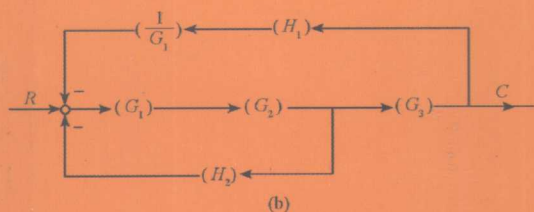


Z D K Z X T J X F S J

自动控制系统 解析法设计

ZIDONG KONGZHI XITONG JIEXIFA SHEJI

贺兆民 编著



ZIDONG KONGZHI XITONG
JIEXIFA SHEJI

ZIDONG KONGZHI XITONG JIEXIFA SHEJI

国防科技大学出版社

自动控制系统解析法设计

贺兆民 编著

国防科技大学出版社
湖南·长沙

图书在版编目(CIP)数据

自动控制系统解析法设计/贺兆民编著. —长沙:国防科技大学出版社, 2009.1

ISBN 978 - 7 - 81099 - 516 - 0

I. 自… II. 贺… III. 自动控制系统—系统设计
IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 062624 号

国防科技大学出版社出版发行

电话:(0731)4572640 邮政编码:410073

<http://www.gfkdcbs.com>

责任编辑:曹 红 责任校对:耿 筠

新华书店总店北京发行所经销

国防科技大学印刷厂印装

*

开本:850×1168 1/32 印张:10 字数:260 千
2009 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数:1—500 册

ISBN 978 - 7 - 81099 - 516 - 0

定价:20.00 元

前言

《自动控制系统解析法设计》是从解决《自控原理》教学内容中的许多难题入手而开拓创新出来的学术新篇。

秉着不误人子弟、教出来的学生要超过自己的这一愿望,为使本科学生更好地掌握《自控原理》的内容,开拓学生的新思路,提高考研录取率,更好地使学生适应今后工作的需要,本书作者孜孜不断,反复深入备课,不断发现和解决《自控原理》教学内容中遇到的疑问和难题,及时开拓创新,并在《自控原理》课中向学生进行讲授。没有教材,没有参考资料,完全靠课堂记笔记,后来把多年来不断增删修改、反复讲授过的新内容,整理成本书——《自动控制系统解析法设计》。(为了减少篇幅删去了“状态反馈综合校正”一章。)

本书 1989 年的打印稿,曾经受到许多同行和湘潭大学自动化系毕业学生的关注,多次打听该书是否正式出版。特别是引起我在哈军工的同学的关注,建议我早日将书正式出版,以使这些有学术价值的内容,能留传于世,以俾益后人。

本书的许多重要内容,近年来陆续在《湘潭大学自然科学学报》上发表过。这些内容也曾经在课堂上反复讲授过,收到了很好的教学效果,凡听过作者讲授过本科《自控原理》课的学生,报考全国高校自动化专业硕士研究生的《自控原理》考研成绩都能得以明显的提高,创造了十分显著的教学效果。

本书内容中的主干多属于国内外《自控原理》教材中的所没有的新内容:如“根轨迹校正的解析法”、“对数频率特性串联校正的

解析法”、“期望特性(2-1-2)串联校正的解析法”、“反馈校正的期望特性法”、“期望特性的解析法串联校正”、应用传递函数求本质非线性系统的非线性方程、应用解析法求波波夫方程参数等。特别是“结构规律法列写系统闭环传递函数”要比世界著名的梅逊(Mason)公式要快要准,愈复杂的系统,更加突出;“设计期望特性(2-1-2)的新公式”,比前苏联名教授 B.A. 别塞凯尔斯基设计(2-1-2)的公式产生的设计误差少 70 多倍;“闭环脉冲传递函数定理”结束了《自控原理》课程中采用图形查表法,求取闭环脉冲传递函数的历史等等。

由于本书作者学术水平有限,书中错误在所难免,衷心欢迎各位读者批评指正。谨向鼓励支持、评审、校正本书出版的同行们致以衷心的感谢。特别感谢湘潭大学信息工程学院对本书赞助出版,以暨院长刘任任教授对本书出版所做的大量工作。

作者缅怀母校哈尔滨军事工程学院,谨以此书献给敬爱的院长陈赓大将。

贺兆民

2008 年 4 月 8 日

目 录

第一章 概论

- 1.1 自动化时代的概念 (1)
- 1.2 自动控制理论的发展 (3)
- 1.3 控制系统的概念 (4)
- 1.4 从复杂系统结构图上求系统闭环传递函数的结构
规律法 (7)
- 小 结 (18)

