

高等学校教学用书

自动控制原理

修 订 版

高等学校教学用书

自动控制原理

(修订版)

东北工学院 杨自厚 主编

冶金工业出版社

高等学校教学用书
自动控制原理
(修订版)

东北工学院 杨自厚 主编

*

冶金工业出版社出版

(北京北河沿大街嵩祝院北巷39号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

787×1092 1/16 印张 25 字数 601 千字

1980年10月第一版 1987年11月第二版

1987年11月第四次印刷

印数48,801, ~68,400册

统一书号: 15062·4632 定价4.10元

ISBN 7-5024-0040-0/TP·2

修订版前言

本书初版于1980年出版以后，受到广大读者的欢迎和爱护，许多读者来信给本书以积极的评价，使我们受到很大的鼓舞；在此同时，许多读者对原书中存在的问题，也提出了许多中肯的意见，编者对此表示衷心的感谢。

在1979年编写本书时，为了满足当时高等院校教学急需，编写时间比较仓促，再加上编者水平所限，故在编写中存在一些问题。经过几年的实践，我们根据使用经验和读者的意见，对本书进行了修改。

在本书修订中，我们保留了原书中深入浅出、理论联系实际、内容精炼、便于读者自学的特点；对讲述繁琐的部分进行了改写，删除了一些没有必要的部分，补充了缺少的部分。考虑到目前教学计划中已有“系统仿真”这一课程，则删去了计算机仿真方面的内容。另外，为了使内容更精炼，我们将拉氏变换的有关内容放在附录里。为了使用本书方便，我们在每章之后增加了习题。

本书经修改后由原来的九章改为八章，第一章至第三章由汪谊臣同志编写，第四章和第七章由吴源达同志编写，第五章由杨自厚同志编写，第六章由李宝泽同志编写，第八章由侯军同志编写，全书由杨自厚同志主编。

在修订本书时，曾邀请北京钢铁学院、鞍山钢铁学院、武汉钢铁学院、华东冶金学院、江西冶金学院、河北矿冶学院、上海电力学院、吉林工业大学、辽宁锦州工学院等院校有关同志进行审查和讨论。他们提出了许多宝贵意见和建议，在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限，在修订版中仍会存在不少缺点和错误，欢迎广大读者继续给以宝贵的批评和指正。

编 者

一九八六年九月

前言

在工业和科学技术的发展过程中，自动控制起着重要的作用。目前，它已日益成为工业生产、国防建设和交通运输中不可缺少的组成部分。它对于提高产品的质量、降低生产成本、提高劳动生产率、改善劳动条件都起着重要的作用。因此，自动控制理论已成为从事自动化工作的广大工程技术人员不可缺少的重要理论基础之一。

自动控制理论涉及的范围非常广泛。一般把二十世纪五十年代建立起来的主要处理单输入单输出定常反馈控制系统的理论称为古典控制理论，而把六十年代以来建立起来的用于处理多变量和时变系统的理论称为近代控制理论。前者是建立在频率法的基础之上的，这种理论在工业中获得了广泛的应用，目前仍是一种很有用的方法；后者是建立在状态变量的概念上，本质上是一种时域的方法，这种方法特别适合于用数字计算机来计算和分析比较复杂的多变量控制系统。

《自动控制原理》一书是根据一九七七年冶金工业部高等院校教材会议制订的自动化专业教学计划编写的，可以作为工科院校“工业自动化”专业教学之用，也可以作为从事自动化和有关工作的科技人员自学的读本。

本书对经典自动控制原理的基本内容作了较为详细的介绍，以期读者通过学习能初步掌握闭环反馈控制系统的基本概念、基本分析方法和校正方法，对于设计和调试目前在工业中广泛应用的反馈控制系统有较好的理论基础，并为进一步学习有关专门文献和近代控制理论打下基础。

本书共分九章：第一章至第三章由东北工学院汪谊臣同志执笔，第四章和第八章由武汉钢铁学院吴源达同志执笔，第五章和第六章由东北工学院余平章同志执笔，第七章由东北工学院李宝泽同志执笔，第九章由侯军同志执笔，全书由东北工学院杨自厚同志负责主编。

本书在编写过程中，曾邀请北京钢铁学院、中南矿冶学院、昆明工学院、西安冶金建筑学院、鞍山钢铁学院、武汉钢铁学院、江西冶金学院、河北矿冶学院、广东矿冶学院、哈尔滨工业大学、上海机械学院、上海业余工业大学、云南工学院和贵州工学院等院校工业自动化（或自动控制）教研室有关同志进行审查和讨论，提出了许多宝贵意见和建议，在此表示衷心感谢。

