	121
第五章 控制系统的综合	124
第一节 系统动态性能指标及其关系	124
第二节 对数频率特性综合法	135
第三节 复合控制	174
第四节 极点配置设计法	197
第五节 采用鲁棒调节器综合控制系统	209
习 题	216
第六章 控制系统举例	220
第一节 随动系统	220
第二节 调节系统	232

第七章 控制系统的调试与试验	245
第一节 引 言.....	245
第二节 系统调试的一般步骤与方法.....	246
第三节 控制系统调试实例.....	254
第四节 振荡原因分析.....	259
附录 I 常用拉氏变换表.....	264
附录 II 多项式近似因式分解.....	266
附录 III 常用无源校正网络及其特性.....	270
附录 IV 常用有源校正网络及其特性.....	272
附录 V 反馈校正中闭环特性与开环特性的转换.....	274
主要参考文献	275

第一章 绪 论

第一节 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上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。因为在生产实践中被应用的控制质量比较高的大多是反馈控制系统。它是如何组成,有什么特点呢?我们简略地讨论一下。

一、控制系统的组成

为了说明控制系统的组成,介绍一个实际的控制系统。图 1-1 是仿型铣床随动系统示意图。图中 $x(t)$ 为模杆的位移, $y(t)$ 是铣刀杆的位移。希望铣刀的运动 $y(t)$ 完全复现模杆的运动 $x(t)$, 使得加工出来的零件尺寸和模型一样。图 1-2 画出了这个系统的方框原理图。由于系统有惯性,当 $x(t)$ 随时间变化时, $y(t)$ 不可能完全和 $x(t)$ 相同,而存在误差 $e(t)$, 且误差 $e(t) = x(t) - y(t)$ 。这一误差通过测量装置(如电位计 R_{w_1} 、 R_{w_2})转换为误差电压,误差电压信号经过放大器、校正装置和功率放大器放大后加到执行电机的输入端,使执行电机转动。通常执行电机通过减速器驱动控制对象,朝着消除误差方向运动。只要输出量 $y(t)$ 和输入量 $x(t)$ 不相等,执行电机就会产生转动来消除误差,一直到误差电压等于零,执行电机停止转动。这时控制系统实现了输出量 $y(t)$ 复现输入量 $x(t)$ 的运动。

由图 1-2 可见,控制系统由以下基本部分组成:测量元件、校正装置、放大器、功率放大器、执行元件、减速器和控制对象。

控制系统的应用场合很多,形式也是多样的。作为系统的输入量 $x(t)$, 可以是位移、转角、电压,也可以是数字形式的信号。输出量是机械位移、转角或其它物理量。

根据执行电机输出功率的大小,控制系统可分为:(1)小功率系统,例如记录仪表中的随动系统,火炮机电指挥仪中的随动系统等,其功率在 100W 以下;(2)中功率系统,执行

