

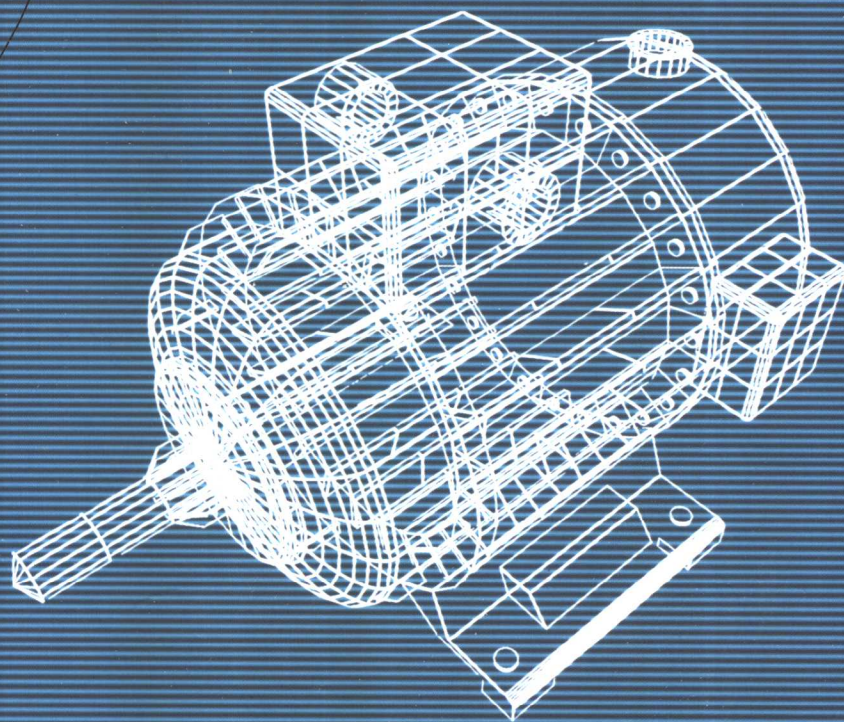
控制科学与工程



国防科工委「十五」规划教材

自动控制元件

● 葛伟亮 编著



北京理工大学出版社

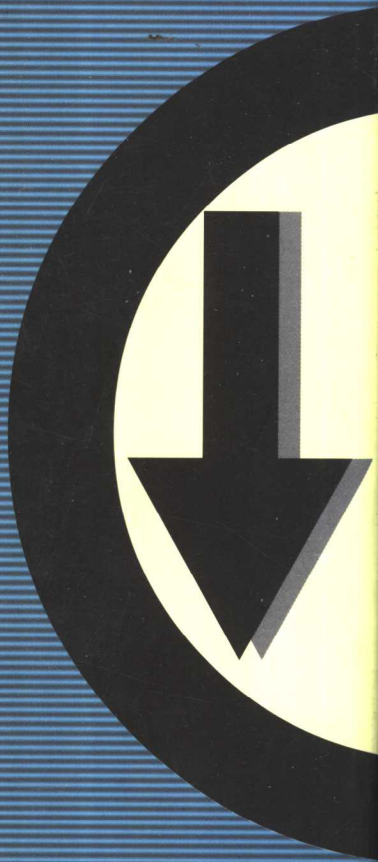
北京航空航天大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

西北工业大学出版社

哈尔滨工程大学出版社

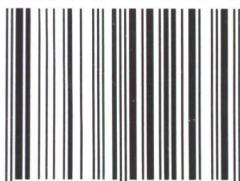
国防科工委“十五”规划教材
控制科学与工程



责任编辑：陈 竝

书籍装帧： 航空出版社

ISBN 7-5640-0253-0



9 787564 002534 >

ISBN 7-5640-0253-0

定价：35.00 元

TP273
G315



国防科工委“十五”规划教材·控制科学与工程

自动控制元件

葛伟亮 编著

RA1574/09

北京理工大学出版社

北京航空航天大学出版社 西北工业大学出版社
哈尔滨工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

917762

10

内容简介

本书为国防科工委重点教材建设计划中“自动控制元件”招标教材。主要介绍军工和民用自动控制系统中常用的自动控制元件的基本原理、构造、特性和使用等。全书共分两篇:第一篇为执行元件篇,包括电磁铁和继电器、变压器、直流电机、感应电机、同步电机和步进电机等。这些元件均基于电磁原理,故以此为主线逐个介绍各类元件的共同问题及在控制系统中的特殊问题。第二篇为检测元件篇,其中包括电磁检测元件、电阻式检测元件、磁电式检测元件、电容传感器、压电传感器、光电检测元件和陀螺传感器等。书中还适当介绍了各类元件在民用和军工控制系统中的应用实例和学科领域中的一些新成果。

