



全国工程硕士专业学位教育指导委员会推荐教材

控制系统分析与设计

—— 运动控制系统

Control System Analysis and Design
—— Motion Control Systems

廖晓钟 刘向东 编著

Liao Xiaozhong Liu Xiangdong



<http://www.tup.com.cn>

清华大学出版社

全国工程硕士专业学位教育指导委员会推荐教材



控制系统分析与设计

—— 运动控制系统

Control System Analysis and Design
—— Motion Control Systems

廖晓钟 刘向东 编著

Liao Xiaozhong Liu Xiangdong

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书结合电气运动控制系统的工程实例,全面系统地介绍了控制系统的构成,分析和设计方法。内容主要包括控制系统组成及性能指标、伺服系统的工程实现、控制系统的综合与校正、伺服系统的非线性控制、典型控制系统实例分析和设计等。

本书强调理论联系实际,在介绍理论方法时,列举了较多的应用例子,便于读者理解和应用。本书介绍了多个控制系统实例的分析和设计,特别是数字控制系统的设计和实现,例如校正环节的数字实现、数字定标和定点运算、标么化系统及控制器设计等。本书还介绍了伺服控制系统的干摩擦及其改善措施、传动间隙对伺服系统的影响及其补偿、机械谐振对伺服系统的影响及其补偿等实际控制系统的典型问题及解决方法。此外,本书在系统介绍经典方法的同时,还介绍了控制系统的非线性补偿、重复控制、滑模变结构控制、自抗扰控制和它们在运动控制系统中的应用。

本书可作为控制工程领域工程硕士专业学位硕士研究生和控制科学与工程专业研究生选修课教材,也可作为自动化专业、电气工程及自动化专业、机电一体化专业的高年级本科生专业选修课教材,还可作为相关专业本科生和研究生的参考书。教师可以根据不同专业需求选择本书中的相应内容采用讲授与自学相结合的方式组织教学。本书也可以作为从事设计、分析、调试控制系统的科学研究与工程设计的人员的参考书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

控制系统分析与设计——运动控制系统/廖晓钟,刘向东编著. —北京:清华大学出版社,2010.8
(全国工程硕士专业学位教育指导委员会推荐教材)

ISBN 978-7-302-20537-1

I. ①控… II. ①廖… ②刘… III. ①控制系统—系统分析 ②控制系统—系统设计
IV. ①TP271

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 059531 号

责任编辑:王一玲

责任校对:白蕾

责任印制:孟凡玉

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市春园印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×230 印 张:19.5 字 数:424 千字

版 次:2010年8月第1版 印 次:2010年8月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:35.00 元

前言

控制工程领域涉及工业、农业、军事、社会、经济、环境、金融、交通运输、商业、医疗、服务等几乎所有的国民经济领域和国防领域,与国家的经济水平、科技水平、社会环境乃至意识形态都有着密切的关系。自动控制系统是控制工程的主要专业方向,自动控制系统广泛应用于国民经济和国防部门,在国民经济和国防建设中起着重要的作用。随着电力电子技术、微电子技术、控制技术、网络技术的不断发展,自动控制系统新的控制方法、新的控制思想和新的控制系统不断出现。教学上应该及时总结这些最新发展与进步,帮助学生既掌握传统方法,又掌握最新方法和设计思想。此外,“强基本理论、重工程实践能力和创新能力”已成为控制工程领域人才的目标。为了适应技术的发展和教育教学的需要,作者结合自己多年来的研究经历和教学改革编写了本书。

本书主要有以下特色:

(1) 密切结合工程实际,从应用的角度介绍控制系统的构成、分析、设计和实现等问题。本书实例较多,理论深度适中,强调实际工程应用,尤其突出物理概念、基本理论与实际应用之间的有机联系,使读者能更好地理解 and 掌握理论知识,并将其用于解决实际控制系统问题。作为工程硕士研究生教材,本书选材上考虑了与本科生知识的衔接和拓展。

(2) 所举的工程实例具有典型性、代表性,内容既体现传统技术又体现新技术的应用。例如,空间机械臂一体化关节伺服控制系统(数字系统)、天线指向/跟踪伺服系统(高精度系统)、火炮方位伺服系统(模拟系统+典型非线性)、飞行仿真伺服系统(基于总线的数字系统)。通过具有不同代表性的多个典型实例,介绍不同典型自动控制系统的构成原理,设计和分析方法。

(3) 在系统介绍传统方法的基础上,又介绍了控制系统的非线性补偿、重复控制、滑模变结构控制、自抗扰控制等。结合伺服控制系统的特点,介绍了干摩擦及其改善措施、传动间隙对伺服系统的影响及其补偿、机械谐振对伺服系统的影响及其补偿等实际控制系统的典型问题及解决方法、控制系统的电磁兼容和可靠性等问题。实例中重点介绍数字控制系统设计以及工程实现的问题,例如数字控制器实现、数字定标和定点运算、标幺化系统及控制器设计等。

