



中等职业教育国家规划教材
全国中等职业教育教材审定委员会审定

电气自动控制系统

(电气运行与控制专业)

主编 张 涛



高等教育出版社

中等职业教育国家规划教材
全国中等职业教育教材审定委员会审定

电气自动控制系统

(电气运行与控制专业)

主 编 张 涛
责任主审 吴锡龙
审 稿 薛瑞福 田作华

高等教育出版社

内容简介

本书是中等职业教育国家规划教材,是根据教育部 2001 年颁发的《中等职业学校电气运行与控制专业教学指导方案》中主干课程《电气自动控制系统教学基本要求》,并参照有关行业的职业技能鉴定规范及中级技术工人等级考核标准编写的。

本书全面系统地介绍了自动控制系统的基本概念、基本理论和常见的电气自动控制系统。全书共十章,主要内容包括:自动控制系统的基础知识及典型环节、单闭环直流调速系统、双闭环无静差调速系统、可逆直流调速系统、直流脉宽调速系统、交流调速系统、变频器、异步电动机的电压-频率调速系统及伺服控制系统。每章后面都附有习题和思考题。

本书可作为中等职业学校机械制造与控制及相关专业教材,也可作为有关行业岗位培训教材或自学用书。

图书在版编目(CIP)数据

电气自动控制系统/张涛主编. —北京:高等教育出版社, 2002.8 (2006 重印)

中等职业学校电气运行与控制专业

ISBN 7-04-010935-2

I. 电… II. 张… III. 电气设备-自动控制系统-专业学校-教材 IV. TM762

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 043662 号

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010-58581000		http://www.hep.com.cn
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司	网上订购	http://www.landaco.com
印 刷	北京铭成印刷有限公司		http://www.landaco.com.cn
		畅想教育	http://www.widedu.com
开 本	787×1092 1/16	版 次	2002 年 8 月第 1 版
印 张	7.5	印 次	2006 年 12 月第 4 次印刷
字 数	170 000	定 价	9.30 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 10935-00

中等职业教育国家规划教材出版说明

为了贯彻《中共中央国务院关于深化教育改革全面推进素质教育的决定》精神,落实《面向21世纪教育振兴行动计划》中提出的职业教育课程改革和教材建设规划,根据教育部关于《中等职业教育国家规划教材申报、立项及管理意见》(教职成[2001]1号)的精神,我们组织力量对实现中等职业教育培养目标和保证基本教学规格起保障作用的德育课程、文化基础课程、专业技术基础课程和80个重点建设专业主干课程的教材进行了规划和编写,从2001年秋季开学起,国家规划教材将陆续提供给各类中等职业学校选用。

国家规划教材是根据教育部最新颁布的德育课程、文化基础课程、专业技术基础课程和80个重点建设专业主干课程的教学大纲(课程教学基本要求)编写,并经全国中等职业教育教材审定委员会审定。新教材全面贯彻素质教育思想,从社会发展对高素质劳动者和中初级专门人才需要的实际出发,注重对学生的创新精神和实践能力的培养。新教材在理论体系、组织结构和阐述方法等方面均作了一些新的尝试。新教材实行一纲多本,努力为教材选用提供比较和选择,满足不同学制、不同专业和不同办学条件的教学需要。

希望各地、各部门积极推广和选用国家规划教材,并在使用过程中,注意总结经验,及时提出修改意见和建议,使之不断完善和提高。

教育部职业教育与成人教育司

二〇〇一年十月

前 言

本书是中等职业教育国家规划教材,是根据教育部 2001 年颁发的中等职业学校《电气运行与控制专业教学指导方案》中主干课程《电气自动控制系统教学基本要求》,并参照有关行业的职业技能鉴定规范及中级技术工人等级考核标准编写的。

本教材在编写过程中,遵循“结合实例,突出工程应用,注重典型系统,加强实验实训”的原则,以能力为本位,减少理论推导。全书共九章,包括自动控制系统的基础知识及典型环节、单闭环直流调速系统、双闭环无静差调速系统、可逆直流调速系统、直流脉宽调速系统、交流调速系统、变频器、异步电动机的电压-频率调速系统及伺服控制系统。每章后面都附有习题和思考题,以帮助学生巩固所学的知识。

本书适用于电气运行与控制专业及相近专业,学制 3、4 年的中等职业教育的教学,建议课时分配如下:

序号	内 容	学 时	学时分配	
			讲 课	实 验
1	自动控制系统的基础知识及典型环节	10	8	2
2	单闭环直流调速系统	16	10	6
3	双闭环无静差调速系统	14	10	4
4	可逆直流调速系统	4	4	
5	直流脉宽调速系统	4	4	
6	交流调速系统	4	4	
7	变频器	12	6	6
8	异步电动机的电压-频率调速系统	10	6	4
9	伺服控制系统	16	10	6
	机动	10		
	合计	100	62	28

