

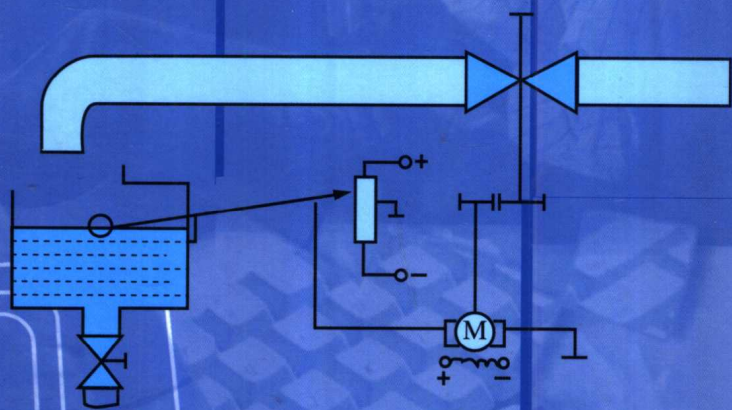


高等学校教材
Textbook for Higher Education

控制工程导论

(修订版)

周雪琴 张洪才 编



西北工业大学出版社

高等学校教材

控制工程导论

(修订版)

周雪琴 张洪才 编

西北工业大学出版社

(陕)新登字 009 号

【内容简介】 本书初版于 1988 年出版,本次再版根据学科发展和教学实践,进行了全面修订。

本书比较系统地介绍了自动控制理论的基本内容,着重阐明基本概念、基本理论和基本分析方法。全书共九章:第一章和第二章介绍与控制理论有关的基本知识和控制系统中常用的基本元件;第三章至第六章介绍分析、设计线性控制系统的时域法、根轨迹法和频率法;第七章介绍分析研究非线性系统的描述函数法和相平面法;第八章讨论采样控制系统;第九章简要介绍现代控制理论的基本内容。每章附有例题和习题,并给出了部分参考答案或提示。

本书主要对象为高等工业院校本科非自动控制类专业学生以及专科自动控制类专业学生,亦可供需要学习和了解自动控制基本理论的工程技术人员自学与参考。

控制工程导论

(修订版)

周雪琴 张洪才 编

责任编辑 蒋宗

责任校对 齐

*

西北工业大学出版社出版发行

(邮编:710072 西安市友谊西路 127 号 电话:8493844)

全国各地新华书店经销

空军工程大学导弹学院印刷厂印装

ISBN 7-5612-0735-2/TP·80(课)

*

开本:787 毫米×1 092 毫米 1/16 印张:20.25 字数:488 千字

1988 年 2 月第 1 版

2002 年 3 月第 2 版第 4 次印刷

印数:8 001~11 000 册

定价:21.00 元

购买本社出版的图书,如有缺页、错页的,本社发行部负责调换。

修订本前言

本书初版自 1988 年问世以来,得到了广大读者的关心和支持,不少同行在使用过程中提出了宝贵的意见和建议,编者深表感谢。根据形势发展的需要以及这些年来的教学实践,经过认真讨论,对本书进行了修订。

在修订过程中,我们保留并突出了原版的基本特色:叙述尽可能深入浅出,注重物理概念的阐述,保持课程内容的系统性和先进性,并且便于读者自学。与原书相比,这次修订版进一步精选了各章内容,加强了对基本内容的阐述,舍弃了一些相对次要的内容。此外,为加强实践性环节,增加了习题,特别是一些概念性和综合性较强的习题,并给出了部分参考答案或提示。

本书仍以经典控制理论为主,同时简要介绍现代控制理论中最基本的内容,以期读者在学完此书后,能初步掌握经典控制理论的基本方法,并能用来分析和设计一些简单的控制系统,同时对现代控制理论的概貌有所了解。

本书简单地介绍了控制系统常用的几种主要元件。在介绍经典控制理论时,仍以频率法为重点,对这种方法的理论基础、基本思想、主要计算方法,从系统分析到系统设计都做了比较全面的介绍。对时域分析法、根轨迹法也做了简明扼要的阐述,以便读者对控制理论有一个比较全面的了解。

考虑到数字计算机已广泛应用,书中对采样系统的分析和设计也作了简要介绍,以便为分析和设计计算机控制系统打下一定基础。

为了适应不同专业、不同层次的教学需要,各章内容尽可能做到相对独立,以便根据具体情况灵活选择。

本书各部分内容比例分配如下:经典控制理论的线性部分约占 75% (连续控制理论占 63%,离散系统理论占 12%),非线性部分约占 10%,现代控制理论约占 15%。

本书由西北工业大学自动控制理论及应用教研室周雪琴(第一~八章)、张洪才(第九章)编写,全书由周雪琴统稿。西北工业大学陈新海教授审阅,并提出了不少宝贵意见,为本书增色不少,深表感谢。

