

机电控制理论及应用

张永相 主编

郭天石 蔡启仲 副主编

重庆大学出版社

第1章 概 论

制造业是我国实现现代化的原动力,是国家实力的支柱,是支撑共和国大厦的基石。现代制造已进入了机械、电子、计算机、光学等技术被整合为一体的“光、机、电、算”一体化阶段。制造技术与控制理论的结合,促进了这个一体化的进程,推动了自动化的发展,引起了制造观念的更新、制造模式的转变,智能化前景已现端倪。

本书力图把您引进控制理论的大门,让您了解经典控制理论的主要内容,也触及到现代控制理论的门槛。本章介绍控制理论的产生和发展,它的一些重要概念,需要用控制理论来解决现代制造工程中的哪些问题,以及解决这些问题的思想方法是什么。

1.1 控制理论的产生和发展

我国很早就使用了自动机械,如西汉出现了开环控制的记里鼓车,北宋发明了闭环控制的水运仪象台。大约半个世纪后,欧洲在16世纪才出现作为自动机器的磨和钟表。接着18世纪兴起产业革命,瓦特发明了调节蒸汽机转速的反馈调速器。19世纪中期产生了第一篇关于反馈的论文《论调速器》。20世纪初期,对线性系统的稳定性进行了深入研究,推动了恒值控制的应用。从20世纪30年代起,特别是在40年代的第二次世界大战中,伺服控制得到了广泛应用,大大加快了它的发展,并逐渐形成了“经典控制理论”。

不过,明确地在机器中实现人脑的功能,是美国数学家维纳在1948年创立控制论后才开始的。他经常参加由生理学家罗森勃吕特主持的每月一次的科学方法讨论会,来自医学、物理、数学、生物等学科的年轻科学家们,聚在一起自由交谈和争论,使人大受启发,认识到在似乎不相干的机器和生物之间,存在着“有关通信、控制和统计力学一系列核心问题之间的本质上的统一”,需要建立一门学科来概括这种统一性。当时,构成控制论基础的若干科学和技术已经发展起来,也有可能产生一门横向科学来研究这一类广泛的问题。维纳和其他科学家从事了这一工作,从众多的学科取来砖石建造了“控制论”这座新的科学大厦,其奠基石就是他在1948年出版的《控制论》。在这部名著中,控制论被定义为:“关于既是机器又是动物中的控制和通信理论的整个领域”。

与此同一时期,奥地利生物学家贝塔朗非创立了“系统论”,美国数学家申农创立了“信息论”。这三门具有内在密切联系的新学科的诞生,大大深化了人们对客观事物的认识,改变了人们头脑中客观世界的图景。此后,控制论迅速向各种领域扩展,相应形成了工程控制论、生物控制论、经济控制论等学科分支。我国物理学家钱学森在1954年出版了《工程控制论》,搭接起控制论与工程科学之间的“桥梁”。在20世纪60年代,由于空间技术的需要并随着计算机技术的发展,逐渐形成了“现代控制理论”。从80年代起,又迅速在广度和深度方向上向“大系统理论”和“智能控制理论”发展。

机电控制理论是控制理论与现代机械工程之间的“桥梁”,它用控制论的思想、控制理论的方法,研究“光、机、电、算”一体化系统现实的和可能的运动结构及其控制方法,正在成为现代

机械工程中一门重要的新兴技术科学。

1.2 控制理论的一些基本概念

1.2.1 系统、控制系统

系统是一个相互作用着的若干要素的复合体。它指我们所研究的对象,这个对象与外部环境之间,以及内部各部分之间的各种相互作用,系统是它们的总称。

严格说来,我们周围一切相互作用的事物都应被看做系统。但控制理论并不研究一切系统,而只研究“控制系统”,即一类在控制作用下能够改变其运动并进入各种状态的系统。至于这个系统是实体的或抽象的、人为的或自然的对控制理论来说并不重要。

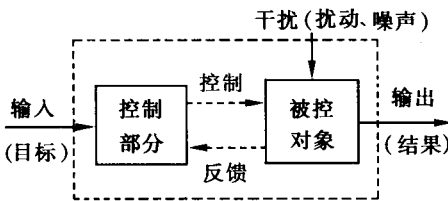


图 1.2.1 控制系统的一般表示

控制系统(以后简称系统)如图 1.2.1 所示,它分两大部分、五种基本变量。其中输入、干扰、输出三种变量表示外部环境与系统间的相互作用;控制、反馈两种变量则表示控制部分与被控对象间的相互作用。

只有形成相互作用才能形成结构,只有形成结构才具有系统性,“一盘散沙”或一堆不相干的事物没有形成结构,不能叫系统。

事物一旦形成了某种结构,这种结构就决定了系统的功能和运动。要改变系统的功能或运动,必须要改变系统的结构。因此,我们说研究一个系统,就是在研究事物的结构(即变量间的相互关系),研究由结构决定的系统的运动特性,研究在输入及干扰共同作用下系统的动力学行为(即系统内部状态变化特性或外部输出变化特性)。

为了揭示系统运动的结构、运动特性或动力学行为,对于一个具体的控制问题,图 1.2.1 将被具体化为原理方块图,并进一步变为数学模型方块图。

1.2.2 开环控制

例 1.1 直流电机开环控制系统。

系统原理图如图 1.2.2 所示。系统的控制部分由电位器、放大器组成,被控对象为直流电动机(以及所拖动的工作机构)。

因为改变电位器滑臂的位置,可以改变给定电位 u_e ,通过放大器改变电机驱动电压 u_a ,从而改变在负载转矩 M_L 作用下的电机输出转速 n_a ,使系统运行在不同的工作状态 $\{u_a, M_L, n_a\}$,所以该系统是一个转速控制系统,其原理方块图如图 1.2.3 所示。

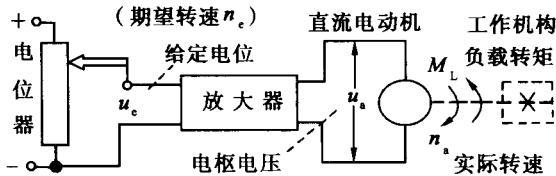


图 1.2.2 直流电动机开环控制系统

(1) 方块图中的信号变量

- 1) 输入——系统要实现的控制目标。本例为期望转速 n_e 。
- 2) 参考输入——变换了量纲的输入,又称指令输入或给定值。本例为给定电位 u_e 。
- 3) 控制——克服干扰使系统输出趋于输入的作用。本例为信号放大器输出 u_e 。

4) 执行——放大了功率、能直接驱动被控对象的控制信号。本例为电枢电压 u_a 。

5) 干扰(扰动)——系统外部及内部各种阻碍或破坏系统实现目标的因素总称。本例为负载转矩变化 ΔM_L 、电源波动、元器件参数变化等。干扰也是对系统的一种输入,只是与系统输入的作用性质相反,随机性的干扰又常被称为噪声。