由于我们水平不高，经验较少，编写时间仓促，缺点和错误一定不少，欢迎读者批评指正。

编 者

一九八〇年一月

目 录

第一章 自动控制系统的基本概念	1
第一节 开环控制系统与闭环控制系统.....	1
第二节 闭环控制系统的组成和基本环节.....	5
第三节 对反馈控制系统的基本要求.....	6
第四节 自动控制系统的类型.....	8
习题.....	11
第二章 自动控制系统的数学模型	13
第一节 动态微分方程式的编写.....	13
第二节 非线性数学模型的线性化.....	20
第三节 传递函数.....	23
第四节 系统动态结构图.....	34
第五节 系统传递函数和结构图的变换.....	37
第六节 信号流程图.....	46
习题.....	53
第三章 自动控制系统的时域分析	58
第一节 自动控制系统的时域指标.....	58
第二节 脉冲响应函数.....	61
第三节 二阶系统的阶跃响应.....	62
第四节 闭环传递函数具有零点的二阶系统的暂态响应.....	72
第五节 三阶系统的暂态响应.....	76
第六节 高阶系统的暂态响应.....	82
第七节 自动控制系统的代数稳定判据.....	83
第八节 稳态误差.....	93
习 题.....	104
第四章 根轨迹法	108
第一节 根轨迹法的基本概念.....	109
第二节 根轨迹的绘制法则.....	111
第三节 用根轨迹法分析系统的暂态特性.....	133
第四节 用根轨迹法设计系统.....	137
习 题.....	157
第五章 频率法	160
第一节 频率特性的基本概念.....	160
第二节 频率特性的表示方法.....	162
第三节 典型环节的频率特性.....	165

第四节	系统开环频率特性的绘制	176
第五节	用频率法分析控制系统的稳定性	183
第六节	系统暂态特性和开环频率特性的关系	196
第七节	闭环系统频率特性	204
第八节	系统暂态特性和闭环频率特性的关系	211
习 题		213
第六章 用频率法设计系统		216
第一节	一般概念	216
第二节	串联引前(微分)校正	218
第三节	串联迟后(积分)校正	226
第四节	串联迟后-引前(积分-微分)校正	233
第五节	具有时滞环节的系统的串联校正	240
第六节	用并联校正装置设计系统	242
第七节	前馈校正	253
习 题		256
第七章 非线性系统		257
第一节	非线性特性及其影响	257
第二节	描述函数法	259
第三节	相平面法	275
第四节	最佳控制	290
习 题		294
第八章 采样控制系统		297
第一节	采样控制系统概述	297
第二节	采样过程及采样定理	299
第三节	z 变换	310
第四节	脉冲传递函数	323
第五节	扩展 z 变换	333
第六节	采样系统时域分析	339
第七节	采样系统的根轨迹法	348
第八节	采样控制系统的稳态误差	352
第九节	采样系统的频域分析	356
第十节	采样系统的校正	360
习 题		378
附录 拉普拉斯变换		382
参考文献		393

第一章 自动控制系统的基本概念

第一节 开环控制系统与闭环控制系统

在工业生产过程中,为了提高产品质量和劳动生产率,需要对生产设备和工艺过程进行控制,使被控制的物理量保持恒定,或者按照一定的规律变化,例如选矿厂矿浆浓度的控制、轧钢厂加热炉温度的控制、轧机机架速度的控制、带钢张力的控制,等等。我们把这些被控制的设备或过程称为控制对象或对象,被控制的物理量称为被控制量或输出量。

在实际条件下,一台生产设备或一工艺过程,有许多外部作用。不可能考虑所有这些作用,一般只考虑对输出量有最大影响的量,这些量被称为输入量。

从对控制对象和输出量的影响来看,输入量可分为两种原则上不同的类型。一种类型的输入作用是为了保证对象的行为达到所要求的目标,这一类输入量称为控制量或给定量。在手动控制时,这一类作用由操作者给定。另一类输入作用则相反,它妨碍达到目标,这类作用称为扰动作用或扰动量。

控制的实际任务就是形成控制作用的变化规律,使得不管是否存在扰动,均能使对象得到所希望的行为。

控制系统按其结构可分为开环控制系统、闭环控制系统和复合控制系统。

如果控制系统的输出量对系统没有控制作用,这种系统称为开环控制系统。图1-1所示直流电动机速度控制系统,是开环控制系统的例子,其给定量是给定电压 U_g ,输出量是电动机转速 n 。当改变电位器滑动端位置时,就相应改变了给定电压 U_g 和可控硅整流装置的输出电压 U_d ,这样,电动机的转速也就随着改变了。对应电位器滑动端的一个位置,电动机就运行在一个对应的转速上,从而达到了控制的目的。当有外部扰动(例如电动机的负载变化、可控硅电源电压变化等)或内部扰动(例如可控硅的移相器特性变化)时,电动机转速将偏离给定值。这时如要维持给定转速不变,必须人工重新调整电位器滑动端的位置。例如负载突然增加,电动机的转速相应地降低,偏离了给定值。操作人员检测到实际转速并与给定值进行比较,判断出实际转速低于给定值时,可相应调整电位器的滑动端子,增加给定电压 U_g ,使电动机转速恢复到给定值。图1-2所示结构图可以表示这种系统的输入量与输出量之间的关系。这里,给定量直接经过控制器作用于控制对象,不需要将输出量反馈到输入端去与给定量进行比较,所以只有给定量影响输出量。当出现外部扰动或内部扰动时,没有人的干预,输出量将不能按照给定量所期望的状态去工作。这种开环控制系统多用于轧钢厂的许多辅助传动。在这些传动中,有的只需要控制其起动、制动过程,或者有的转速不需要精确地加以控制。

