

韩致信
袁朗 编著
姚运萍

机械 自动控制工程



科学出版社

www.sciencep.com

机械自动控制工程

韩致信 袁 朗 姚运萍 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书主要讨论机电设备自动控制系统的一般分析和综合方法及基本理论。主要内容包括:线性连续系统与离散系统数学模型的建立方法和不同形式数学模型之间的转化方法、线性连续系统与离散系统稳定性的时域分析法和频域分析法、线性连续系统与离散系统的瞬态响应分析方法和误差分析方法、频域内线性连续系统的综合与校正方法、线性连续系统的根轨迹分析和校正方法等。

本书可作为高等院校泛机械类专业的教科书,也可供从事机械工程和电气工程工作的技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械自动控制工程/韩致信,袁朗,姚运萍编著. —北京:科学出版社, 2004

ISBN 7-03-011992-4

I. 机… II. ①韩…②袁…③姚… III. 机械系统-自动控制
IV. TP271

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 073380 号

策划编辑:童安齐 沈 建/文案编辑:彭 斌 姚 晖
责任校对:柏连海/责任印制:刘士平/封面设计:张 放

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2004 年 1 月 第 一 版 开本: B5(720×1000)

2004 年 1 月 第一次印刷 印张: 24

印数: 1—2 500 字数: 476 000

定价: 36.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

前 言

20 世纪科学技术发展之迅猛,用日新月异来形容毫不为过。在这短短的 100 年中,人类创造的科学技术奇迹数不胜数。比如“上九天揽月,下五洋捉鳖”,这在 100 多年前还只是人类的梦想,只能在神话传说或童话小说中看到一星半点想像的灵光,可哪知仅隔半个多世纪,这梦想成真,人类还真的上至“九天月宫”,下至“东海龙宫”,处处留下了“到此一游”的足迹。又如,100 多年前,人们把望远镜当作“千里眼”、把电报电话当作“顺风耳”,然而今天,举首是星罗棋布各种各样的监测卫星、通信卫星,低头是密如蛛网的电视电话网、Internet,它们才是真正的“千里眼”和“顺风耳”;因为有了这些“千里眼”和“顺风耳”,偌大的地球变成了一个小村庄,村庄东“家”发生的事,不出几秒钟,西“家”就能耳闻目睹、了如指掌,真正实现了“秀才不出门,全知天下事”。再如,当前迅猛发展日趋成熟的纳米技术、克隆技术、基因控制技术等,100 多年前即使最乐观最富于想像的预言家也不敢想像,今天却已经渗透到我们的日常生活、已经改变了并且正在更深入地改变着世界的面貌。凡此种种,都建立在机械设计制造及控制技术的基础上,但它们反过来又极大地促进了机械设计制造及控制技术的发展。的确,100 多年前的机电产品不仅品种稀、功能少,而且耗能大、效率低,控制方式也极为落后。而今天,机电产品种类之多可谓无所不有,应用之广可谓无孔不入,产品的功能也实现了数控化、柔性化、集成化、自动化和智能化,真正延伸、加强、扩大甚至在一定程度上取代了人的许多能动作用。

从 18 世纪 70 年代蒸汽机问世以来,机械工程和 control 工程两大学科就一直形影不离、相得益彰、相互促进、共同发展。任何机电产品都离不开控制,控制离开机电产品也就成了无源之水、无本之木。今天,自动控制已成为许多机电产品的控制方式,大到航天飞机、航空母舰,小到电动玩具、电子手表等,都离不开自动控制。机电产品功能的数控化、柔性化、集成化、自动化和智能化也正是建立在自动控制技术基础之上的。

作为自动控制技术的结晶,自动控制理论是一门重要的技术学科,学习和掌握这门学科的基本理论和知识,对于当今的机械和电器工程师来说无疑是十分必要的。同时,自动控制理论还是一门卓越的自然辩证法。它在研究论证和分析处理问题的过程中,时时处处贯穿着系统的观点、运动的观点、内因外因的观点、事物相互作用相互联系的观点、主要矛盾和次要矛盾的观点等等,闪烁着辩证法的光芒。这些对于启迪人们的思想,培养和提高人们分析问题和解决问题的能力是十分有益

的。因此,现在自动控制理论不仅是高等院校自动化和电子信息类专业本专科学生的必修课,也是机械类专业本专科学生的必修课。本书正是基于这样的背景编写的。

本书在取材上着重于成熟而又不过时的有较高理论和应用价值的基本原理和方法,为便于课堂讲授和读者自学,在分析论证中力求阐明概念的内在哲理和原理的数学逻辑,在论述中力求条理清晰、重点突出、繁简适中、深入浅出、通俗易懂。