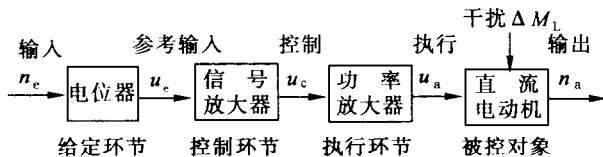


图 1.2.3 直流电动机开环系统工作原理方块图

6) 输出——系统的被控变量,即被控对象的输出,是控制和干扰共同作用下系统状态变化的外部表现。本例为实际转速 n_a 。

7) 偏差——系统输出偏离输入的值,即实际控制结果偏离期望目标的值,它的稳态值是衡量系统控制精度的重要指标。本例为转速差 $\Delta n = n_e - n_a$ 。

(2) 方块图中的功能环节

1) 给定环节——它将系统输入转换为参考输入。本例为电位器,它将期望转速 n_e 转换为给定电位 u_e 。

2) 控制环节——它根据参考输入按一定的控制策略产生控制信号。本例为信号放大器(比例控制器),它产生与给定电位 u_e 成比例的控制信号 u_c 。

3) 执行环节——将控制信号放大为执行信号,以驱动被控对象。本例为功率放大器。

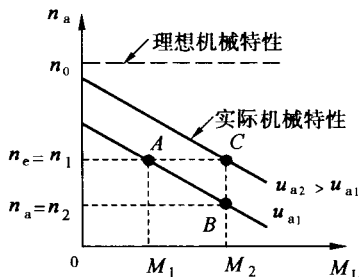


图 1.2.4 直流电机调速特性

图 1.2.3 系统的控制过程是单向进行的,各环节间的信号只有前向通道而没有反馈通道,这种系统被称为开环控制系统。

直流电动机的调速特性如图 1.2.4 所示,当工况发生变化使负载转矩从 M_1 增大到 M_2 时(出现干扰 $\Delta M_L = M_2 - M_1$),在相同电枢电压 u_{a1} 作用下,电机转速从期望的 n_1 降到 n_2 (出现稳态偏差 $\Delta n = n_1 - n_2$),系统平衡工作点则从 A 变到 B。因此,对于图 1.2.2 所示的转速控制系统,在干扰作用较大时,把电位器滑臂设定于期望转速位置并不能实现恒速控制,换言之,开环控制系统不具备抗扰纠偏能力。

1.2.3 闭环控制

如果利用转速从 n_1 到 n_2 的降落,使电枢电压 u_{a1} 自动地增大到 u_{a2} ,让系统运行在平衡工作点 C,就可以克服干扰,保持恒速,图 1.2.5 能实现这种想法。

例 1.2 直流电机闭环控制系统。

用测速发电机把输出转速 n_a 转换成相应电压 u_f 反馈到系统的输入端,与给定值 u_e 比较,得到电位差 $u = u_e - u_f$ 。当负载转矩增大 ΔM_L 使输出转速降低 Δn 时,反馈电位将随

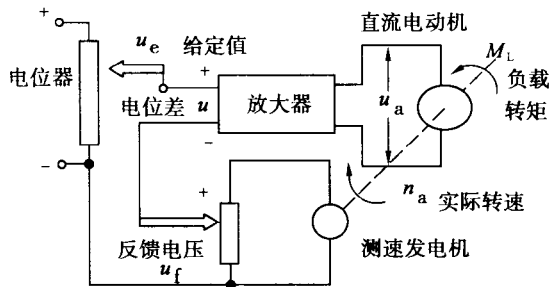


图 1.2.5 直流电动机闭环恒速控制系统

着降低 Δu_f , 从而产生电位差增量 Δu , 电枢电压就产生增量 Δu_a , 使输出转速 n_a 增高, 最后以接近于 n_e 的转速运行。当负载转矩减小 ΔM_L 时, 则按反方向自动调节(此不赘述), 整个过程如图 1.2.6 所示。

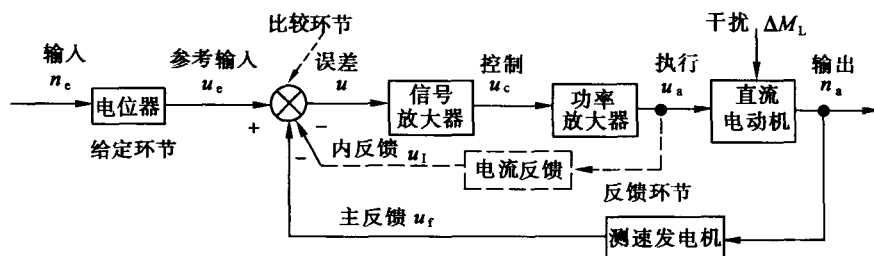


图 1.2.6 直流电动机闭环控制系统原理方块图

由图可见, 系统的控制过程是双向进行的, 信号变量既有前向通道又有反馈通道, 它们形成一个闭环, 这种系统被称为闭环控制系统或反馈控制系统。

(1) 闭环控制必需的两种信号

1) 主反馈——输出经量纲变换返回到输入端, 与同量纲的参考输入比较, 以得到系统误差。本例为反馈电压 u_f , 它代表着电机输出转速 n_a 。

2) 误差——参考输入与主反馈的差值, 它代表偏差但变换了量纲。本例为电位差 $u = u_e - u_f$, 它代表着转速差 $\Delta n = n_e - n_a$ 。

(2) 闭环控制必需的功能环节

1) 反馈环节——检测被控变量, 将其转换为主反馈信号。本例为测速发电机, 它将输出转速 n_a 转换为反馈电压 u_f 。

如果反馈的控制结果是使误差向减小方向变化, 则称为负反馈, 反之称为正反馈。通常情况下, 不特别加以说明时是指负反馈。

2) 比较环节——将主反馈与参考输入进行比较, 输出误差信号。本例为电位器与放大器间的连接电路, 它将反馈电压 u_f 与给定值 u_e 进行比较, 形成电位差 u 。

在方块图中, 比较环节用 $\otimes$ 表示。反馈信号右边标有“-”号的比较, 表示作用相互抵消(作减运算); 右边标有“+”号的比较, 表示作用相互叠加(作加运算)。

图 1.2.6 中, 经测速发电机的反馈是系统输入到系统输出的反馈, 称为主反馈或外反馈。其他信号之间的反馈(如图中虚线所示的电流反馈, 在过载、启动、换向时作限流用)称为子反馈、内反馈或局部反馈。