闭环控制系统是把输出量检测出来,经过物理量的转换,再反馈到输入端去与给定量进行比较(相减),并利用比较后的偏差信号,经过控制器或调节器对控制对象进行控制,抑制内部或外部扰动对输出量的影响,减小输出量的误差。

图1-3所示闭环调速系统是闭环控制系统的例子。这里用测速发电机CF将输出量检测出来,并转换成与给定电压物理量相同的反馈电压 U_f ,然后反馈到输入端,与给定电压 U_g 相比较,其偏差经过放大器放大后,用来控制可控硅电压和电动机的转速。当

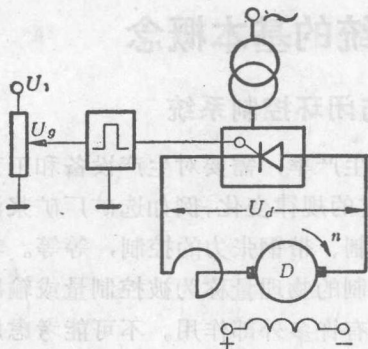


图 1-1 开环调速系统

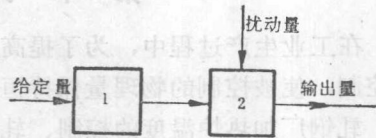


图 1-2 开环控制

1—控制器；2—控制对象

电位器滑动端在某一位置时，电动机就以一个指定的转速运转。如果由于外部或内部扰动，例如由于负载突然增加，使电动机转速降低，那么这一速度的变化，将由测速机检测出来。此时反馈电压相应降低，与给定电比较后，偏差电压增大，再经过放大器放大后，将使可控硅移相角前移，整流电压升高，从而减小或消除电动机的转速偏差。这样，不用人的干预，系统就可以近似保持给定速度不变。图1-4表示这种系统的输入量、输出量和反馈量之间的关系。

这种系统把输出量直接或间接地反馈到输入端形成闭环，参与系统的控制，所以称为闭环控制系统。由于系统是根据负反馈原理按偏差进行控制的，因此，也叫作反馈控制系统或偏差控制系统。

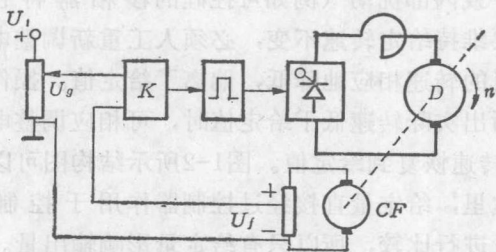


图 1-3 闭环调速系统

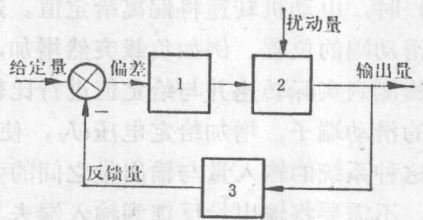


图 1-4 闭环控制

1—控制器；2—控制对象；3—检测装置

在工业生产中，按照偏差控制的闭环系统种类繁多，尽管它们完成的控制任务不同，具体结构不一样，但是，从检出偏差、利用偏差信号对控制对象进行控制，以减小或纠正输出量的偏差这一控制过程却是相同的。归纳起来，这种系统的特点如下。

(1) 在开环系统中，只有输入量对输出量产生控制作用；从控制结构上来看，只有从输入端到输出端从左向右的信号传递通道（该通道称为正向通道）。闭环控制系统中除正向通道外，还必须从右向左、从输出端到输入端的信号传递通道，使输出信号也参与

控制作用，该通道称为反馈通道。闭环控制系统就是由正向通道和反馈通道组成的。

(2) 为了检测偏差，必须直接或间接地检测出输出量，并将其变换为与输入量相同的物理量，以便与给定量相比较，得出偏差信号。所以闭环系统必须有检测环节、给定环节和比较环节。

(3) 闭环控制系统是利用偏差量作为控制信号来纠正偏差的，因此系统中必须具有执行纠正偏差这一任务的执行机构。闭环系统正是靠放大的偏差信号来推动执行机构，进一步对控制对象进行控制。只要输出量与给定量之间存在偏差，就有控制作用存在，力图纠正这一偏差。由于反馈控制系统是利用偏差信号作为控制信号，自动纠正输出量与其期望值之间的误差，因此可以构成精确的控制系统。

反馈控制系统广泛地应用于各工业部门，例如加热炉和锅炉的温度控制、轧钢厂主传动和辅助传动的速度控制、位置控制、带钢张力控制等。

在有些系统中，将开环和闭环控制系统结合在一起，构成开环—闭环控制系统，这种系统称为复合控制系统，它能够取得很好的效果。

在本书中，我们重点研究闭环控制系统。下面再举几个闭环控制系统的例子，说明闭环控制系统的工作原理及其应用。

图1-5是炉温自动控制系统。在这一系统中，温度给定量由电位器滑动端的位置和电压 U_g 给定，炉温输出量由热电偶检测出来，并转换成电压 U_f ，再把这个电压反馈到系统的输入端与给定电压 U_g 相比较。由于扰动（例如电源电压 U 或加热物件）影响，炉温偏离了给定值时，其偏差电压经放大，控制执行机构（可逆运行伺服电动机 D ），带动供电