本书内容涉及高等数学、积分变换、复变函数、理论力学、电工电子学、测试技术等诸方面的基础理论和知识,读者学习前应基本掌握这些基础理论和知识。

本书由韩致信、袁朗和姚运萍三人合作编著。全书共分10章。其中,第1、8、9、10章由韩致信编写,第2、3、5章及习题由袁朗编写,第4、6、7章由姚运萍编写。全书由韩致信统稿。另外,张洁、葛庆安、冯宜伟、景葵、苗莉等同志参加了本书的文字整理和绘图工作。

本书编写时参阅了有关院校、企业和研究单位的许多技术文献,得到了同行许多专家、教授的支持和帮助,在此谨致谢意。限于编者水平,书中错误和不当之处在所难免,恳请读者不吝赐教。

韩致信

2003年6月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 自动控制的基本控制方式及自动控制系统的组成	5
1.3 自动控制系统的类型.....	11
1.4 控制系统应具备的基本性能.....	13
习题	15
第 2 章 控制系统的数学模型	17
2.1 系统的微分方程.....	18
2.2 系统的传递函数.....	32
2.3 系统的结构图及其等效变换.....	43
2.4 系统的信号流图及梅逊公式.....	54
习题	59
第 3 章 控制系统稳定性的时域分析法	62
3.1 稳定性定义.....	62
3.2 判定线性系统稳定性的基本准则.....	66
3.3 代数稳定性判据.....	70
习题	80
第 4 章 控制系统的瞬态响应	81
4.1 有关时间响应的基本概念和典型实验信号.....	81
4.2 一阶系统的瞬态响应.....	85
4.3 二阶系统的瞬态响应.....	88
4.4 高阶系统的瞬态响应	104
习题.....	114
第 5 章 控制系统的误差分析	115
5.1 有关稳态误差的基本概念	116
5.2 典型控制信号作用下系统的给定稳态误差和稳态误差系数	118
5.3 系统的无差度	124
5.4 动态误差系数	128
习题.....	130

第 6 章 控制系统的频率特性	132
6.1 有关频率特性的基本概念	132
6.2 幅相频率特性曲线图	139
6.3 对数频率特性曲线图	154
6.4 闭环系统的频率特性	170
6.5 最小相位传递函数与最小相位系统	174
6.6 传递函数实验确定法	178
习题	186
第 7 章 控制系统稳定性的频域分析法	189
7.1 奈魁斯特稳定性判据	189
7.2 奈魁斯特稳定性判据的推论	207
7.3 系统的相对稳定性	214
7.4 时域性能指标与频域性能指标间的关系	220
习题	223
第 8 章 控制系统的综合与校正	225
8.1 系统综合与校正的基本概念	225
8.2 基本控制规律及常用校正装置	236
8.3 串联校正	252
8.4 反馈校正	273
8.5 顺馈校正与复合控制系统	282
习题	286
第 9 章 根轨迹法	289
9.1 有关根轨迹的基本概念和绘图规则	289
9.2 控制系统的根轨迹分析	308
9.3 控制系统的根轨迹综合与校正	312
习题	325
第 10 章 离散控制系统	327
10.1 有关离散控制系统的基本概念	327
10.2 z 变换及其反变换	338
10.3 离散系统的数学模型	348
10.4 离散系统的稳定性分析	356
10.5 离散系统的稳态误差分析	365
10.6 离散系统的动态性能分析	368
习题	375
参考文献	378

第1章 绪 论

1.1 引 言

本书主要讨论机电设备自动控制系统的一般分析和综合方法及基本理论。

所谓自动控制,指的是在没有人直接参与的情况下,利用控制器自动调节和控制机器设备或生产过程(统称为被控对象)的工作状态,使之保持不变或按预定的规律变化这样一种现象。所谓自动控制系统,指的是由一些机电元件或装置以实现自动控制为目标而按照一定的方式和内部联系组合而成的一个整体。例如,能按预先设定的工艺程序自动切削工件,从而加工出预期的几何形状的数控机床和加工中心;能按照预定航迹自动升降和飞行的无人驾驶飞机;能自动将导弹发射并引导到被攻击目标的导弹发射系统和制导系统等,这些都是自动控制系统。

