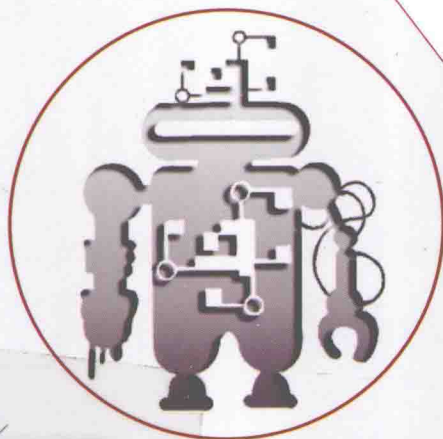




普通高等教育“十二五”规划教材

自动控制原理

张丽敏 陈孝桢 编著



 科学出版社

普通高等教育“十二五”规划教材

自动控制原理

张丽敏 陈孝桢 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书详细讲述了自动控制的基本原理，对常见知识点进行了归纳，力求条理清晰，推导详细。既讲述手工数值计算方法，也介绍 Matlab 分析和综合的示例，以求简化手工数值计算，提高计算的精度和准确性。适当增加电路方面的内容，便于读者分析和设计电路。

本书可作为高等学校电子科学与技术、电子信息类专业的本科生教材，也可供相关专业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理/张丽敏, 陈孝桢编著. —北京: 科学出版社, 2014.1
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-03-039593-1

I. ①自… II. ①张…②陈… III. ①自动控制理论-高等学校-教材
IV. ①TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 011964 号

责任编辑: 李岚峰 / 责任校对: 郭瑞芝
责任印制: 闫磊 / 封面设计: 迷底书装

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>

新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年1月第一版 开本: 787×1092 1/16

2014年1月第一次印刷 印张: 19 3/4

字数: 496 000

定价: 45.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

编者在南京大学电子科学与工程学院给本科生和成教生讲授自动控制原理课程。最初使用的教材是吴麒主编的《自动控制原理》(清华大学出版社出版),同时还参考了其他的自动控制原理教材。这些教材都是很好的教材,但多以机电系统为控制对象,而编者的学生是电子信息类专业,不是自动控制专业。在教学中编者有如下体会:①自动控制原理教材中所述的系统与理论不仅仅是对机电系统而言的,对所有系统都可以进行分析与设计。例如,吴麒主编的《自动控制原理》中提到的生态系统,又如经济学中的货币控制等。在电子系统中十分普遍地使用了系统理论。国内现有的电路教材,由于电路课多数安排在低年级讲授,大都从技术上叙述电路中的反馈。若用控制系统理论分析电路中的反馈,可以更进一步认识反馈的原理、放大电路稳定与否的原因等,有利于分析和设计电路。所以,在自动控制原理中应增加关于电路的内容。②自动控制原理是一门涉及较多数理基础、带有一定综合性的课程。它要求读者已经学习常系数线性常微分方程、状态方程、线性代数、复变函数、信号与系统、电子技术基础等前置课程。在自动控制原理课程中,对于上述内容不是简单地孤立使用,而是被用来作为基础,并由此导出新的相对独立的自动控制原理方面的知识。读者通过本书的学习,不仅可以学到自动控制原理方面的知识,而且还能够提高基于已学知识学习新知识的能力。基于这样的想法,编写了这本自动控制原理教材。

在教材编写中,除了上述的两点想法外,本书还对自动控制中的常见知识点进行了归纳,力求条理清晰。将讲述的内容与习题连为一体,使读者可通过阅读本书找到求解习题的思路与方法。同时希望通过习题使读者巩固所学知识,锻炼自学的能力。本书既讲述手工数值计算方法,也介绍用 Matlab 分析和综合,以求简化手工数值计算,提高计算的精度和准确性。

本书最初由陈孝桢编写,最初的电子稿由彭勇征、吴淞炎输入。历经约十年,在原电子稿的基础上,张丽敏、陈孝桢对内容做了大量的修改完善,与最初的书稿已有较大的修改。本书配有习题,所有的习题均有详细的题解,可以赠送给任课教师。希望这本书对非自动控制类,尤其是电子信息类的读者有所帮助。

编 者

2013 年 12 月

目 录

前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 自动控制科学与技术发展的历史回顾	1
1.3 控制系统分类举例	4
1.4 反馈控制系统的组成	8
1.5 本书特点及对读者的建议	9
第 2 章 控制系统的数学描述	11
2.1 用常系数线性常微分方程描述单输入、单输出线性时不变控制系统	11
2.2 常微分方程的解	20
2.3 用传递函数描述线性控制系统	29
2.4 动态结构框图	36
2.5 典型激励信号	48
2.6 基本单元	50
2.7 利用 Matlab 的 Simulink 对系统进行仿真	53
习题	63
第 3 章 控制系统的时域分析	67
3.1 控制系统的稳定性	67
3.2 控制系统的动态特性	81
3.3 控制系统的稳态误差	97
3.4 举例	108
3.5 高阶系统的时域分析及其简化	122
习题	133
第 4 章 控制系统的根轨迹分析	137
4.1 根轨迹	137
4.2 根轨迹的角条件和模条件	138
4.3 绘制根轨迹的基本规则	139
4.4 举例	148
4.5 控制系统的根轨迹分析	163
习题	168
第 5 章 控制系统的频域分析	170
5.1 频率特性函数	170
5.2 频率特性的函数图像 1——Nyquist 图	174
5.3 Nyquist 稳定判据	181
5.4 频率特性的函数图像 2——Bode 图	189