本书由五章组成。第1章控制系统组成及性能指标。介绍控制系统的基本结构、控制

Foreword

系统性能指标、分析参数对性能指标的影响。第2章伺服系统的工程实现。介绍执行电机选择、信号检测与信号转换原理与设计、伺服系统的电磁兼容性和可靠性等。第3章控制系统的综合与校正。介绍控制系统机理建模方法和工程建模方法,控制系统的串联校正、反馈校正、并联校正、复合校正、期望频率特性校正等方法,校正环节的模拟及数字实现方法。第4章伺服系统的非线性控制。介绍伺服系统的干摩擦及其改善措施、传动间隙对伺服系统的影响及其补偿、机械谐振对伺服系统的影响及其补偿、伺服系统的非线性补偿、重复控制、滑模变结构控制等。第5章控制系统设计举例。以永磁同步电机调速系统、异步电机调速系统(非线性、强耦合系统)、空间机械臂一体化关节伺服控制系统(数字系统)、天线指向/跟踪伺服系统(高精度系统)、火炮方位伺服系统(模拟系统+典型非线性)、飞行仿真伺服系统(基于总线的数字系统)等为例介绍控制系统的设计方法。

针对不同专业、不同层次的学生,教师可以根据学生已有的专业基础知识,采用讲授和自学相结合的方式有选择地组织教学。本书中第5章控制系统实例,具有不同的典型伺服控制系统实例,教师或学生可以根据需要选择相应系统进行选讲或自学。

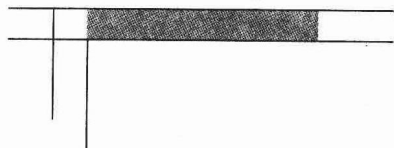
本书由廖晓钟教授和刘向东教授编著。高营、王丽婕、李爽、邵力伟参加了部分文字整理和插图整理工作。本书编写过程中得到全国工程硕士专业学位教学指导委员会的支持。本书承蒙清华大学窦日轩教授认真审阅,并提出了许多宝贵意见和建议,在此一并表示衷心的感谢。

由于作者学识和水平有限,虽然尽力而为,但仍难免有不妥和错误之处,敬请广大读者批评指正,并给予谅解。

作者

2010年3月

目 录



第 1 章 控制系统组成及性能指标	/1
1.1 引言	1
1.2 自动控制系统组成	2
1.3 控制系统的性能指标	5
1.3.1 控制系统的稳态性能和系统的型别	5
1.3.2 控制系统的时域性能指标	9
1.3.3 控制系统的闭环频域指标	14
1.3.4 控制系统的开环频域指标	20
1.4 控制系统分析与设计步骤	31
第 2 章 伺服系统的工程实现	/33
2.1 伺服电机	34
2.2 伺服系统检测与信号转换	38
2.2.1 伺服系统的位移检测	39
2.2.2 伺服系统的信号转换电路	54
2.2.3 自整角机/旋转变压器-数字转换器(SDC-RDC)	57
2.2.4 数字-自整角机/旋转变压器转换器(DSC/DRC)	61
2.3 伺服系统的稳态设计	64
2.3.1 负载分析计算	64
2.3.2 执行电机选择	71
2.3.3 检测装置、信号转换线路、放大装置及电源设计与选择	79
2.4 伺服系统的电磁兼容性设计	85
2.4.1 电磁干扰模型分析	85
2.4.2 抑制电磁干扰的方法	88
2.4.3 伺服系统电磁兼容设计	96

2.5	伺服系统的可靠性	98
2.5.1	可靠性特征量	98
2.5.2	伺服系统的可靠性设计	107
第2章	习题	112
第3章 控制系统的综合与校正 /114		
3.1	控制系统的数学模型	114
3.1.1	伺服控制系统的机理建模方法	114
3.1.2	时域建模的飞升曲线法	119
3.2	串联校正	124
3.2.1	串联超前校正	124
3.2.2	串联滞后校正	132
3.2.3	串联滞后-超前校正	137
3.3	期望频率特性法	144
3.3.1	期望频率特性设计	146
3.3.2	常用期望频率特性	152
3.3.3	期望频率特性设计举例	154
3.4	反馈校正	159
3.5	复合校正	165
3.6	综合校正环节的实现	177
3.6.1	综合校正环节的模拟实现方式	177
3.6.2	综合校正环节的数字实现方式	179
第3章	习题	186
第4章 伺服系统的非线性控制 /189		
4.1	伺服系统的干摩擦及其改善	189
4.1.1	低速不平稳性	190
4.1.2	减小低速跳动的措施	192
4.2	传动间隙对伺服系统的影响及其补偿	195
4.2.1	传动间隙对伺服系统性能的影响	196
4.2.2	消除间隙影响的措施	197
4.3	机械谐振对系统的影响及其补偿	201
4.3.1	传动轴变形造成的机械谐振	201
4.3.2	消除机械谐振的补偿措施	204