本书可供高等学校特别是国防科工委所属高等院校自动控制专业和相关专业作为教材和教学参考书,并可供从事上述专业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制元件/葛伟亮编著. —北京:北京理工大学出版社,
2004.5

国防科工委“十五”期间重点教材建设计划立项教材
ISBN 7-5640-0253-0

I. 自… II. 葛… III. 自动控制-控制元件-高等学校-
教材 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 022505 号

自动控制元件

葛伟亮 编著

责任编辑 陈竑

责任校对 陈玉梅

北京理工大学出版社出版发行

北京市海淀区中关村南大街5号(100081)

电话:010-68914775(办公室) 68912824(发行部)

[http:// www. bitpress. com. cn](http://www.bitpress.com.cn)

E-mail: chiefedit@bitpress.com.cn

北京圣瑞伦印刷厂印制 各地新华书店经销

开本:787×960 1/16

印张:22.5 字数:464千字

2004年5月第1版 2004年5月第1次印刷

印数:3000册.

ISBN 7-5640-0253-0 定价:35.00元

005510

国防科工委“十五”规划教材编委会

(按姓氏笔画排序)

主 任：张华祝

副主任：王泽山 陈懋章 屠森林

编 委：王 祁	王文生	王泽山	田 蔚	史仪凯
乔少杰	仲顺安	张华祝	张近乐	张耀春
杨志宏	肖锦清	苏秀华	辛玖林	陈光福
陈国平	陈懋章	庞思勤	武博祎	金鸿章
贺安之	夏人伟	徐德民	聂 宏	贾宝山
郭黎利	屠森林	崔锐捷	黄文良	葛小春



总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就。研制、生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其他技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占有了一席之地。十一届三中全会以来,伴随着改革开放的伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转移,大量军工技术转向民用,为发展国民经济作出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍,他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,生产和传播国防科技新知识、新思想,攻克国防基础科研和高技术研究难题当中,具有不可替代的作用。国防科工委高度重视,积极探索,锐意改革,大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当

今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影响。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版200种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相关专业领域的专家学者竞投编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的100多位专家、学者,对经各单位精选的近550种教材和专著进行了严格的评审,评选出近200种教材和学术专著,覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与工程、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者,他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等,具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中,国防特色专业重点教材和专著的出版,将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出,进入二十一世纪,我国进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。全面建设小康社会的宏伟目标,对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展,提升国防实力,需要造就宏大的人才队伍,而教育是奠基的柱石。全面振兴国防科技工业必须始终把发展作为第一要务,落实科教兴国和人才强国战略,推动国防科技工业走新型工业化道路,加快国防科技工业科技创新步伐。国防科技工业为有志青年展示才华,实现志向,提供了缤纷的舞台,希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识,树立正确的世界观、人生观、价值观,努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任,创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好,国防科技工业的明天将再创辉煌。

张华祝



前言

尽管已编写并公开出版过三本有关控制元件及其控制之类内容的书,但接到这次任务,心中仍不免有点诚惶诚恐。一方面是因为它是国防科工委定的重点教材之一,不能在我的笔下名不副实,误人子弟;另一方面自动控制元件所包含的内容实在太丰富,发展又如此之快,一些传统的元件还在被人们进一步认识并发掘出新的应用领域,而另一批新的元件又不断被开发出来,满足国民经济各个领域新的需求。如何处理好传统元件与新技术、新元件的关系,如何处理好军工和民用的关系,如何在有限的课时内让学生获得更多信息等一系列问题,是作者在动笔前必须要明确和解决的。在如今科技发展日新月异,经济发展日趋全球化和我国改革开放愈加深入的形势下,要求教育必须面向未来,面向世界,面向现代化。在市场经济的大环境下,人才培养必须“拓宽专业、加强基础、重视实践、发展智力、培养创新能力”,这是编著此教材的指导思想。