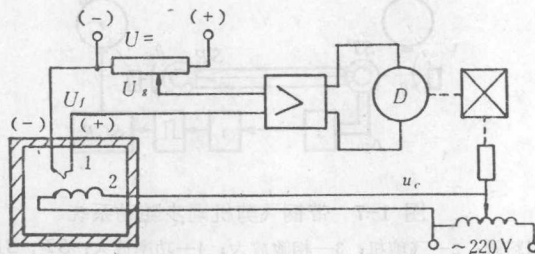


图 1-5 炉温控制系统

1—热电偶；2—加热器

变压器的滑动端，改变了加热器的电压 U_c ，使炉温保持在给定温度。在这个系统中，输出量是炉温，所以称为炉温控制系统。

图1-6是带钢连轧机机架轧辊的转速自动控制系统。连轧机生产的主要特点是：轧制过程中，在各机架中的带钢必须保持秒流量相等的关系，否则将产生拉钢或叠钢等故障；这样，就要求各机架轧辊的转速之间保持一定的比例，并在各种扰动的情况下保持这一比例不变。在图1-6中，转速给定量由电位器滑动端的位置电压 U_g 给定，转速输出量由测速机检测出来，并转换为反馈电压 U_f 。把这个电压反馈到输入端与给定量比较，其偏差电压经过调节器 T 和功率放大 SCR 来控制执行机构—电动机的转速，使轧辊保持在给定转速。在这个系统中，输出量是转速，所以称为转速控制系统，或转速反馈系统。

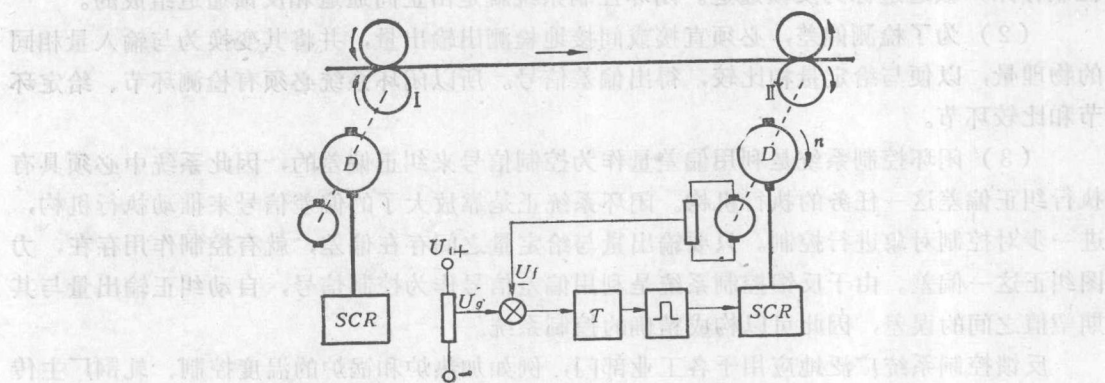


图 1-6 连轧机速度控制系统

图1-7表示带钢飞剪机同步随动控制系统。在钢板剪切线中，为了将带钢剪切成一定长度以提高收得率，要求飞剪机2与引料辊1同步运转，即二者转角应相同。在这个系统里，输入量是引料辊的转角 θ_g ，它由自整角机ST给出。输出量是飞剪机的转角 θ_c ，它由自整角机SR检测出来，并反馈到输入端与给定量进行比较，所得偏差电压 Δu 经过放大后用

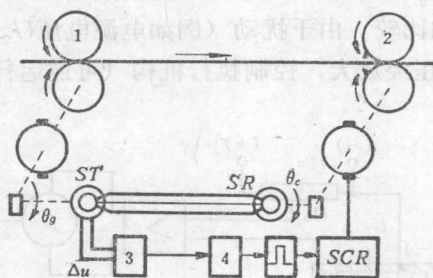


图 1-7 带钢飞剪机同步随动系统

1—引料辊；2—飞剪机；3—相敏放大；4—功率放大；ST，SR—自整角机

来控制飞剪电动机的转速。当引料辊以一定转速转动时， θ_g 随时间按直线变化，飞剪机也以某一速度跟随引料辊转动，二者转角相同。这样，当飞剪机的剪刀每相遇一次，就剪切下长度相同的钢板。当给定量变动，例如引料辊速度突然减小而使钢板速度变慢时，ST的转角变化减慢，SR的转角将大于ST，所得转角偏差控制飞剪电动机，使其转速下降，于是SR的转角变化也变慢，以纠正二者的偏差。又如，当飞剪机由于负载扰动（剪切钢板），速度突然降低，则SR转角小于ST的转角。所得偏差控制飞剪电动机，使其转速上升，直到消除二者的转角差。

在这一系统里，输入量是引料辊这一任意变化的转角，输出量是飞剪机转角。要求输入量以任意事先不知道的规律变化时，输出转角追随输入转角变化，这种系统叫作同步随动系统或随动系统。