第二章 控制系统特性

- 2.1 系统稳定性 (19)
- 2.2 系统动态特性 (29)
- 2.3 系统静态特性 (34)
- 2.4 系统反馈特性 (41)
- 小 结 (49)

第三章 控制系统的设计原则和性能指标

- 3.1 控制系统的设计任务书和设计系统应综合考虑的
问题 (50)
- 3.2 控制系统的设计步骤 (52)
- 3.3 系统性能指标 (56)
- 小 结 (63)

第四章 最佳参数解析法综合校正

4.1 二阶最佳参数法综合校正	(64)
4.2 三阶最佳参数法综合校正	(69)
4.3 调节器综合校正和最佳一阶系统	(76)
4.4 多环系统最佳参数法综合校正	(82)
小 结	(92)

第五章 根轨迹解析法综合校正

5.1 根轨迹法概述	(93)
5.2 根轨迹解析法校正的原理和公式	(95)
5.3 根轨迹解析法综合校正在多环系统中的应用	(108)
小 结	(114)

第六章 对数频率特性解析法串联校正

6.1 对数频率特性概述	(115)
6.2 开环对数频率特性的基本性质	(118)
6.3 对数频率特性解析法串联综合校正	(121)
6.4 期望特性中频率长度的计算新公式和解析法串联校正	(138)
小 结	(149)

第七章 反馈、顺馈综合校正和迟后系统的综合校正

7.1 反馈综合校正	(150)
7.2 顺馈综合校正	(157)
7.3 迟后系统的综合校正	(166)
小 结	(171)

第八章 离散系统的综合校正

8.1 采样开关和零阶保持器的数学模型	(173)
8.2 脉冲传递函数和闭环脉冲传递函数定理	(181)
8.3 离散系统的特性	(189)
8.4 W 域综合校正	(194)
8.5 Z 域综合校正	(197)
8.6 S 域设计与 $D(S)$ 的数字仿真	(216)
8.7 采样频率 ω_s 的选择	(226)
小 结	(229)

第九章 非线性控制系统的综合校正

9.1 描述函数法	(231)
9.2 相平面法	(250)
9.3 非线性系统的稳定性	(264)
9.4 非线性系统的综合校正	(287)
小 结	(307)

参考文献	(308)
------------	-------

第一章 概 论

人类征服自然,控制自然,创造物质财富的愿望,自古以来,一直是促使整个人类社会生产不断发展的动力。征服自然,控制自然和创造物质财富,必须借助于工程技术的力量来完成超出人们力所能及的任务。进入 21 世纪以来,自动化技术的蓬勃发展,已经把过去难以想象的神话和希望变成了现实。

自动控制技术是自动化时代的主要标志,自动化时代的到来,仅仅是自动化时代的开始,它的发展和趋势,无可限量。

本章介绍自动化时代的概念;自动控制理论的发展;控制系统的概念;由复杂系统结构图列写系统传递函数的结构规律法。

1.1 自动化时代的概念

人类社会的发展史,人类文明的创造史,也是一个社会生产力不断发展的历史。生产力的发展以生产工具为主要标志,有什么样的生产工具,就有相应的创造工具和使用工具的劳动者。所以生产工具是人类社会发展和人类文明最主要最集中的标志。

人类社会中生产工具的不断更新导致了社会的不断向前发展和进步,在人类历史上生产工具的发展,经历了石器时代、青铜器时代、铁器时代,直到 1764 年瓦特(J. watt)在前人研究的基础上,制造出了第一台单汽缸蒸汽机,并且在实际中获得应用,从此开创了为各种机器提供原动力的时代。1807 年富尔顿(R. Fulton)把蒸汽机用于船上,制成了轮船。1814 年斯蒂芬逊制造出蒸汽机和铺

设铁路。1876 年奥托(N.A. Otto)发明了火花式四冲程内燃机。1885 年戴姆勒和卡尔·本茨制造了第一台汽车。1903 年莱特兄弟用内燃机作动力制成了有人驾驶飞机。至此,人类在水上、陆上、空中开始采用机器作为运输工具。其他如纺织机,各种机床等等都得到了迅速发展,从此人类社会开始用机器代替人和畜的体力劳动,大大提高了生产效率,使人类社会进入了机械化时代。