本书是为自动控制专业本科生学习“自动控制元件”课程编写的。根据大纲要求,本教材主要介绍军工和民用自动控制系统中常用的自动控制元件。全书共分两篇。第一篇是执行元件。这些元件均基于电磁原理,故以此为主线,引导学生用电磁基本原理分析各类电磁电器和电机的工作原理、特性和应用,掌握各类元件的共同问题及在控制系统中的特殊问题。在内容安排上遵循从普遍到特殊,从一般的执行元件到控制系统中执行元件特殊性的原则。第二篇是检测元件。考虑到本科生教材特点,不以元件的应用而是以元件的基本工作原理进行分类,再通过应用实例,给学生留出更多应用的想像空间。内容上既介绍传统的检测元件及其最新应用,又将该领域发展的前沿介绍给读者。全书力求概念清晰,叙述清楚,简明扼要,循序渐进。各章均有例题、习题、思考题及应用实例,还附有各类元件的性能和型号表等供备查。

全书共十三章。第一章为电磁电器,第二章到第六章为各类电机,第七章到第十三章为各类检测元件。内容包括电磁电器、变压器、直流电机、感应电机、同步电机、步进电机、电磁检测元件、电阻式检测元件、磁电式检测元件、电容传感器、压电传感器、光电检测元件、陀螺传感器等,对一些新型电机、传感器等也作了



介绍。

本书是在总结作者 40 多年来教学实践经验和科研成果基础上编写的。贺力勤同志参与了全书大部分的计算机录入及校核工作。全书承蒙两位匿名的评审专家在百忙之中认真审阅,并提出宝贵的修改意见和建议,在此表示深切的谢意。由于编著者水平有限,难免有错误和不妥之处,欢迎读者批评指正。

今年四、五月是写书最紧张的时刻,肆虐的非典,威胁着每个北京市民的安危,是党中央的英明决策、各级政府的正确领导,白衣战士的无私奉献,保证了我能顺利完成任务,我愿以此书奉献给他们,以表示我衷心的感谢。

作者

2003 年 5 月北京

目 录

绪论	1
0.1 自动控制元件在控制系统中的作用	1
0.2 自动控制元件的分类	3
0.3 本课程特点	4

第一篇 执行元件

第一章 电磁铁和电磁继电器	7
1.1 电磁铁的静吸力和静吸力特性	7
1.2 电磁继电器和接触器	17
1.3 新型继电器举例	23
习 题	29
第二章 变压器	31
2.0 概述	31
2.1 单相变压器的空载运行	32
2.2 单相变压器的负载运行	37
2.3 变压器的额定值和性能指标	42
2.4 特殊变压器	45
2.5 变压器绕组极性的测定	47
习 题	48
第三章 直流电机	51
3.0 概述	51
3.1 直流电机的基本原理和结构	51
3.2 直流电机的电枢绕组和磁场	55
3.3 直流电机的电枢电势和电磁转矩	60
3.4 直流电机的换向与火花	61
3.5 直流发电机	62
3.6 直流伺服电动机	66
3.7 特殊直流电动机	84
习 题	90



第四章 交流异步电动机	92
4.0 概述	92
4.1 交流异步电动机的结构和磁场	92
4.2 三相交流异步电动机的运行分析	102
4.3 三相交流异步电动机的功率和转矩	109
4.4 三相交流异步电动机的使用	114
4.5 交流伺服电动机	122
4.6 直线异步电动机	141
习 题	142
第五章 三相交流同步电动机	146
5.0 概述	146
5.1 同步电动机的工作原理	148
5.2 同步电动机的功率平衡、功角和矩角特性	151
5.3 同步电动机的励磁调节及 V 形曲线	156
5.4 同步电动机的启动	159
5.5 介绍几种特殊的同步电动机	160
习 题	164
第六章 步进电动机	167
6.0 概述	167
6.1 反应式步进电动机的工作原理	168
6.2 反应式步进电动机的基本特性	171
6.3 直线步进电动机	178
6.4 步进电动机的驱动电源	179
6.5 步进电动机的主要性能指标及技术数据	186
习 题	189

第二篇 检测元件

第七章 电磁检测元件	193
7.1 直流测速发电机	193
7.2 交流异步测速发电机	199
7.3 电感传感器	202
7.4 自整角机	216
7.5 旋转变压器	230
7.6 感应同步器	239
习 题	244