在本书修订过程中,得到了本教研室同志们的热心帮助。得到了各主管院、系有关同志的大力支持。在此,我们一并表示衷心的感谢。

由于编者水平所限,书中一定存在不妥之处,恳切希望广大读者提出批评和指正。

编 者

1994 年 3 月 8 日

前 言

本书是在原有讲义基础上,经过多年教学实践逐步修订而成的。考虑到目前我国的实际情况,本书仍以经典控制理论为主,同时简要介绍了现代控制理论中最基本的内容,以期读者在学完此书后,能初步掌握经典控制理论的基本方法,并能用来分析和设计一些简单的控制系统,同时对现代控制理论的概貌有所了解。

本书简单地介绍了控制系统常用的几种主要元件。在介绍经典控制理论时,仍以频率法为重点,对这种方法的理论基础、基本思想、主要计算方法,从系统分析到系统设计都作了比较全面的介绍。对时域分析法根轨迹法也作了扼要的阐述,以使读者对控制系统有一个比较全面的了解。

考虑到电子计算机已广泛应用,书中对采样系统的分析和设计也作了简要介绍,以便为分析和设计数字系统、计算机控制系统打下一定基础。

为了适应不同专业、层次的教学需要,各章内容尽可能做到相对独立,以便根据具体情况灵活选择。

本书各部分内容比例分配如下:经典控制理论的线性部分约占 75% (连续控制理论占 63%,离散系统理论占 12%),非线性部分约占 10%,现代控制理论约占 15%。

本书由西北工业大学自动控制理论及应用教研室周雪琴(第一~八章)、张洪才(第九章)编写,全书由周雪琴统稿。西北工业大学陈新海教授主审,并提出了不少宝贵意见,为本书增色不少,深表感谢。

还要感谢上海交通大学张钟俊教授的热情支持与推荐。

在本书编写过程中,得到了本教研室同志们的大力支持。特别是王培德教授给予了热情鼓励与指导,崔桃瑞副教授给予了热心帮助。另外,在编审过程中,八〇三教研室李济萍同志也给予了不少帮助。在此,一并表示衷心的感谢。

由于编者水平所限,书中一定存在不妥之处,恳切希望广大读者提出批评和指正。

编 者

1987年4月4日

目 录

第一章 概论	1
1-1 自动控制系统的一般概念.....	1
1-2 自动控制系统举例.....	5
1-3 自动控制系统的分类.....	8
1-4 对自动控制系统的一般要求.....	9
1-5 本课程的任务	11
习题	11
第二章 物理系统的数学模型	13
2-1 引言	13
2-2 元件和系统运动方程的建立	13
2-3 运动方程的线性化	18
2-4 控制系统的元件	20
2-5 用拉普拉斯变换方法解微分方程	31
2-6 传递函数	33
2-7 结构图等效变换及梅逊公式	36
2-8 反馈控制系统的传递函数	45
例题	47
习题	50
第三章 时域分析法	54
3-1 引言	54
3-2 脉冲响应函数	55
3-3 一阶系统	56
3-4 二阶系统	59
3-5 高阶系统及性能估计	73
3-6 系统稳定性分析	77
3-7 稳态误差分析	81
例题	90
习题	92
第四章 根轨迹法	97
4-1 概述	97
4-2 绘制根轨迹的基本法则.....	100
4-3 广义根轨迹和零度根轨迹.....	108

4-4 系统性能分析与估算	111
例题	115
习题	117
第五章 频率响应法	120
5-1 频率特性的一般概念	120
5-2 典型环节的频率特性	124
5-3 系统开环频率特性	131
5-4 稳定性分析	133
5-5 系统闭环频率特性和性能指标	139
5-6 开环对数频率特性和时域指标	144
5-7 传递函数的实验确定法	148
例题	149
习题	150
第六章 线性系统频率法校正	156
6-1 引言	156
6-2 串联超前(微分)校正	157
6-3 串联迟后(积分)校正	160
6-4 串联迟后-超前校正	164
6-5 反馈校正	168
习题	171
第七章 非线性控制系统理论	173
7-1 非线性控制系统的概述	173
7-2 描述函数	177
7-3 非线性系统的描述函数分析法	183
7-4 相轨迹	191
7-5 非线性控制系统的相平面分析法	197
习题	202
第八章 采样系统理论	205
8-1 引言	205
8-2 信号的采样和复现的数学描述	208
8-3 Z变换	212
8-4 脉冲传递函数	217
8-5 采样系统分析	222
8-6 采样系统动态性能估算	233
8-7 采样系统的校正与设计	237
习题	244

第九章 现代控制理论概述	247
9-1 概述	247
9-2 状态变量法	248
9-3 可控性与可观测性	261
9-4 状态反馈与极点配置	268
9-5 控制系统的稳定性	274
9-6 最优控制问题	280
9-7 自适应控制的提法	290
习题	292
附录	294
附录一 拉普拉斯变换	294
附录二 部分分式展开法	300
附录三 控制系统的模拟研究	301
附录四 部分习题参考答案或提示	307
参考文献	313

