

面向21世纪高等院校规划教材

自动控制原理

Automatic Control Principle

韩绍坤 许向阳 王晓华 编著

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

面向 21 世纪高等院校规划教材

自动控制原理

韩绍坤 许向阳 王晓华 编著



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书主要介绍闭环控制系统的基本理论及其工程分析和设计方法。全书共9章。前6章主要介绍控制的发展、闭环系统的基本原理、数学模型的建立、控制系统的基本分析方法、稳定性分析以及控制系统的设计和校正。后3章分别讲述现代控制理论、计算机控制理论和非线性控制系统。

全书内容力图构成一个完整的体系,使读者掌握控制理论的基本分析和设计方法。

本书可以作为自动化、通信、计算机、机电、光电、化工等专业本科生的教材,也可供相关专业的工程技术人员参考。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理/韩绍坤,许向阳,王晓华编著. —北京:北京理工大学出版社,2009.1

ISBN 978-7-5640-1670-8

I. 自… II. ①韩…②许…③王… III. 自动控制理论 IV. TP13

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第112507号

出版发行/北京理工大学出版社

社 址/北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编/100081

电 话/(010)68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址/http://www.bitpress.com.cn

经 销/全国各地新华书店

印 刷/北京地质印刷厂

开 本/787毫米×1092毫米 1/16

印 张/14.25

字 数/333千字

版 次/2009年1月第1版 2009年1月第1次印刷

印 数/1~4000册

定 价/28.00元

责任校对/陈玉梅

责任印制/吴皓云

图书出现印装质量问题,本社负责调换

前 言

本教材全面阐述了自动控制的基本理论，系统地介绍了自动控制系统分析和设计的基本方法。全书共分 9 章，第 1 章对自动控制理论的起源、现状、发展进行了简单介绍；第 2 章介绍控制系统的数学描述方法，系统地介绍了控制系统的数学模型以及利用结构图等等效化简和梅逊增益公式确定系统闭环传递函数的方法；第 3 章介绍了线性系统的时域分析方法，重点对系统的稳定性、快速性、准确性的分析方法进行了讨论；第 4 章介绍了线性系统根轨迹分析方法，重点讨论了根轨迹的绘制法则以及利用根轨迹分析系统性能的方法；第 5 章介绍了系统频域分析方法，对频域法作图、分析的原理进行了详细讨论；第 6 章介绍了控制系统的综合和校正的方法，分别介绍了采用根轨迹方法和频率特性方法进行系统校正的方法；第 7 章介绍了控制系统的状态空间分析方法，对系统的状态空间描述、运动分析、可控性、可观测性、线性变换以及综合设计方法进行了讨论；第 8 章介绍了线性离散系统的分析与校正，讨论了 z 变换理论，介绍了线性离散系统的分析方法；第 9 章讨论了非线性系统的描述函数法。

本书可作为高等学校自动化、通信、计算机、自动控制等专业的教材，也可作为成人教育和继续教育的教材，亦可供有关科技人员参考。

本教材由北京理工大学信息科学技术学院“自动控制理论基础 B 教学组”集体分工编写。参加编写的人员及具体分工是：第 1、2、3 章由韩绍坤教授编写；第 4、5、6 章由许向阳副教授编写；第 7、8、9 章由王晓华副教授编写。对书中存在的错误及不妥之处，恳请各位读者、同行批评指正。

编 者

目 录

第1章 绪论	1
1.1 自动控制及其发展概述	1
1.2 自动控制的基本方式	3
1.3 控制系统的分类及组成	5
1.4 对控制系统性能的基本要求	7
1.5 本课程的任务	7
习题	8
第2章 控制系统的数学模型	9
2.1 列写微分方程的一般方法	9
2.2 非线性微分方程的线性化	15
2.3 传递函数	17
2.4 动态结构图(方框图)及其简化	28
2.5 系统对给定和扰动作用下的传递函数	37
2.6 信号流图和梅逊公式(S.J.Mason)	39
习题	44
第3章 时域分析法	47
3.1 典型控制过程及性能指标	47
3.2 一阶系统分析	51
3.3 二阶系统分析	56
3.4 高阶系统的时间响应概述	68
3.5 稳定性和代数判据	69
3.6 稳态误差及误差系数	78
习题	87
第4章 根轨迹法	89
4.1 引言	89
4.2 根轨迹的概念	89
4.3 绘制根轨迹的基本规则	90
4.4 应用根轨迹进行参数设计	99
习题	104
第5章 控制系统的频率特性	106
5.1 引言	106
5.2 频率特性	106
5.3 频率特性图	107
5.4 奈奎斯特稳定性判据	117