第八章 电阻式检测元件	247
8.1 电位器传感器	247
8.2 电阻应变传感器	251
8.3 热电阻传感器	258
8.4 湿敏电阻传感器	264
习 题	268
第九章 磁电式检测元件	270
9.1 磁电感应式传感器	270
9.2 霍尔传感器	274
习 题	281
第十章 电容传感器	282
10.1 工作原理和分类	282
10.2 电容传感器的测量电路	288
10.3 电容传感器的应用	291
习 题	293
第十一章 压电传感器	294
11.1 压电传感器的工作原理	294
11.2 压电传感器的等效电路	299
11.3 压电传感器的测量电路	301
11.4 压电传感器的应用	302
习 题	305
第十二章 光电式检测元件	306
12.1 光电效应及光电器件	306
12.2 常规光电传感器及其应用	312
12.3 红外传感器	317
12.4 激光传感器	323
12.5 角度—数字编码器	326
习 题	330
第十三章 陀螺传感器	332
13.0 概述	332
13.1 陀螺仪基本结构、原理和特性	332
13.2 传统陀螺仪	334
13.3 新型陀螺仪举例	338
习 题	340
附录一 控制电机产品名称代号	341
附录二 控制电机机座号	342



附录三 控制电机使用环境条件	343
附录四 控制电机电源频率和电压等级	343
附录五 各种控制电机传递函数表	343
附录六 常用传感器的分类和应用	344
参考文献	346

绪 论

0.1 自动控制元件在控制系统中的作用

随着我国现代化建设的飞速发展和科学技术的不断进步,自动控制系统在现代化建设中起着越来越重要的作用。从传统产业信息化改造、航空航天技术、机器人控制到美伊战争中的精密制导武器系统等高新技术领域都需要由精度高、可靠性好、响应快的自动控制系统来实现。控制理论研究的深入和计算机技术的迅猛发展,使一些控制系统已实现了数字化、智能化、计算机化和集成化,从而使自动控制系统功能更强,性能更优,体积更小,运行更可靠。但任何一种自动控制系统,不论是经典的还是实现了数字化、智能化、计算机化的,都离不开大量的检测、转换、放大、执行元件。这些元件统称为自动控制元件。自动控制元件种类很多,它们的工作原理可以是基于物质的各种物理、化学性能,如光特性、电特性、磁特性、机械特性、化学特性、生物特性等,但无论哪一种控制元件,它们中的大多数最终都是直接利用电能来进行工作的。与采用其他能源的元件相比,利用电能信号的采集、转换、传递、控制与处理方面具有一系列的优点,因此目前品种最多,产量最高,应用最广泛的是利用电能的控制元件。随着新材料、新技术、新工艺的出现以及控制系统的发展,它也得到越来越迅速的发展。

下面以四个控制系统为实例,来说明控制元件在控制系统中的地位与作用。

图 0.1.1 是一个简单的速度控制系统原理图。对系统的要求是在负载变化时保持转速恒定。在该系统中,输出速度始终与要求的恒定速度进行比较,以便进行自动调节,确保输出速度为恒定。

图中 V_R 为对应于要求的恒定速度的电压, $K_s \omega_0$ 是速度传感器的输出电压,它与输出速度成正比。 ϵ 是供给放大器的误差电压, $\epsilon = V_R - K_s \omega_0$, ω_0 是负载的旋转角速度,即输出速度。

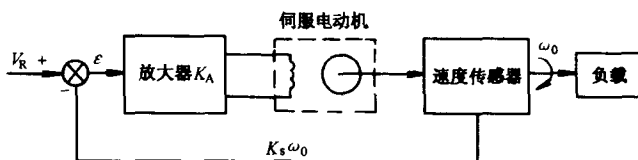


图 0.1.1 简单的速度控制系统原理图

图 0.1.2 是雷达天线方位角手控原理框图。雷达天线控制系统的作用是使雷达天线的指向自动复现输入指令,以达到跟踪空中目标的目的。由于雷达天线在空间的指向由方位角和高低角两个参数所确定,所以控制系统也分为两个通道,即高低角和方位角控制通道。两个通道的工作原理和控制过程是相同的,所以下面仅介绍方位角控制通道。