5.5	稳定裕量	204
5.6	闭环频率特性	211
5.7	系统频率特性与闭环阶跃响应的关系	215
	习题	218
第 6 章	单输入单输出线性系统的校正与综合	221
6.1	概述	221
6.2	以二阶模型为综合目标的串联校正	222
6.3	顺馈校正	238
6.4	根轨迹校正	247
6.5	利用 Bode 图校正控制系统	259
	习题	272
第 7 章	非线性控制系统分析	275
7.1	非线性控制系统的基本概念	275
7.2	小信号微变线性化分析法	279
7.3	描述函数分析法	281
7.4	相平面分析法	294
	习题	307
	参考文献	310

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

所谓自动控制,就是在没有人直接参与的情况下,使受控对象或过程自动地按照人预先要求的规律运动。这里“运动”泛指一切物理量随时间的变化。

人们在日常社会生产生活活动中,都期望尽可能地实现自动控制。20 世纪以来,随着科学技术的发展,自动控制得到了广泛、迅速、长足的发展。目前,自动控制已成为科学研究、军事、工农业生产和日常生活中不可缺少的组成部分,而且其原理也越来越多地应用于社会学、经济学、生态学等领域。

自动控制是一门应用性的学科。它包括科学原理和工程技术。它总是与具体受控物理量紧密联系,与具体工程技术紧密联系,与自动控制元件紧密联系。同时,它又有建立在数学描述基础上自成体系、抽象的基础理论,即自动控制原理。因此,它的内容十分广泛、丰富。“自动控制科学与技术”是对自动控制所涉及的所有内容的总称。图 1.1.1 中虚线包围的部分给出了自动控制原理包含的内容。

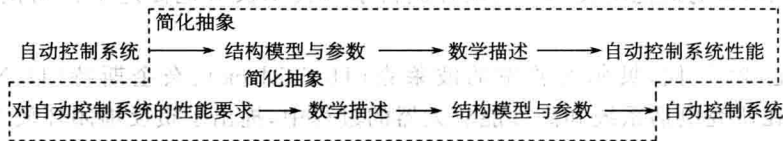


图 1.1.1 自动控制系统分析与设计过程示意图

1.2 自动控制科学与技术发展的历史回顾

自动控制科学与技术是在现代科学与技术进步发展过程中逐步形成、独立起来的一门科学与技术。自动控制科学与技术发展历史的内容十分广泛,不同的教科书有不同的观点和叙述方式。以下所述内容,仅仅是为了让读者了解粗略的概况。

许多教科书认为,第一个著名的现代控制系统是 1769 年瓦特(J. Watt)设计的蒸汽机离心调速器,如图 1.2.1 所示。离心调速器利用旋转质量产生的离心力,调节蒸汽进汽阀,使蒸汽机的转速稳定在人设定的转速上,而不因负载变化而变化。但这个装置在运行过程中有时会自激。

1868 年,麦克斯韦(J. C. Maxwell)用常系数微分方程描述了“离心调速器-蒸汽机-负载”系统,成功地解决了自激问题。

1880 年,罗斯(E. J. Routh)提出了自动控制系统稳定性的代数判据。这个判据至今仍被广泛使用。

1834 年,亚哥比(C. G. Jacobi)设计出了第一台可供使用的直流电动机。1871 年麦尔准发明了交流发电机。1888 年,多布罗勿斯基研制出了交流三相异步电动机。电力的优点和社会

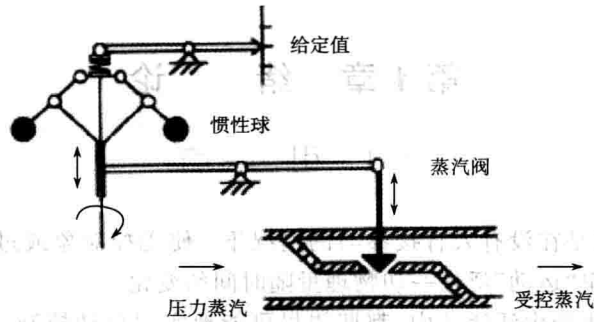


图 1.2.1 蒸汽机离心调速器示意图

的需求,极大地刺激了发电与用电自动化的研究和发展。在其后很长一段时间内,电磁式元件在自动控制系统中一直占据着十分重要的位置,直到现在仍广泛使用。

1906年,安修斯(H. Anschuty)造出了第一台可用于航海的陀螺罗经。1910年,斯伯里(E. A. Sperry)在结构上对其进行了改进。他们提出的原理一直使用至今。陀螺罗经是自动航向测量元件,以它为核心构成的各种用途的自动驾驶仪,目前仍广泛使用。

1913年,福特汽车公司出现了第一条自动化汽车装配流水线。它应用了许多当时已取得的自动控制技术,如电机拖动技术。自动控制科学与技术极大地促进了自动化生产流水线的发展。