我们所处的时代被称为信息技术时代。作为这个时代的脉搏,四通八达连接着地球村千家万户的互联网和电视电话网正在争分夺秒地传送着无穷无尽的信息;用途各异的宇宙飞船正在遨游太空,探索着地球以外宇宙的奥秘;一台台不同类型的发电机组正在不知疲倦地运转着,为人类提供着巨大的电能;一条条形形色色的自动化生产线正在夜以继日地工作着,为人类制造着各式各样的器具物品;星罗棋布于全球各地的地面、海上、空中交通指挥系统正在不分昼夜风雨无阻地为人类站岗执勤,指挥着绵延不断的车流人流和飞机轮船有序流动;还有那一个个千姿百态的工业机器人正在埋头苦干,替人类做着这样那样繁重而危险的生产劳动……这一幅幅画卷是那样的美妙神奇,令人不禁思绪纷纷,感慨万千。回眸沉思,追根溯源,我们不难发现这一切都是建立在自动控制技术基础之上的。事实上,自动控制技术已经渗透到人类社会的各个方面各个角落,它不仅在机械工程、石油化工、交通运输、采矿冶金、电力通信、水利环境、食品纺织等行业得到了极为广泛的应用,而且在生物医疗、影视出版、金融经管等方面也有着十分广泛的应用。可以说当今一切技术领域都离不开自动控制技术,没有自动控制技术就没有现代文明。

自动控制技术之所以能有如此广泛的应用,那是因为它可使生产过程具有高度的准确性,能有效地提高产品的性能和质量并同时节约能源和降低材料消耗;能极大地提高劳动生产率并同时改善劳动条件和减轻人的劳动强度;能有效提高各种武器装备的命中率、增强攻击能力等。

作为自动控制技术的载体,自动控制系统广泛存在于国民经济的各行各业、方

方面面。由于用途的不同,这些系统的物理结构和组成各种各样,千差万别。但另一方面,它们又有一个共同特点,那就是系统内部一个(或一些)物理量自动地按照另一个(或另一些)物理量的变化而变化,或者更确切地说,是系统内部的一个(或一些)物理量按照预定的方式自动地控制另一个(或另一些)物理量,使之保持不变或按照期望的方式变化。这种用一个(或一些)物理量按照预定的方式自动地控制另一个(或另一些)物理量使之保持不变或按照期望的方式变化的普遍规律是自动控制技术的精髓,研究和表述这种普遍规律的理论体系就是自动控制理论。

自动控制理论不仅本身是一门重要的学科,而且还是一门卓越的方法论。它以系统的观点、运动的观点(体现于动态方程及其解)、内因外因的观点(传递函数和状态变量是内因,控制作用是外因)、事物相互作用相互联系的观点(系统内部状态变量之间的相互作用和相互联系)来分析、研究和解决问题,这种思想方法是唯物辩证方法,具有普遍意义。正因为此,它一经建立便迅速发展并很快渗透到其他学科,派生出许多新型边缘学科,如生物控制论、经济控制论、社会控制论、信息论等。

自动控制理论作为一门独立的学科,始于20世纪40年代。

早在北宋王朝时期(约1086~1089年)我国人民就发明了具有反馈控制作用的自动调节系统——水运仪像台,可以说这是人类历史上最早的自动控制系统。不过现在被世界公认的最早的自动控制系统是瓦特(J. Watt)于1784年左右发明的控制蒸汽发动机速度的飞球调节器。1868年,麦克斯韦(J. C. Maxwell)在伦敦皇家学会会议录(Proceedings of the Royal Society of London)第十六卷上发表了“论调节器”一文,系统分析了飞球调节器的动态性能。一般认为这是正式发表的有关反馈控制理论的第一篇论文。正因为此,麦克斯韦被许多人看做是控制理论的奠基人。尔后不久,赫尔维茨(Harwith)于1875年、劳斯(E. J. Routh)于1884年、李雅普诺夫(Ляпунов)于1892年先后经严格的数学分析分别提出了几个重要的稳定性判据,为调节理论的发展做出了重要贡献。也就在这一时期,自动控制技术才开始被广泛应用于工业生产控制和武器控制等方面。

20世纪二三十年代,受电信工程技术实践的大力推动,自动控制理论有了进一步的发展。1932年奈魁斯特(H. Nyquist)提出了有关频率响应的稳定性分析方法。随后波德(H. W. Bode)等人也在频率响应理论方面进一步做了研究,提出了一些在频域内描述和分析系统的新方法,使频率法趋于完善。

第二次世界大战大大推动了自动控制技术和理论的发展。由于战争的需要,各主要军事国家都在全力以赴研制飞机、火炮、舰船、雷达等的新型控制器,以提高控制精度,增强进攻能力。控制技术的迅速发展进一步丰富了人们的认识,同时战争形势对先进控制技术的迫切要求又促使人们去寻找新的理论分析方法,这有力地推动了自动控制理论的发展。战后不久,1950年伊万斯(W. R. Evans)提出了根轨迹法,创建了用微分方程模型分析系统的整套方法。至此,以频率响应法和根轨迹