(3) 开环控制与闭环控制的区别

比较图 1.2.3 和 1.2.6 可知: 开环系统的控制信号是根据给定值产生的, 是一种以期望结果为依据的控制。它在按期望目标校准好给定值后, 不去管实际控制结果, 也不利用实际控制结果来调整系统的行为, 是一种没有反馈调节过程的一次性控制, 因此开环控制不具有抗扰纠偏能力, 只要存在干扰就存在稳态偏差。

闭环系统的控制信号是根据误差产生的, 是一种以实际结果为依据的控制。它把实际控制结果的信息用于控制过程, 通过反馈在系统中建立起不断获取误差、又力图不断依据误差来消除误差的动态调节过程, 因此具有抗扰纠偏能力, 这个过程直到误差完全被消除或者不能再

减小为止。

(4) 闭环控制的普遍性

反馈调节原理普遍存在于人们的各种目的性的行为活动中,人的任何目的性活动都或隐或显地采用负反馈控制,故目的性行为系统都是闭环控制系统,如图 1.2.7 所示。

工程系统也不例外,无论是人工控制或自动控制的工程系统,都具有目的性,都属于闭环控制系统,只不过后者采用了自动化装置来代替人进行反馈与控制,如图 1.2.8 所示。

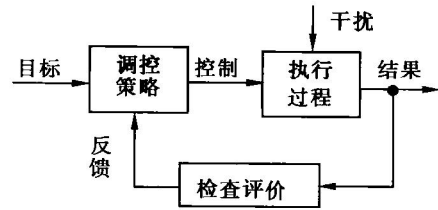


图 1.2.7 行为闭环系统

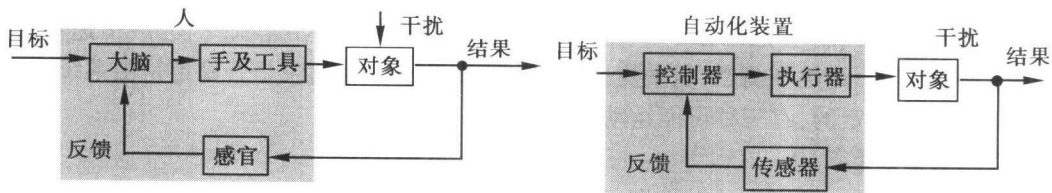


图 1.2.8 人工控制与自动控制

目前的自动化装置已具有人的某些智能甚至复杂智能,但这种人工智能与人脑智能在本质上仍有相当的距离,它不具备人的意志、情感、创造性等本质智能特征,所以不能完全替代人的作用。人总要参与其控制过程,只是参与程度和方式不同而已。

1.2.4 固有反馈

固有反馈又称内在反馈,它不像上述反馈那样,作为一种控制手段被人为地加进系统,它由系统本身的结构关系所形成,是作为系统保持自身平衡的一种调节形式而存在于系统中的。固有反馈普遍存在于自然界、生物界以及人们的各种自发性的行为活动中,在方块图上也构成闭环。

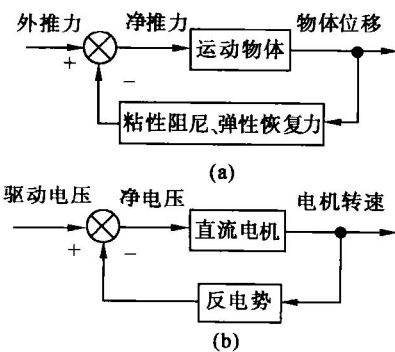


图 1.2.9 物理系统中的固有反馈

在动力学系统中,固有反馈表现为对所受作用的反作用。当外推力使物体运动时,粘性阻尼力和弹性恢复力构成对外推力的反作用,如图 1.2.9 (a)所示。当电机转动时,反电势构成对驱动电压的反作用,如图 1.2.9 (b)所示。

各种无人参与下的自治动力学系统都存在基于上述固有反馈的动态平衡,如生态环境的平衡,生物个体的体温平衡,生物群体的物种平衡、市场的供需平衡等。总之,作用与反作用构成了一个自治动力学系统的运动平衡。

对固有反馈的处理

一个实际闭环系统往往既有人为反馈,又存在固有反馈,控制理论在分析系统时并不区分其反馈是人为的还是固有的。

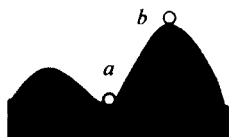
一般工程系统中的固有反馈多为子反馈,此时,可把含有固有反馈的部分作为系统的一个动态环节(子系统)来处理。但在有些情况下固有反馈构成系统主反馈,并对问题的本质起决定性作用,此时必须要仔细找出固有反馈的结构(它一般不易被察觉)及其数学模型来进行分析,以便通过调整系统的结构参数使固有正反馈变为负反馈,或者人为加入负反馈包围固有正反馈,以消除固有正反馈可能引起的自激振荡。

1.2.5 平衡与稳定

平衡与稳定,是系统无时无刻具有的两种运动形态。这里说的“运动”具有广义性,它不限于机械运动,而泛指系统输出(或状态)的变化,比如物体的温度变化、电路的电流变化、原材料储备量的变化等。当系统输出(或状态)的变化为零或者为常数时,称系统运动处于平衡态。比如一个电机转速控制系统的运动处于平衡态,意味着电机不转动(静态平衡)或恒速转动(动态平衡)。稳定态一定是平衡态,但平衡态不一定是稳定态。平衡态是否稳定是由系统自由运动的形态特征来决定的,有三种可能运动状态。

(1) 三种运动状态

1) 稳定



考察图 1.2.10 所示的小球受到干扰而偏离平衡态 a 后的自由运动。在有摩擦情况下,它将呈单调衰减或振荡衰减形态,最终恢复到 a ,此时称平衡态 a 是小球的稳定平衡态。从稳定平衡态出发的运动称为稳定运动,如图 1.2.11(a) 所示。对于线性系统,也可称该系统是一个稳定系统。

平衡态稳定的线性系统,在输入作用下的强迫运动也是稳定的,其特征是在经历一段过渡过程后将达到一个由输入确定的新的稳定平衡态,如图 1.2.8(b) 所示。

稳定平衡态简称稳态或静态。系统在稳态过程中的运动特性称为稳态特性,主要指稳态误差,其大小表征系统自身平衡的或受控运动的精度高低。

系统进入稳态前的过渡过程,称为瞬态过程、暂态过程或调节过程。任何物理系统都是一个动力学系统(都有惯性),所以任何物理系统都存在瞬态过程。

系统在瞬态过程中的运动特性称为瞬态特性,主要指振荡程度和衰减速度,其大小表征系统自身平衡的或受控运动的稳定程度和响应速度。

2) 临界稳定

在无摩擦情况下,小球受到干扰偏离 a 后的自由运动将围绕 a 作永无终结的等幅振荡,不能最终恢复到 a ,如图 1.2.12(a) 所示。此时,经典控制理论称平衡态 a 是临界稳定的(现代控制理论称 a 在李亚普诺夫意义下是稳定的)。从临界稳定平衡态出发的运动称为临界稳定运动,其特征是瞬态过程不收敛。对于线性系统,也可称该系统是临界稳定系统。