在20世纪30年代,贝尔实验室的波莱克(H. S. Black)、奈奎斯特(H. Nyquist)、伯德(H. W. Bode)在研究电话系统和高性能放大器的过程中,提出了负反馈闭环放大器理论、奈奎斯特稳定判据和基于对数频率特性图(即Bode图)的频域分析法。这些理论不仅极大地推动了电子技术的迅速发展,而且也成为自动控制科学与技术的重要组成部分。

1948年,伊万思(W. R. Evans)提出了分析、设计自动控制系统的根轨迹法。它使闭环特征根随开环参数变化的趋势变得十分清晰。

人们普遍认为,至此,基于常系数线性常微分方程的时域分析法、频域分析法和根轨迹分析法的经典自动控制原理已基本形成。经典自动控制原理是以模拟量、单输出为主要特征的。

进入20世纪50年代以后,随着电子技术和信号处理理论与技术的迅速发展,自动控制科学与技术得到了更充足充分的发展。1958年,英格贝格(J. Engelberger)和戴弗(G. Devol)造出了第一个工业机器人。1969年出现了用于自动控制的微处理器。1970年以后,计算机开始广泛地进入控制系统。

在理论方面,最值得提出的是状态变量分析法。在经典自控原理中,用一元 n 阶微分方程描述 n 阶系统。它只能描述单输出系统,或者说,它只能观察一个系统变量的状态。在状态变量分析法中,用 n 元一阶微分方程组描述 n 阶系统,它能够描述多输入、多输出系统。或者说,它能同时观察、改变系统中所有的 n 个独立变量的状态。现代高效准确的计算机矩阵运算算法促使了状态变量分析法的广泛应用。

自动控制系统中有变量为离散量,就称其为离散控制系统。将微处理器和计算机引入自控系统,就称其为计算机控制系统。考虑控制系统中元件的非线性,就称其为非线性系统。将信号处理技术引入自控系统,由此产生了许多新的名词,如自适应控制系统、模糊控制系统、自

治控制系统等等。

人们把近六十年来出现的自动控制理论称为现代控制原理。

经典自动控制原理是控制理论的基础,而且至今仍然有很大的直接的实用性。现代自动控制原理是用于分析设计更复杂、功效更强、性能更好的控制系统的理论,它的基础是经典自动控制原理。因此,无论是经典自动控制原理还是现代自动控制原理,都是自动控制原理不可缺少的部分。

自动控制系统往往由多个不同的物理系统组成,如力学系统、电学系统等。对控制系统简化、抽象,可得到自动控制系统的数学描述。通过对数学描述的分析,可以得到对所需物理量运动的描述。在对数学描述的分析过程中,常常不再必须考虑不同物理量的各自特性以及它们之间物理上的关系,因此,可以建立起机电一体化系统的统一的数学描述和对数学描述的分析。更令人兴奋的是,对人类社会中的其他系统(如经济系统、生态系统等)的分析控制也完全可以用类似上述的方法,即简化抽象、建立数学描述,再依据数学描述进行分析,得到所需指标的变化情况。因此,自动控制原理已不再局限于物理系统,目前它已广泛地被应用到各种各样的其他系统中。

目前,自动控制原理仍在发展中。一方面,自动控制原理还有一些问题并没有得到圆满解决。例如,非线性系统的稳定性问题。例如,电力网中局部故障,仍有可能使电力网中并没有故障的部分不能正常运行。另一方面,随着社会的不断进步,一定会不断出现新的问题,自动控制原理也一定会随之而面临新的课题。

在现代生活中,人类已无法离开自动控制系统,而且越来越多地依赖它。自动控制系统已渗透到社会的每一个角落,并越来越多地造福于人类。以下仅仅是一些例子。

电力系统是人类至今为止制造出的最大最复杂的自动化系统。在庞大的电力网中要求发电、输配电和无数用电户的用电达到平衡。

在制造业中,自动化生产线(如金属型材生产线、汽车装配生产线、电子电路安装焊接生产线、饮料灌装生产线、自动包装生产线以及化工过程自动化控制等等)极大地提高了生产效率,提高了产品质量,降低了劳动强度,减少了生产成本。

在农业生产中,自动控制系统(如奶牛场普遍使用的自动挤奶机,饲料自动化生产、存储、输送饲喂装置,各种果实自动采摘装置,温湿度、肥力和生长情况自动调节的工业化蔬菜大棚,等等)正日益减轻劳动强度、增强收获量和提高产品质量。

在空中,自动控制系统如自动驾驶仪使飞机能自动起降航行,使无人驾驶飞机完成复杂的飞行使命,使航天器安全准确地遨游太空。在海中,它使航船实现了自动航行;使核潜艇实现了水下环球航行;使水下无缆自治潜器能准确地到达指定海底位置,使它带回的深海海底照片、录像和样品有准确的地理坐标。