第一章 概 论

1-1 自动控制系统的一般概念

从本世纪以来,特别是第二次世界大战以后,自动控制和自动化科学得到了迅速的发展。

工业生产的自动化,改善了劳动条件,增加了产量,提高了产品质量。在军事装备上,自动控制技术大大提高了武器的威力和精度。近十几年来,由于计算机的广泛应用和控制理论的发展,使得自动控制技术所能完成的任务更加复杂,水平大大提高,应用的领域也越来越广泛。以宇宙飞船为例,要把重达数吨的宇宙飞船准确地送入预先计算好的轨道,并一直保持它的姿态正确,要保持它的太阳能电池一直朝向太阳,要保持它的无线电天线一直指向地球,要保持飞船内的温度和气压不变,要使它所携带的大量测量仪器自动地准确地工作等等。所有这一切都是以高度的自动控制技术为前提的。

随着人们的生活水平的提高,自动控制技术已深入到每个家庭,洗衣机、电热锅、电冰箱……等都体现了自动控制的成果。

自动控制技术已经成为生产(电力、机械、冶金、化工……等)、军事、科学研究、企业管理等几乎是一切领域中必不可少的手段。因此,各个领域的科学工作者和工程技术人员都必须具备一定的自动控制工程知识。

自动控制是一门理论性及工程实践性均较强的技术学科,常常称为“控制工程”,而同时把实现这种技术的基础理论叫做“自动控制理论”。在工程 and 科学的发展过程中,自动控制起着愈来愈重要的作用,它已成为现代工业生产过程中十分重要的而且不可缺少的组成部分。根据自动控制技术发展的不同阶段,自动控制理论通常分为“经典控制理论”和“现代控制理论”两大部分。

自动控制是随着人们不断解决在生产实践和科学试验中提出的“控制”问题而发展起来的,所以,首先必须了解什么是控制。

一、控 制

在生产和科学实践中,往往要求一台机器或一套设备按人们所希望的状态工作,但是实际上,由于种种原因,它们的实际工作状态一般不会自动地和人们所希望的工作状态相一致。例如,要想使烘烤炉提供合格的产品,就必须严格地控制炉温;要想使数控机床加工出高精度零件,就必须控制其工作台或刀架的位置,……等。我们把烘烤炉、机床称做被控对象;炉温、刀架位置是表征被控对象工作状态的物理量,称做被控量;而规定的炉温、进刀量就是在运行过程中的被控量的希望值,或是被控对象的希望工作状态。要使被控量等于希望值,就必须对被控对象进行控制。这个任务,如果是由人直接参与来完成时,称为人工控制;但是,随着科学技术的发展,可以无需人的直接参与,而采用一些设备(控制装置)来代替人的功能,使被控制的对象(如机器、设备或生产过程等)自动地按照预定的规律运行(或变化),这就是自动控制。下面

以简单的发电机为例加以说明。

【例 1-1】如图 1-1 所示一台发电机。发电机的激磁电压 u_f 由直流电源供电,通过电位器进行调节,在原动机的带动下,它就可以发出电压,供负载使用。为了使用设备的安全,并且能正常工作,我们希望无论在什么情况下,发电机发出的电压能保持恒定不变。但事实上,若不采取任何措施想使它的电压 u 保持恒定几乎是不可能的。因为发电机在实际工作中,要受到很多因素的影响。例如:激磁电压 u_f 的变化;原动机转速 ω 的变化;以及负载的变化,……等,这些因素都将使输出电压 u 发生变化,而且所有这些变化,事先我们是很难准确估计或根本无法估计的。

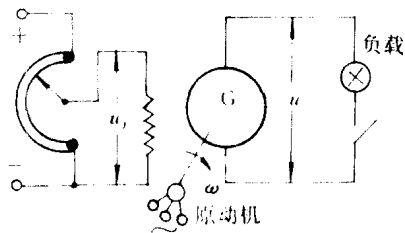


图 1-1 发电机原理图

假如,由于负载发生变化(增加或减小),使发电机发出电压 u 也变化(下降或上升),那么人应如何来控制,才能使发电机的电压回到原来值(即希望值)呢?此外,人在控制过程中又起哪些作用呢?下面我们就来分析这些问题。

二、人工控制

首先明确以下几个问题,在这个系统中:

- (1) 被控对象为发电机;
- (2) 被控量为发电机发出的电压 u ;
- (3) 希望工作状态即希望值为发电机的额定工作电压 u_r 。

人工控制过程 首先,人应对发电机发出的实际电压 u 进行测量。然后与希望的电压值 u_r 进行比较,看它们是否相等,若不等,是高了还是低了,差多少。所谓比较,就是人在脑子里进行一个简单的减法运算,即把眼睛观测到的(通过电压表)实际电压值 u 与脑子里记忆的希望值 u_r 相减,其偏差为 u_c 。然后,根据偏差 u_c 的大小和正负来设法改变发电机的输出电压,使实际值 u 接近或等于希望值 u_r 。如何改变发电机的输出电压 u 呢?电机学的知识告诉我们,改变发电机的激磁电压 u_f 可以比较方便地控制其输出电压 u 。因此,人就可根据比较的结果进行控制,即若电压 u 下降了(即 $u < u_r$, $u_c > 0$),就可动手去转动电位器,使激磁电压 u_f 加大,从而使发电机输出电压接近或等于希望值。反之,亦然。上述这种操作过程称为执行。