平衡态临界稳定的系统,在输入作用下的强迫运动也是临界稳定的,如图 1.2.12(b) 所示。

3) 不稳定

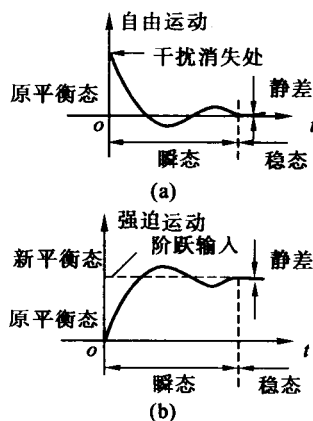


图 1.2.11 稳定运动

小球位于 b 是处于不稳定平衡态, 偏离 b 后的自由运动不收敛(振荡发散或单调发散), 且偏离原平衡态 b 越来越远, 如图 1.2.13(a) 所示, 其特征是瞬态过程呈现无限增长势态而无稳态可言。此时称系统的原平衡态 b 是不稳定的, 从它出发的运动是不稳定运动。

对于线性系统, 也可称该系统是不稳定系统。

不稳定系统在输入作用下的强迫运动也是不稳定的, 如图 1.2.13(b) 所示。

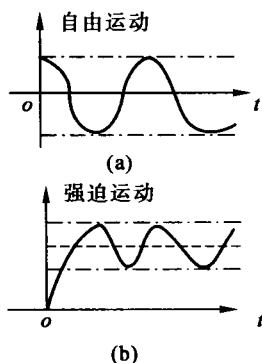


图 1.2.12 临界稳定运动

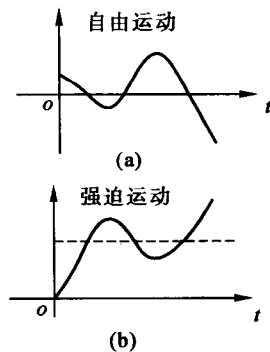


图 1.2.13 不稳定运动

(2) 不稳定是反馈控制的不幸附产物

反馈系统虽然具有抗扰纠偏能力, 但如果结构参数不当, 反馈力度与系统惯性不匹配, 就有可能造成反馈作用过头甚至成为正反馈, 此时, 偏差不但不减小反而随着反馈的不断循环而越来越大, 从而产生不稳定, 固有反馈系统也不例外。

在一定条件下, 固有负反馈转化为正反馈时, 系统的自我调节作用将遭到破坏。此时, 即使系统外部没有发生任何变化, 只是系统内部偶然产生了微小扰动, 在固有正反馈的推动下, 它也会被放大而持续不停甚至越演越烈, 导致系统崩溃。这种不稳定现象称为自激振荡(它与强迫振荡或共振性质不同)。机械低速运动中的“爬行”、切削加工中的“颤振”、滑动轴承中的油膜振荡等都是其中的实例。

开环控制没有反馈, 系统振荡总会因系统的阻尼而衰减, 最终收敛到稳态, 不可能使偏差越来越大, 故开环系统不会出现不稳定。前面说闭环系统具有抗扰纠偏能力是在系统运动稳定的前提下而言的, 运动不稳定的系统根本谈不上具有任何工作能力。

由上可见, 从运动角度看, 与其把一个系统看做相互作用着的若干要素的复合体, 不如把系统看做是一个若干相关要素的状态变化过程(即运动过程)。

(3) 对系统动态性能的基本要求

1) 稳定性——它表征着一个系统能够恢复其平衡态的能力特性, 是一切系统正常工作的前提。任何系统运动都必须稳定(绝对稳定性), 且稳定的程度要足够(相对稳定性), 一定不会出现不稳定或者临界稳定的情况。

2) 准确性(精度)——它表征系统稳态运动与目标平衡态的误差特性。

3) 快速性(响应速度)——它表征系统瞬态运动趋于平衡态的速度特性。

上述“稳、准、快”三项要求, 总体上代表了系统工作性能的好坏, 是对系统动态特性的基本要求, 其性能指标是进行系统分析和设计的重要依据。

(4)控制理论的广义性

从平衡与稳定的观点出发,控制最终要实现的目标是系统需要保持的或需要达到的平衡态。因此,控制系统的含义具有广义性,它不单纯指具有某种自动化装置的自动控制系统,那些不具有自动化装置但具有“自动控制”含义(自我调节)的动力学系统,包括物理系统、经济系统、生态系统、行为系统等也属于“广义控制系统”的范畴。从这个意义上来看,与其说控制理论是一门自动控制科学,不如说它是一门系统运动学及动力学。

与系统动力学一样,控制理论把系统输入和干扰统称为激励,把系统输出称为响应。

1.3 控制系统分类

1.3.1 按信息传递特征

(1)开环系统

无主反馈的系统称为开环系统。它结构简单,调试方便,在扰动很小时,选用参数变化小的高精度元件并对系统进行精确校准,也可达到较高的精度,不过响应速度较闭环系统慢,一般优先应用在输入变化小且扰动又不大的场合。在日常生活中,很多按设定目标进行控制的自动调节器、自动售货机、自动洗衣机,按时基原则进行的红绿灯交通管理等等都是开环控制的实例。

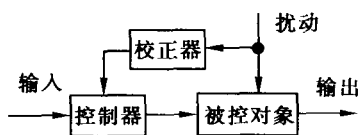


图 1.3.1 带扰动校正的开环控制

如果扰动较大,但其规律可预知或可检测,也可采用带前馈校正(补偿)的开环控制,如图 1.3.1 所示。它附加了一个由校正器提供的前向通道,该校正器产生的信号将补偿(抵消)扰动所产生的偏差。

(2)闭环系统

有主反馈的系统称为闭环系统。它利用误差来消除误差,不必采用很高精度的元件,但需要检测与反馈,结构和调试都较复杂,还存在不稳定的可能性。同时,闭环控制原理是基于瞬态误差来消除稳态误差的,这必然要造成稳态精度与瞬态性能之间的矛盾。要克服这一矛盾必须加入校正装置来改变系统的结构和参数,这就增加了系统的复杂性和成本。所以,只有当扰动和输入变化大且无法预知时,或者要求误差较小且响应速度较快时,闭环控制的必要性及其优点才被明显地体现出来。