人类为了征服自然,在各个领域中不屈不挠地向自然探索,揭示自然的秘密和规律,寻求为人类创造物质财富的道路。在人们研究和发明蒸汽机的年代里,在电的领域里也研究出了许多新成果。1799 年伏打(A. Volta)发明了化学电池,为在实验室进行电的研究起到了不可估量的作用。1831 年法拉第(M. Faraday)发现了电磁感应定律,为电能的实际应用,奠定了理论基础。1866 年西门子(E. W. Siemens)发明了自激直流电机。从此电能工业上的应用得到了迅速的发展,为工业生产提供了新的原动力。1841 年莫尔斯(S. F. B. Morse)发明了电报电话。1896 年马可尼(G. Marconi)发明了无线电。人类征服自然又达到了一个新的里程碑——电气化时代。它和机械化时代比较,又有新的特点,能远距离操纵,能分散使用原动力。

随着第二次世界大战战线的扩大,在战争压倒一切,一切服从战争的口号下,各参战国几乎动员了所有的科学技术人员来从事武器的研制,千方百计提高武器的命中率和武器的杀伤力。在自动控制方面,相继出现了高炮随动系统,雷达跟踪系统,V-2 导弹的制导系统,轰炸机的自动驾驶系统,原子弹的引爆控制系统等等。

第二次世界大战结束后,军事部门的自动化技术向外扩散,各行各业为了提高产品的质量、数量,降低成本使在市场上具有竞争力,都踊跃采用自动化新技术。自动化的机器越来越多,而且深入到整个社会和家庭,人类社会开始步入了自动化时代。

自动化控制技术的机器和自动化生产工具不仅可以减轻人的体力劳动,而且具有某些思维判断作用。它比机械化和电气化时代的生产工具又有显著的进步,开始用机器代替脑力劳动。特别是1947年世界上第一台军事订货电子计算机问世之后,实现用机器代替脑力劳动的生产工具发展得非常迅速。自动化时代生产工具的基本特征是用机器代替部分脑力劳动。

自动化控制系统的实物在我国古代就已出现。公元前2000年黄帝造过指南车(另一说是公元前235年马钧所造)。公元前300年李冰父子在都江堰建立过水位自动调节。公元前100年左右,东汉张衡创建了以流水作动力的浑天仪。公元1100年左右,宋朝苏颂等制作了水运仪象台,按程序运行观测日月星辰。在国外最著名的自动装置是瓦特于1784年发明的蒸汽机离心调速器。虽然在中国历史上有过自动调节装置的实物,但是,由于社会生产力水平所具备的物质基础的科学技术水平的限制,不可能出现自动化时代。自动化时代的生产是在社会生产工具发展到一定阶段的必然产物。

1.2 自动控制理论的发展

自动控制理论随着自动化技术和科学研究的产生而产生,发展而发展。

1948年维纳(N·Wiener)发表了“控制论”：“机器的自动控制或动物在自然界的活动,都可以看成是其本身各组成部分之间信息的传递过程”。他是控制理论的奠基人。1948年波德(W·H·Bode)发表了对数频率法;同一年伊文思(W·R·Evans)提出了根轨迹法;不久崔普金(Я·З·Унжкин)发表了数字控制的采样系统。1945—1950年由哥尔德伐伯、柯恩波格及其他人共同研究提出了描述函数法。

1960年卡尔曼(R·E·Kalman)在莫斯科自动化国际会议上提

出了能控性、能观性的问题。别尔曼(R·E·Bellman)提出了动态规划法(根据最优化原理求最优控制的计算方法,适用于连续系统,主要用于离散系统的最佳控制计算),他和卡尔曼为现代控制理论奠定了基础,作出了贡献。庞特里亚金(L·J·Pontryagin)发表了极大值原理。何毓奇发表了决策对策论。从此控制理论步入到现代控制理论的新阶段。

自动控制理论和自动控制技术的总趋势是:仿生智能化;性能齐全的最优化;系统庞大的复杂化;控制方法的数字化;控制多元的信息化等等。

1.3 控制系统的概念

控制系统是一个范围广泛,内容丰富的概念。系统是由多个相联系的部分,具有一定功能的整体。小至简单的调节器、调温系统、调速系统;大至城市的交通管理系统、能源管理系统、经济管理系统、商品流通系统和生态平衡系统等等都是系统。最复杂的系统莫过于生命系统。总起来说系统可概括为四大类:工程系统、自然系统(自然界的一切生态系统)、经济系统和社会系统。要使这些系统能按照一定的规律来运动,都必须或一定服从控制论的基本原理,才能使它们变成能控制的系统,或本来就是能控制的系统。包括生物体在内的所有控制系统中,最大量的是反馈系统,或称闭环系统。无论系统多么复杂和庞大,它们都是由许多单个反馈回路组合起来的系统。所以反馈回路是工程、自然、经济和社会系统中最普遍的,最常见的基本单元。