由此可见,人在控制过程中主要完成测量、比较和执行这三种作用。

显然,在负载变化较慢的情况下,采用人工控制是可以完成任务的。但若负载变化较快,人就会跟不上变化而达不到控制的目的。也就不能准确(准)和迅速(快)地进行控制了。

随着科学技术和国防工业的发展,对“准”和“快”的要求愈来愈高;而且一些特殊场合,例如需要在高温、真空、原子反应堆中进行控制,人就不能直接去进行控制。这样,人工控制就不能满足生产实际的需要,要求用一些设备来代替人的功能,进行自动控制。另外,在某些场合,即使人工控制可以满足要求,但工作十分繁重、单调、工作条件差,为了提高生产率,提高产品质量,改善劳动条件,亦要求将人从这些单调、繁重的劳动中解放出来,去从事更高级的创造性的劳动。

三、自动控制

所谓自动控制就是用一些设备代替人自动地进行控制。显然,这些设备至少应完成人所起

的三种作用:测量、比较和执行。

下面仍用发电机这个简单例子来说明如何用一些设备来代替人所起的三种作用,而完成自动控制的任务,参见图 1-2。

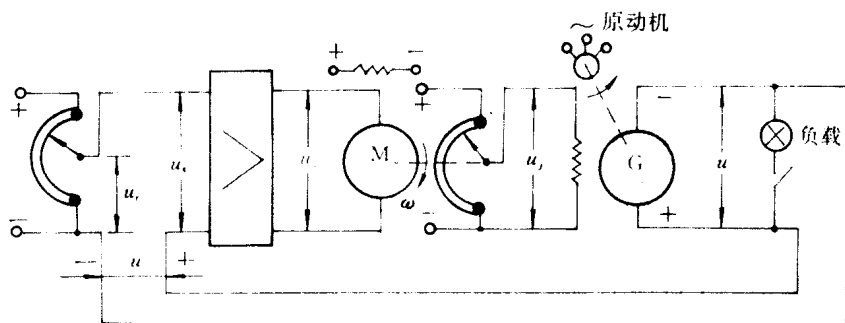


图 1-2 电压自动控制原理图

测量 由于要测量的是发电机的输出电压,所以只要用二根导线把发电机输出电压 u 直接引出即可。

比较 电压 u_r 为给定的基准电压(这里用一个电位器给定),其设置值与发电机的输出希望值相对应。因此,为了得到 u_r 和 u 的差值,只要把电压 u 与 u_r 反向串联连接即可,如图 1-2 中所示。

通常,对系统准确度的要求比较高,即要求 u 与 u_r 的差值(偏差) u_e 很小,因此,必须将偏差信号放大后才能加以利用。

放大 这里选用电子放大器。

执行 u_e 放大后的电压 u_1 驱动电动机,并带动与电机轴相联的电位器滑臂移动,从而调节激磁电压 u_f ,保证发电机的输出电压 u 接近输出希望值 u_r ,减小以致消除偏差 u_e 。

$$u_e = u_r - u$$

由此可见,利用这些装置可以代替人的作用自动地控制发电机的输出电压,完成自动控制的任务。把能自动地完成控制任务的系统,称为自动控制系统。

在图 1-2 所示的控制系统中, u_r 为控制系统的输入量(控制量); u 为系统的输出量(被控量)。

下面粗略地分析图示系统的控制过程:若系统处于平衡工作状态,即输出为某一个希望值 u (这时 $u = u_r$),偏差 $u_e = 0$,电动机不转。当负载加大(可认为是系统受扰动作用),破坏了系统的平衡工作状态,输出偏离希望值, u 值减小。因此,系统产生偏差 $u_e = u_r - u > 0$,经放大后的偏差 u_1 ,使电动机转动,增加发电机的激磁电压 u_f ,最终使发电机输出电压回到希望值 $u = u_r$,偏差 $u_e = 0$,系统回到平衡工作状态。从整个控制过程来看,可以既准而又快地自动完成控制任务。因此,自动控制系统在现代工业和国防上得到了广泛的应用。

至此,我们已对自动控制系统有了一些感性认识。但是,是否用任意一些设备随意组合起来就能完成自动控制任务呢?要回答这个问题,必须了解自动控制系统的工作原理和自动控制系统的组成原则。

1. 工作原理 在自动控制系统中,首先应对被控量(如发电机输出电压)进行测量,然后

与系统输入量(如发电机输出的希望值)进行比较,获得偏差量,最后利用放大后的偏差信号使执行元件(如电动机)的输出(转角 α)改变,从而使被控量接近或等于系统输出希望值,以减小或消除偏差,使系统输出保持某个恒值。