其中第九章和带 * 号的部分为选学内容,4 年制专业和要求较高的 3 年制专业可根据专业需要选择部分内容实施教学。

本书由张涛担任主编,浦国平担任副主编参加编写的还有杨劲松和杨文新。

本书通过全国中等职业教育教材审定委员会审定,由上海大学吴锡龙教授担任责任主审,上海交通大学薛瑞福和田作华教授审稿。他们对书稿提出了很多宝贵意见,在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限,错误之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

2002 年 5 月

目 录

第一章 自动控制系统的基础知识及典型环节	1
第一节 概述	1
第二节 自动控制系统示例	2
第三节 自动控制系统的分类	6
第四节 自动控制系统的性能指标	7
第五节 自动控制系统的数学模型及典型环节	9
思考题与习题	13
第二章 单闭环直流调速系统	15
第一节 转速负反馈有静差调速系统	15
第二节 具有电流截止负反馈环节的调速系统	20
第三节 电压负反馈和电流正反馈调速系统	22
第四节 无静差直流调速系统	24
思考题与习题	29
第三章 双闭环无静差调速系统	31
第一节 转速、电流双闭环调速系统的组成及其静特性	31
第二节 双闭环调速系统的动态性能	34
第三节 双闭环系统的特点	36
思考题与习题	41
第四章 可逆直流调速系统	42
第一节 可逆运行的基本知识	42
第二节 逻辑控制的无环流可逆调速系统	45
思考题与习题	51
第五章 直流脉宽调速系统	52
第一节 脉宽调制电路的工作原理	52
第二节 脉宽调速系统的开环机械特性及控制电路	55
思考题与习题	57
第六章 交流调速系统	58
第一节 交流调速系统的基本概念	58
第二节 交流变频调速的基本方案	59
第三节 逆变器的工作原理	64
思考题与习题	65
第七章 变频器	66
第一节 交-直-交电压源型变频器	66
第二节 交-直-交电流型变频器	71
第三节 变频器的选用与运行	73
思考题与习题	75
第八章 异步电动机的电压-频率调速系统	76
第一节 开环变频调速系统	76
第二节 转差频率电流控制的转速闭环变频调速系统	78
第三节 PWM型变频调速系统	79
思考题与习题	88
第九章 伺服控制系统	89
第一节 伺服系统的组成与分类	89
第二节 位置传感器	91
第三节 步进电机及其控制系统	98
第四节 直流伺服电机及其控制系统	105
第五节 交流伺服电机及其控制系统	108
思考题与习题	112
参考文献	113

第一章 自动控制系统的基础知识 及典型环节

第一节 概 述

一、自动控制技术的发展

现代化生产的水平、产品的质量和经济效益等各项指标,在很大程度上取决于生产设备的先进性和电气自动化程度。因此,电气自动控制系统越来越受到人们的重视,随着电机及各种自动控制器件、特别是计算机的发展,控制系统也正在不断发展。

自动控制技术经历了一个漫长的发展过程。18 世纪出现的锅炉水位调节装置,以及 19 世纪出现的转速调节装置,都是有效的自动控制装置。到了 20 世纪 30 年代,自动控制技术已普遍应用于各种生产过程中,但只是对单机或对单个温度、压力、流量等工艺参数进行控制。40~50 年代的交磁放大机-电动机控制系统,可随时检查控制对象的工作状态,对控制对象自动进行调整,它的快速性及控制精度都大大超过了最初的断续控制,并简化了控制系统,提高了生产效率。但系统存在体积大、响应慢、噪声高等缺点。

20 世纪 60 年代晶闸管的出现,组成了晶闸管-直流电动机无级调速系统。晶闸管具有功率大、体积小、效率高、动态响应快、控制方便等优点,使其在控制系统中得到了广泛的应用,并正在向大容量方向发展。其后,由于逆变技术的出现和高压大功率晶体管的问世,20 世纪 80 年代以来,交流电动机无级调速系统得到迅速发展,由于交流电动机无电刷与换向器,较之直流电动机易于维护且寿命长,使交流调速系统很有发展前途,如今用大功率晶体管逆变技术和脉宽调制技术(PWM)改变交流电的频率从而实现交流电动机无级调速的控制系统在工业上逐渐得到应用。目前已出现了多种以微机为核心的变频调速系统,使交流电动机的控制系统更简化,可靠性更高,拖动系统的性能也更优化,为电气传动与自动控制开辟了新途径。

随着计算机技术的发展,出现了具有运算功能和较大功率输出能力的可编程控制器(PLC),用它的软件代替大量继电器,使硬件简化。PLC 实际上是一台按开关量输入的工业控制用的微型计算机。用它来替代继电器-接触器控制系统,提高了系统的可靠性和柔性,使自动控制技术又产生了一个飞跃。20 世纪 90 年代以来,大型 PLC 正向着高速度、多功能、适应多级分布控制系统发展,同时,微型 PLC 已发展成不仅具有开关型逻辑控制、定时/计数、逻辑运算功能,还具有处理模拟量输入/输出,数字运算功能及通信功能,可构成分布式控制系统,因此,它的应用越来越普遍,越来越广泛。