(3)复合环系统

既有开环又有闭环的系统称为复合环系统,如图 1.3.2 和 1.3.3 所示,它用于性能要求很高,单独采用开环或闭环都难以满意的场合。图 1.3.2 系统的输入有两路,一路经比较环节进入反馈通道,另一路经前馈校正环节进入开环通道。图 1.3.3 系统的输入进入闭环通道,扰动进入开环通道。

闭环通道的作用主要是纠偏自调,开环通道的作用主要是补偿偏差。

1.3.2 按输出变化规律

(1)恒值控制系统

系统输入恒定不变或变化缓慢,系统的任务是:在干扰作用下保持输出为期望恒定值。恒

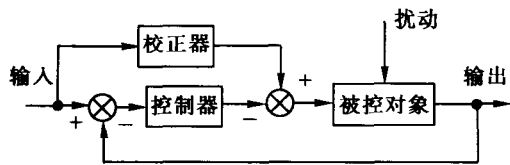


图 1.3.2 带输入前馈的复合环系统

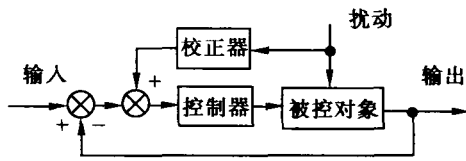


图 1.3.3 带扰动前馈的复合环系统

值系统可采用闭环也可采用开环,闭环恒值系统又称自镇定系统或自调节系统。除机电系统的各种恒值控制外,还有一类被控对象为某类工艺流程下的物流的恒值控制,如恒温、恒流、恒压、恒液位(物位)、恒成分(物性)控制等等,它们在石油、化工、电力、冶金、轻工、纺织等制造业中被广泛采用,常称为过程控制。

(2) 随动控制系统

系统输入随时间任意变化,系统的任务是:使输出以一定的精度来跟踪输入。由于需要跟踪,必须采用闭环来不断消除误差。输出量为位置、速度、加速度的随动系统又称为伺服控制系统,在各种武器的自动跟踪与拦截中,在各种自动化仪器仪表、自动作业机械中,伺服控制都应用得十分广泛。

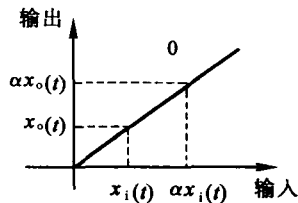
(3) 程序控制系统

程序控制系统是随动系统的特例,输入不是任意变化的,而是按预先给定的规律(即程序)而变化。程序控制可采用闭环也可采用开环。在数控加工、热处理、自动作业机械以及轻化、食品工业中应用广泛。程序控制中也可包含伺服系统。

1.3.3 按元件的输入输出特性

(1) 线性系统

系统中各个元件或环节的输入输出间的关系为连续直线时称为线性特性,如图 1.3.4 所示,其系统称为线性系统,用线性微分(或差分)方程描述。



线性微分方程是只含输出变量 $x_o(t)$ 及其各阶导数 $\dot{x}_o(t)$, $\ddot{x}_o(t)$... 线性组合的方程,方程中不含它们的二次幂及高次幂,也不含超越函数。例如

$a_1 \ddot{x}_o(t) + a_2 \dot{x}_o(t) = \sin \omega t + e^{-pt}$ 是非线性微分方程;

$a_1 \ddot{x}_o(t) + a_2 \dot{x}_o(t) + a_3 x_o(t) = b_1 \dot{x}_i(t) + b_2 x_i(t) + b_3 x_i^2(t)$ 是线性微分方程。

注意,等号右端的输入变量 $x_i(t)$ 出现的二次和高次幂以及超越函数,并不影响方程是线性或是非线性的判断。

线性系统的物理特性

1) 输入输出满足叠加原理

当输入 $x_i(t)$ 变化 α 倍时响应 $x_o(t)$ 也变化 α 倍;输入 $x_i(t)$ 叠加时响应 $x_o(t)$ 也叠加。设 $x_i(t) \rightarrow x_o(t)$ 表示输入产生响应,叠加原理可表示为

$$\alpha x_i(t) \rightarrow \alpha x_o(t), \alpha_1 x_{i1}(t) + \dots + \alpha_p x_{ip}(t) \rightarrow \alpha_1 x_{o1}(t) + \dots + \alpha_p x_{op}(t)$$

2) 输入输出满足频率不变性

在输入为正弦信号时,线性系统的输出是同频率的正弦信号;当输入信号保持相位和幅值

不变而频率连续变化时,输出信号的相位和幅值将随输入频率变化而连续变化。

3) 运动稳定性与初始状态和输入无关

线性系统从初始状态出发的运动形态,只取决于系统的结构和参数,不随初始偏差的大小而改变,也不随输入的大小而改变。

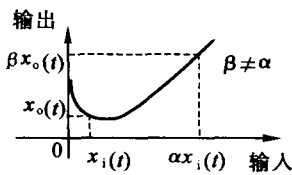


图 1.3.5 非线性输入输出特性

(2) 非线性系统

系统中任一元件或环节的输入输出间的关系为非连续直线时称为非线性特性,如图 1.3.5 所示。含有非线性特性的系统称为非线性系统,用非线性微分(或差分)方程描述。

非线性系统的物理特性

1) 不满足叠加原理(对图 1.3.5 表现为 $\beta \neq \alpha$)。

2) 不满足频率不变性

系统输入为正弦信号时,其输出因含有多种谐波分量使波形发生畸变而不是正弦信号。同时,输入信号频率连续变化时,输出信号的相位和幅值变化不一定连续,出现所谓频率跳变现象。

3) 运动稳定性与初始状态和输入大小有关

见图 1.3.6,当初始偏离较小时系统稳定,但超过一定阈值时就可能变得不稳定。

由此可见,对线性系统而言,运动稳定等价于系统稳定。但对一个非线性系统,不能直接说系统稳定或不稳定,只能说该系统从某个初始状态出发的运动稳定或不稳定。

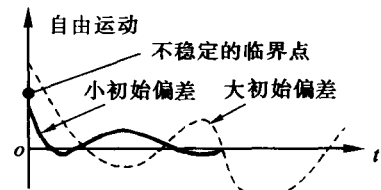


图 1.3.6 非线性系统的稳定性

4) 出现自激振荡

由图 1.3.5 非线性特性所导致的低速爬行运动就是一种自激振荡现象。当运动速度(输入)低到粘性阻尼(输出)正好处于曲线前段向下部分时,物体受到的阻尼是负阻尼,图 1.2.9(a)中的负反馈就变为正反馈,产生自激振荡。自激振荡与原来运动的合成产生时快时慢、时走时停的蠕动现象,被称为“爬行”。

有的非线性系统不稳定的临界点比比皆是,有的非线性系统自激振荡相当严重,有时连系统的输入也被牵入进去作同步振荡。可见,非线性系统比线性系统复杂得多,目前已成为智能控制(如神经网络控制)和非线性动力学(如混沌理论)的研究热点。但对非线性系统的研究不像对线性系统的研究那样成熟,还缺乏统一理论,其分析设计法也不具有普适性,常常只适于较低阶或某种特定的情况。