电机的功率在 100~500W 之间;(3)大功率系统,例如导弹发射架随动系统、大型炮塔随动系统等,功率在 500W 以上,甚至几百千瓦。

根据控制系统的工作方式可分为:(1)连续作用的控制系统;(2)继电控制系统;(3)数字控制系统;(4)连续与离散混合控制系统。

按照选用执行电机的种类,又分为:(1)交流系统;(2)直流系统;(3)交直流混合系统。尽管控制系统有上述各种类型,但它们的基本工作原理和设计方法是相同的。

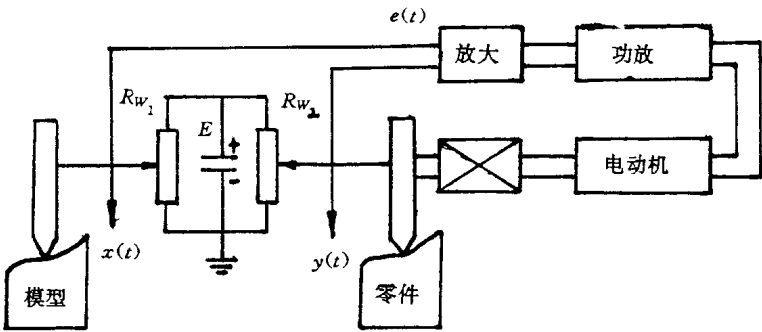


图 1-1 仿型铣床随动系统示意图

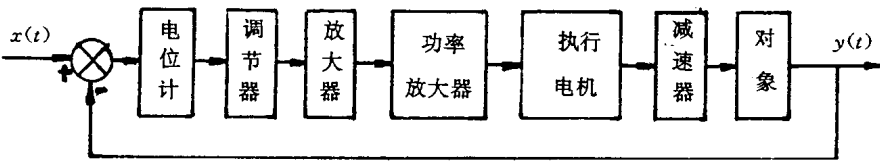


图 1-2 随动系统方框图

二、反馈对系统的影响

一般地说,只要系统变量之间存在闭合的因果关系,反馈就会存在。反馈的存在对控制系统有深刻的影响。考察图 1-3 所示的最基本的反馈系统框图。图中 $X(s)$ 是输入, $Y(s)$ 是系统的输出, $E(s)$ 是误差,它的基本关系式是

$$\Phi(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} \tag{1-1}$$

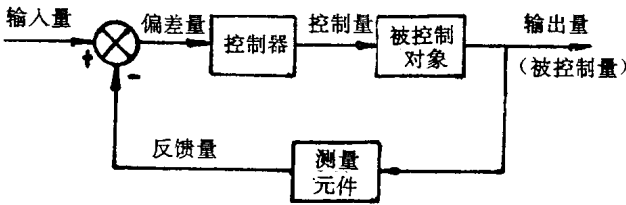


图 1-3 基本的反馈控制系统

式(1-1)可以揭示出反馈对系统总增益、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 $G(j\omega) \cdot H(j\omega)$ 都是频率的函数,则不论正、负反馈都有可能会出现在某个频段 $|1+G(j\omega)H(j\omega)|>1$ 或 $|1+G(j\omega)H(j\omega)|<1$ 的情况。

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系统变得稳定。如图1-4所示那样。系统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,整个系统的传递关系为

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

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1-5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,沿水平面上 y 的方向运动。应用牛顿定律有

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

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

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

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

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

$$\sin \varphi \approx \varphi \quad \cos \varphi \approx 1$$

于是

$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$\dot{x}_2 = a_{21}x_1 + b_2u$$

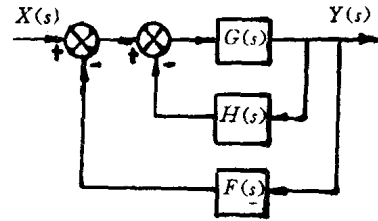


图1-4 有两个反馈环的反馈控制系统

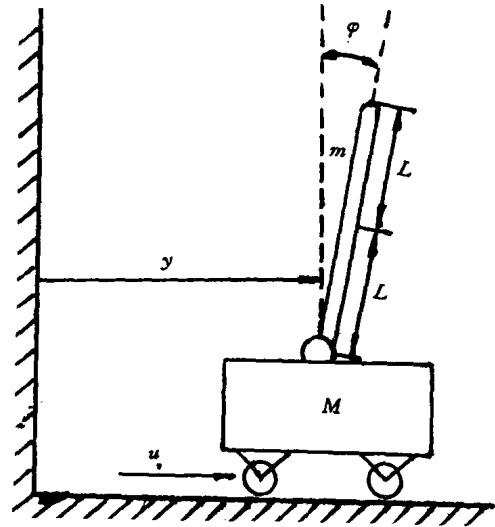


图1-5 倒立摆系统

$$\begin{aligned}\dot{x}_3 &= x_4 \\ \dot{x}_4 &= a_{41}x_1 + b_4u\end{aligned}$$

或

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ a_{21} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ a_{41} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} 0 \\ b_2 \\ 0 \\ b_4 \end{bmatrix} u = AX + Bu \quad (1-3)$$

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数时, 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

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

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

的所有根都具有负实部时, 系统是稳定的。显然, 对于任一组 a_{21}, a_{41}, b_2, b_4 的值, 总可以选择适当的 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的灵敏度的影响