二、常用名词术语定义

(1) 对象 是一个设备,由一些器件组合而成。其作用是完成一个特定的动作。在本书中,我们称被控制物体(如加热炉、化学反应器)为对象。

(2) 系统 是一些部件的组合,它可以完成一定的任务。系统的概念可以应用于抽象的动态现象,如经济学的现象。

(3) 扰动 给定信号以外,作用在控制系统上一切会引起被控量变化的因素。如果扰动产生于系统内部,则称为内扰;如产生于系统外部,则称为外扰。

(4) 负反馈控制 在有扰动的情况下负反馈控制有减小系统输出量与给定输入量之间偏差的作用。控制作用正是根据偏差而实现的。

(5) 随动系统 是一种反馈控制系统。在这种系统中,输出量通常是机械位移、速度或者加速度。因此,随动系统这个术语,与位置(或速度、或加速度)控制系统是同义语,现代工业中广泛地采用了随动系统。例如,采用程序指令的机床自动化操作等。

(6) 自动调节系统 是一种反馈控制系统,给定输入量保持常量或者随时间缓慢变化。这种系统的基本任务,是在有扰动的情况下,使实际的输出量保持希望的数值。用恒温器作为控制器的室内加温系统,就是一种自动调节系统,恒温器的温度给定值与室内的实际温度进行比较得到偏差。室外温度的变化量是该系统的扰动。自动调节系统的任务,是保证所要求的室内温度不受室外温度变化的影响。自动调整系统的例子还有很多,例如压力的自动控制,电压、电流和频率等电量的自动控制。

(7) 闭环控制系统 凡是系统输出信号对控制作用有直接影响的系统,都称为闭环控制系统。闭环控制系统也就是负反馈控制系统。输入信号和反馈信号(反馈信号可以是输出信号本身,也可以是输出信号的函数)之差,称为偏差信号。偏差信号加到控制器上,使系统的输出量趋向给定的值。换句话说,“闭环”的含义就是应用反馈作用来减小系统的偏差。图 1-1 表示了闭环控制系统的输入量与输出量之间的关系,这种关系图称为功能框图。

(8) 开环控制系统 若系统的输出量对系统的控制作用没有作用,则称为开环控制系统。开环控制系统既不需要对输出量进行测量,也不需要将它反馈到系统的输入端与输入量进行比较。图 1-2 表示了开环控制系统的输入量与输出量之间的关系。洗衣机就是开环控制系统的实例,它的浸湿、洗涤和漂清的过程是顺序进行的,无需对其输出信号,即衣服的清洁程度进行测量。

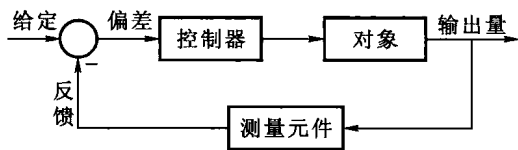


图 1-1 闭环控制系统

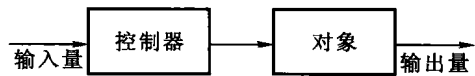


图 1-2 开环控制系统

由于开环控制系统中系统的输出量不与给定的输入量进行比较,因此,对应于每一个给定的输入量,便有一个固定的输出量与之对应,系统的精度只取决于系统校准的精度。当然,出现扰动时,开环控制系统就无法进行控制了。如果输入量与输出量之间的关系已知,并且不存在内扰和外扰,则可采用开环控制系统。显然,这种系统不是反馈控制系统。

第二节 自动控制系统示例

分析自动控制系统时,首先应明确如下一些问题:

(1) 受控对象是什么？哪些状态参量要求控制(亦即被控量是什么)？作用在对象上的主要干扰有哪些？

(2) 操纵哪个机构可改变被控量？

(3) 有哪些测量元件？测量的是被控量还是干扰？

(4) 给定值(参考输入)或指令由哪个装置提供？

(5) 如何实现各信号的偏差计算和判断偏差？

(6) 控制作用通过什么部件来实现？

一、烘烤炉温度控制系统

图 1-3 是烘烤炉温度控制系统原理图。

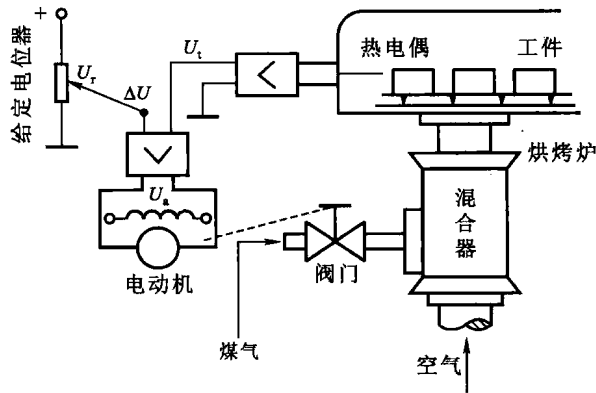


图 1-3 烘烤炉温度控制系统原理图

根据图 1-3 应先明确：

(1) 系统的任务——保持炉膛温度恒定。

(2) 受控对象——烘烤炉。

(3) 被控量——炉膛温度。

(4) 干扰——工件数量、环境温度、煤气压力等。

(5) 调节煤气管道上阀门开度可改变炉温。

(6) 测量元件——热电偶。它将炉膛温度转变为相应的电压 U_i 。

(7) 给定装置——给定电位器。其输出电压 U_r ，对应于给定的炉膛温度。

(8) 计算——将两电压极性反接，就可完成减法运算。输出电压 $\Delta U = U_r - U_i$ ，相当于炉温的偏差量。

(9) 执行机构——电动机、传动装置和阀门。

烘烤炉温度控制系统的控制原理是：

炉温既受工件数量及环境温度的影响，又受由混合器输出的煤气流量的影响，因此调整煤气流量便可控制炉温。

假定炉温恰好等于给定值，这时 $U_i = U_r$ ，即 $\Delta U = 0$ 。故电动机和调节阀都静止不动，煤气流量恒定，烘烤炉处于给定温度状态。

如果增加工件,烘烤炉的负荷加大,而煤气流量一时没变,则炉温下降。温度下降将导致 U_i 减小,使 $\Delta U > 0$,电动机将阀门开大,增加煤气供给量,从而使炉温回升,直至重新等于给定值(即 $U_i = U_r$)为止。这样在负荷加大的情况下仍然保持了规定的温度。

如果负荷减小或煤气压力突然加大,则炉温升高。 U_i 随之加大, $\Delta U < 0$,故电动机反转,关小阀门,减少煤气量,从而使炉温回降,直至等于给定值为止。

由此看出,系统通过炉温与给定值之间的偏差来控制炉温,所以是按偏差调节的自动控制系统。系统中除烘烤炉及供气设备外,其余统称温度控制装置或温度调节器。

表示系统内各功能部件之间相互联系的框图如图 1-4 所示,图中每个功能部件用一个方框表示,箭头表示信号的输入、输出通道,最右边的方框习惯于表示被控对象,其输出信号即为被控量,而系统的总输入量包括给定值和外部干扰。

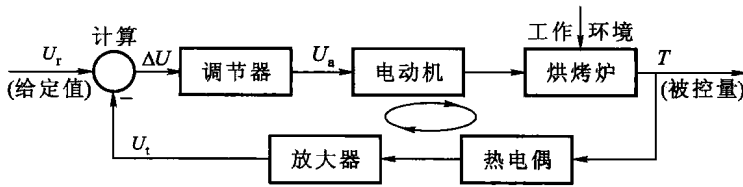


图 1-4 烘烤炉温度控制系统功能框图

系统是一个闭合的回路,信号经调节器、烘烤炉之后又反馈到调节器。由于系统是按偏差进行调节的,因而必须测量炉温,反馈的闭合回路也是必需的,而且反馈信号应与给定值作减法的计算(图中以负号表示负反馈),以得到偏差信号。所以,这种系统是反馈控制系统。

负反馈闭合回路,是按偏差进行调节的控制系统在结构联系和信号传递上的重要标志。

二、位置随动系统

图 1-5 是位置随动系统的原理图。

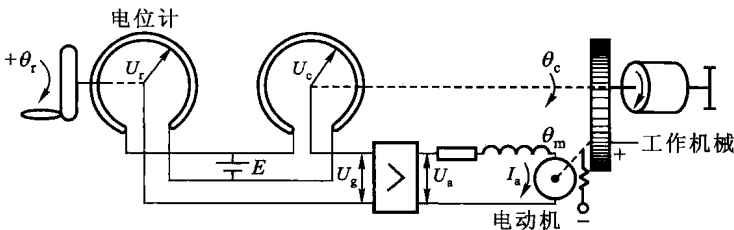


图 1-5 位置随动系统原理图

根据图 1-5 应先明确:

(1) 控制的任务——使工作机械跟随指令机构同步转动,即要求工作机械的角位置 θ_c 跟随指令转角 θ_r 变化,亦即使 $\theta_c(t) = \theta_r(t)$;

(2) 受控对象——工作机械;

(3) 被控量——角位置 θ_c ;

(4) 给定值——指令转角 θ_r ;

(5) 测量元件——电位器。转角 θ_c 及 θ_r 由两个电位计测量并转换为相应的电压 U_c 及 U_r ;

(6) 计算—— $\Delta U = U_r - U_c$ 。两个测量电位计作桥式连接,即完成了减法运算 $U_r - U_c$ 。两电刷之间的电压 U_g ,反映了被控量 θ_c 与给定值 θ_r 的误差;