上述过程说明,自动控制系统的工作原理可归结为:测量偏差(测量输出实际值,为了获得偏差),利用偏差,最后达到减小或消除偏差。由此可见,利用(按)偏差进行控制是自动控制系统工作的基础。

2. 组成原则 根据自动控制系统的工作过程可知,整个系统应由测量、比较、放大、执行机构和被控对象组成。

这些设备是如何组成自动控制系统的呢?为了便于说明,同时也为了便于以后表示和分析计算自动控制系统,将系统原理图简化成系统方框图。

系统方框图,是由许多对信号进行单向传递的元件方框和一些连线组成,它包含三种基本单元如图 1-3 所示。

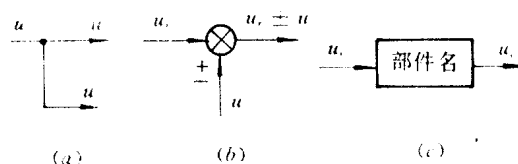


图 1-3 方框图的基本组成单元

引出点 如图 1-3(a) 所示。表示信号的引出或信号的分支,箭头表示信号传递方向,线上标记信号为传递信号的时间函数。为书写方便省去变量 t ,如 $u(t)$ 一般简写成 u 。

比较点 如图 1-3(b) 所示。表示二个或二个以上信号进行加或减的运算。“+”号表示信号相加(“+”号可省去不写);“-”号表示信号相减。

元件方框 如图 1-3(c) 所示。方框中写入元、部件名称,进入箭头表示其输入信号;引出箭头表示其输出信号。

任何复杂的自动控制系统,都是由元、部件组成的。各元、部件的输入、输出信号之间均可用一个单向性的方框来表示。整个自动控制系统的方框图,就是按照系统中信号传递顺序,用信号线依次将各个方框连接而成的图形。图 1-4 就是一个电压自动控制系统的原理方框图,当然,系统方框图中的方框与实际系统中元、部件并非一定是一一对应的。

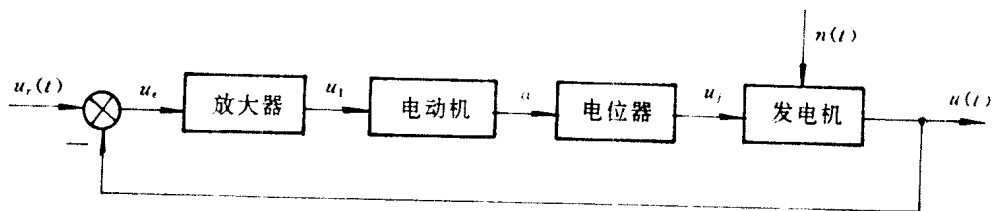


图 1-4 电压自动控制系统方框图

由系统方框图可见,上述控制系统中信号的传递形成一个封闭回环,且被控量反回输入端和输入信号进行比较是相减的运算,我们称这种联系为负反馈。因此,自动控制系统必须按照闭环负反馈的原则组成(应当指出,反馈是指对被控制量而言的)。

闭环控制系统的一般原理方框图,如图 1-5 所示。图中 $r(t)$ 为输入信号; $c(t)$ 为系统输出信号。把完成控制作用的测量元件、比较元件、放大元件和执行元件组合称为控制器。因此,自

动控制系统一般由控制器和被控对象组成。显然,闭环控制是指控制器(控制装置)与被控对象之间既有顺向作用(控制器对被控对象的作用),又有反向联系(被控量反回到控制器)的控制过程。

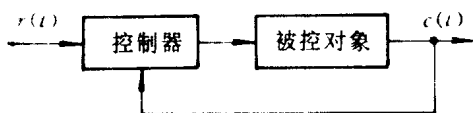


图 1-5 闭环系统方框图

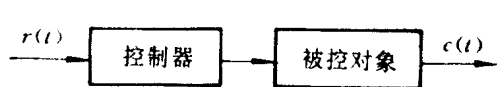


图 1-6 开环控制的方框图

四、开环控制

开环控制是指控制器与被控对象之间只有顺向作用而没有反向联系的控制过程。在开环系统中,既不要对输出量进行测量,也不需要输出量反馈到系统输入端与输入量进行比较。图 1-6 表示了这类系统的输入量与输出量之间的关系。如自动售货机、产品生产自动线、数控机床、交通指挥的红绿灯转换和洗衣机等,一般都是开环控制系统。

在任何开环控制系统中,系统的输出量都不被用来与输入量进行比较。因此,当出现扰动而产生偏差时,系统一般不采取任何措施来减小或消除这些偏差,显然如果扰动较大,或控制精度要求较高,开环控制系统就不能完成既定任务了。