本书只介绍线性系统,未涉及非线性系统的内容。

1.3.4 按系统参数及变量性质

(1) 连续与离散系统

各变量均为连续信号的系统称为连续系统,用微分方程描述。凡有一个变量是离散信号的系统为离散系统,用差分方程描述。离散信号只在离散时刻有值,在离散时刻之间无信号或信号未确定。连续(模拟)信号可通过采样将其变成离散的脉冲序列,如图 1.3.7 所示,它被量化处理后便成为数字信号。

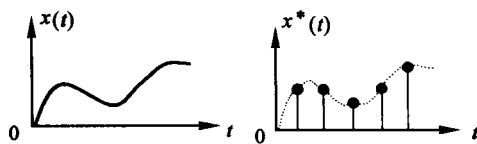


图 1.3.7 连续信号与采样离散信号

(2) 确定性和不确定性系统

被控对象的结构和参数是确定的,系统输入(或扰动)能用确定性的数学函数表示,此时系统输出也是确定的,这种系统称为确定性系统,反之称为不确定性系统。

不确定性系统包括随机系统和模糊系统两大类。

(3) 定常系统与时变系统

各元件的参数不随时间改变的系统是定常系统,用常系数微分方程(或差分方程)描述。反之是时变系统,用变系数微分方程(或差分方程)描述。比如微分方程 $a_1(t)\dot{x}_0(t) + a_2(t)x_0(t) = b_1(t)x_i(t)$ 是一个变系数微分方程。

定常系统的重要性质

定常系统的响应与输入作用的起始时间无关,如图 1.3.8 所示。图中,输入在 t_1 时间 0 时刻的响应与输入在 t_2 时间 τ 时刻的响应完全相同,因此从任何时间或时刻起考察定常系统的运动都是等效的。

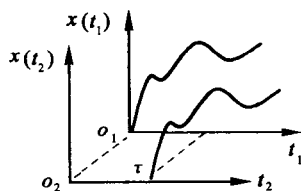


图 1.3.8 定常系统的响应特性

(4) 单变量与多变量系统

仅有一个输入(或扰动)及一个输出的系统称单变量系统,有多个输入(或扰动)及多个输出的系统称多变量系统,如图 1.3.9 所示。

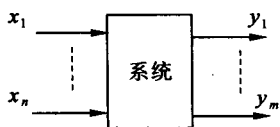


图 1.3.9 多变量系统

由于多变量系统的各输入和各输出之间往往存在交叉作用(耦合)关系,而不是简单的一对一作用关系,因此,在各输入和各输出之间没有被解耦情况下,多变量系统不能被看做多个单变量系统的叠加,需要用现代控制理论中的解耦法或多变量系统分析法来加以处理。

本书只向读者介绍线性、确定性、定常、单变量系统,它也适用于所含非线性特性很小(可忽略)或不起主导作用(可被线性化处理)的情况,以及时变参数变化很小(可忽略)的情况,其中离散系统被放在第 7 章中集中介绍。

1.4 控制理论要解决的工程问题

1.4.1 概述

工程是指人类利用科学原理来改造自然界的实践活动,它是通过一个个具体的工程系统来实现的。随着现代制造日趋高速、精密和多样化,对系统的要求越来越高,除了实现自动化的要求外,很多非自动化问题也越来越多地涉及到系统的动态过程。比如对系统的平衡,不仅要求静态平衡还要求动态平衡;对系统的刚度,不仅要有足够的静刚度也要有足够的动刚度;对系统的监测,不仅要有静态数据还要有动态数据等等。

凡问题涉及到对象的动态过程的特性时,无论它属于不属于自动控制范围,都需要用控制理论来进行研究。控制理论向制造工程的渗透与结合已成为现代制造科学研究方法的一个重

要趋势。

1.4.2 控制理论方法的重要特征

(1) 引入了“信息”这一新的科学范畴

控制论认为,信息与物质和能量一样,都是组成世界的重要成分。如果没有信息,就没有有组织的系统,就没有机器与有机体在通信和控制问题上的本质统一。如果不着眼于信息联系及其变化,就不可能很好地理解系统与结构、控制与反馈、状态与运动、平衡与稳定等概念。

制造过程中所发生的各种数据蕴涵着系统运动的各种信息,组成系统的各种元器件及其装配结构,只是实现系统运动即信息变化要求的物质形态而已。

信息无处不在,制造过程中的信息集成技术已成为现代制造技术发展的重要方向。

(2) 提供了整体的、动态的观点和方法

从控制理论看,系统既是空间意义上的整体,也是时间意义上的整体。因此,必须从相互作用上,并在运动和发展中来考察系统的功能和行为。激励是外因,响应是结果,外因通过内因起作用,内因就是系统结构参数的耦合情况。如果结构参数匹配不当,系统就有可能丧失其稳定性(不能达到平衡),或者丧失能观性(不能获得系统状态的信息),或者丧失能控性(无法控制系统状态的变化)。显然,如果不用控制理论来研究系统,就不能揭示系统的这些重要的特性,也就谈不上对系统进行有效的动态控制。

(3) 基于统一的数学模型来研究系统

虽然模型化的概念和方法已经以或隐或显的形式,被引入到绝大多数的科学分支中去了,但它在任何领域中都没有像在控制论中那样明确和彻底。因为控制论摒弃了个别系统的具体属性,抽象出它们运动相似性的一般关系,使数学模型以最一般的形式表现出来。

基于统一的数学模型,控制理论发展了一种研究系统的重要方法即系统仿真,它使人们能够在某一个领域内去分析、综合和优化另一个领域内的结构和过程,大大加快了该领域学科的发展和不同领域学科之间的相互渗透。

(4) 发展了“黑箱”理论和方法

控制理论认为,在一定条件下,系统的输入和输出的数据中包含着系统结构的信息,行为与结构是相联系的,因此通过系统行为可以识别系统的结构。控制论基于“黑箱”理论的系统识别(系统辨识)方法,对现代科学方法论作出了十分重要的贡献。

1.4.3 步骤和主要内容

用控制理论研究系统动态问题一般有四个相互联系的步骤:定义系统,建立模型,求解问题,实践验证。这四个步骤与它所含的内容和所需知识,将整合成一个图 1.4.1 表示的三维时空结构,整个工作过程将构成一个不止一次反馈的闭环行为系统。

(1) 定义系统

把所要解决的问题作为一个系统,确定出问题所涉及的对象、范围和目标,输入、输出、干扰等有关信号变量和有关动态环节,以构建问题的概念框架,为系统建模和求解问题打基础,并对建模和求解问题起总体意义上的指导作用。有两个问题需要在此提及:

1) 信号变量的确定——在一般情况下把所需要研究的变量(问题结果)作为系统的输出变量,把控制目标或它的某种变换作为输入变量,把实现目标的可控作用作为控制变量,把没有

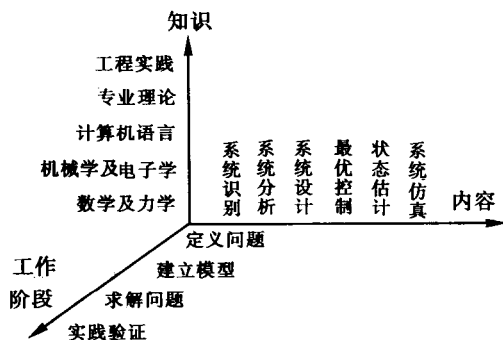


图 1.4.1 控制工程的三维时空结构

(2) 建立数学模型

系统的数学模型,是输入或干扰/系统(结构)/输出(或状态)三者间关系的一种表达。本书涉及两类数学模型:a. 参数模型——如微分方程、传递函数、频率特性、状态方程与输出方程等;b. 非参数模型——各种响应(如脉冲响应、阶跃响应、频率响应)曲线或数据等。

控制理论在解决工程问题时,实际系统将被抽象的数学模型所代替,实际输入(或干扰)被典型信号所代替,实际输出则由典型信号作用下数学模型的解来代替,如图 1.4.2 所示。可见,数学模型在控制工程中非常重要,它是进行系统分析、设计、最优控制、状态估计、系统仿真等工作的基础和工具。

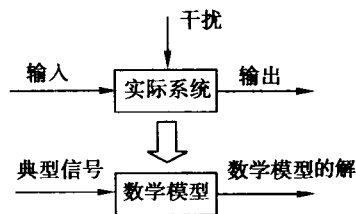


图 1.4.2 系统与数学模型

建立系统参数模型的方法分为两类:

1) 系统识别 (实验法)

它是用系统输入和输出含有测量噪声的观测数据,按一定的算法来估计系统的阶次、结构和参数,从而建立系统的数学模型,如图 1.4.3 所示。它一般用于系统输入和输出可观测、但系统工作机理不清楚或参数不确定时(即“黑箱”系统)的建模。

本书第 6 章将对系统识别作简要介绍。

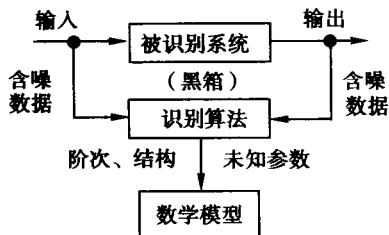


图 1.4.3 系统识别

有时会碰到这样一种“黑箱”系统,不仅不清楚该系统的工作机理,而且系统的范围也难以确定,无法观测输入,甚至不知道输入是什么,这时可只根据输出的观测数据用时间序列分析法建模(这部分内容已超出了本书范围)。

2) 机理建模 (解析法)

它是根据系统工作机理,按相应的物理定律,用解析法来获得系统的数学模型。这种方法一般用于已知系统工作机理、结构及参数时(即“白箱”系统)的建模。在解析法建模中,系统阶次和部分参数有时仍要由实验来确定。

本书第 2 章将详细介绍系统的各种数学模型及其解析建模方法。

(3) 求解各种问题

1) 系统分析

控制时造成系统输出的那些不可控作用作为干扰变量。在各种干扰中,次要干扰一般可以忽略(如例 1.1 中忽略了元器件参数变化和电源电压波动),主干扰则必须要加以考虑(如例 1.1 中考虑了负载力矩变化)。

2) 功能环节的确定——通过方块图分析系统的工作过程,并结合系统数学模型方块图来确定。各种功能环节都是动态环节,它与系统实际元器件并不一定对应,一个功能环节可以由一个或多个元器件组成,一个元器件也可以起一个或多个功能环节的作用。

系统分析是进行系统设计的根据,它通过研究系统数学模型的性质及其对典型信号输入下的解,来认识系统的运动规律,判断系统的稳定性、能控性、能观性,获得系统“稳、准、快”性能指标,并找出系统结构参数与这些性能指标间的关系。

经典控制理论的系统分析法有时域法、频域法两大类。时域法(包括时间响应法、根轨迹法)以传递函数为数学模型。频域法(频率响应法)以频率特性为数学模型。现代控制理论的系统分析采用状态空间法,以状态方程和输出方程为数学模型。

上述三种分析方法常常被同时运用。本书第3、4两章将详细介绍时域法和频域法,对状态空间法也作了简要介绍。限于篇幅,本书把根轨迹法概念融在时域法中。

2) 系统设计

系统设计是在系统分析的基础上确定满足性能要求的系统。对给定系统的设计称为系统综合,即加入某种校正装置改变给定系统的结构和参数,使系统性能满足给定要求。

经典控制理论主要采用频域法或根轨迹法来确定校正装置的结构形式和参数,现代控制理论主要采用状态空间法来确定状态观测器和反馈控制器的参数。

本书第5章详细介绍频域法校正装置设计,也涉及状态反馈控制器的参数确定。

3) 最优控制

最优控制是要求系统性能指标(目标函数)满足最优准则时的系统设计。如果系统在环境条件发生大范围急剧变化时仍能保持其最优性能指标,则称为自适应控制。

4) 状态估计

状态估计是用含有噪声的输入和输出观测数据,按一定算法来估计系统现在、过去或将来的状态。观测时刻等于估计时刻(估计现在状况)称为滤波,观测时刻大于估计时刻(估计过去状况)称为平滑,观测时刻小于估计时刻(估计未来状况)称为预报。

上述3)和4)的内容都超出了本书范围,有兴趣的读者可在学习本书后再另作了解。

5) 系统仿真

系统仿真是根据系统数学模型,采用计算机对系统运动进行数字模拟,完成事前分析与设计,以提供可选择的控制方案和有关的计算结果。

本书所配教学光盘编制了用MATLAB语言进行控制系统计算机辅助设计的程序集,本书涉及的大部分分析和设计的内容都可以使用该程序集来进行仿真,同时还扩展了不少本书未涉及的内容。

(4) 实践验证

在系统建模中,常常要根据具体要求和条件对问题进行工程简化,各种物理定律也都是在若干假设条件下得到的(假设就是简化),如果不简化,任何问题都无法解决。衡量简化合理性的标准,是简化模型的结果是否满足工程实际要求。