在军事上,自动控制系统得到了广泛的应用。例如,射击指挥仪使各种战术武器实现了发射自动化,且命中率大大提高;使远程导弹具有精确打击的能力。

各种各样的机器人正代替人做复杂的、或繁重的、或本来由人承担的危险工作。

在日常生活中,自动售货机、自动取款机已广泛使用。具有自动化功能的器具(如自动洗衣机、变频空调器、自动热水器、电冰箱等等)正越来越多地进入了家庭。

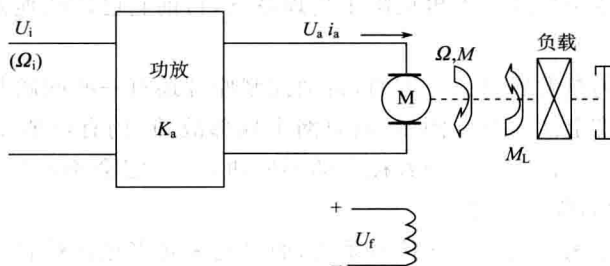
1.3 控制系统分类举例

自动控制系统实现控制的方式是多种多样的。按照不同实现控制的方式进行分类,可以有不同的分类。实际的自动控制系统往往采用多种实现控制的方式。

1.3.1 开环控制系统与闭环控制系统

按控制系统有无反馈分类,可分为开环控制系统和闭环控制系统。

图 1.3.1 为直流电动机转速开环控制系统的示意图。若负载转矩 M_L 不变,选择适当的输入电压 U_i ,就可以得到所需的转速 Ω 。这种控制系统十分简单。但是,若负载转矩发生变化,转速 Ω 也将随之变化。所以这种直流电动机转速开环控制系统只适用于负载恒定不变或基本不变,且系统中的其他参数(如 U_i 等)不受到干扰的场合。



(a) 直流电动机转速开环控制系统组成结构示意图

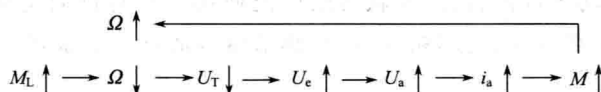


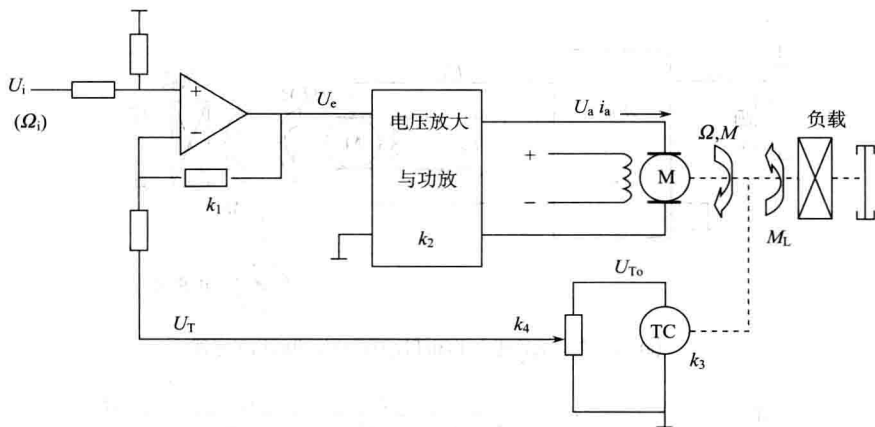
(b) 直流电动机转速开环控制系统示意框图

图 1.3.1 直流电动机转速开环控制系统

普通家用全自动洗衣机的控制系统就是程序控制的开环控制系统。操作者设定洗衣程序,相当于设定了被衣物的洗净程度。洗衣程序设定后,实际洗衣过程将与被洗衣服数量、洗涤剂浓度、被洗衣服洗净程度等无关,只按设定程序运行。

图 1.3.2 为直流电动机转速闭环控制系统的示意图。稳态时,输出转速 Ω 与输入电压 U_i 有一一对应的关系。所以给定 U_i ,就设定了转速 Ω_i 。若负载转矩 M_L 增加,在 M_L 增加的瞬时,电动机转速 Ω 下降;这使得测速发电机(输出电压 U_{T_0} 与输入转速 Ω 呈现线性关系的测量元件)输出电压 U_{T_0} 下降;差动放大器的反相输入电压 U_T 减小,输出电压 U_c 上升;电动机电枢电压 U_a 随之上升,电枢电流 i_a 随之上升;电动机电枢输出转矩 M 上升,输出转速 Ω 上升,从而使电动机转速 Ω 基本回到原先设定的转速。以上叙述可用下列简洁的方式表达。





(a) 直流电动机转速闭环控制系统组成结构示意图



(b) 直流电动机转速闭环控制系统示意框图

图 1.3.2 直流电动机转速闭环控制系统

设计良好的转速闭环控制系统在负载变化较大时,转速变化可以很小。但闭环控制系统比开环控制系统要复杂,若设计不当,闭环控制系统有可能不稳定。不稳定系统是不能正常运行的。