方位角控制通道控制过程分两个阶段。第一阶段为手动控制,第二阶段为自动跟踪。手

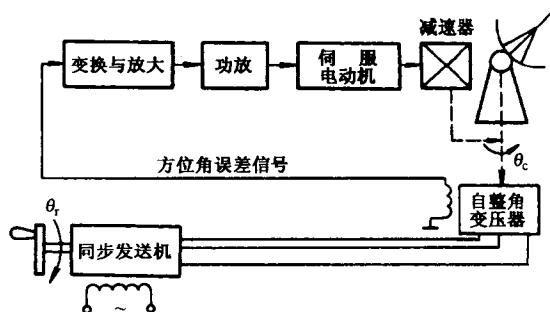


图 0.1.2 雷达天线方位角手控原理图

轴按照 θ_r 的规律跟随转动，直到跟上目标。图 0.1.3 为雷达天线自动控制系统原理框图。当雷达盯上目标后，雷达发射的电磁波经目标反射回来，雷达接收反射回来的电磁波信号后，经过相应的处理，分解为方位角和高低角信号，并通过相应的通道去控制雷达天线的方位角和高低角，使天线朝误差角减少的方向运动，直到完全对准目标。若目标连续飞行，则雷达天线跟随目标连续运动，实现对目标的自动跟踪。

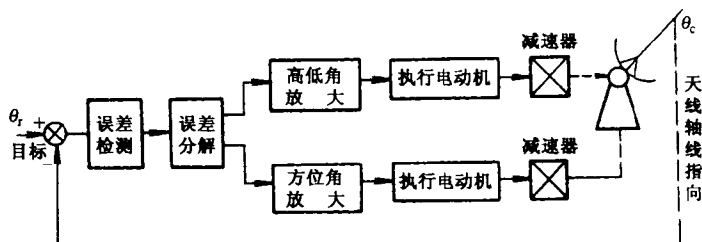


图 0.1.3 雷达天线自动控制系统原理框图

图 0.1.4 为机床数字控制系统原理图。在该系统中机床工作台的运动可以由可编程控制器储存的二进制编码信息来控制。工作时，首先启动系统，于是可编程控制器内的信息通过与反馈脉冲信号进行比较，控制器根据脉冲信号的差值进行数字运算，如果在两个脉冲信号之间存在某一差值，此差值由数-模转换器变为模拟信号，就有一定数值的电压经放大器放大，然后去驱动伺服电动机。刀架的位置由伺服电动机的输入信号控制。与刀架连接在一起的传感器将刀具的运动变为电脉冲信号，反馈到可编程控制器。只要两个脉冲信号之间存在差值，便有电压输送到

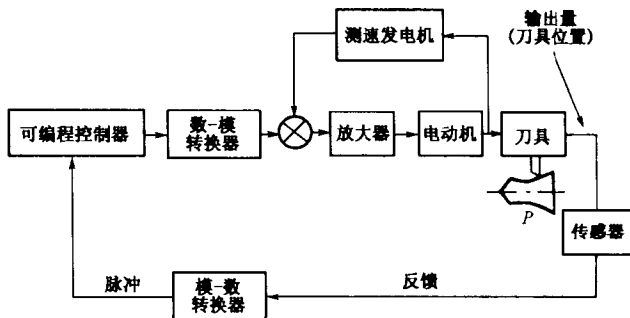


图 0.1.4 机床的数控系统原理图



伺服电动机以驱动刀架的运动,以减小差值,直到其等于 0 为止。新一代的数控机床则采用功率步进电动机和数字传感器,机床的精度和可靠性均得到进一步的提高。

图 0.1.5 是典型的数字计算机控制系统方框图。该系统是由一组模拟(或数字)传感器、模数转换器、计算机、数模转换器以及一组模拟(或数字)控制器和执行元件所构成。

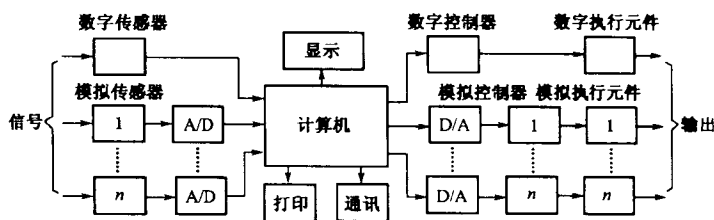


图 0.1.5 典型的计算机控制系统方框图

在上述四个控制系统实例中,各元件的功能为:

传感器(或称检测元件)——把被测的物理量转换成电信号(或数字信号);

放大器——把电信号进行电压和功率放大,以达到驱动执行元件的要求;