(7) 执行机构——电动机减速装置。

位置随动系统的控制原理是:

如果工作机械转角 θ_c 等于指令转角 θ_r ,经事先调整,使 $U_r = U_c$,则 $U_g = 0$,电动机不动,系统处于平衡状态。如果指令转角 θ_r 变化了,而工作机械仍处于原位,则 $\theta_c \neq \theta_r$, $U_c \neq U_r$, $U_g \neq 0$,电动机拖动工作机械向 θ_r 所要求的方向快速偏转,直至 $\theta_c = \theta_r$,电动机停转,在新的位置上又处于与指令同步的平衡状态,完成了跟随的任务。

由于系统是通过测量 θ_c 与 θ_r 的偏差来控制的,所以是按偏差调节的自动控制系统,系统的功能框图如图 1-6 所示,它是个负反馈的闭合回路。在工程技术上,常常需要某个机构(如船闸、雷达天线等)的位置能快速精确地跟随一个指令信号动作,而这可以通过随动原理来实现。

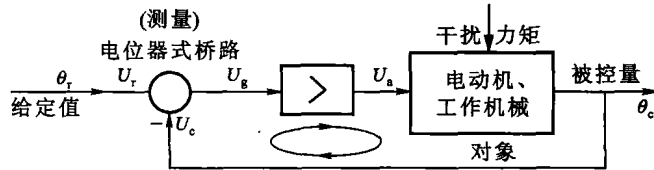


图 1-6 位置随动系统功能框图

这种系统的受控对象比较简单,相当于执行机构直接拖动一个纯机械负荷;指令信号根据工作需要经常变化,而且事先无法完全确定。只要选用大功率的功放装置和电动机,即可以用功率很小的信号来操纵功率很大的工作机械,且可以进行远距离控制。

三、自动调速系统

图 1-7 为自动调速系统的工作原理图。

根据图 1-7 应先明确:

- (1) 控制的任务——保持工作机械恒转速运行。
- (2) 被控对象——工作机械。
- (3) 被控量——电动机转速。
- (4) 给定值——给定电位器的电压 U_r 。
- (5) 测量元件——测速发电机。

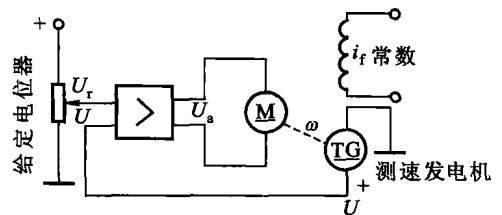


图 1-7 自动调速系统原理图

(6) 计算—— $\Delta U = U_r - U$,由运算放大器完成偏差计算,并将 ΔU 放大为 U_a 。

(7) 执行机构——电动机。

调速系统的控制原理是:

测速机测量电动机的转速 ω 并将其转换为相应的电压 U ,与给定电位器的输出电压 U_r 进行比较,其输出信号经放大装置放大后控制电动机,而电压 U_r 即代表了所要求的转速。

如果工作机械的载荷加大,使电动机转速下降,测速发电机输出电压 U 减小,与给定电压 U_r 比较后的偏差电压 $\Delta U = (U_r - U)$ 放大为 U_a ,故电枢电压相应加大,从而使电动机转速得到补偿。

这里是通过测量转速(与给定转速的偏差)来控制转速的,因此,调速系统亦称为按偏差调节的自动控制系统。其功能框图如图 1-8 所示。

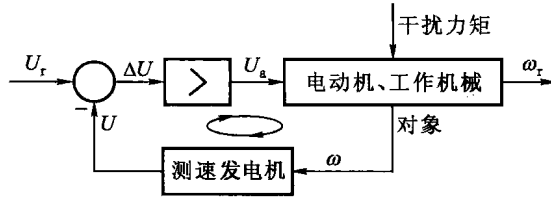


图 1-8 自动调速系统功能框图

第三节 自动控制系统的分类

自动控制系统可以从不同的角度来进行分类。

一、按参考输入量变化的规律分类

1. 恒值控制系统

这种控制系统参考输入量是一个恒值,可维持被控量恒定的反馈控制,图 1-8 中当输入量 U_r 恒定时,即使存在扰动的影响,仍可维持转速基本恒定,因此,该系统属于恒值控制系统。工业生产中的温度、压力、流量、液位等参数维持恒定的自动控制都属此类。

2. 随动控制系统

一个反馈控制系统,如其输入量变化规律为无法预先确定的时间函数,而其被控量能以一定的精度跟随输入量变化。这样的系统称为随动控制系统,简称随动系统或伺服系统,如图 1-6 所示的位置随动系统。在随动系统中,被控量通常是机械位移、速度或加速度等。