1.3.2 人工闭环控制系统和自动闭环控制系统

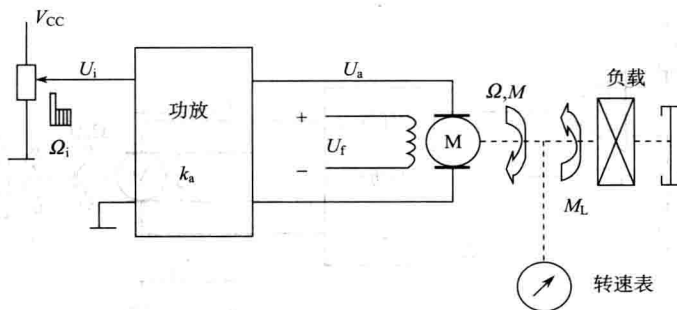
图 1.3.3 为直流电动机转速人工闭环控制系统的示意图。给定转速是在人脑中设定的,眼睛观察转速表,当转速背离设定转速时,用手调整电位器,使电动机转速尽量接近设定值。驾驶汽车、骑自行车、人工操纵火炮瞄准目标等,就是最常见的典型人工闭环控制系统的例子。

人工闭环控制对于操作者往往是十分艰苦繁重的劳动,且控制精度一般较低。对要求精度高、速度变化快的系统,靠人工闭环控制往往是无法达到所需控制性能要求的。

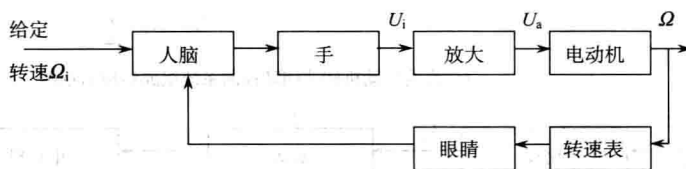
相对于人工闭环控制系统,称图 1.3.2 所示的系统为自动闭环控制系统。

1.3.3 无差控制系统与有差控制系统

图 1.3.4 为简化的直流电动机拖动角位置随动系统示意图。该系统的工作原理是:由人工或其他设备转动电位器组中的滑臂 I 给定所需负载角位置 ψ ;若电位器组滑臂 II 的角位置,即负载的角位置 φ 与 ψ 不同,那么电位器组就输出电压 U_p ; U_p 经放大(包括电压放大和电流放大)输出电压 U_a (U_a 为直流电动机的电枢电压),当电动机电枢电压不为零时,电动机转动,经减速装置带动电位器组滑臂 II 和负载同步转动;正确的极性连接使滑臂 II 与滑臂 I 的角位置差 $(\psi - \varphi)$ 逐步减少;当角位置差 $(\psi - \varphi)$ 为 0 时, $U_p = 0$, $U_a = 0$,电动机停止转动,这时,负载

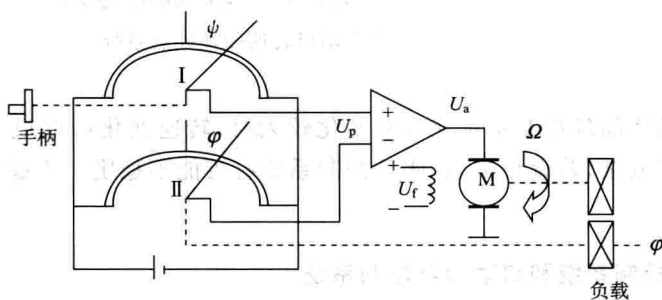


(a) 直流电动机转速人工闭环控制系统组成结构示意图

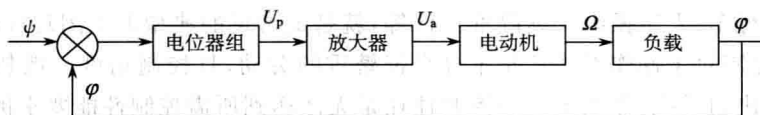


(b) 直流电动机转速人工闭环控制系统示意框图

图 1.3.3 直流电动机转速人工闭环控制系统



(a) 直流电动机拖动角位置随动系统组成结构示意图



(b) 直流电动机拖动角位置随动系统示意框图

图 1.3.4 直流电动机拖动角位置随动系统

所在的角位置 $\varphi = \psi$ 。这种自动控制系统被广泛使用。例如，当人们希望使庞大沉重的受控对象到达某一位置时，用类似的随动系统，只需轻轻旋转一下电位置滑臂 I 就行了，可谓“四两拨千斤”。

由上述分析可见，当给定角位置 ψ 固定不动时，受控对象的角位置 φ 最终将完全与 ψ 相同，即输出能无差地复现输入。称这样的控制系统为无差控制系统。

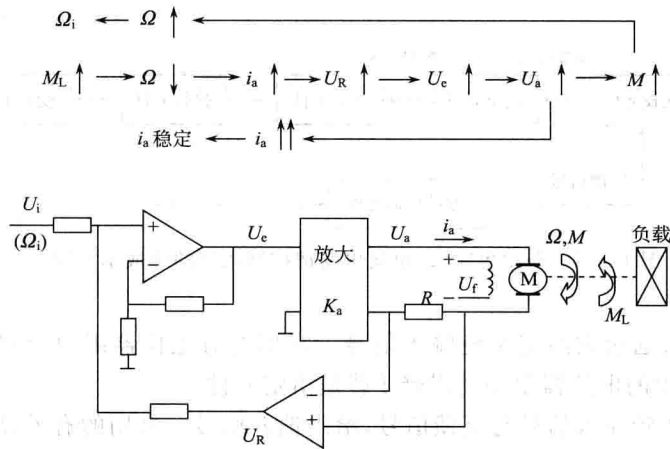
再看图 1.3.2。给定量是电压 U_i ，输出量是转速 Ω 。若要求输出转速 Ω 完全实现输入电