4.4 伺服系统的非线性补偿	207
4.4.1 非线性速度阻尼	207
4.4.2 非线性积分器和非线性 PI 调节器	209
4.4.3 自抗扰控制	210
4.4.4 多模控制技术	213
4.5 伺服系统的重复控制	215
4.5.1 重复控制原理	215
4.5.2 重复控制系统的稳定性	218
4.5.3 重复控制器设计	219
4.6 伺服系统的滑模变结构控制	220
4.6.1 滑模变结构控制原理	221
4.6.2 二阶系统开关控制	223
4.6.3 滑动模态	225
第 4 章习题	227

第 5 章 控制系统设计举例

/229

5.1 永磁同步电机调速系统	229
5.1.1 永磁同步电机的数学模型	229
5.1.2 永磁同步电机矢量控制策略	232
5.1.3 永磁同步电机调速系统设计	233
5.2 异步电机调速系统	236
5.2.1 异步电机的数学模型	236
5.2.2 异步电机的矢量控制策略	239
5.2.3 异步电机调速系统自抗扰控制器设计	241
5.3 空间机械臂一体化关节伺服控制系统	244
5.3.1 空间机械臂一体化关节伺服控制系统静态设计	245
5.3.2 数字控制系统软件设计	250
5.3.3 数字定标与定点运算	252
5.3.4 标么化系统及控制器设计	260
5.3.5 空间机械臂一体化关节伺服控制系统软件设计	264
5.4 星载天线伺服控制系统	269
5.4.1 星载天线负载特性分析与伺服电机选择	270
5.4.2 星载天线伺服系统结构设计	272
5.4.3 星载天线伺服系统控制器设计	274
5.4.4 星载天线伺服系统滑模变结构控制	277

第 1 章

控制系统组成及性能指标

1.1 引言

自动控制是一种广泛应用于工业生产、农业生产、交通运输、航空、航天、航海、核能和国防建设等部门的技术。自动控制是在没有人直接参加或较少人参与的情况下,利用控制装置使机器、设备或生产过程等被控对象按照预定的规律自动地运行或变化。例如,化工生产中要求反应塔的温度和压力自动维持恒定不变,防空系统中要求通过跟踪雷达和指挥仪使高炮自动地跟踪目标,无人驾驶飞机要求能按预定航迹自动飞行,载人飞船能够被发射到预定轨道并能准确回收,电子设备的电源部分要求输出电压稳定,数控机床加工中心要按照规定程序运行,电子设备的自动微调和自动跟踪,等等,所有这些都是需要借助于自动控制来实现。

自动控制技术在航天器航行、导弹制导、飞机及舰船的驾驶系统等技术领域中具有特别重要的作用,是实现农业、工业和国防科学技术现代化的重要手段。从 20 世纪初以来,特别是从第二次世界大战以来,控制科学与控制技术得到了迅速发展。自动控制技术的广泛应用推动了现代工农业的巨大进步,提高了武器的精确度和威力,实现了航天器飞行、导弹制导等。在工业生产领域,自动控制技术使得生产设备不需要人的直接参与,而控制某些物理量按照指定的规律变化,进而大大提高了劳动生产率和产品质量。例如,往复式轧钢机在钢材往复两次通过轧辊的时间间隔里,一方面要使钢材停下、反向,把钢材拨正后送入轧辊;另一方面必须使轧辊停转、反向,并调整到正确的转速,迎接钢材,这些操作必须互相配合,快速完成。在人工操作时,难免由于配合得不紧密而造成钢材或轧辊等待,如果每一个轧辊多等待 1s,一台轧机一年就要少轧几万吨钢。再如,工业加热炉炉温通常应当维持在一定的数值,而要在经常变化的热负荷下维持炉温为某个数值,只允许很小的误差,很难靠人力凭经验调整燃料供给量,甚至造成燃料的浪费,或直接影响产品质量。在军事领域,自动控制技术使得技术兵器可以自动实现敌方目标的识别、跟踪和瞄准,进而大大提高作战兵器的作战效能和杀伤力。以高射炮为例,在敌方飞机来袭时,雷达天线必须随时保持指向敌机,

测出敌机的方位仰角和距离等数据,并经计算机处理计入射击提前量后,控制高射炮转动,使高射炮时刻保持瞄准敌方飞行器,随时准备开火。瞄准的角度误差要求只有几分,如果不用控制技术,很难实现。现代军用飞行器速度很快,炮身又很沉重,通过人力直接转动炮身完全不能适应现代战争的需求。在航天领域,要把重达数吨的人造卫星准确地送入位于数百千米高空的预设轨道和指定的位置,并使太阳能帆板指向太阳,无线电天线指向地球,还要保持卫星内的环境条件正常,使它所携带的各种仪器自动准确地工作,所有这一切都是以高水平的控制技术为前提的。