1.4.4 常用的工程简化

可以从图1.4.4所示微分方程的简化,来说明建模中常用的工程简化方法。

(1) 用集中参数代替分布参数

将机械系统连续分布的质量、刚度、阻尼用集中参数 m 、 k 、 c 来代替。将电气系统连续分布的电感、电容、电阻分别用集中参数 L 、 C 、 R 表示。将液压系统中的分布流速用平均流速 v 来表示。这样,使系统数学模型从偏微分方程简化为常微分方程。

(2)非线性特性线性化

非线性特性对问题本质不起主导作用时,将某些非线性特性进行线性化处理,使系统数学模型从非线性微分方程简化为线性微分方程。

(3)变参量简化为常量

系统中有不少变参量。比如飞行体质量随燃料消耗而减少,电阻因发热而变化,液体粘度随温度改变,粘性阻尼是速度的函数,弹簧刚度随变形量改变。若这些变参量的变化微小或影响不大,便可近似为常量处理。这样系统数学模型从变系数微分方程简化为常系数微分方程。

(4)忽略次要影响因素

忽略次要干扰及小的随机噪声。如果系统元件的质量、弹性、阻尼、电感、电容、电阻,液压元件的泄漏、液压油的压缩性很小,对所研究问题作用甚微,也可忽略不计。这样,微分方程从高阶降到低阶或使方程的各项系数得到简化。

有关说明

① 要提出一个既简化又合理的数学模型并非易事,必须对建模对象要有一定的先验知识。比如,在高频范围内分布参数对系统或元器件的性质往往起重要作用,若采用集中参数模型就有较大的模型误差,在低频范围内建立集中参数模型才比较适用。此外,机电控制系统一般都包括有机、电、气、液、光等各种元器件,种类多且耦合关系复杂,特别是有些“软”参数对系统的影响难以掌握。一个模型的合理性并不在于数学模型本身,任何模型都有误差,但模型结果与实际结果间的误差必须满足工程要求。

② 在对象和环境具有高度复杂性、高度不确定性的情况下,往往不一定要去努力建立一个“精确”的参数模型,而是采用自适应、自校正的办法来实时地修改模型参数,或者基于“不太精确”的参数模型进行模糊控制,或者基于非参数模型或神经网络进行控制,从而实现很高的控制要求(这部分内容已远远超出了本书范围)。

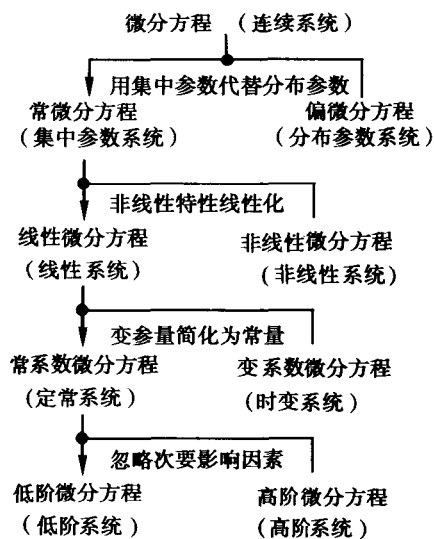


图 1.4.4 系统的简化

1.5 本课程学习指南

1.5.1 本课程的性质和作用

(1)本课程是一门技术基础课

本课程作为技术基础课,主要介绍控制系统的基本概念、性质、分析与校正方法。它比其他技术基础课更抽象,涉及的范围更广泛,知识的综合性也更强。

在学习本课程时,需要适当复习有关的基础知识,注意本课程各种概念和方法的物理意义。虽在数学推证上可不追求纯数学意义上的严密性,但要注意结论的准确性及其适用的对象、条件和范围。由于没有接触专业,本书中的例子都作了相当的简化,但它们具有代表性,是

今后解决复杂问题的基础,应认真理解和掌握。本书内容联系紧密,需要前后反复贯穿起来学习。此外,还需要随时关注控制理论的应用和发展。目前它主要应用在自动化装置设计、动态过程建模与分析、测控信号处理、故障诊断等方面。随着控制理论的发展,它的应用将更加活跃和深入。

(2)本课程是一门计算机应用课

现代技术总是与计算机应用分不开。计算机应用是多方面的,它在本课程中体现为引入 MATLAB 语言对控制系统进行计算机辅助分析与设计。MATLAB 是美国 Mathworks 公司在 20 世纪 80 年代开发的一种面向数值计算与仿真的可视化的高级语言,发展很快,目前已相继推出了信号处理、控制系统、系统识别、图像处理、模糊逻辑、神经网络等近 40 个工具箱(应用程序),为众多领域提供了功能强大、界面友好、编程效率极高的软件环境(有人认为它比 C、BASICS、FORTRAN 可高几十倍)。

学习本课程要充分利用教材的 MATLAB 程序,注意配合相关的实验迅速处理数据,加深对抽象理论及方法的直观理解和掌握,但不宜沉醉于编程而舍掉了基本理论,忽略了系统分析能力的培养,要防止“精了电脑荒了人脑,只会编程不会分析”的现象。MATLAB 作为一个工具,它不能代替人的积极思维,更不能代替人从事创造性劳动。

(3)本课程是一门重要的方法论课

专业课重在培养应用能力,基础(技术基础)课则重在培养认识能力。随着认识方法从低层次向高层次转化,普适性加大,认识能力增强,深入研究和横向跨越的能力也被扩大了。因此学习本课程时要注意控制理论的基本思想,理解基本概念和方法的内涵与哲理性。要大胆思考,敢于提出问题,积极发现问题,努力探讨问题,不要被书本所束缚。

要真正了解一门学科,总是要通过自己的基础和其他知识及实践,对教材和有关的参考文献进行个人的选择和再综合,并随着知识、经验的积累和认知领域的不断扩大,才会越来越好地理解和运用该学科的概念和方法。

1.5.2 本课程的基本要求

从总体上说,应初步学会以系统及其运动的观点、概念和方法来分析、处理制造工程中涉及动态过程的各种问题。从具体内容上说,应掌握简单机电系统的解析建模法,利用传递函数对系统进行时域分析的方法,利用频率特性对系统进行频域分析和校正的方法;应了解系统识别的基本方法、系统状态空间分析法和离散采样系统的分析方法;还应初步学会用 MATLAB 程序对机电系统进行计算机辅助分析与设计的方法。

1.6 小 结

本章在不涉及数学模型及其方法的情况下,对控制理论作了一般性介绍。本章的许多内容将贯穿于后面各个章节,应通过后面各个章节的学习,再反过来加深对本章内容的理解。

通过本章学习,应能确定一般系统的输入、输出、干扰及有关的信号和功能环节,能确定一个系统所采用的或应当采用的控制方式,能用工作原理方块图来表达系统,明确系统基本性能的含义,各类系统的划分,它们各自有什么特征,自动控制系统与动力学系统、人工反馈与固有反馈有什么异同,前馈与反馈有何区别等等。