恒值控制系统及随动系统虽均为反馈控制,但分析研究重点不同。对于恒值控制系统应着重研究各种扰动对被控量的影响,以及设法抑制扰动对被控量的影响而使被控量保持在希望值。而在随动系统中,由于输入量是随时变化的,系统的被控量也必须迅速准确地跟随给定目标而变化。如果输入信号变化较快,执行装置就应该快速响应并有足够的功率,以保证不丢失目标。如果被跟踪的目标变化较慢,系统就应着重考虑跟踪的平稳性等。

3. 程序控制系统

这种控制系统输入量不为常值,但其变化规律是预先知道的和确定的。如热处理炉的温度调节,要求温度按一定的时间程序和规律变化(自动升温、保温及降温等)。

二、按被控量来分类

1. 电力拖动自动控制系统

这种控制是以机械运动为主要生产方式,以电动机为被控对象的电力拖动自动控制系统,其中包括恒值控制系统及随动控制系统。

2. 过程控制系统

这种控制为工业生产过程自动控制(简称过程控制),被控量是温度、压力、流量、液位等过程

控制量。而所谓过程是指在某设备中将原料经过适当处理得到产品的这段生产过程。对过程的控制常应用于如化工、石油、冶炼等各工业中,为保持其生产过程所需的环境条件而加的控制。其系统主要用被规格化的各类仪表,作为各功能元件而构成。

三、按信号作用特点分类

1. 连续控制系统

它亦称为模拟控制系统。系统中各个组成元件输出量都是输入量的连续函数。图 1-5 随动系统及图 1-7 转速负反馈控制系统都是连续控制系统。

2. 断续控制系统

这种系统中包含有断续元件,其输入量是连续量,而输出量是断续量。目前有三种断续控制系统:

(1) 继电系统,它也称为开关控制系统。

(2) 脉冲系统又称为采样控制系统。脉冲系统将输入连续信号变成一串脉冲信号输出,脉冲的幅度、宽度及符号取决于采样时刻的输入量。

(3) 数字控制系统。数字控制系统中,信号以数码形式传递。

第四节 自动控制系统的性能指标

自动控制系统的性能通常是指系统的稳定性、稳态性能和动态性能。

一、系统的稳定性

当扰动作用(或给定值发生变化)时,输出量将会偏离原来的稳定值,这时,由于反馈环节的作用,通过系统内部的自动调节,系统可能回到(或接近)原来的稳定值(或跟随给定值)稳定下来,如图 1-9(a)所示。但也可能由于内部的相互作用,使系统出现发散而处于不稳定状态,如图 1-9(b)所示。显然,不稳定的系统是无法进行工作的。因此,对任何自动控制系统,首要的条件是使系统能稳定正常运行。

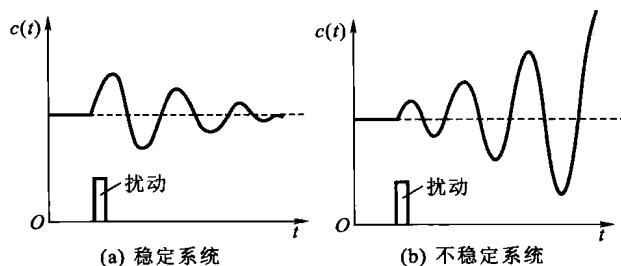


图 1-9 稳定系统和不稳定系统

二、系统的稳态性能指标

系统稳态误差是指系统实际输出值与期望输出值之差。系统稳态误差的大小反映了系统的稳态精度(或静态精度),它表明了系统的准确程度。稳态误差越小,则系统的稳态精度越高。若

稳态误差为零,则系统称为无静差系统,如图 1-10(b)所示。否则,则称为有静差系统。如图 1-10(a)所示。

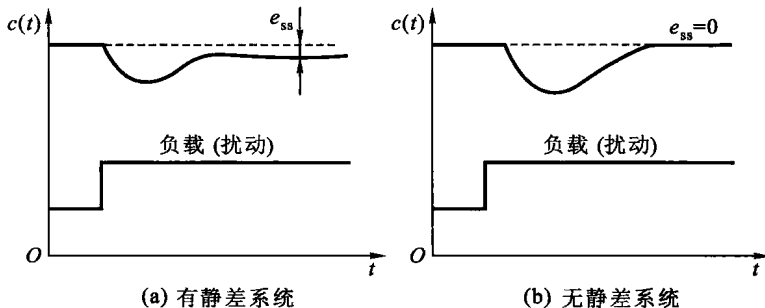


图 1-10 自动控制系统的稳态性能

事实上,对一个实际系统,要求系统的输出量丝毫不变地稳定在某一确定的数值上,往往是办不到的,要求稳态误差绝对等于零,也是很难实现的。因此,我们通常把系统的输出量进入并一直保持在某个允许的足够小的误差范围(称为误差带)内,即认为系统已进入稳定运行状态。此误差带的数值可看作系统的稳态误差。此外,对一个实际的无静差系统,在理论上,它的稳态误差为零,但在实际上,只是其稳态误差极小而已。