自动控制理论是研究自动控制共同规律的理论。它的发展初期是以反馈理论为基础的自动调节原理。从第二次世界大战到 20 世纪 50 年代末,由于生产和军事的需要,自动控制技术开始蓬勃发展,自动控制理论逐步形成比较完整的理论体系,并在工程实践中得到成功的应用。这个时期的自动控制理论一般被称为经典控制理论。20 世纪 50 年代以后,宇航技术的发展推动了高性能、高精度、多结构体、多自由度复杂控制系统的研究,经典控制理论已不能完全满足要求,计算机的发展又在客观上提供了必要的技术手段,使得自动控制理论又发展到一个新的阶段——现代控制理论。目前现代控制理论已成功地应用于工农业生产和国防建设的各个领域。

自动控制理论与技术还处在继续发展过程中。从经典频域控制理论、基于状态空间法的现代控制理论到智能控制,自动控制理论正经历着前所未有的“百花齐放,百家争鸣”的大好局面。从模拟控制到数字控制,从单环到多环,从单变量到多变量多自由度多耦合,从串级控制、并级控制、集中分布式控制到网络控制,自动控制技术正经历着 Internet 网络带来的一场翻天覆地的技术变革。微电子技术、计算机技术、网络技术、传感器技术和功率电子技术的发展,不断推动着自动控制水平的提高,以适应日益复杂、日益精密、难度愈来愈大的控制要求。近年来,控制科学的应用范围已经扩展到生物、医学、环境、经济管理和其他许多社会生活领域。可以毫不夸张地说,控制科学和控制技术已经成为现代化社会不可缺少的组成部分。

1.2 自动控制系统组成

能够对被控对象的工作状态进行自动控制的系统,称为自动控制系统。高性能的自动控制系统一般采用闭环控制。根据被控制量变化规律的不同可分为恒值控制系统、程序控制系统和伺服系统。

被控制量基本保持恒定的系统称为恒值控制系统。使被控制量按预定规律变化的控制系统称为程序控制系统。被控制量跟随输入量的变化而变化,而输入量的变化规律是事先不能确定的,这种控制系统称为伺服系统(也称随动系统)。伺服系统的输入量是随机变量,如雷达的自动跟踪系统,要求天线能迅速而准确地跟随目标运动,而目标(如敌机或舰船等)的运

动规律是事先无法预料的；又如雷达的天线手控系统，要求天线能跟随控制手轮转动，而手轮的转速和转向则依据目标的运动而变化，也是无法预料的。这些目标的运动都是随机变化的。

图 1.1 所示为导弹发射架方向控制伺服系统，通过转动手轮使电位器 R_1 送出指令信号控制导弹发射架转动。当发射架作方位运动时，它的实际方位由电位器 R_2 来检测，从 R_2 所引出的信号反馈到输入端并输至差分放大器。差分放大器是一个偏差检测与放大装置，当发射架实际方位与指令所确定的方位不一致时，差分放大器就输出偏差信号，经功率放大器放大后去控制执行电机，从而驱动发射架，直至发射架的实际方位角与指令信号所确定的方位角相一致，差分放大器即无信号输出，于是实现手轮转角与导弹发射架方位角相一致。因此，这个系统是由反馈信号控制的伺服系统。

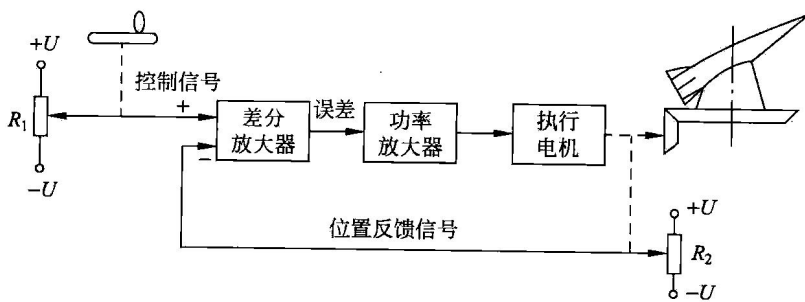


图 1.1 导弹发射架方位伺服系统

一个闭环自动控制系统的组成，必须包含以下各类基本元件。首先，为了测量被控制量及控制量，系统需要有测量元件。因为测量元件的精度直接影响控制系统的精度，所以应尽可能采用精度高的测量元件和合理的测量线路。其次，为了完成对被控制量和控制量的比较，以便产生偏差信号，系统必须有比较元件。比较元件在多数控制系统中是和测量元件或线路结合在一起的。再次，由于偏差信号一般比较微弱，需要进行变换放大，使它具有足够的幅值和功率，系统还必须具有放大元件。最后，需要根据偏差信号产生的控制作用，使被控对象按照控制信号的变化规律动作，这就要求系统具有执行元件。需要指出的是，按反馈原理由上述基本元件简单组合起来的控制系统往往是不能完成既定任务的。这是因为系统内部既有控制作用的因素，同时也存在反控制作用的因素。例如，在系统中由于有干摩擦死区及惯性等因素的存在，当输入信号作用到系统之后，在系统的输出端并不能马上得到反应，而只有当偏差信号大到一定程度时系统才有输出。由于惯性的作用，系统在反应控制信号过程中还有可能产生振荡，严重时甚至会使系统的正常工作遭到破坏。因此，为了使系统正常工作，还需要在系统中加进能消除或减弱上述振荡从而可以提高系统控制性能的一些元件，这类元件称为校正元件。校正元件可以加在由偏差信号至被控信号间的通道内，该通道称为前向通道；也可以加在由偏差信号至反馈信号间的通道内，该通道称为反馈通道。前者称为串联校正，后者称为反馈校正。在有些情况下，为了提高系统控制性能，可以同时应用串联校正和反馈校正。