压 U_i 所对应的转速 Ω_i , 那么就要求 $U_i = U_T = k_3 k_4 \Omega$ 。由图 1.3.2(a) 可知, 这是不可能的。因为, 当 $U_i = U_T$ 时, 误差电压 $U_e = 0$, 这时电动机就会停转, 即 $\Omega = 0$ 。所以在这样的控制系统中, 必定有 $U_i \neq U_T$, 即输出转速 Ω 并不能完全实现输入电压 U_i 所对应的给定转速 Ω_i 。称这样的控制系统为有差控制系统。不过对图 1.3.2 所示的系统, 只要放大器的放大量足够大, U_e 就可以很小, 这时 $U_T \approx U_i, \Omega \approx \Omega_i$ 。

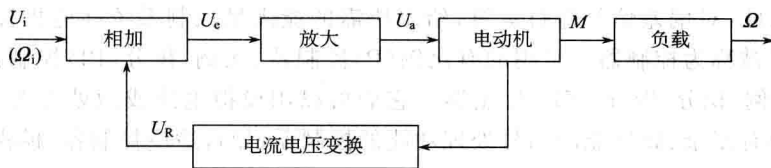
1.3.4 按扰动控制的控制系统与按偏差控制的控制系统

在图 1.3.1 直流电动机开环控制系统中, 当负载转矩 M_L 不变时, 在给定电压 U_i 的作用下, 系统负载转速 $\Omega = \Omega_i$ 。在实际中, 负载转矩 M_L 往往是变化的。当负载转矩 M_L 增大时, 电动机转速 Ω 下降, 电枢电流 i_a 上升; 当电动机负载转矩 M_L 减小时, 电动机转速 Ω 上升, 电枢电流 i_a 下降。负载转矩 M_L 的变化量 ΔM_L , 可看作是对转速 Ω 的一种扰动。

直流电动机调速系统的任务就是要使系统在负载转矩 M_L 变化时, 负载转速 Ω 基本不变或最终不变。图 1.3.5 所示的示意图是直流电动机调速系统中的一部分。如图所示, 在负载转矩 M_L 增加的瞬时, 为了达到转矩平衡 $M = M_L$, 负载转速 Ω 瞬时下降, 电枢反应产生的感应电压下降, 这时电动机的电枢电流 i_a 增大, 经取样电阻 R , 电枢电流 i_a 的变化被变换成了 U_R 的变化, U_R 与 U_i 相加, 使 U_e 增加, 电枢电压随之增加, 电枢电流 i_a 的变化进一步增加, 电动机输出转矩 M 增加, M 增加的部分被用于平衡 M_L 增加的部分。从而使负载转速回到设定的转速, 即 $\Omega = \Omega_i$, 这时电枢电流 i_a 随之稳定。上述叙述可用以下简洁方式表示。



(a) 直流电动机调速系统结构示意图



(b) 直流电动机调速系统示意框图

图 1.3.5 直流电动机调速系统

这里电流正反馈并不是使电流 i_a 一直不断地增加, 它受到转速 Ω 的制约。对于转速 Ω , 图 1.3.5 是负反馈闭环系统。当转速达到新的平衡时, 电枢电流 i_a 也达到了新的平衡而不再

增加。所以电流正反馈必须在转速负反馈的制约下进行。这样整个系统才是稳定的。

图 1.3.5 是按扰动控制的例子。因为调整系统状态的参考信息是扰动 ΔM_L 。

通常称系统实际输出偏离设定输出的差为偏差。利用偏差信息来稳定输出的控制方法称为按偏差控制。图 1.3.2~图 1.3.4 所示的系统都是按偏差控制的控制系统。

1.3.5 恒值控制系统与随动控制系统

若控制系统的给定量很少变化或根本就不变化,则称这样的控制系统为恒值控制系统。对恒值控制系统侧重要求在扰动作用下,系统的输出变化尽可能小。图 1.3.5 所示的系统就是恒值控制系统。例如,电力系统给定量为相电压 220V 和频率 50Hz,电冰箱的给定温度等。

若控制系统的给定量频繁变化,则称这样的控制系统为随动控制系统。对随动控制系统侧重要求在给定量变化时,系统输出尽可能快而准确地复现给定量的变化。在图 1.3.4 中,若给定角位置 ψ 频繁变化,则图 1.3.4 所示的就是一个随动控制系统。

1.4 反馈控制系统的组成

具体的控制系统是多种多样的,并无确定的模型。对于常用的单输入、单输出反馈控制系统可用图 1.4.1 所示的模型来描述,并以此为例,介绍常用的关于反馈控制系统组成元件的术语。