法为主要内容的自动控制理论就作为一门独立的学科诞生了。现在一般把这些理论称为经典控制理论。

20 世纪 50 年代,自动控制理论和技术被广泛应用于化工、炼油、冶金等民用生产行业,出现了许多用以调节和控制生产过程中的温度、压力、流量、密度、速度等物理量的自动控制系统,取得了十分显著的经济效益。同时控制装置也进一步规范化,产生了许多通用控制装置,气动和电动 PID 调节器即是典型的例子。伴随着这一过程,随机过程控制、采样控制和非线性控制等方面的技术实践和理论研究也有了进一步发展。

20 世纪 50 年代末 60 年代初,由于冷战的原因,以美国和前苏联为首的东西方两大军事集团为了争夺战略优势,都斥巨资发展宇航技术和导弹技术。与一般生产过程相比,航天器和导弹所需的控制更为复杂、更为精确。面对这样的系统设计要求,经典控制理论就显得无能为力了。主要原因如下:

(1) 航天器和导弹涉及的控制问题多为强非线性问题和时变问题,而经典控制理论一般来说只能分析研究线性定常问题,无法精确处理非线性问题和时变问题。

(2) 航天器和导弹涉及的控制问题一般为多输入-多输出问题,而经典控制理论只能分析研究单输入-单输出系统,无法处理多输入-多输出问题。

(3) 航天器和导弹涉及的控制问题是最优控制问题(如最少燃料问题、最短时间问题等),而用经典控制理论进行系统设计的过程是试探渐进过程,设计效果与设计者的经验密切相关,难以达到最佳设计。

另外,还有最佳滤波问题、系统辨识问题等都是用经典控制理论难以圆满解决的。

这些新的控制问题的出现,迫使人们把注意力转向新的研究领域。此时恰逢数字计算机软硬件技术日趋成熟,计算机强大的数据运算和处理能力,为求解复杂的线性和非线性高阶微分方程提供了强有力的工具,于是人们自然而然地想起了适合于计算机求解的分析力学中的状态空间描述法,并把它与计算机算法结合起来,创立了一些新的理论方法,如线性系统的状态空间理论、最佳滤波理论、最优控制理论、系统辨识理论等。以这些理论为基本内容的理论体系,今天被称为现代控制理论。

现代控制理论是以前苏联学者庞特利亚金(Л. С. Понтрягин)于 1956 年提出的极大值原理和美国学者贝尔曼(R. L. Bellman)于 1957 年提出的动态规划及美国学者卡尔曼(R. E. Kalman)于 1960 年提出的卡尔曼滤波理论为基本理论发展形成的。经过半个世纪的发展,现代控制理论已经形成了一个庞大的体系,除以上介绍的各个理论以外,还有其他很多分支,如自适应控制理论、非线性控制理论、时变系统理论、分布参数理论、大系统理论、随机控制理论、鲁棒控制理论、智能控制和

混沌控制理论等。它们相对独立自成体系,又互相联系互相渗透。

把经典控制理论与现代控制理论做一比较,不同之处大致如下:

1) 适用对象不同

一般来说,经典控制理论只适用于单输入-单输出线性定常系统,而现代控制理论则适用于线性和非线性、定常和时变、单变量和多变量、连续和离散等系统。显然,现代控制理论的适用性比经典控制理论的适用性更广泛。

2) 采用的数学工具不同

在经典控制理论中,使用的数学模型主要是传递函数,处理问题的数学工具主要是拉普拉斯(Laplace,简称拉氏)变换。而在现代控制理论中,使用的数学模型主要是状态空间动态方程,处理问题的数学工具主要是微分方程理论和矩阵理论。

3) 研究方法不同

在经典控制理论中,分析和研究系统动态特性所用的主要方法是频率法,主要工具是各种图表,如奈奎斯特曲线、波德图、尼柯尔斯(Nichles)图、根轨迹图、劳斯表等。而在现代控制理论中,分析和研究系统动态特性所用的主要方法是时域法(即状态空间法),主要工具是计算机算法。

4) 系统综合的过程和效果不同

所谓系统综合简单地说就是系统构造,其任务是寻求满足设计指标要求的控制规律,以便在理论上构造出一个在物理上能实现的控制系统。系统综合构成了系统方案的基本内容。

运用经典控制理论进行系统综合的过程是不断试探、渐进完善的过程,系统综合的效果与设计者的经验密切相关,一般只能得到比较理想的结果,难以实现最优综合。而运用现代控制理论进行系统综合的过程是计算机按一定算法进行的寻优过程,系统综合的效果主要与计算机算法有关,因而可实现最优综合。