5.5 控制系统的相对稳定性.....	122
5.6 频率特性与控制系统性能指标.....	123
习题.....	128
第6章 控制系统的综合和校正.....	131
6.1 引言.....	131
6.2 系统设计方法.....	131
6.3 用根轨迹方法设计校正网络.....	133
6.4 用频率特性方法设计超前校正网络.....	141
习题.....	151
第7章 现代控制理论基础.....	154
7.1 状态空间法的基本概念.....	154
7.2 线性定常数系统状态空间方程的建立.....	156
7.3 线性定常系统的运动分析.....	165
7.4 线性系统的能控性和能观测性.....	170
7.5 线性系统的状态反馈与极点配置.....	175
7.6 状态观测器.....	179
习题.....	186
第8章 计算机控制系统.....	189
8.1 离散控制系统概述.....	189
8.2 采样过程及采样定理.....	190
8.3 信号的复现与保持器.....	191
8.4 线性离散系统数学模型.....	193
8.5 线性离散系统的稳定性.....	199
8.6 线性离散系统的时域分析.....	202
习题.....	207
第9章 非线性控制系统.....	209
9.1 非线性系统概述.....	209
9.2 非线性系统的分析方法.....	212
9.3 用描述函数法分析稳定性.....	217
习题.....	219
参考文献.....	222

第1章 绪 论

1.1 自动控制及其发展概述

自动控制作为一种重要的技术手段,能在没有人参与的情况下,高速度和高精度地自动完成被控对象的运动。它已在宇宙航行、军事装备的自动化、工业过程的自动控制、自动检测等方面获得了广泛的应用。自动控制在工业、农业、国防及科学技术的现代化中起着重要作用,自动控制技术的应用不仅使生产过程实现自动化,从而提高劳动生产率,增加产品量,降低生产成本,提高经济效益,改善劳动条件,使人们从繁重的体力劳动和单调重复的脑力劳动中解放出来,这在冶金、采矿、机械、化工、电子等部门尤为明显。同时,自动控制又可使工作具有高度的准确性,大大地提高了产品的质量和数量,提高了武器的命中率和战斗力。近年来,自动控制的应用范围还扩展到交通管理、生物医学、生态环境、经济管理、社会科学和其他许多社会生活领域,并对各学科之间的相互渗透起到促进作用。在人类改造大自然、探索新能源、发展空间技术和创造人类社会文明方面都具有十分重要的意义。

自动控制理论是在人类改造自然的生产实践活动中孕育、产生,并随着社会生产和科学技术的进步而不断发展、完善起来的。早在古代,劳动人民就凭借生产实践中积累的丰富经验和对反馈概念的直观认识,发明了许多闪烁着控制理论智慧火花的杰作。第一次工业革命促进了自动控制的飞速发展,1788年,由詹姆斯·瓦特(James Watt)发明的蒸汽机离心调速器是一个最著名的例子。在他发明的蒸汽机上使用了离心调速器,解决了蒸汽机的速度控制问题,引起了人们对控制技术的重视。蒸汽机在某些条件下,转速会发生振荡,这个现象引起了一些学者的兴趣,1868年,英国物理学家麦克斯威尔(J. C. Maxwell)根据力学原理,用常系数线性微分方程描述了调速器—蒸汽机—负荷系统,并得出简单的代数判据,圆满地解决了稳速问题,开辟了用数学方法研究控制系统的途径。此后,英国数学家劳斯(E. J. Routh)和德国数学家古尔维茨(A. Hurwitz)分别在1877年和1895年独立地建立了直接根据代数方程的系数判别系统稳定性的准则,就是现在的劳斯—古尔维茨判据。用此准则设计系统,可以保证系统的稳定性,并具有满意的控制精度。这些方法奠定了经典控制理论中时域分析法的基础。1932年,美国物理学家奈奎斯特(H. Nyquist)研究了长距离电话线信号传输中出现的失真问题,运用复变函数理论建立了以频率特性为基础的稳定性判据,奠定了频率响应法的基础。第二次世界大战前夕,自动控制理论有了进一步的发展。1934年,赫兹(H. L. Hazen)发表了具有历史意义的著作《伺服机构理论》,提出了用于位置控制系统的伺服机构的概念,讨论了可以精确跟踪变化的输入信号的继电器式伺服机构。随后,伯德(H. W. Bode)和尼柯尔斯(N. B. Nichols)在20世纪30年代末和40年代初进一步将频率响应法加以发展,形成了经典控制理论的频域分析法,为工程技术人员提供了一个设计反馈控制系统的有效工具。