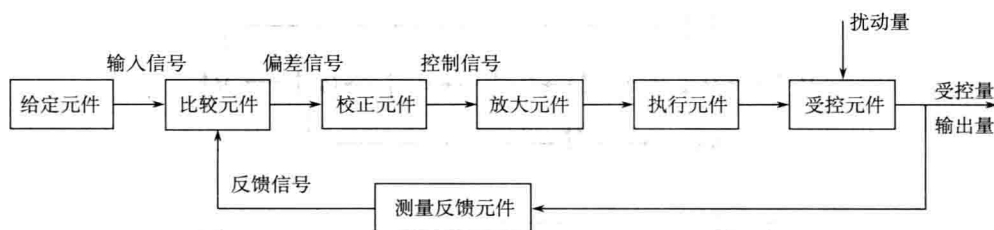


图 1.4.1 典型单输入、单输出反馈控制系统的组成示意图

(1) 给定元件:人通过它给定系统输入信号。常用的有电位器组、自整角机、程序输入装置等。图 1.3.4(a) 中的电位器组中的滑臂 I 就是给定元件。

(2) 比较元件:比较输入信号与反馈信号,给出偏差信号。常用的有差动放大器、电桥、机械差动装置等。图 1.3.2(a) 中的差动放大器就是比较元件。

(3) 校正元件:对偏差信号进行运算,给出所需的能满足控制系统性能指标的控制信号。所以校正元件又被称为控制器。常用的有比例(P)控制器、比例-积分(PI)控制器、比例-微分(PD)控制器、比例-积分-微分(PID)控制器。它们可以用模拟电路或微处理器来实现。利用计算机可实现具有复杂、高性能的信号处理功能的控制器,如自适应控制器、模糊控制器、人工智能控制器等。

(4) 放大元件:校正元件给出的控制信号往往不具有直接驱动执行元件的功能,所以必须进行放大。放大元件的形式是多种多样的。通常,电信号放大器由电压放大器和功率放大器组成。

(5) 执行元件:将放大器输出的信号变为直接驱动受控对象的物理量的元件。执行元件

是多种多样的,常用的有电动机、液压装置、气动装置等。在图 1.3.5 (a)中,直流电动机就是执行元件。

(6) 受控对象:被执行元件驱动的对象。受控对象在执行元件作用下改变的物理量称为受控量。受控对象除受执行元件驱动外,还常常受到不希望出现的物理量的作用,这种不希望的物理量称为扰动量。受控对象、受控量、扰动量是多种多样的。在图 1.3.5 (a)中,受控对象是负载,受控量是负载的转速 Ω ,干扰量是负载转矩的变化量 ΔM_L 。

(7) 测量反馈元件:测量输出量,并反馈到输入端,与输入信号进行比较。测量反馈元件的输入量与输出量常常是不同量纲的物理量。例如,测速发电机将输入转速转化为电压;热敏电阻将温度转化为电压或电流;力传感器将力转化为电压;电位器将角位置转化为电压;等等。

自动控制系统对一个受控量的控制,往往并不是用一个物理量来进行控制的。图 1.4.2 所示的是常用的直流电动机调速系统的示意图。这个系统的受控对象是负载,受控量是转速 Ω ,执行元件是直流电动机。它具有电枢电流正反馈支路、电枢电压负反馈支路和输出转速负反馈支路。控制信号中包含了电枢电流信息、电枢电压信息和电枢转速(即电动机输出转速)信息。通常,这种利用多种物理量来实现控制的自动控制系统的性能,优于仅用单一物理量来实现控制的自动控制系统。

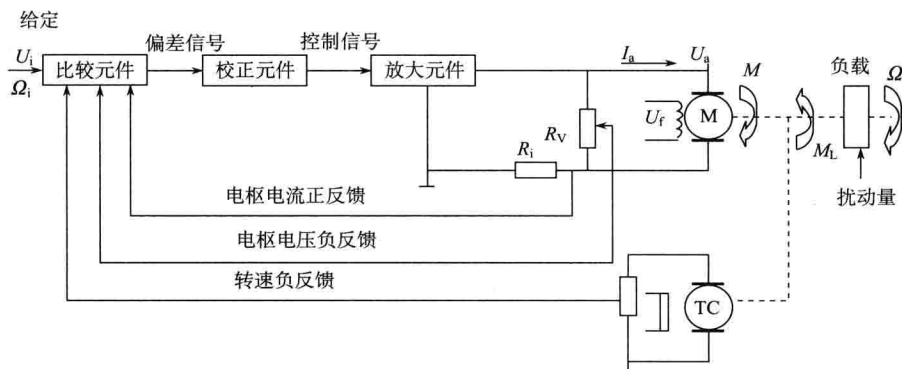


图 1.4.2 直流电动机调速系统示意图

1.5 本书特点及对读者的建议

“自动控制原理”教材已有很多版本。每一本教材都富蕴着作者对自动控制原理的见解和教学经验。本书借鉴了多本教材,根据非自控电子类专业的特点和自己的教学体会编写而成。

自动控制原理课程内容概括地说,就是利用物理概念和数学描述,分析系统的特性以及改善特性的途径,其核心问题是系统输出复现输入的能力。具体地说,主要有自动控制系统的数学描述、性能指标(主要是稳定性、准确性、快速性)、自动控制系统的校正等。