五、闭环与开环控制系统的比较

由上可知,闭环与开环控制系统的主要差别就在于是否采用“反馈”。闭环控制系统的优点是:由于采用了反馈,因而使系统输出(响应)对外部干扰和系统内部元、部件的参数变化不很敏感。这样就有可能采用不太精密的、成本较低的元、部件来构成具有较高精度的控制系统。而这一点在开环系统中,是不可能做到的。另一方面,从稳定性的角度来看,开环控制系统比较容易稳定,稳定性对开环系统来说不是很重要的问题。相反,以后将会看到,在闭环控制系统中,稳定性却始终是一个很重要的问题。由于闭环系统采用了反馈,如果设计不当,有可能使系统产生较大的振荡,甚至发散而不稳定。

一般来说,当系统的输入量能预先知道,并且不存在任何扰动,或扰动不大时,建议采用开环控制为好,因为开环控制结构比较简单,成本比较低。只有当存在着无法预计的扰动和(或)系统中元件参数存在着无法预计的变化时,才能充分发挥闭环控制系统的优越性。

还应当指出,系统输出功率的大小,在某种程度上确定了控制系统的成本、重量和尺寸。为了减小系统所需要的功率,在可能情况下应当采用开环控制。如将开环和闭环控制适当地结合在一起,既经济又能够满足整个系统性能要求,这种控制方式称为复合控制。

1-2 自动控制系统举例

一、位置随动系统

在飞行器的仪表中,为了将陀螺(或其它测量元件)测得的姿态角的数据,传递到比较远

的地方(如驾驶室的仪表板上),就要进行转角的远距离传送,可以利用图1-7所示随动系统来实现上述要求。该系统的任务就是保持输出轴始终紧紧跟踪输入轴变化,又由于输入轴位置是未知的时间函数,所以该系统是一个位置随动系统。

系统的工作原理如下:利用两个电位器 R_1 和 R_2 分别把输入轴和输出轴的转角 θ_i 和 θ_o 变成相应的电压,然后把这两个电压反向串联(相减)即得与角度偏差 $\theta_e = \theta_i - \theta_o$ 成比例的电压 u_e ,该电压经过放大器放大后加到电动机上,电动机的轴经减速器和输出轴相联,并且同时带动电位器 R_2 的电刷移动,如 $\theta_e \neq 0$,则 $u_e \neq 0$,放大后的电压 u 驱动电动机转动,转动方向最终应使 θ_o 向 θ_i 接近,使 θ_e 减小。最后,两者取得一致, $\theta_e = 0$,则 $u_e = 0$,电机停止转动,系统进入平衡状态(假定元件没有死区)。这样,就保证了输出轴紧紧地跟随着输入轴的变化。

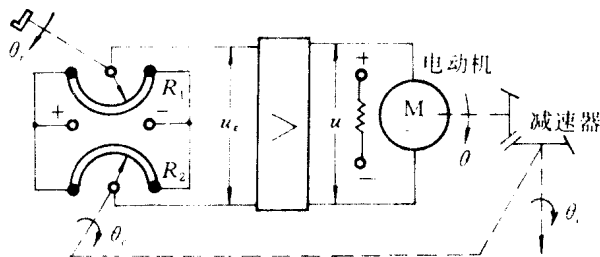


图 1-7 随动系统原理图

二、函数记录仪

函数记录仪是一种自动记录电压信号的设备,其原理图如图1-8所示,其中记录笔与电位器 R_m 的电刷机械连接。因此,由电位器 R_o 和 R_m 组成桥式线路的输出电压 u_p 与记录笔位移是成正比的。当有输入信号 u_i 时,在放大器输出端得到偏差电压 $u_e = u_i - u_p$,经放大器放大后驱动伺服电动机,并通过减速器及绳轮带动记录笔移动,使偏差电压减小至 $u_p = u_i$ 时,电动机停止转动。这时记录笔的位移 L 就代表了输入信号的大小。若输入信号随时间连续变化,则记录笔便跟随并描绘出信号随时间变化的曲线。

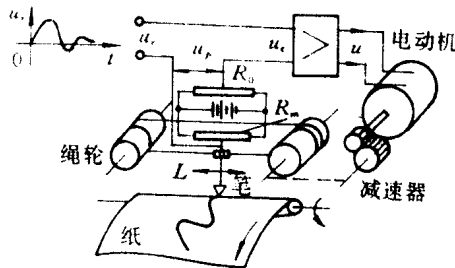


图 1-8 函数记录仪原理示意图

函数记录仪控制系统方框图如图1-9所示。函数记录仪系统的任务是控制记录笔正确记录输入的电压信号。而输入信号的变化规律可以是时间的未知函数,因此,这种控制系统也是一个随动系统。