5) 所用的控制器不同

运用经典控制理论进行系统综合时,所用的控制器一般是能实现典型控制规律的调节器,而运用现代控制理论进行系统综合时,所用的控制器是能实现任意控制规律的数字计算机。

应当指出,现代控制理论在宇航和导弹技术中的应用是卓有成效的,这种成就自然吸引了从事工业过程控制设计和研究工作的工程师们的注意,然而当把这些理论应用于工业过程控制的设计和研究时,效果并不像人们所期望的那样理想,主要原因是:

(1) 工业过程的数学模型很难建得准确;

(2) 控制对象的性能指标往往难以用明显的数学形式表达;

(3) 设计的控制器往往过于复杂,甚至在物理上不可实现。

面对这些问题,人们又想起了经典控制理论的频率法。20世纪70年代,英国

学者罗森布洛克(Rosenbrock)以状态空间和矩阵代数为基础,把具有强关联的多输入-多输出系统的设计问题转化成若干个单变量系统的设计问题,建立了多变量系统频域设计方法。这种方法的优点在于:不要求建立精确的数学模型,容易满足工程上的限制条件;设计出的控制器既能满足系统指标要求,又结构简单,易于物理上实现。因此,这一方法很受熟悉单变量系统频率法的工程技术人员的欢迎。

这一事实表明,现代控制理论的产生和发展不是对经典控制理论的否定,也不意味着经典控制理论已经过时了。相反,现代控制理论不仅是在经典控制理论的基础上发展起来的,而且它的一些概念和方法还直接引自经典控制理论,如传递函数矩阵和极点配置等,因此掌握经典控制理论是学习现代控制理论的必要准备。工程上有相当数量的控制系统并不需要实现或者难以实现最优控制,大多数控制问题尽管它本身是非线性的,但经合理抽象和简化把它当作线性问题来处理,也能得到很好的效果。这就为经典控制理论提供了广阔的应用天地。更为重要的是,运用经典控制理论设计的系统一般要比运用现代控制理论设计的系统简单,因而成本也更为低廉。作为控制理论的基础性教材,本书的内容将限于经典控制理论。

1.2 自动控制的基本控制方式及自动控制系统的组成

自动控制的基本控制方式有三种,即开环控制方式、闭环控制方式、复合控制方式。

1.2.1 开环控制

图 1-1(a)所示为由电位器、放大器 FD、触发器 CF、晶闸管整流装置 KZ、直流电动机及工作机组成的某速度控制系统原理图。该系统的任务是控制工作机的转速使之保持期望值。其工作原理如下:

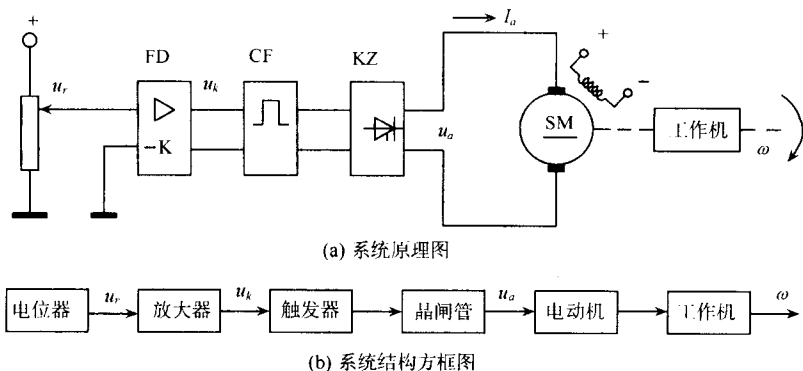


图 1-1 开环速度控制系统

工作机转速 ω 的大小取决于电动机的转速,电动机的转速又取决于其电枢电压 u_a ,电枢电压 u_a 由晶闸管整流装置 KZ 提供,其大小可通过调节触发器 CF 的控制电压 u_k 来改变,而 u_k 是放大器的输出电压,其大小正比于电位器电压 u_r 。由于各元件的输入和输出特性是一定的,所以,归根结底,工作机的转速 ω 取决于电位器电压 u_r 。当 u_r 一定时, ω 也是一定的,欲改变 ω ,只需改变 u_r 。 u_r 和 ω 之间有一一对应关系。该系统的被控制对象是工作机,称为被控对象,被控制的物理量是工作机转速 ω ,称为系统的被控量(也称输出量或输出信号);用来控制 ω 变化的原始物理量是电位器电压 u_r ,它是预先给定的系统输入电压,称为系统的参考输入量(也称输入量或输入信号或控制信号);产生输入量的电位器称为输入元件或给定元件。