图1-8表示轧钢机压下装置的位置控制系统，系统采用计算机直接数字控制（简称DDC）。所采用的执行机构是具有速度负反馈的可控硅-直流电动机传动装置，它带动压

下装置上下运动，以调整轧辊辊缝。位置给定量为设定的数字量，位置输出量由自整角机编码器检测，并变换为数字量，反馈到计算机与给定数字量进行比较。根据比较后的偏差，计算机经过控制计算和数模变换，输出模拟量的控制信号，作为速度给定值，使电动机带动压下装置移动，以减少位置偏差，直到实际位置与给定位置相等为止。

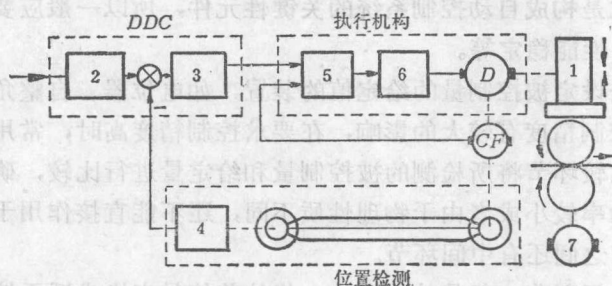


图 1-8 压下装置位置控制系统

1—压下装置；2—设定值储存；3—控制计算和数模转换；4—模数转换；5—调节器；6—可控硅；7—主机

在这一系统中，输出量是位置，所以称为位置自动控制系统。在系统中，采用了数字计算机作为控制器。它的输入、输出和反馈各量都必须都是断续的数字量，而执行机构输入的控制量和输出量都是连续的模拟量。因此，这一系统是由断续控制部分和连续控制部分组成，在两部分的接口处有控制信号的转换装置——数模转换和模数转换装置。

从上述各例可以看出，每一个闭环系统都是要检测输出量，并将其反馈到输入端与输入量相比较，比较后的偏差信号再经过控制装置的运算和放大，作用于执行机构，自动地纠正偏差。通过这种反馈控制，可使控制系统的性能得到显著的改善。

第二节 闭环控制系统的组成和基本环节

根据控制对象和使用的元件不同，自动控制系统有各种不同的形式，但是概括起来，一般均由以下基本环节组成（图1-9）。

1. 控制对象或调节对象 是指要进行控制的设备或过程，如前面所举例中的轧机架轧辊、压下装置、电动机、加热炉等。相应地，控制系统所控制的某个物理量，就是系统

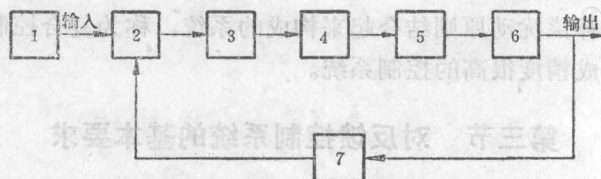


图 1-9 控制系统结构图

1—给定环节；2—比较环节；3—校正环节；4—放大环节；5—执行机构；6—控制对象；7—检测装置

的输出量或被控制量，如轧辊转速、加热炉的炉温、压下装置的位置等。闭环控制系统的任务就是控制这些系统输出量的变化规律，以满足生产工艺的要求。

2. 执行机构 一般由传动装置和调节机构组成。执行机构直接作用于控制对象,使被控制量达到所要求的数值。

3. 检测装置或传感器 该装置如所举例中的测速发电机、自整角机、编码器等,用来检测被控制量,并将其转换为与给定量同一物理量。检测装置的精度和特性直接影响控制系统的控制品质,它是构成自动控制系统的关键性元件,所以一般应要求检测装置的测量精度高,反应灵敏,性能稳定等。

4. 给定环节 是设定被控制量的给定值的装置,如电位器、自整角机等。给定环节的精度对被控制量的控制精度有较大的影响,在要求控制精度高时,常用数字给定装置。

5. 比较环节 比较环节将所检测的被控制量和给定量进行比较,确定两者之间的偏差量。该偏差量由于功率较小或者由于物理性质不同,还不能直接作用于执行机构,所以在执行机构与比较环节之间还有中间环节。

6. 中间环节 中间环节一般是放大元件,将偏差信号变换成适于控制执行机构工作的信号。根据控制的要求,中间环节可以是一个简单的环节,如晶体管放大器和可控硅装置;或者是将偏差信号变换为适于执行机构工作的物理量,如液压伺服放大器。常常除了要求中间环节能将偏差信号放大以外,还希望它能按某种规律对偏差信号进行运算,用运算的结果控制执行机构,以改善被控制量的稳态和暂态性能,这种中间环节常称为校正环节,如经常应用的电子调节器、气动调节器等。

在控制系统中,常把比较环节、放大装置、校正环节合在一起称为控制装置。

在图1-9的自动控制系统结构图中,清楚地表明了各环节之间的关系和信号传递的方向。应注意,在结构图中,各环节的信号传递是有方向性的。在正向通道里,总是前一环节的输出生影响后一环节,而后面的环节的输出生不影响前面的环节。如果在实际的环节中存在输出对输入的影响,那么,这一影响可以用反馈的形式表示出来,这种反馈称为局部反馈,而系统输出量的反馈称为主反馈。有时,为了改善系统中某些环节的特性,如改善环节的非线性特性,减少环节的延迟等,在部分环节之间,附加局部反馈。图1-9是按照偏差原则构成的控制系统的典型结构图,不管外部扰动或内部扰动什么时候发生,只要出现偏差量,系统就利用这一偏差量去纠正输出量的偏差。