由上述各基本元件组成的闭环自动控制系统基本结构图如图 1.2 所示。

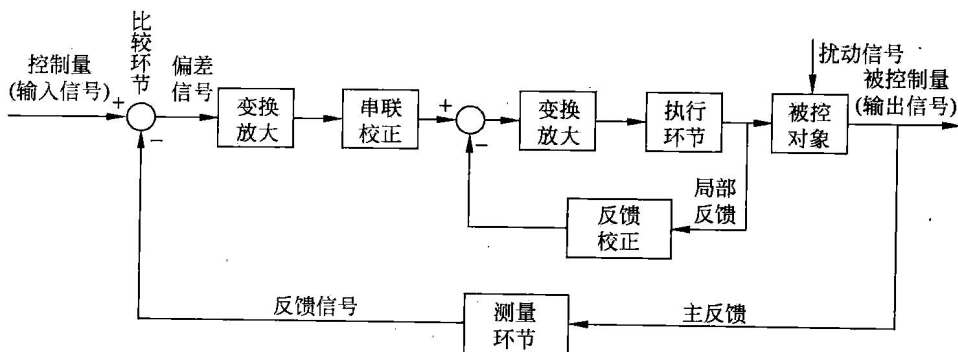


图 1.2 闭环自动控制系统基本结构图

一般说来,尽管闭环自动控制系统的控制任务各不相同,使用元件的结构和能源形式也均有所不同,但从其信号的传递和变换的职能来看,都可抽象成图 1.2 所示的闭环自动控制系统结构图。

从输入端沿箭头方向到达输出端的传输通道称为前向通道;系统输出量经由测量装置反馈到输入端的传输通道称为主反馈通道;前向通道与主反馈通道构成主回路。此外还有局部反馈通道以及由它组成的内回路。只有一个反馈通道的系统称为单回路系统,有两个以上反馈通道的系统称为多回路系统。

一般控制系统受到两种外部信号的作用:给定信号和扰动信号。它们都是系统的输入信号。通常所说的系统输入信号一般是指给定信号,系统的给定信号决定系统被控制量的变化规律。扰动信号是系统不希望的外作用,它破坏有用信号对系统输出量的控制。在实际系统中,扰动总是不可避免的,它可以作用于系统中的任何部位。电源电压的波动,环境温度、压力的变化,飞行中气流的扰动以及负载的变化等都是现实中存在的扰动。

下面以雷达天线方位随动系统为例进一步说明闭环自动控制系统的组成。图 1.3 为雷达天线方位随动系统机电连接图。系统中各组成元件、符号和参数意义如下:

主令信号 θ_1 ——系统的输入信号,是手轮转动时的转角,是机械量。

控制装置——由放大器、直流伺服电机(执行电机)及齿轮减速装置等组成。它接受来自比较环节的电信号,产生一个输出转矩 T ,使雷达天线转动。

被控对象——雷达天线。天线由伺服电机、齿轮减速装置拖动,天线按方位角 θ 变化。 θ 即为被控制量。

反馈环节——自整角变压器,它与天线机械连接,天线转动时,方位角 θ 输入自整角变压器,产生反馈信号。

比较环节——自整角发送机与自整角变压器(它既是检测装置也是比较环节),它将自整角发送机的输出信号与本身所产生的反馈信号相比较,得到偏差信号 e ,送给控制装置。

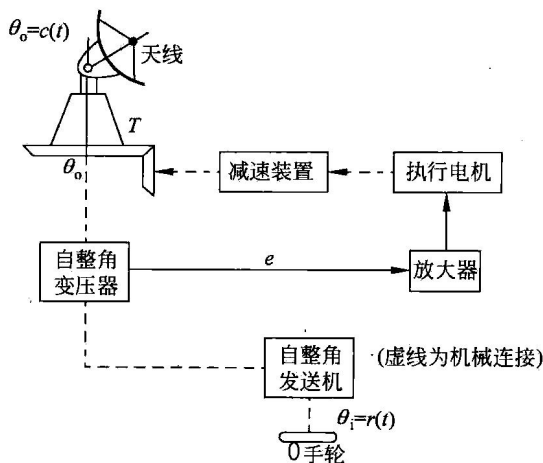


图 1.3 雷达天线方位随动系统机电连接图

可以看出,系统中的自整角变压器有两个作用:一是将天线方位角 θ_o 转化为反馈信号(将机械量 θ_o 转变为电信号),起反馈作用;另一是将主令信号与反馈信号进行比较,产生偏差信号 e ,起比较作用(作电压比较)。该系统的输入量是 $r(t)$,输出量是 $c(t)$ 。