根据工作时信号的传输过程,上述工作原理可用如图 1-1(b)所示的结构方框图表示。图中的方块表示构成系统的元件(或装置)及其特性,矢线表示系统中的信号(即物理量)及其传递方向。从该图可以看出,在这个速度控制系统中,信号的传递是单方向的,只存在输入端对输出端的顺向作用,而没有输出端对输入端的反作用。这样的控制称为开环控制,相应的系统称为开环控制系统。

开环控制系统的优点是结构简单,容易实现且便于调整,缺点是抗干扰能力差。系统内部扰动(如组成元件因摩擦发热而产生的性能漂移)和外部扰动(如工作机负载的变化)都会引起实际输出量偏离期望值。一旦输出量偏离了原期望值,系统本身无能力纠正,只有通过重新调整输入量来纠正。因此,开环控制系统的控制精度取决于系统的校准精度及其保持校准值的能力。

开环控制系统在国民经济的各个部门有着广泛的应用,如自动售货机、自动洗衣机、产品生产流水线、数控车床以及用于交通指挥的红绿灯控制系统等都是开环控制系统。

1.2.2 闭环控制

图 1-2(a)所示系统是在图 1-1(a)所示系统的基础上引进直流测速发电机和反向串接电路而成的,其任务也是控制工作机的转速 ω 使之保持期望值。该系统的参考输入量也是电位器电压 u_r ,输出量仍是工作机转速 ω ,工作原理如下:

测速发电机的轴固联于工作机轴上,当工作机轴旋转时,测速发电机的电枢两端产生一个正比于转速 ω 的电压 u_ω ,该电压被传输到输入端与输入电压 u_r 反向串联形成差电压 $\Delta u = u_r - u_\omega$, Δu 送入放大器放大后变为 u_k , u_k 的大小决定着电动机电枢电压 u_a 的大小, u_a 使电动机旋转,电动机驱动工作机做功。与图 1-1 开环速度控制系统不同,这个控制系统能抑制系统内部扰动和外部扰动对被控量的影响,当被控量的实际值因受内外扰动作用而偏离期望值时,系统就自动进行调节,以使其重新趋于期望值。例如,假设系统的参考输入量(电位器电压)为 u_r ,与 u_r 对应的输

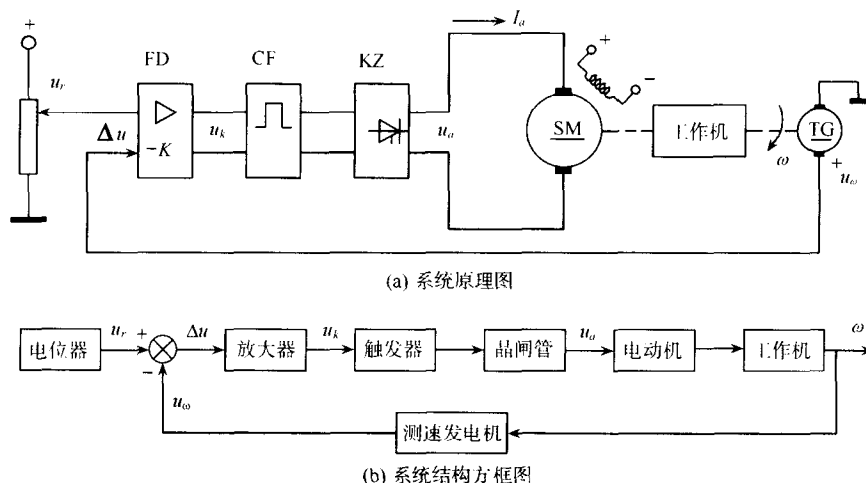


图 1-2 闭环速度控制系统

出量(工作机转速)为系统输出量的期望值 ω , 如果系统内外扰动导致实际输出量 $\tilde{\omega}$ 大于期望值 ω , 则测速发电机电压 u_ω (u_ω 正比于 $\tilde{\omega}$) 将会随之增大, 当 u_ω 增大时, 电压差信号 $\Delta u = u_r - u_\omega$ 就减小, Δu 一减小, 触发器控制电压 u_k , 进而晶闸管整流电压 u_a 就随之减小。因 u_a 是电动机电枢电压, 所以 u_a 的减小必然使电动机转速下降。这一调节过程不断进行, 直到工作机转速重新趋于期望值 ω 为止。反之, 如果内外扰动使实际输出量 $\tilde{\omega}$ 小于期望值 ω , 则测速发电机电压 u_ω 将会随之减小, 从而电压差信号 $\Delta u = u_r - u_\omega$ 将增大, 进而触发器控制电压 u_k 和电动机电枢电压 u_a 也将随之增大, 于是电动机转速将上升。这一调节过程不断进行, 直到工作机转速重新趋于期望值 ω 为止。由此可见, 只要实际输出量 $\tilde{\omega}$ 不等于期望值 ω , 系统就自动进行调节, 以使其朝着期望值的方向变化。同时, 从上述调节过程可以看出, 在该系统中, 真正起控制作用的信号已不再是输入量本身 u_r , 而是由输入量 u_r 和正比于输出量 ω 的测速发电机电压 u_ω 两者形成的差电压 Δu 。