从系统的结构上来看,也可以按照补偿扰动的原则构成系统,即当扰动量引起偏差的同时,利用扰动量来纠正偏差。这样,控制作用迅速,但是当有多种干扰时,检测干扰比较困难,系统结构也比较复杂。

按偏差原则和按补偿扰动原则结合起来构成的系统,称为复合控制系统。这种系统兼有二者的优点,并构成精度很高的控制系统。

第三节 对反馈控制系统的基本要求

一个反馈控制系统,当扰动量或给定量(或给定量的变化规律)发生变化时,被控制量偏离了给定量(或给定量的变化规律)而产生偏差,通过反馈控制的作用,经过暂短的过渡过程,被调量又趋近于或恢复到原来的稳态值,或按照新的给定量(或给定量的变化规律)稳定下来,这时系统从原来的平衡状态过渡到新的平衡状态。我们把被控制量处于变化状态的过程称为动态或暂态,而把被控制量处于相对稳定的状态称为静态或稳态。

一个反馈控制系统的稳态性能用稳态误差来表示。所谓稳态误差是指系统达到稳态

时, 输出量的实际值和期望值之间的误差。对于一个恒值控制系统(如调速系统)来说, 稳态误差是指扰动(例如负载)作用下, 被控制量(例如转速)在稳态下的变化量; 对于一个随动系统来说, 则是指在稳定追随过程中, 输出量偏离给定量的大小。这一性能表示稳态时的控制精度。一个设计合理的自动控制系统其稳态特性应能满足工艺要求。

除上述的稳态性能外, 一个自动控制系统还应满足暂态特性的要求。前面介绍的闭环速度控制系统, 在某一给定转速下运行过程中, 如由于工艺上的要求, 给定量突然增加某一给定值, 这就要求输出量也相应地增加某一给定值, 并在新的状态下稳定运行。如果各元件都没有惯性, 那么在突然变化的偏差量作用下, 电动机即可于一瞬间到达新的给定转速。但是事实上, 系统总是存在惯性, 如电动机电枢回路的电磁惯性、机械部分的惯性、可控硅装置的惯性等等, 致使电动机的转速不能突变。这样就产生了速度偏差, 在这一偏差信号作用下, 使可控硅装置的输出电压变化, 电枢电流增加, 电动机的转矩增加, 用以克服机械惯性, 电动机的转速开始变化。所以输出量和反馈量总是滞后于输入量的变化, 在时间上有某些延迟。如果控制对象的惯性很大, 系统的反馈又不及时, 则被控制量在暂态过程中将产生过大的偏差, 到达稳态的时间拖长, 并呈现各种不同的暂态过程。对于一般的控制系统, 当给定量或扰动量突然增加某一给定值时, 输出量的暂态过程可能有以下几种情况。