该控制系统的扰动信号 $f(t)$ 是一个影响天线方位角转动的量,可以是天线所受的风力矩、放大器的噪声及齿轮装置的传动误差等。

上述雷达天线方位随动系统,通过反馈作用,可使天线与天线控制手轮同步转动,其同步误差很小(即 $\theta_o \approx \theta_i$)。

1.3 控制系统的性能指标

控制系统的性能指标为稳定性、动态特性和稳态特性。稳定性是控制系统最重要的性能,只有系统是稳定的,控制系统才能正常工作;动态特性反映系统针对给定信号的快速平稳跟踪能力或扰动作用后系统快速恢复正常工作的能力;稳态特性则反映了控制系统的控制精度。

1.3.1 控制系统的稳态性能和系统的型别

自动控制系统的输出量一般都包含两个分量:稳态分量和暂态分量。暂态分量反映了控制系统的动态性能。对于稳定的系统,暂态分量随着时间的推移,将逐渐减小并最终趋于零。稳态分量反映系统的稳态性能,它反映控制系统跟随给定量和抑制扰动量的能力和准

准确度。稳态性能的优劣,一般以稳态误差的大小来度量。

稳态误差长期存在于系统的工作过程之中,因此在设计系统时,首先要保证系统能稳定运行,其次就是要求系统的稳态误差小于规定的容许值,只有在此基础上,进一步考虑动态误差才有实际意义。

1. 系统误差的定义

1) 系统误差 $e(t)$

现以图 1.4 所示的典型反馈控制系统来说明系统误差的概念。系统误差 $e(t)$ 的一般定义是: 输出希望值 $c_r(t)$ 与输出实际值 $c(t)$ 之差, 即 $e(t) = c_r(t) - c(t)$ 。对于输出希望值 $c_r(t)$, 通常以偏差信号 $\epsilon(t)$ 为零来确定希望值, 则 $\epsilon(t)$ 的拉氏变换也为零, 即

$$\epsilon(s) = R(s) - H(s)C_r(s) = 0 \quad (1.1)$$

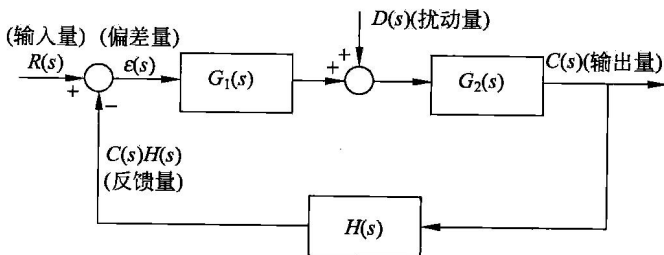


图 1.4 反馈控制系统结构图

于是输出希望值的拉氏变换为 $C_r(s) = \frac{R(s)}{H(s)}$ 。系统误差 $e(t)$ 的拉氏变换为

$$E(s) = \frac{R(s)}{H(s)} - C(s) \quad (1.2)$$

由图 1.4 可知, 输出信号 $c(t)$ 的拉氏变换为

$$C(s) = \frac{G_1(s)G_2(s)}{1+G_o}R(s) - \frac{G_2(s)}{1+G_o}D(s) \quad (1.3)$$

式中, $R(s)$ 为输入信号的拉氏变换; $D(s)$ 为扰动信号的拉氏变换, 开环传递函数为 $G_o = G_1(s)G_2(s)H(s)$ 。将式(1.3)代入式(1.2), 那么系统误差 $e(t)$ 的拉氏变换 $E(s)$ 可以进一步表示为

$$\begin{aligned} E(s) &= \frac{1}{[1+G_o]H(s)}R(s) + \frac{G_2(s)}{1+G_o}D(s) \\ &= E_r(s) + E_d(s) \end{aligned} \quad (1.4)$$

式中, $E_r(s) = \frac{1}{[1+G_o]H(s)}R(s)$ 为输入信号产生的误差的拉氏变换, 又称跟随误差; $E_d(s) = \frac{G_2(s)}{1+G_o}D(s)$ 为扰动量产生的误差的拉氏变换。对 $E_r(s)$ 和 $E_d(s)$ 分别进行拉氏反变换, 即可

得跟随动态误差 $e_r(t)$ 和扰动动态误差 $e_d(t)$ 。两者之和即为系统动态误差

$$e(t) = e_r(t) + e_d(t) \quad (1.5)$$

2) 系统稳态误差 e_{ss}

对于稳定的系统,当 $t \rightarrow \infty$ 时, $e(t)$ 的极限值即为稳态误差 e_{ss} 。利用拉氏变换终值定理可以直接由系统误差的拉氏变换 $E(s)$ 求得稳态误差,即

$$e_{ss} = e_{ssr} + e_{ssd} = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s)$$