三、系统的动态性能

由于系统的对象和元件通常都具有一定的惯性(如机械惯性、电磁惯性、热惯性等),而且还由于能源功率的限制,系统中各种量值(加速度、位移、电流、温度等)的变化不可能是突变的。因此,系统从一个稳态过渡到新的稳态都需要经历一段时间,亦即需要经历一个瞬态过程。表征这个瞬态过程性能指标叫做动态指标。现在以系统对突加给定信号(阶跃信号)的动态响应来介绍动态指标。

图 1-11 为系统对突加给定信号(阶跃信号) $r(t)$ 的动态响应曲线。

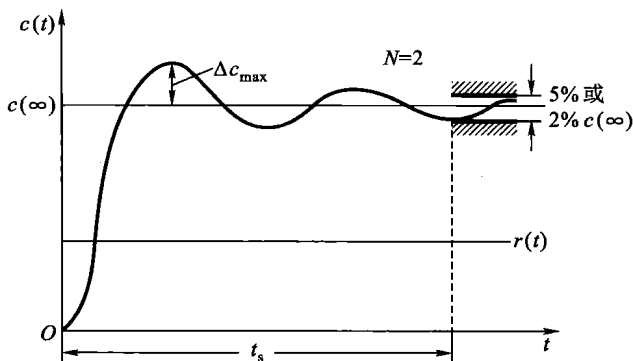


图 1-11 系统对突加给定信号的动态响应曲线

动态指标通常用最大超调量(σ)、调整时间(t_s)和振荡次数(N)来衡量。

1. 最大超调量(σ)

最大超调量是输出量 $c(t)$ 与稳态值 $c(\infty)$ 的最大偏差 Δc_{\max} 与稳态值 $c(\infty)$ 之比,即

$$\sigma = \frac{\Delta c_{\max}}{c(\infty)} \times 100\%$$

最大超调量反映了系统的动态精度,最大超调量越小,则说明系统瞬态过程进行得越平稳。不同的控制系统,对最大超调量的要求也不同,例如,对一般调速系统,可允许 σ 为10%~35%;轧钢机的初轧机要求 σ 小于10%;对连轧机则要求 σ 小于2%~5%;而在张力控制的卷取机和造纸机等则不允许有超调量。

2. 调整时间(t_s)

我们常用调整时间来表征系统的瞬态过程时间,但是实际系统的输出量往往在稳态值附近,要作很长时间的微小的波动,那么怎样确认瞬态过程结束了呢?于是我们将系统输出量进入并一直保持在离稳态值的某一误差带内,作为瞬态过程完成。在实用上,常把 $\pm \delta c(\infty)$ 作为允许误差带, δ 取2%或5%。于是调整时间 t_s 可定义为:系统输出量进入并一直保持在离稳态值允许误差带内所需要的最短时间。允许误差带为 $\pm \delta c(\infty)$ 。 δ 取2%或5%,见图1-11。调整时间反映了系统的快速性。调整时间 t_s 越小,系统快速性越好。例如连轧机 t_s 为0.2~0.5s,造纸机为0.3s。

3. 振荡次数(N)

振荡次数是指在调整时间内,输出量在稳态值上下摆动的次数。如图1-11所示的系统,振荡次数为2次。振荡次数越少,也表明系统稳定性能好。例如普通机床一般可允许振荡2~3次;龙门刨床与轧钢机允许振荡1次;而造纸机传动则不允许有振荡。

在上述指标中,最大超调量和振荡次数反映了系统的稳定性能。调整时间反映了系统的快速性。稳态误差反映了系统的准确度。一般说来,总是希望最大超调量小一点,振荡次数少一点,调整时间短一些,稳态误差小一点。总之,希望系统能达到稳、快、准。但在同一个系统中上述指标往往是相互矛盾的,这就需要根据具体对象所提出的要求,对其中的某些指标有所侧重,同时又要注意统筹兼顾。因此在确定技术性能指标要求时,既要保证能满足实际工程的需要(并留有一定的余量),也不宜提得过高,因为过高的性能指标要求意味着昂贵的价格。

第五节 自动控制系统的数学模型及典型环节

分析控制系统的动态性能,首先要建立控制系统的数学模型,而拉普拉斯变换是常用的数学工具。

* 一、拉普拉斯变换的定义

函数 $f(t)$, t 为实变量。如线性积分 $\int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt$ (s 为复变量 $\sigma + j\omega$)存在则称其为函数 $f(t)$ 的拉普拉斯变换,简称拉氏变换。

$$\text{记作: } F(s) = L[f(t)] = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt$$

通常称 $F(s)$ 为 $f(t)$ 的象函数,而称 $f(t)$ 为 $F(s)$ 的原函数。

$$\text{另外,拉氏反变换: } L^{-1}[F(s)] = \frac{1}{2\pi j} \int_{\sigma-j\infty}^{\sigma+j\infty} F(s)e^{-st} ds = f(t)$$