1. 单调过程 这时, 输出量单调变化, 缓慢地到达新的稳态值。这种暂态过程具有较长的暂态过程时间, 如图1-10所示。

2. 衰减振荡过程 这时被控制量变化很快, 以致产生超调, 经过几次振荡后, 达到新的稳定工作状态, 如图1-11所示。

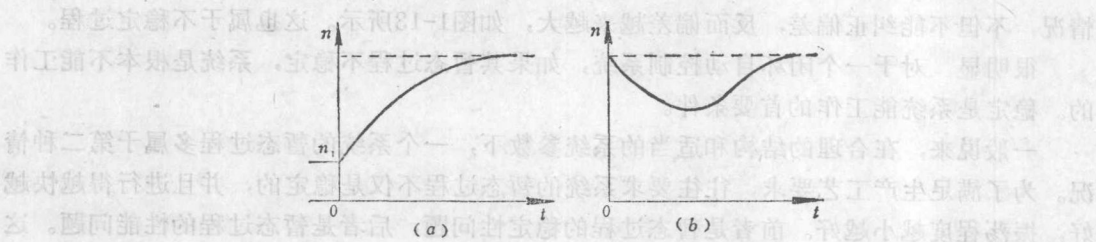


图 1-10 单调过程

(a) 给定量突变时输出量的变化; (b) 负载突变时输出量的变化

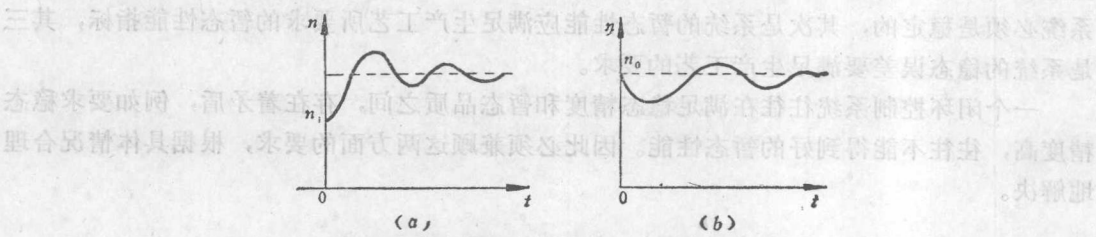


图 1-11 衰减振荡过程

(a) 给定量突变时输出量的变化; (b) 负载突变时输出量的变化

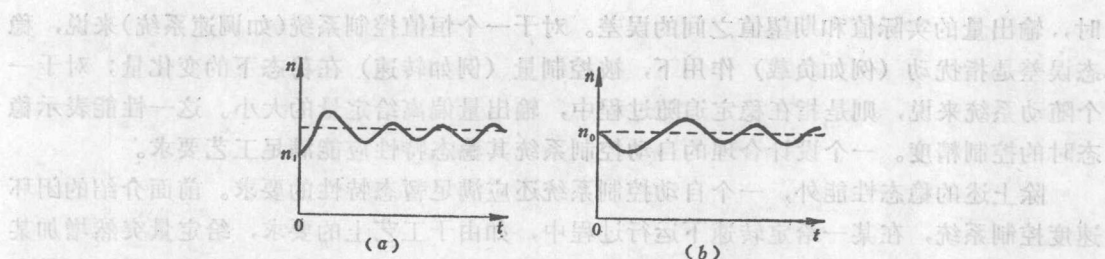


图 1-12 持续振荡过程

(a) 给定量突变时输出量的变化; (b) 负载突变时输出量的变化

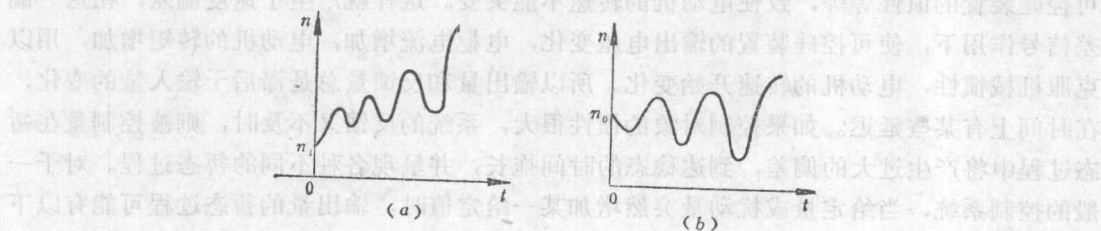


图 1-13 发散振荡过程

(a) 给定量突变时输出量的变化; (b) 负载突变时输出量的变化

3. 持续振荡过程 这时被控制量持续振荡, 始终不能达到新的稳定工作状态, 如图 1-12 所示。这属于不稳定过程。

4. 发散振荡过程 这时被控制量发散振荡, 不能达到要求的稳定工作状态。在这种情况下, 不但不能纠正偏差, 反而偏差越来越大, 如图 1-13 所示。这也属于不稳定过程。

很明显, 对于一个闭环自动控制系统, 如果其暂态过程不稳定, 系统是根本不能工作的。稳定是系统能工作的首要条件。

一般说来, 在合理的结构和适当的系统参数下, 一个系统的暂态过程多属于第二种情况。为了满足生产工艺要求, 往往要求系统的暂态过程不仅是稳定的, 并且进行得越快越好, 振荡程度越小越好。前者是暂态过程的稳定性问题, 后者是暂态过程的性能问题。这些都是设计闭环控制系统时必须研究的问题。

对于暂态过程的性能, 一般采用系统输入量为单位阶跃函数时, 系统输出响应的暂态性能来衡量, 如超调量的大小, 调整时间的长短, 振荡次数的多少等指标。关于这方面的问题将在第三章中详细阐述。因此, 一般说来, 对于反馈控制系统的基本要求是: 首先, 系统必须是稳定的, 其次是系统的暂态性能应满足生产工艺所要求的暂态性能指标, 其三是系统的稳态误差要满足生产工艺的要求。

一个闭环控制系统往往在满足稳态精度和暂态品质之间, 存在着矛盾, 例如要求稳态精度高, 往往不能得到好的暂态性能。因此必须兼顾这两方面的要求, 根据具体情况合理地解决。

第四节 自动控制系统的类型

自动控制系统广泛地应用于各类工业部门。随着生产规模的扩大和生产能力的不断提

高, 以及自动化技术和控制理论的发展, 自动控制系统也日益复杂和日趋完善。例如, 由单输入单输出的控制系统, 发展为多输入多输出的系统; 由具有常规控制仪表和控制器的连续控制系统, 发展到由计算机作为控制器的直接数字控制系统, 从而实现最优控制。由于各式各样的自动控制系统的不断发展, 很难确切地对自动控制系统进行分类。现在将经常讨论的几种自动控制系统的类型概括如下。

一、线性和非线性系统

按组成自动控制系统主要元件的特性方程式的特征, 可以分为线性控制系统和非线性控制系统。

1. 线性系统 线性系统是由线性元件组成的系统, 该系统的运动方程式可以用如下的线性微分方程描述。

$$\begin{aligned} a_0 \frac{d^n x_c(t)}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} x_c(t)}{dt^{n-1}} + a_2 \frac{d^{n-2} x_c(t)}{dt^{n-2}} + \dots + a_{n-1} \frac{dx_c(t)}{dt} + a_n x_c(t) \\ = b_0 \frac{d^m x_r(t)}{dt^m} + b_1 \frac{d^{m-1} x_r(t)}{dt^{m-1}} + b_2 \frac{d^{m-2} x_r(t)}{dt^{m-2}} + \dots \\ + b_{m-1} \frac{dx_r(t)}{dt} + b_m x_r(t) \end{aligned}$$