从信号的传输过程来看, 上述工作原理可用如图 1-2(b)所示的结构方框图表示。图中, 图形符号 $\otimes$ 表示反向串联电路, 正负号表示两个叠加信号极性相反。从该图可以看出, 在这个速度控制系统中, 输入端对输出端有顺向作用, 而输出端对输入端有反向作用。换言之, 信号的传递不再是单方向的, 而是从输入端传输到输出端, 又从输出端传输到输入端, 形成了一个封闭的环链。这样的控制称为闭环控制, 相应的系统称为闭环控制系统。

在闭环控制系统中, 输出端对输入端的反向作用称为反馈, 从输出端引出并直

接或经变换后传输到输入端去的信号称为反馈信号。由输入信号和反馈信号反向叠加后形成的信号称为偏差信号(图 1-2 闭环速度控制系统的偏差信号为 Δu)。偏差信号通常是由被称为比较元件的电路或机构产生的。由于闭环控制是以信号反馈为前提的,故闭环控制和闭环控制系统又有反馈控制和反馈控制系统之称。

在闭环控制系统中,真正起调节作用的信号已不再是输入量,而是偏差信号。这一点和开环控制系统有着明显的不同。闭环控制系统的最大优点是能抑制系统内部扰动和外部扰动对被控量的影响,使被控量保持在期望值上。换言之,闭环控制系统具有自动纠正输出量偏离期望值的能力。正因为如此,在闭环控制系统中,用精度较低的元件实现精度较高的控制是完全可能的,而这在开环系统中是无法实现的。

闭环控制系统的缺点是使用的元件多、线路复杂、成本高,系统分析和综合也比较麻烦,若参数选配不当,系统还可能会因为振荡不稳定而无法正常工作。由于真正起控制作用的信号是偏差信号,系统要调节就必须有偏差存在,所以实际输出量一般不可能与由输入量和控制律规定的期望值完全保持一致,只能趋于期望值。也就是说输出量的实际值与期望值之间是有误差的。这种误差完全是原理性的,不是因为系统受到内部或外部扰动而产生的。

一般来说,当系统元件本身的参数稳定性能满足控制精度要求而又没有外部扰动作用且系统的输入量能够预先确定时,多采用开环控制;否则,如果或者系统元件参数不稳定,或者存在外部扰动,或者系统的输入量无法预先确定,则采用闭环控制。

1.2.3 复合控制

复合控制是一种将开环控制和闭环控制结合在一起的一种控制方式,具有这种控制方式的系统称为复合控制系统;或者说复合控制系统是在闭环控制系统的基础上再附加一条开环控制通路而形成的一种控制系统。典型的复合控制系统的结构图如图 1-3 所示。在这种控制系统中,附加的开环控制通路的作用主要是提供一个输入补偿量,以补偿由闭环系统的原理性误差或内外扰动引起的控制精度的不足,并同时改善系统的动态性能。正因为如此,通常将引进的附加装置称为补偿装置。按照补偿对象的不同,补偿方式分为按输入量的补偿[参见图 1-3(a)]和按扰动量的补偿[参见图 1-3(b)]两种。前者的补偿作用主要是给输入量提供一个补偿量以减小或消除存在于闭环系统的原理性误差,后者的补偿作用主要是事先给扰动量提供一个补偿量以减小或消除扰动对输出量的影响。

复合控制系统具有控制精度高、动态性能好的优点,应用十分广泛。目前,在火炮、雷达、飞机自动驾驶仪等对控制精度和动态性能二者同时要求较高的控制系统中,一般都采用复合控制。

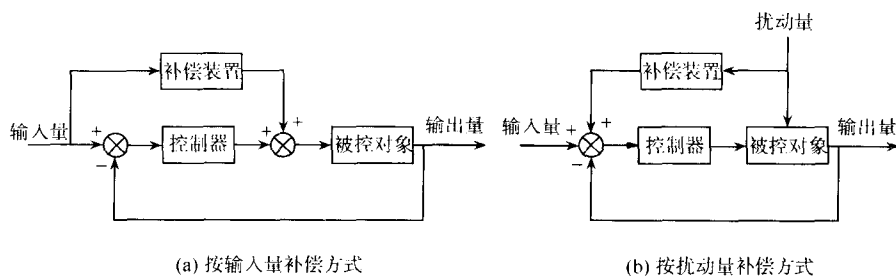


图 1-3 复合控制系统结构图

1.2.4 自动控制系统的组成

1) 系统的基本组成

如前所述,自动控制系统广泛存在于国民经济的各行各业。由于用途的不同,这些系统的组成千差万别,因此具体地讨论自动控制系统的组成既无可能、也无意义。这里我们撇开组成系统的元件的具体内容和个体形式,只按照元件在系统中的职能特点来介绍一下自动控制系统的基本组成。