* 二、常用函数的拉氏变换

表 1-1 给出了几种常用函数的拉氏变换。

表 1-1 常用函数拉氏变换表

序号	原函数 $f(t)$	象函数 $F(s)$
1	$\delta(t)$	1
2	$U(t)$	$\frac{1}{s}$
3	t	$\frac{1}{s^2}$
4	$t^n (n = 1, 2, 3 \dots)$	$\frac{n!}{s^{n+1}}$
5	e^{-at}	$\frac{1}{s + a}$
6	te^{-at}	$\frac{1}{(s + a)^2}$
7	$\sin \omega t$	$\frac{\omega}{s^2 + \omega^2}$
8	$\cos \omega t$	$\frac{s}{s^2 + \omega^2}$
9	$t^n e^{-at} (n = 1, 2, 3 \dots)$	$\frac{n!}{(s + a)^{n+1}}$
10	$\frac{1}{b-a}(e^{-at} - e^{-bt})$	$\frac{1}{(s+a)(s+b)}$
11	$\frac{1}{b-a}(be^{-at} - ae^{-bt})$	$\frac{s}{(s+a)(s+b)}$
12	$\frac{1}{ab} \left[1 + \frac{1}{a-b}(be^{-at} - ae^{-bt}) \right]$	$\frac{1}{s(s+a)(s+b)}$
13	$e^{-at} \sin \omega t$	$\frac{\omega}{(s+a)^2 + \omega^2}$
14	$e^{-at} \cos \omega t$	$\frac{s+a}{(s+a)^2 + \omega^2}$
15	$\frac{1}{a^2}(at - t - e^{-at})$	$\frac{1}{s^2(s+a)}$
16	$\frac{\omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} \sin \sqrt{1-\zeta^2} \omega_n t (\zeta < 1) - \frac{1}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} \sin \sqrt{1-\zeta^2} \omega_n t - \theta$	$\frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$
17	$\theta = \arctan \sqrt{\frac{1-\zeta^2}{\zeta}} (\zeta < 1)$	$\frac{s}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$
18	$1 - \frac{1}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} \sin(\sqrt{1-\zeta^2} \omega_n t + \theta)$ $\theta = \arctan \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta} (\zeta < 1)$	$\frac{\omega_n^2}{s(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)}$

* 三、拉氏变换的主要定理

1. 线性性质

设 $L[f_1(t)] = F_1(s)$, $L[f_2(t)] = F_2(s)$, 则 $L[af_1(t) + bf_2(t)] = aF_1(s) + bF_2(s)$

其中 a, b 为常数。

2. 微分定理

在零初始条件下, 若 $L[f(t)] = F(s)$, 则有 $L\left[\frac{d^n f(t)}{dt^n}\right] = s^n F(s)$

3. 终值定理

它表明原函数在 $t \rightarrow \infty$ 时的数值。设 $L[f(t)] = F(s)$, 且 $\lim_{t \rightarrow \infty} f(t)$ 存在, 则

$$\lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sF(s)$$

四、数学模型

分析自动控制系统的动态性能, 首先要建立系统的数学模型, 线性微分方程是表示系统数学模型的最基本的形式, 还包括由微分方程派生出来的传递函数、动态结构图。

1. 微分方程的建立

例 1-1 设 RC 电路如图 1-12 所示, 在开关 S 闭合之前电容上的初始电压为 0, 试求开关闭合后, 电容的端电压 u_c 。

解 开关 S 瞬时闭合, 相当于电路有阶跃电压 $U_r = U \cdot I(t)$ 输入。故电路的微分方程为

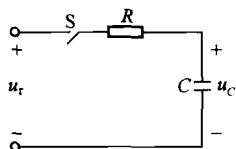


图 1-12 RC 电路

$$RC \frac{du_c}{dt} + u_c = U \cdot I(t)$$

在零初始条件下, 对方程两边进行拉氏变换 $RCsU_c(s) + U_c(s) = \frac{1}{s}U$

由上式求出输出量的拉氏变换表达式 $U_c(s) = \frac{U}{s(RCs + 1)}$

将 $U_c(s)$ 展成部分分式, 为

$$U_c(s) = \frac{1}{s}U - \frac{RC}{RCs + 1}U$$

对方程两边进行拉氏反变换, 得 $u_c(t) = U(1 - e^{-\frac{1}{RC}t})$

2. 传递函数

在零初始条件下, 线性定常系统(或元件)输出量拉氏变换与输入量拉氏变换之比, 称为系统(或元件)的传递函数。

在例 1-1 中, 我们建立了 RC 电路的微分方程, 并用拉氏变换法对微分方程进行了求解。如果用 $u_r(t)$ 表示电路输入电压的一般式, 则微分方程可表示为

$$RC \frac{du_c(t)}{dt} + u_c = u_r(t)$$

在零初始条件下, 对微分方程两边进行拉氏变换, 得 $RCsU_c(s) + U_c(s) = U_r(s)$