式中 $x_r(t)$ ——系统的输入量;

$x_c(t)$ ——系统的输出量。

在该方程式中, 输出量 $x_c(t)$ 及其各阶导数都是一次的, 并且各系数与输入量 (自变量) 无关。这是一种简单而重要的系统, 有关这种系统已有较为成熟的研究成果和分析设计的方法。线性系统主要特点是具有叠加性和齐次性, 即当输入量为 $x_{r1}(t)$ 和 $x_{r2}(t)$ 时, 如果输出量分别为 $x_{c1}(t)$ 和 $x_{c2}(t)$; 则当输入量为 $x_r(t) = ax_{r1}(t) + bx_{r2}(t)$ 时, 输出量为 $x_c(t) = ax_{c1}(t) + bx_{c2}(t)$ 。

叠加性和齐次性是鉴别系统是否为线性系统的根据。

线性微分方程的各项系数为常数时, 称为定常系统。

本书第二章到第六章讨论单输入单输出定常线性系统的自动控制基本原理。这种系统可以用拉普拉斯变换解微分方程, 并由此定义出系统传递函数这一系统动态数学模型。根轨迹法和频率法就是在这一基础上发展起来的分析和设计线性系统的有效方法。至于多输入多输出系统所采用的状态空间、传递矩阵等分析方法, 将在有关课程中论述。

2. 非线性控制系统 如果系统微分方程式的系数与自变量 $x_r(t)$ 有关, 则为非线性微分方程; 由非线性微分方程描述的系统称为非线性控制系统。应指出, 在自动控制系统中, 即使只含有一个非线性环节, 这一系统也是非线性的。典型的非线性环节有, 例如继电器特性非线性环节 (如图1-14a)、饱和特性非线性环节 (如图1-14b) 和不灵敏区非线性环节 (如图1-14c) 等。

对于非线性控制系统的理论研究远不如线性系统那样完整, 一般只能满足于近似的定性描述和数值计算。本书第七章将介绍有关非线性理论的描述函数法和相平面图等基本内容。

应指出的是, 任何物理系统的特性, 精确地说都是非线性的, 但在误差允许范围内, 可以将非线性特性线性化, 近似地用线性微分方程来描述, 这样就可以按照线性系统来处理。

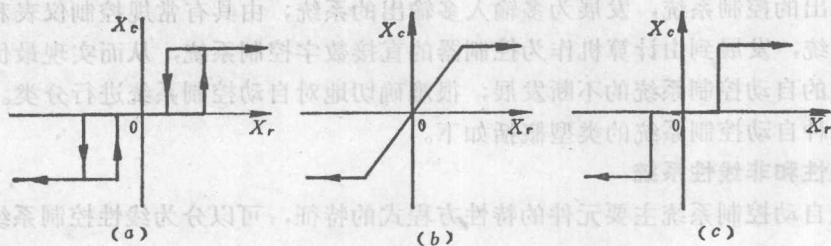


图 1-14 典型非线性环节特性

(a) 继电器特性; (b) 饱和特性; (c) 不灵敏区特性

非线性系统的暂态特性与其初始条件有关。从这一点来看,它与线性系统有很大的区别。例如当偏差的初始值很小时,系统的暂态过程为稳定的,而当偏差量的初始值较大时,则可能变为不稳定的。而线性系统的暂态过程则与初始条件无关。

二、连续数据系统和离散数据系统

连续数据系统,是指系统各部分的信号都是模拟的连续函数。目前大多数闭环系统都是这种型式的。

离散数据系统,是指系统的某一处或几处,信号是以脉冲序列或数码的形式传递。

离散系统的主要特点是,在系统中使用脉冲开关或采样开关,将连续信号转变为离散信号。通常对于离散信号取脉冲形式的系统,称为脉冲控制系统;而对于采用数字计算机或数字控制器,其离散信号以数码形式传递的系统,则称为采样数字控制系统。

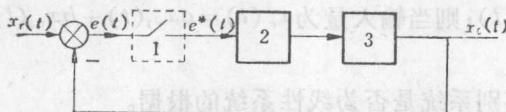


图 1-15 脉冲控制系统结构图

1—采样开关; 2—数据保持器; 3—控制对象

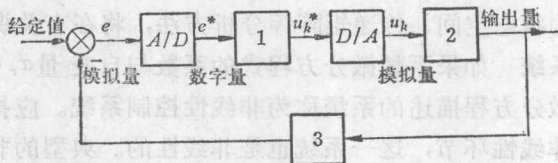


图 1-16 采样数字控制系统

1—计算机; 2—控制对象; 3—检测装置; A/D—模数转换; D/A—数模转换

图1-15为脉冲控制系统的结构图。当连续信号 $x_r(t)$ 加于输入端时,采样开关对偏差信号 $e(t)$ 进行采样,采样开关的输出是偏差的脉冲序列 $e^*(t)$ 。用这一偏差信号序列 $e^*(t)$ 经过保持器对控制对象进行控制。

采样数字控制系统中包括有数字控制器或数字计算机,因此在系统中就必须有相应的