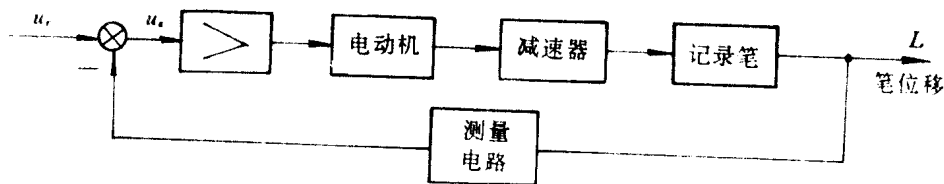


图 1-9 函数记录仪系统方框图

三、速度控制系统

图 1-10 表示出蒸汽机上瓦特调速器的基本原理。进入蒸汽缸中的蒸汽量,可根据蒸汽机的希望转速与实际转速的差值自动地进行调整。它的工作原理是:根据希望的转速,设置输入量(控制量)。如果实际转速降低到希望的转速值以下,则调速器的离心力下降,从而使控制阀上升,进入蒸汽机的蒸汽量增加,于是蒸汽机转速随之增加,直至上升到希望的转速值时为止。反之,若蒸汽机的转速增加到超过希望的转速值,调速器的离心力便会增加,造成控制阀向下移动。这样就减少了进入蒸汽机的蒸汽量,蒸汽机的转速也就随之下降,直到下降至希望的转速时为止。

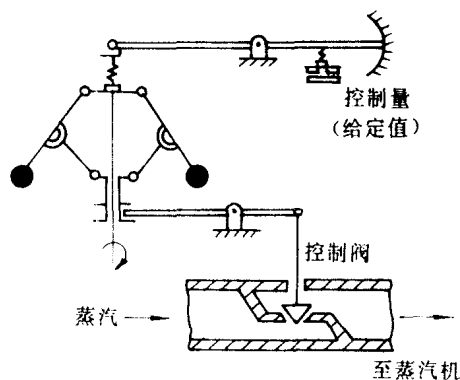


图 1-10 速度控制系统原理图

四、数控机床系统

数控机床系统方框图如图 1-11 所示,根据对工件 P 的加工要求,事先编制出控制程序,作为系统的输入量送入计算机。与工具架连接在一起的传感器,将刀具的位置信息变换为电压信号,再经过模-数转换器变为数字信号,并作为反馈信号送入计算机。计算机将输入信号与反馈信号比较,得到偏差信号,随后经数-模转换器将数字信号转变为模拟电压信号,经功率放大后驱动电动机,带动刀具按期望的规律运动。系统中的计算机还要完成指定的数学运算等,使系统有更高的工作质量。图中的测速电机反馈支路是用来改善系统性能的。

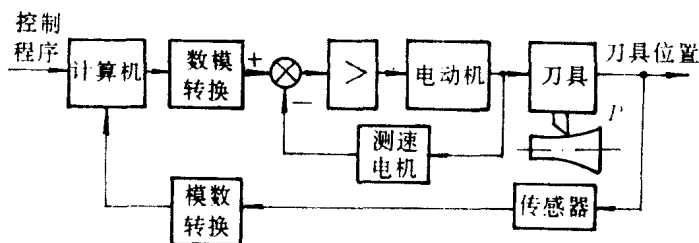


图 1-11 数控机床原理图

五、复合控制系统

图 1-12 为火炮自动控制系统原理方框图。它是在闭环控制回路的基础上,附加一个输入信号的顺向通路,顺向通路由对输入信号的补偿装置组成,因此,它是一个按输入信号补偿的复合控制系统。火炮对空射击时,要求炮身方位角 θ_t 与指挥仪给定的方位角 θ_c 一致。为了保证炮身能准确跟随高速飞行的目标,提高跟踪精度,所以,从指挥仪引出方位角的速度信号 $\dot{\theta}_c$,通过补偿装置形成开环控制信号,由于方位角速度信号总是超前于方位角信号,所以只要补偿装

置合适,就能使炮身按照指挥仪的方位角信号以及所要求的角速度准确地跟踪目标。

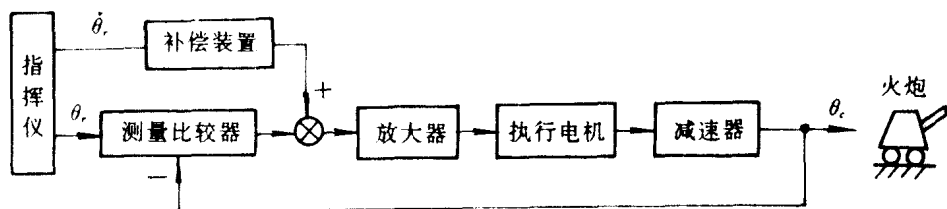


图 1-12 火炮自动控制系统方框图

1-3 自动控制系统的分类

本课程的主要内容是研究按偏差控制的系统。为了更好的了解自动控制系统的特性,介绍一下自动控制系统的分类。分类方法很多,这里主要介绍其中比较重要的几种:

一、按描述系统的微分方程分类

在数学上通常可以用微分方程来描述控制系统的动态特性。按描述系统运动的微分方程可将系统分成两类:

1. 线性自动控制系统 描述系统运动的微分方程是线性微分方程。如方程的系数为常数,则称为定常线性自动控制系统;相反,如系数不是常数而是时间 t 的函数,则称为变系数线性自动控制系统。线性系统的特点是可以应用叠加原理,因此数学上较容易处理。