式中,跟随稳态误差 $e_{ssr} = \lim_{s \rightarrow 0} sE_r(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{sR(s)}{(1+G_o)H(s)}$; 扰动稳态误差 $e_{ssd} = \lim_{s \rightarrow 0} sE_d(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{sG_2(s)D(s)}{1+G_o}$ 。

2. 系统稳态误差与系统型别、系统开环增益间的关系

控制系统各环节的传递函数可以表示为如下的形式

$$G(s) = \frac{K \left(1 + \sum_{j=1}^m b_j s^j \right)}{s^v \left(1 + \sum_{i=1}^n a_i s^i \right)} \quad (1.6)$$

在图 1.4 所示的典型反馈系统中,设 $G_1(s)$ 中包含 v_1 个积分环节,其增益为 K_1 ,于是 $\lim_{s \rightarrow 0} G_1(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{K_1}{s^{v_1}}$, 式中 v_1 为扰动作用点前的积分个数。设 $G_2(s)$ 中包含 v_2 个积分环节,其增益为 K_2 ,于是 $\lim_{s \rightarrow 0} G_2(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{K_2}{s^{v_2}}$, 式中 v_2 为扰动作用点后的积分个数。设 $H(s)$ 中不包含积分环节,其增益为 α , 于是 $\lim_{s \rightarrow 0} H(s) = \alpha$ 。

跟随稳态误差 e_{ssr} 为

$$e_{ssr} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{sR(s)}{[1+G_o]H(s)} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{sR(s)}{\left[1 + \frac{K_1 K_2 \alpha}{s^{v_1+v_2}} \right] \alpha} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{sR(s)}{\left[1 + \frac{K}{s^v} \right] \alpha} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{s^{v+1} R(s)}{\alpha K} \quad (1.7)$$

开环增益 $K = \alpha K_1 K_2$, 前向通道积分个数 $v = v_1 + v_2$ 。由式(1.7)可见,跟随稳态误差 e_{ssr} 与前向通道积分个数 v 和开环增益 K 有关。 v 和 K 越大,跟随稳态精度越高。此外, e_{ssr} 还与给定信号 $R(s)$ 有关。

扰动稳态误差 e_{ssd} 为

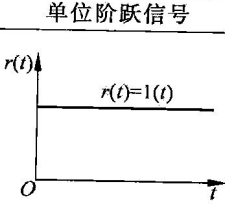
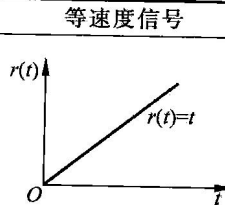
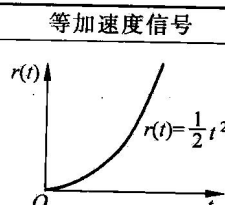
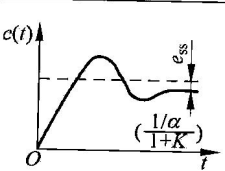
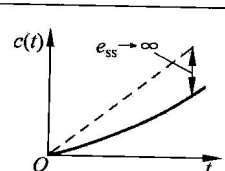
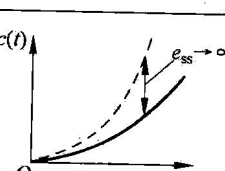
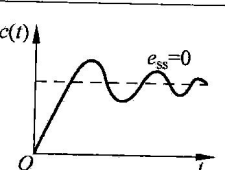
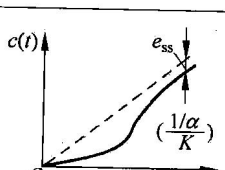
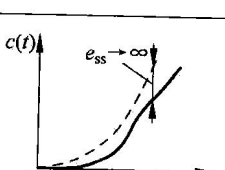
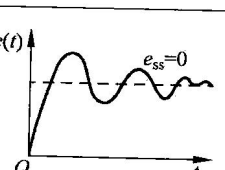
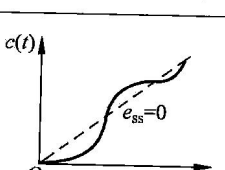
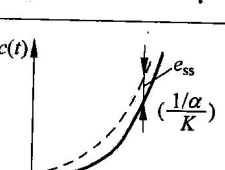
$$e_{ssd} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{sG_2(s)D(s)}{1+G_o} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{\frac{sK_2}{s^{v_2}} D(s)}{\left[1 + \frac{K_1 K_2 \alpha}{s^{v_1+v_2}} \right]} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{s^{v_1+1} D(s)}{\alpha K_1} \quad (1.8)$$

由式(1.8)可见,扰动稳态误差 e_{ssd} 与扰动信号作用点前的前向通道的积分个数 v_1 和增益 K_1 有关。 v_1 和 K_1 越大,则对该扰动信号的稳态精度越高。此外, e_{ssd} 还与扰动信号