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 1-3 的基本反馈控制系统。设 $G(s)$ 的参数不变。 $\Phi(s)$ 对 $G(s)$ 变化的灵敏度定义为

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

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

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

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, 系统的总增益将按 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 1-6 所示为一有噪声扰动的反馈控制系统。

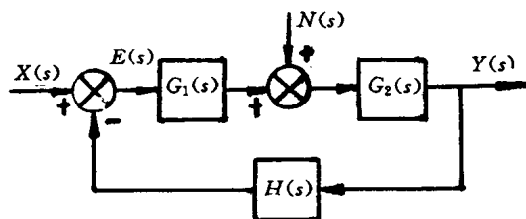


图 1-6 有噪声信号的反馈控制系统

图中 $X(s)$ 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 $Y(s)$ 为

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

其中 $E(s) = X(s)$, 输出信噪比的定义为

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

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

有反馈时,由 $X(s)$ 和 $N(s)$ 同时作用于系统产生的输出为

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

信噪比为

$$\begin{aligned} \frac{\text{信号引起输出}}{\text{噪声引起输出}} &= \frac{G_1(s)G_2(s)X(s)/(1 + G_1(s)G_2(s)H(s))}{G_2(s)N(s)/(1 + G_1(s)G_2(s)H(s))} \\ &= G_1(s) \frac{X(s)}{N(s)} \end{aligned} \quad (1-13)$$

它与无反馈时相同,这表明并不直接影响系统的信噪比。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)的形式是一样的,然而实际上由于有负反馈的存在,获得同样输出 $Y(s)$, 需要更大的 $G_1(s)$ 。例如,在图 1-6 的结构下, $G_1(s)$ 增至 $G'_1(s)$, $X(s)$ 增至 $X'(s)$, 令有反馈作用下和无反馈时输出 $Y(s)$ 相同,即令

$$Y(s)|_{N=0} = \frac{G'_1(s) \cdot G_2(s) X'(s)}{1 + G'_1(s)G_2(s)H(s)} = G_1(s) \cdot G_2(s) X(s) \quad (1-14)$$

这时由噪声单独作用所产生的输出为

$$Y(s)|_{X(s)=0} = \frac{G_2(s) \cdot N(s)}{1 + G'_1(s)G_2(s)H(s)} \quad (1-15)$$

现在信噪比为

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

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均有影响。

三、两类基本的反馈控制系统

从控制的目标看,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 1-7 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。但从各自的特点看它们有以下几个方面的差别。