任何一个自动控制系统,不论是电气的还是机械的,不论是简单的还是复杂的,都是由一些基本元件组成的。这些基本元件在系统中的作用及其相互联系可用图 1-4 表示,其职能是:

输入元件(又称给定元件):其职能是产生与输出量的期望值相对应的系统输入量。图 1-2 中的电位器即是该速度自动控制系统的输入元件。

反馈元件:其职能是产生与输出量有一定函数关系的反馈信号。这种反馈信号可能是输出量本身,也可能是输出量的函数。在图 1-2 速度控制系统中,测速发电机是反馈元件。

比较元件:其职能是比较由给定元件给出的输入信号和由反馈元件传来的反馈信号,并产生反映两者差值的偏差信号。在图 1-2 速度控制系统中,由于给定电

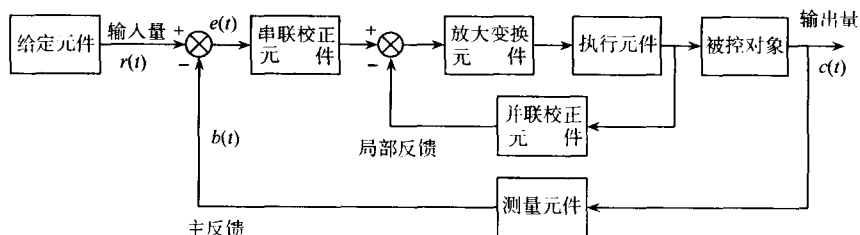


图 1-4 反馈控制系统基本组成

压 u_r 和反馈电压 u_w 都是直流电压,将它们反向串联便可得到偏差电压 Δu ,故该系统的比较元件仅仅是一反向串联电路。

放大变换元件:其职能是将比较元件给出的偏差信号进行放大并完成不同能量形式的转换,使之具有足够的幅值、功率和信号形式,以便驱动执行元件去控制被控对象。由电子管、晶体管、集成电路、晶闸管等组成的电压和功率放大器是常用的电压偏差信号的放大元件,电液伺服阀是把电能变换为液压能并对其进行放大的能量变换和放大元件。

执行元件:其职能是直接驱动被控对象运动,以使被控量(即系统输出量)发生变化。常用的执行元件有电动机、液压马达、液压缸等。

被控对象:就是控制系统所要操纵和控制的对象。在图 1-2 速度控制系统中,被控对象是工作机。

校正元件(又称校正装置):其职能是校正系统的品质特性使之达到技术指标要求。

在工程实际中,比较元件、放大元件及校正元件常常合并在一起形成一个装置,这样的装置一般称为控制元件或控制器。

2) 控制系统的基本变量及表示符号

视系统构成的不同和研究问题的角度不同,控制系统的变量也是举不胜举的,有些具有物理意义(亦即是物理量),有些只具有数学意义没有物理意义(亦即是纯数学量)。这里撇开变量的具体类型、结合图 1-4 简要介绍一下控制系统的基本变量及其意义。

输入信号(又称输入量或给定量、控制量或控制信号) $r(t)$:为控制输出量按预定规律变化必须提供给系统的物理量。

输出信号(又称输出量或被控量) $c(t)$:与输入信号存在一定函数关系的物理量,其变化规律是系统控制的对象,必须按规定的方式变化。

反馈信号 $b(t)$:输出端对输入端的反向作用(或中间环节对输入端的反向作用和输出端对中间环节的反向作用)称为反馈。从输出端或中间环节引出来并直接或经过变换以后传输到输入端比较元件中去的信号(或者是从输出端引出来并直接或经过变换以后传输到中间环节比较元件中去的信号)称为反馈信号。

反馈信号有正负之分,如果引入比较元件的反馈信号的方向与输入信号的方向相同,那么这两个信号比较(叠加)的结果使控制作用增强了,这样的反馈称为正反馈,反馈信号为正;反之,如果引入比较元件的反馈信号的方向与输入信号的方向相反,则两者比较(叠加)的结果使控制作用减小了,这样的反馈称为负反馈,反馈信号为负。

另外,反馈有主反馈和局部反馈之分。从输出端到输入端的反馈称为主反馈,从中间环节到输入端或者从输出端到中间环节的反馈称为局部反馈。自动控制系