自动控制原理是一门涉及较多数理基础、带有一定综合性的课程。它要求读者已经学习常系数线性常微分方程、状态方程、线性代数、复变函数、信号与系统、电子技术基础等前置课程。在自动控制原理课程中,对于上述内容不是简单地孤立使用,而是有机地被用来作为基础,并由此导出新的相对独立的自动控制原理方面的知识。希望读者通过对本课程的学习,不

仅学到自动控制原理方面的知识,而且能够在学习过程中,利用已学知识使学习新知识的能力得到锻炼。

在自动控制原理中,对一、二阶系统的分析可得到便于人工分析计算的代数表达式,这些表达式还有利于读者对问题物理本质的理解。本书将尽量基于一、二阶系统讲解自动控制系统中的基本物理概念和基本分析计算方法,力争将系统运动行为的物理意义讲清楚。这些概念、方法对于高阶系统往往是一样有效的,只是高阶系统的数值计算变得复杂、困难。在本书中,关于高阶系统的数值计算将利用商品软件 Matlab 来完成。这样既可以使读者掌握自动控制原理中常用的分析方法、数值计算公式和物理意义,又可以使读者避免因在繁重的人工数值计算中,或自己编写软件过程中花费过多的注意力和精力,而忽视了对自动控制原理课程中的主要内容(即自动控制系统的数学描述、性能指标(主要是稳定性、准确性、快速性)、自动控制系统的校正等)的学习,还可以使读者学习到如何用商品软件来解决数值计算问题的知识。Matlab 在实际科学研究和工程设计工作中是十分有用的一个工具。在必须以高阶系统为例时,尽量利用三阶系统,以求分析推演得到简化。

希望读者不仅仅能从中学习到新的知识,更能通过学习使自己的创新能力得到提高,同时教学相长,不断进步。

第 2 章 控制系统的数学描述

对控制系统简化、抽象,进而建立对控制系统的数学描述是分析控制系统的基础。

对控制系统的数学描述有多种方法。例如,对线性时不变系统,常用的有连续时域中的微分方程和状态方程(n 元一阶微分方程组),连续频域中的传递函数、传递函数矩阵和频率特性函数,离散时域中的差分方程和离散状态方程(n 元一阶差分方程组);离散频域中的离散传递函数;对非线性系统,常用的有描述函数、相平面法等。

本章叙述的内容仅包含用于分析单输入、单输入(或多输入)线性时不变控制系统的常系数线性常微分方程和传递函数。

2.1 用常系数线性常微分方程描述单输入、单输出线性时不变控制系统

2.1.1 常系数线性常微分方程

通常,控制系统中总是存在储能元件的。若要改变系统的运动状态,就必然会导致系统中储能元件储能的变化。由于作用于储能元件的其他元件的功率总是有限的,所以储能元件中能量的变化需要时间。在时域中,对这样过程的数学描述,常用微分方程。若微分方程含有两个和两个以上的自变量,则称其为偏微分方程;若只有一个自变量,则称其为常微分方程。对控制系统运动规律的描述,自变量只有时间 t ,所以描述控制系统的微分方程通常总是常微分方程。

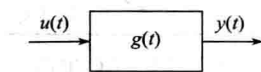


图 2.1.1 系统的示意模型

用于描述图 2.1.1 所示模型最一般的常微分方程的形式是

$$F\left(u(t), y, \frac{dy}{dt}, \frac{d^2y}{dt^2}, \dots, \frac{d^ny}{dt^n}\right) = 0 \quad (2-1-1)$$

若 y 和它的各阶导数 $dy/dt, d^2y/dt^2, \dots, d^ny/dt^n$ 都是一次函数(例如, d^2y/dt^2 是 y 的二次微分的一次函数), $(d^2y/dt^2)^2$ 是 y 的二次微分的二次函数。 d^2y/dt^2 是以 t 为自变量的函数,这种函数关系可以是多种多样的,例如 $d^2y/dt^2 = Ae^{-at} + Be^{bt}$ 。那么(2-1-1)式就可以改写成

$$a_n(t)y^{(n)}(t) + a_{n-1}(t)y^{(n-1)}(t) + \dots + a_1(t)y^{(1)}(t) + a_0(t)y(t) = u(t) \quad (2-1-2)$$

称(2-1-2)式为线性常微分方程。若(2-1-2)式中, $a_n(t), a_{n-1}(t), a_{n-2}(t), \dots, a_1(t), a_0(t)$ 都是常数,则(2-1-2)式可改写为

$$a_n y^{(n)}(t) + a_{n-1} y^{(n-1)}(t) + \dots + a_1 y^{(1)}(t) + a_0 y(t) = u(t) \quad (2-1-3)$$

称(2-1-3)式为常系数线性常微分方程。

若控制系统为单输入、单输出线性时不变系统,它的运动可用以下常系数线性常微分方程描述

$$\begin{aligned} & a_n y^{(n)}(t) + a_{n-1} y^{(n-1)}(t) + \dots + a_1 y^{(1)}(t) + a_0 y(t) \\ & = b_m u^{(m)}(t) + b_{m-1} u^{(m-1)}(t) + \dots + b_1 u^{(1)}(t) + b_0 u(t) \end{aligned} \quad (2-1-4)$$