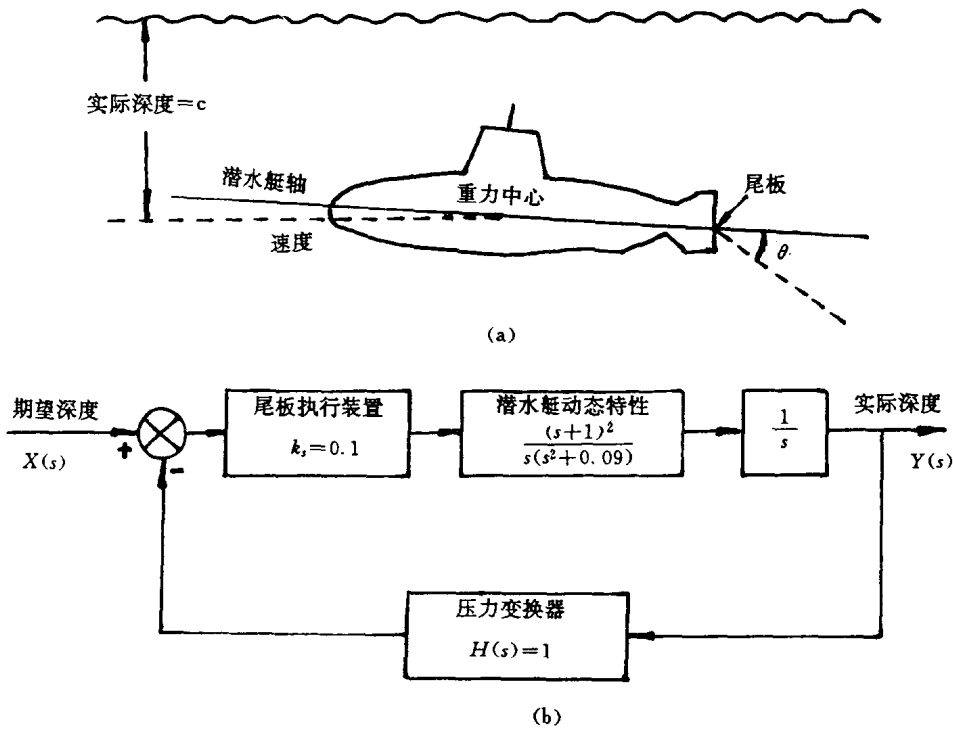


图 1-7 潜艇定深调节系统

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,例如船舶航向和潜艇定深系统,虽然航向和深度也要改变,但系统经常工作在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。

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,如所涉及到的综合方法、模型建立、负载分析、精度分析及系统调试等做一般性的讨论,对随动系统和调节系统设计中的一些特殊问题做了介绍。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。

第二节 一般性的技术要求

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、防辐射、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、液流的种类、规格、容量等。

二、对调节系统的一般要求

调节系统的种类比较多,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 $\Omega_{\max}$

$\Omega_{\max}$ 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 $\Omega_{\min}$

$\Omega_{\min}$ 是指调速系统所能达到的平稳的最小输出值。

以上两项的比值称为调速系统的速度调节范围

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

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 与额定运行转速 Ω_e 之差,即

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

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

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

对于其它类型的调节系统,可以规定相应的调节精度。

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速降 $\Delta\Omega_{mf}$ 与调节时间 t_{sf} 。对于其它调节系统,也就是在一定干扰下的最大误差和恢复时间。

三、对随动系统的一般技术要求

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,静止应没有位置误差。正如第二章所述。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 或速度品质系数 K_v 和加速度品质系数 K_a

当随动系统处于等速跟踪状态时,系统输出与输入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_x (或速度 V_x) 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定跟踪工况下输出轴角加速度 ϵ (或线加速度 a) 与其对应的加速度误差 e_a 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_r 和频带宽度 ω_b

随动系统闭环幅频特性 $\Phi(\omega)$ 和最大值 $\Phi(\omega_p)$ 与 $\Phi(0)$ (对于无静差系统 $\Phi(0)=1$) 的比值称为振荡指标 M_r , $\Phi(\omega_b)=0.707\Phi(0)$ 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,突加阶跃输入信号,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_{mf} 和所对应的过渡过程时间 t_{sf} 均应有具体限制。

第三节 系统的设计计算内容和步骤

前面所讲的对控制系统的技术要求是系统设计计算、生产、安装、调试、试验的基本依据和目标。在设计计算阶段,必须在理论计算上保证达到技术要求。一般系统设计计算分以下几个步骤。

一、系统线路方案的制定与稳态设计

在这个阶段中主要的工作有以下几个方面。

1. 熟悉任务书规定的各项技术要求,与已掌握的现有系统相比较,找出待设计系统的主要技术难点,对保证控制精度进行必要的论证。

2. 进行调查研究,参考已有的同类控制系统和了解市场上提供的新型元件、部件、加工精度、检验技术水平,制定出一个线路方案。具体讲就是要选定系统各主要元部件的形式,确定它们的联接方式,系统的控制方式,系统的主干线路及能源形式。

3. 进行必要的稳态计算,确定各元件、部件的型号、规格;检验各部件之间输入输出的功率匹配;检验系统的静态和稳态精度;解决控制信号的有效传递和转化。并为进一步动态计算需要进行的校正与补偿留有余地。