执行元件——把经放大的控制信号转换成机械信号以带动控制对象。

由此可见,自动控制元件与控制系统的关系是局部与整体的关系。一方面控制元件的性能和作用要服从于整个系统对它的要求,控制元件的好坏要看它是否满足系统的要求,并有较高的性价比。另一方面控制元件的性能又直接制约了整个控制系统的性能,控制元件性能不佳,使用不当或不可靠,整个系统的性能就无法保证和提高。控制元件的发展又可以推动控制系统的发展。因此,从事自动控制工作的工程技术人员,不但要了解控制系统的整体以及系统中各个元件的关系,而且对系统中各个元件也必须熟悉,只有这样,才有可能在设计自动控制系统时,正确地选择、合理地使用各种元件,使设计出的控制系统性能优良、工作可靠、价格便宜、具有竞争力。

0.2 自动控制元件的分类

本书涉及的自动控制元件包括两类,一类是执行元件,另一类是检测元件。

0.2.1 执行元件

执行元件根据能源不同可以分为电磁、液压和气动的。电磁执行元件是自动控制元件中应用最广泛的一种。它是根据电磁原理工作的。从能量转换角度来看,它们是电能和机械能之间的转换器件。一般地说,电能与机械能之间不能直接进行转换,要通过中间媒介——磁场才能实现。因此电磁元件就是指在磁场参与下进行机电信息或能量的传递和转换的自动控制元件。电磁执行元件是一种功率元件,按其功用包括电磁电器、变压器和各种执行电机。如按电流来划分,可分为直流和交流执行元件。



0.2.2 检测元件

检测元件是传感器的统称,是指按各种原理构成的,能从被检测的参量中提取有用信息的器件。一个完善的检测元件应包括敏感元件、测量电路和输出单元三部分,它们可以是分立的,也可以是集成的,用以实现信息搜集、转换和处理任务。

传感器可分为电量传感器如热电偶、磁电传感器、光电池和压电传感器等,它们是有源元件。另一类是电参数传感器,是无源元件,如热敏电阻、电容传感器、感应同步器等。

传感器还可分为简单结构型和差动结构型。差动结构型由于在同一传感器中采用两个完全相同的简单结构型组合成差动输出,因而具有灵敏度高、抗干扰力强、线性好等优点。但不是所有传感器均可采用差动式结构。

有些教材采取从应用的角度对传感器进行分类,如测力传感器、测长度传感器等。这对已掌握各类传感器基本知识的工程技术人员而言,便于使用时的选择。而对初学者而言,按其工作原理分类,更有利于系统掌握该传感器的基本原理、特点、性能和应用知识,给他们更多发挥其想像的空间。为便于读者在选用传感器时参考,本书在附录六中列出了部分传感器的分类、转换原理和典型应用。

0.3 本课程特点

本书作为自动控制系本科生的一门必修技术基础课教材,主要介绍各类电磁执行元件和传感器的基本构造、工作原理、特性及其应用。在交、直流电机章节中本着从一般到特殊,从共性到个性的思维原则,先介绍电机的共同问题,再讨论控制电机的特殊问题,使读者对此有个全面了解,以弥补同类教材中只讨论“控制电机”之不足。随着科技的发展,电机、传动与控制线路已构成一个不可分割的整体,书中对一些有典型意义的控制线路的介绍,就是适应这种变化。检测元件篇不是以应用而是以传感器原理分类,也是为了适应尚未涉足此领域的本科生入门的实际需要。为了反映当前电机及传感器的发展,还编入了一些新型电机及传感器的内容。

自动控制元件种类繁多,不可能也没有必要一一列举。本课程只是对军工和民用中部分典型和广泛应用的元件作比较深入的分析和研究。从整个课程内容的系统性和连贯性来讲,不如有些基础课那样各章之间有严密的逻辑关系,这是它的一个特点。本课程的另一个特点是不仅理论性强,涉及面广,而且有很强的工程实践性,因此,在学习中一定要重视实践环节,切实掌握各种元件的使用和实验方法。

我们都经历过儿时搭积木的游戏,几块各种形状的普通积木,可以搭出丰富多彩的图案。假如将自动控制元件比做一堆“智能”的积木块,一点也不过分,当你掌握了各种元件的原理、特点、性能和应用,也就学好了本门课程,将能在未来的工作中充分展开你想像的翅膀,“搭出”各种各样满足要求,性能优良,可靠而又经济的控制系统。