工程上指的系统,通常是指的自动控制系统。它包括反馈系统和开环程序控制系统。反馈控制系统的组成有信号比较器、控制器,被控制对象和反馈装置,如图 1-1。最常见的反馈系统如调速系统,位置随动系统,温度控制系统等。

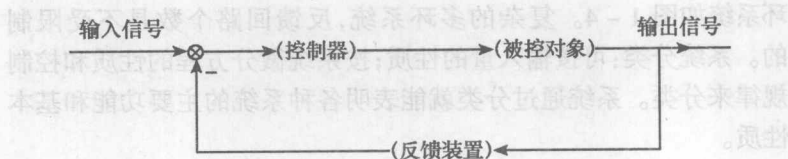


图 1-1 反馈系统组成

程序控制系统是由程序控制器和被控对象两大部分组成,如图 1-2。最常见的程序控制系统有数控机床,全自动洗衣机等。程序控制机器的控制规律是事先按照控制要求设计好的。

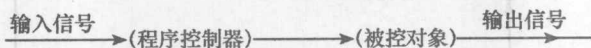


图 1-2 程序控制系统组成

反馈控制系统又称为闭环控制系统。没有主反馈回路的闭环系统称为开环控制系统如图 1-2。

复合控制系统:为了达到某种控制目的,有时采用开环系统和闭环系统联合组成复合控制系统如图 1-3。



图 1-3 复合控制系统

复合控制系统是由控制器 I、反馈装置和被控对象组成闭环控制;又由控制器 II 和被控对象组成开环控制。它们有共同的被控对象,相同的输入信号和输出信号,一起组成复合控制系统。

多环系统:由两个以上的反馈回路所组成的控制系统称为多

环系统如图 1-4。复杂的多环系统,反馈回路个数是不受限制的。系统分类:可按输入量的性质;按系统微分方程的性质和控制规律来分类。系统通过分类就能表明各种系统的主要功能和基本性质。

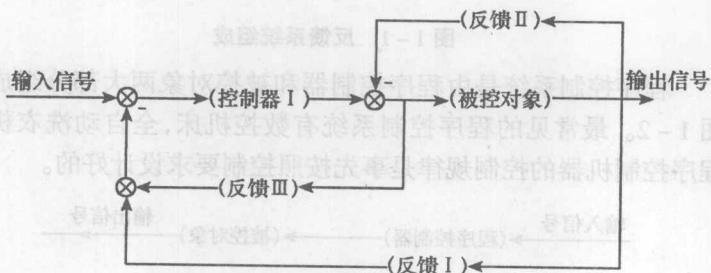


图 1-4 多环系统

①按系统输入量的性质分类

连续系统:输入信号为连续信号。

离散系统:输入信号为离散信号。

确定系统:输入信号为确定规律的信号。

随机系统:输入信号为随机变量。

②按系统微分方程的性质分类

定常系统:系统微分方程各项的系数为常数。

时变系统:系统微分方程各项的系数是时间 t 的函数。

线性系统:系统微分方程的各阶导数项都是一次幂。

非线性系统:系统有一个以上本质非线性元件,或系统微分方程的变量项中,有二次以上幂的。

③按控制规律分类

自动调节系统:闭环控制系统的输入量为给定值 R ,自动调节系统的输出量稳定为 R 值,或在 R 值的附近。

随动系统:闭环控制系统的输出量总是跟随系统的输入量(位

移、速度、加速度)一起变化。而输入量的变化规律是事先不知道的。随动系统又称跟踪系统。

程序控制系统:它可以是闭环控制系统,或开环系统。系统的输出量按照一定规律的时间函数变化。这是用事先设计好的控制规律控制系统的输出量,周而复始地循环进行。

对系统分类的三种方法,习惯上多混合组成系统的名称,以表明系统的特性,其组成如图 1-5:

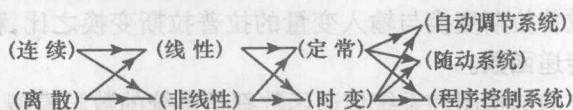


图 1-5 混合组成系统

1.4 从复杂系统结构图上求系统传递函数的结构规律法

建立控制系统数学模型的方法有解析法、实验测试法。解析法是将复杂系统按照信号传递的顺序和结构特点,分解成若干个环节的组合。根据每一个环节的功能和特性建立它们的微分方程。这些微分方程排列在一起,就是系统的微分方程组,消除其中间变量,就能得到系统的运动方程。如果整个系统不能分解成环节,或不能建立环节的微分方程时,就采用实验测试法,建立其数学模型。

经典控制理论中的数学模型是传递函数,在现代控制理论中的数学模型是状态方程。传递函数既可用于时域分析、根轨迹法、频率法,又可推广到非线性系统,还可推广到离散系统。在分析综合系统时,由系统结构图正确地写出系统的传递函数是很重要的。如果数学模型有错误,分析、综合工作可以导致前功尽弃,一无所

是。特别是如何对复杂系统的结构图能够正确、简单、迅速地列出系统的传递函数,这是从事控制理论和工程设计者所殷切期望的事情。为此介绍作者提出的结构规律法列写系统传递函数的方法和有关内容。

1.4.1 结构规律法列写系统传递函数

传递函数的定义:在零初始条件下,线性定常系统(环节)输出变量的拉普拉斯变换与输入变量的拉普拉斯变换之比,称为系统(环节)传递函数。

系统的结构图和系统传递函数都是系统的数学模型。它们之间的差异在于,一是用结构图形表示;另一是用数学表达式描述。既然它们同是系统的数学模型,在本质上是一致的,所蕴含的运动规律是相同的。它们之间必然存在着对应关系。因此,只要找出系统结构图和系统传递函数之间的对应关系,就能直接从结构图写出传递函数,这个方法被称为结构规律法。

任何繁琐复杂的系统结构图,从形式上看都是环节和连线组成的;从信息传递的观点来看都是由前向通道和反馈回路组成的。由于信息的传递,系统才具有自动控制的作用。所以研究结构图中的前向通道和反馈回路是很有意义的。即使具有相同数量和相同结构的环节,若组成不同的前向通道和反馈回路的系统结构图,各系统结构图的系统传递函数,将会千差万别,其根本原因何在呢?这是由于各前向通道和反馈回路,在结构图中的相对位置,各不相同,而使得系统的传递函数各不相同。前向通道和反馈回路之间;反馈回路与反馈回路之间,在结构图中的相对位置,只有互相联系(共用环节,包括相加环节)和互相独立(无共用环节,包括相加环节)两种关系。从结构图中的信息传递的观点来看,就是各前向通道、反馈回路与其他回路中的信息发生直接联系和没有直接联系的两种相互关系。这两种相互关系决定着它们的传递函数

(前向通道传递函数、回路传递函数)在系统传递函数中的位置。这两种相互关系导致它们之间在系统传递函数中的相互关系应遵循加(减)、乘、除规律。

规律 1. 相加(减)关系

①有互相联系的各反馈回路在系统传递函数中的相互关系是相加(减)关系。

设系统有 N_1 个回路,它们之间互相联系,在传递函数中的相互关系为

$$(1-1) \quad 1 + \sum_{i=1}^{N_1} W_i(S) \quad (1-1)$$

即信号沿回路中信号流动方向移动一圈,所经过的全部环节的累加。 $W_i(S)$ ——反馈回路传递函数,简称回路传递函数。它前面的符号,由信号在回路中移动一圈所经过的“-”号的个数 λ 来决定。即为 $(-1)^{\lambda+1} W_i(S)$ 。

②从信号输入点到信号输出点的所有并列前向通道传递函数,在系统传递函数中的相互关系,为相加关系。

设系统有 Q_1 条前向通道,则它们之间的关系为

$$(1-2) \quad \sum_{k=1}^{Q_1} G_k(S) \quad (1-2)$$

是从信号输入点到信号输出点之间,信号单通道传递所经过的环节的累加。 $G_k(S)$ ——前向通道传递函数,如果信号传递过程中所经过的“-”号为 T 个,则 $G_k(S)$ 的符号为 $(-1)^T$ 。

规律 2. 相乘关系

①互相独立的反馈回路之间的关系,在系统传递函数中表示为它们各自的回路传递函数加 1 后的相乘关系。

该系统有 N_2 个互相独立的反馈回路,则有

$$(1-3) \quad \prod_{j=1}^{N_2} [1 + W_j(S)] \quad (1-3)$$