二、建立系统的动态数学模型

1. 用理论分析和实验的方法确定被控对象的数学模型,对于控制对象与控制系统同步进行和设计的系统,则要参考同类型的对象的动态特性,在设计时留有较大的调整余地。

2. 推导已选定元件、部件、线路的传递函数,或建立系统的状态方程,在必要时还要对有关元部件的参数及特性进行实验测试,以获得比较准确的数据。

所建立的系统数学模型应尽量反映实际的系统,因为它是进行动态设计计算的基础。其指导思想应是:不宜将模型搞得过于复杂,便于工程设计计算。

三、系统的动态设计计算

要使控制系统的动态性能符合设计指标,必须经过动态设计计算。也就是说,动态设计计算的基本目的是在保证系统稳定的基础上达到要求的动态性能指标,包括动态精度指标,响应的快速性指标,以及抗动态干扰指标等。一个实际的控制系统总是多半工作于动态工况,因此能否满足动态技术要求至关重要。在动态设计计算过程中,一般方法在系统固有的开环频率特性的基础上,采取均衡和校正的方法达到动态技术指标,必要时,需进行仿真试验来校验校正后的动态品质。

稳态和动态技术指标均满足要求以后,可以把设计方案确定下来,进行下一步的技术设计工作。否则,需要进行局部的修改,甚至需要重新制定方案。

四、样机调试与试验中的完善设计

完成设计方案后,根据方案要求进行各分线路的技术设计,以及工程实现上各元部件和控制对象之间联接方面的技术设计,经过生产、加工、安装、调试、试验,必然会暴露出原始设计中存在的一些问题或对接试验过程中遇到的新问题。设计者必须根据实际情况来解决这些问题,修改和完善设计。这一过程,能使所设计的系统更好地满足设计指标要求,更重要的是为今后的设计积累丰富的经验。

第二章 控制系统的误差分析

第一节 引言

对控制系统提出的一个共同要求是被控制对象的某些物理量(位移、速度、温度、压力等)按照指定的规律变化。但是,任何一个实际的控制系统,在满足系统稳定的前提下,都不能完全做到这一点,而总是存在一定的误差(即控制精度)。控制系统在运行过程中的误差是多种多样的,但归结起来,误差来源于以下几个方面。

1. 原理误差

原理误差是指在控制机理方面必然产生的误差,它与系统的结构以及控制作用的性质有关。例如,反馈控制系统,它能产生控制作用的原因是有偏差信号 $e(t)$, 而偏差信号本身就是系统的误差。另外,系统在外部干扰作用下也会产生误差。原理误差分为确定型和随机型两类,确定型的原理误差就是在确定型的输入信号和扰动作用下产生的误差;而随机型的误差则是指在随机输入和随机扰动下系统产生的误差。这两种类型的原理误差的分析和计算将在下一节中详细的介绍。

2. 元件误差

控制系统由各种控制元件组成,如测量元件、执行元件等。而每种元件都有自己的误差,由于元件在系统结构中所处的地位不同,它们本身的误差对系统误差影响的程度也不同。在设计控制系统选择元件时,往往无法知道这些元件的确切误差,一般只知道误差的极限范围。在本章中,着重讨论测量元件的误差分析和计算方法。

3. 环境变化引起的误差

环境的变化,例如温度、湿度的变化,振动、冲击、腐蚀性、防腐性以及元件的自然老化等,都会引起元件性能参数发生变化而导致系统的误差。

控制系统设计时,首先就遇到如何确定精度的问题。本章将从分析系统误差的主要来源及其计算方法、元件误差的类型及其对系统误差的影响出发,进一步阐明在系统设计初期如何考虑精度,如何进行误差的分配。

在分析误差时,假定系统的结构是已知的。一个确定系统,能传递和转化有效的控制信息,也能传递和转化干扰信息。如果我们把系统内各元件的误差看成干扰信息,那么,它对系统精度的影响也就不难分析了。

在讨论系统的各种误差的定量分析和计算之前,首先讨论一下系统各环节对输入信号、干扰信号引起误差的传递和归化。设有如图 2-1 所示结构的系统,输入为 $X(s)$, 输入干扰噪声为 $R_0(s)$, 输出为 $Y(s)$, 误差为 $E(s)$, 各级的等效扰动信号分别为 $R_1(s)$, $R_2(s)$, $R_3(s)$ 。因为对单位反馈系统而言,总的误差就是 $X(s)$, $R_0(s)$, $R_1(s)$, $R_2(s)$,