$D(s)$ 以及扰动信号作用点有关。

由于系统的稳态误差与系统所包含的积分环节的个数 ν 有关,因此工程上往往把系统中所包含的积分环节的个数 ν 称为型别或无静差度。若 $\nu=0$,则为 0 型系统,称系统是零阶无静差;若 $\nu=1$,则系统为 I 型系统,称系统是一阶无静差;若 $\nu=2$,则系统为 II 型系统,称系统是二阶无静差。下面分别讨论 0、I、II 型系统在不同输入信号情形下的稳态性能,系统稳态误差与系统型别和输入信号之间的关系如表 1.1 所示。

表 1.1 系统稳态误差与输入信号及系统型别间的关系

输入信号 系统型别	单位阶跃信号	等速度信号	等加速度信号
	 <p>$r(t) = 1(t)$</p>	 <p>$r(t) = t$</p>	 <p>$r(t) = \frac{1}{2} t^2$</p>
0 型系统	 <p>e_{ss} $(\frac{1}{1+K})$</p>	 <p>$e_{ss} \rightarrow \infty$</p>	 <p>$e_{ss} \rightarrow \infty$</p>
I 型系统	 <p>$e_{ss} = 0$</p>	 <p>e_{ss} $(\frac{1}{K})$</p>	 <p>$e_{ss} \rightarrow \infty$</p>
II 型系统	 <p>$e_{ss} = 0$</p>	 <p>$e_{ss} = 0$</p>	 <p>e_{ss} $(\frac{1}{K})$</p>

1) 阶跃信号输入

若系统前向通道不含积分环节,则其稳态误差 $e_{ssr} = 1/[\alpha(1+K)]$; 系统开环增益 K 愈大, e_{ssr} 愈小,系统稳态精度愈高。若系统含有积分环节,便能实现无静差, $e_{ssr} = 0$,系统最后无偏差地定位到所需位置。定义稳态位置误差系数为

$$K_p = \lim_{s \rightarrow 0} G_o(s)$$

由于 0 型系统中没有积分环节,单位阶跃输入时的稳态误差为一定值,它的大小差不多与系统开环传递系数 K 成反比。 K 愈大, e_{ssr} 愈小。但总有误差存在,所以这种开环结构没

有积分环节的0型系统,又常称为有差系统。生产过程实际一般是允许控制系统存在稳态误差的,只要它不超过规定的指标就可以了,但总是希望稳态误差愈小愈好。为此,常在稳定条件允许的前提下,增大 K_p 或 K 。若要求系统对阶跃输入的稳态误差为零,则系统必须是I型以上的,即其前向通道中必须至少具有一个积分环节。

2) 斜坡信号输入(即等速度信号输入)

这时若系统不含积分环节,则系统将无法进行跟随, $e_{ssr} \rightarrow \infty$ 。若含一个积分环节,则 $e_{ssr} = 1/(\alpha K)$,增益 K 愈大,稳态精度愈高。若要实现无偏差地跟随作匀速运动,则要求系统含有两个积分环节。定义稳态速度误差系数 K_v 为

$$K_v = \lim_{s \rightarrow 0} s G_o(s)$$

对于0型系统,输出不能跟随斜坡输入,最后稳态误差趋近 ∞ 。对于I型系统,输出能跟踪斜坡输入,但总有误差 $1/K$ 。为了减少误差,必须使系统的 K_v 或 K 值足够大。对于II型或II型以上系统,稳态误差为零,这种系统有时称为二阶无差系统。所以对于斜坡输入信号,要使系统稳态误差为定值或为零,必须使前向通道串联的积分环节数大于等于1。

3) 抛物线信号输入(即等加速度信号输入)

这时系统至少要含有两个积分环节,才能实现有一定误差的跟随运动,若要求系统无误差地跟随,则需含三个积分环节。定义稳态加速度误差系数 K_a 为

$$K_a = \lim_{s \rightarrow 0} s^2 G_o(s)$$

表1.2概括了不同类型单位负反馈系统(即反馈增益 $\alpha=1$)在三种典型输入信号作用下的稳态误差。由以上分析可见:若系统含有的积分个数 ν 越多,开环放大倍数 K 越大,则系统的稳态性能越好。由于含两个以上积分环节的系统不易稳定,所以很少采用II型以上的系统。

表 1.2 给定稳态误差 e_{ssr} 综合表

系统类型	阶跃输入 $r(t)=1(t)$		等速度输入 $r(t)=t$		等加速度输入 $r(t)=\frac{1}{2}t^2$	
	稳态位置 误差系数 K_p	稳态误差 e_{ssr}	稳态速度 误差系数 K_v	稳态误差 e_{ssr}	稳态加速度 误差系数 K_a	稳态误差 e_{ssr}
0型系统	K	$\frac{1}{1+K}$	0	∞	0	∞
I型系统	∞	0	K	$\frac{1}{K}$	0	∞
II型系统	∞	0	∞	0	K	$\frac{1}{K}$

1.3.2 控制系统的时域性能指标

控制系统输出响应的时域性能指标,通常用系统初始条件为零时对单位阶跃信号输入的响应所定义的各项指标来表征,如图1.5所示。衡量控制系统输出响应的时域性能指标,