2. 非线性自动控制系统 描述系统的微分方程是非线性微分方程。非线性系统一般不能应用叠加原理,因此数学上处理比较困难,至今尚没有通用的处理方法。

严格地说,在实践中,理想的线性系统是不存在的,但是如果对于所研究的问题,非线性的影响不很严重时,则可近似地看成线性系统。同样,实际上理想的定常系统也是不存在的,但如果系数变化比较缓慢,也可以近似地看成线性定常系统。

二、按系统中传递信号的性质分类

1. 连续系统 系统中传递的信号都是时间的连续函数,则称为连续系统。

2. 采样系统 系统中至少有一处,传递的信号是时间的离散信号,则称为采样系统,或离散系统。

三、按控制信号 $r(t)$ 的变化规律分类

1. 镇定系统 $r(t)$ 为恒值的系统称为镇定系统(图 1-2 所示系统就是一例)。

2. 程序控制系统 $r(t)$ 为事先给定的时间函数的系统称为程序控制系统(图 1-11 所示系统就是一例)。

3. 随动系统 $r(t)$ 为事先未知的时间函数的系统称为随动系统,或跟踪系统,如图 1-7

所示的位置随动系统及函数记录仪系统。

1-4 对自动控制系统的一般要求

下面仍以图 1-7 所示随动系统为例进行讨论。首先看一下随动系统在外作用下是如何运动的。

设系统处于平衡状态,输入和输出均为零。假定,在时间 $t = 0$ 时,我们把输入轴突然转过一个角度 θ_r ,如图 1-13 中 $\theta_r(t)$ 所示。因此,系统出现了偏差信号 $\theta_e = \theta_r$,它经过电位器转换成电压 u_e ,又经过放大器放大后加到电动机上,于是电动机产生转矩,驱动电动机转轴带动负载转动,由于电动机的转子包括负载(负载惯量可折算到电机轴上)是有转动惯量(惯性)的,故转子的转速和转角不可能发生突变。随着时间的增加,输出轴的转速渐渐增加,相应的转角 θ 也渐渐增加,如图 1-13 中 θ 所示,破坏了系统的平衡状态,进入加速过程。随着 θ_e 的增加,相应的偏差角 θ_e 就减小。当 $t = t_1$ 时,偏差为零。此时作用在电动机绕组上的电压 $u = 0$,似乎系统的运动此时就应该结束了。但实际上不然。因为电机的转子有惯性,在运动过程中已积累了一定的动能,即使电机绕组上电压 u 已为零,转子并不能立刻停止转动。因此, θ 就向大于 θ_r 的方向转动。显然,由于 $\theta_e > \theta_r$,故出现了负的偏差信号。此信号就产生一个使电机向反方向转动的转矩,即此时电机进入了制动过程。电机的转速开始下降,最后在 $t = t_2$ 时下降至零。由于此时负的偏差信号还存在,故电机又开始了反方向的加速运动,来减小偏差信号,到 $t = t_3$ 时,偏差 θ_e 又等于零。同样由于惯性又会使 θ 小于 θ_r 。因此,一般说来, θ_e 的变化是一个振荡的过程。如果电机的惯性不太大而且控制“恰当”,那么振荡的振幅就会愈来愈小,经过几次振荡 θ 就趋于 θ_r ,如图 1-13 中曲线“1”所示,系统趋于新的平衡状态。

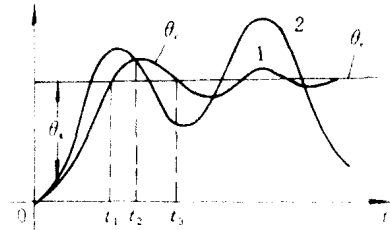


图 1-13 图 1-7 系统的响应曲线

可以想象,假如随着惯性的增加系统振荡的趋势将加大,因此,当惯性大于一定数值后,就有可能使振荡幅值愈来愈大,以致于系统不能正常工作,如图 1-13 中曲线“2”所示。显然,一般来说,在生产中所需要的是前一种过程(曲线“1”),而且希望 θ_e 很快地趋于 θ_r 。

从上述分析可以得到以下几个重要概念:

由于系统中元、部件具有惯性,故系统在外作用下由一个平衡状态(或稳态)过渡到另一个平衡状态(或稳态)需要有一个过程。这一过程称为过渡过程或瞬态过程,或称系统响应,如图 1-14 所示。

瞬态过程有两种形式:一种是收敛的,如图 1-15 中曲线 1 和曲线 2 所示,对应的系统是稳定的;另一种是发散的,如图 1-15 中曲线 3 和曲线 4 所示,对应的系统是不稳定的。

由上述例子可见,系统要能正常工作,首先它的瞬态响应(过渡过程)必须是收敛的,即系统是稳定的。其次系统的输出(响应)应能尽快地跟踪输入的变化或克服干扰的影响,即瞬态响应愈快愈好。系统到达稳态以后,系统的输出与希望值之间的差别应尽量地小,即“准确度愈高愈好”。简而言之,对系统的要求就是稳(稳定性)、准(稳态准确度)、快(快速性)三个字。