第二次世界大战期间,军工技术的发展,要求控制系统能够准确地跟踪迅速变化的目标,即要求系统有良好的瞬态特性。如在设计研制飞机自动驾驶仪、火炮定位系统、雷达天线控

制系统及其他军用系统时,这些系统的复杂性和对快速跟踪、精确控制的高性能追求,迫切要求拓展已有的控制技术,促使了许多新的见解和方法的产生。同时,还促进了对非线性系统、采样系统以及随机控制系统的研究。当时设计这类系统所需的理论已经在通信工程中发展形成,这就是以奈奎斯特(H. Nyquist)稳定判据为基础的频率响应理论。它对于分析、设计单变量系统是非常有效的工具。设计者只需要根据系统的开环频率特性,就能够判别闭环系统的稳定性和给出稳定裕量。同时又能非常直观地表示出系统的主要参数,即开环增益与闭环系统稳定性的关系。频率响应法圆满地解决了单变量系统的设计问题。在此基础上,波德(H. W. Bode)于1945年发表用图解法来分析和综合反馈控制系统的方法,并将其应用于控制工程中,这就形成了控制理论中用于分析和设计控制系统的频率法。第二次世界大战推动了自动控制理论和实践的发展。飞机、火炮、舰船快速精确的控制,雷达跟踪和导弹制导技术发展之快令人惊奇。

战后,随着这些新理论及实践成果的公布,控制理论出现了蓬勃发展的新阶段。1948年,美国科学家伊万斯(W. R. Evans)提出了根据系统参数变化时特征方程根变化的轨迹来研究控制系统的“根轨迹”理论,创建了用微分方程模型来分析系统性能的整套方法,为分析系统性能随系统参数变化的规律性提供了有力工具,被广泛应用于反馈控制系统的分析、设计中。以传递函数作为描述系统的数学模型,以时域分析法、根轨迹法和频域分析法为主要分析设计工具,构成了经典控制理论的基本框架。到20世纪50年代,经典控制理论发展到相当成熟的地步,形成了相对完整的理论体系。至此,控制理论发展的第一阶段——自动调节阶段基本完成。建立在频率法和根轨迹法基础上的理论,通常称为经典控制理论。经典控制理论研究的对象基本上是以线性定常系统为主的单输入/单输出系统,还不能解决如时变参数问题,多变量、强耦合等复杂的控制问题。

20世纪50年代中期至60年代初,空间技术的发展迫切要求解决更复杂的多变量系统、非线性系统的最优控制问题(例如火箭和宇航器的导航、跟踪和着陆过程中的高精度、低消耗控制)。实践的需求推动了控制理论的进步,同时,计算机技术的发展也从计算手段上为控制理论的发展提供了条件,适合于描述航天器的运动规律,又便于将计算机求解的状态空间描述成为主要的模型形式。例如人造地球卫星空间技术的发展,要求实时地、高精度地处理多变量和非线性控制问题。计算机技术的成熟和完善,使得有可能在研究中利用标准式或状态形式的常微分方程作为数学模型,直接在时域内进行大量复杂的解算、设计以及实现高度完备的最优控制。并逐步形成了一套完整的理论,这就是有别于“经典”的“现代控制理论”。俄国数学家李雅普诺夫(A. M. Lyapunov)1892年创立的稳定性理论被引用到控制中。1956年,前苏联科学家庞特里亚金提出极大值原理;同年,美国数学家贝尔曼(R. Bellman)创立了动态规划。极大值原理和动态规划为解决最优控制问题提供了理论工具。1959年美国数学家卡尔曼(R. E. Kalman)提出了著名的卡尔曼滤波器,1960年卡尔曼又提出系统的可控性和可观性问题。到20世纪60年代初,一套以状态方程作为描述系统的数学模型,以最优控制和卡尔曼滤波器为核心的控制系统分析、设计的新原理和方法基本确定,现代控制理论应运而生。

现代控制理论主要利用计算机作为系统建模分析、设计乃至控制的手段,适用于多变量、非线性、时变系统。现代控制理论在航空、航天、制导与控制中创造了辉煌的成就,人类迈向宇宙的梦想变为现实。为了解决现代控制理论在工业生产过程的应用中所遇到的被控对象

精确状态空间模型不易建立, 合适的最优性能指标难以构造, 所得最优控制器往往过于复杂等问题, 科学家们不懈努力, 在近几十年中不断提出一些新的控制方法和理论。

至今, 现代控制理论又有了巨大发展, 并形成了若干分支, 例如线性系统理论、最优控制理论、动态系统辨识、自适应控制、大系统理论、模糊控制、预测控制、容错控制、鲁棒控制、非线性控制和复杂系统控制等, 大大地扩展了控制理论的研究范围。控制理论目前还在向更深、更广阔的领域发展。

1.2 自动控制的基本方式

自动控制系统可以按照多种方式组成。工程上应用的控制系统, 根据有无反馈, 把控制系统分为开环控制系统和闭环控制系统。控制系统中, 如果输出信号不反馈到输入端产生控制作用, 称这种系统为开环控制系统, 如图 1-1 所示。也就是说, 开环控制系统的输出量不对系统的控制作用发生影响。

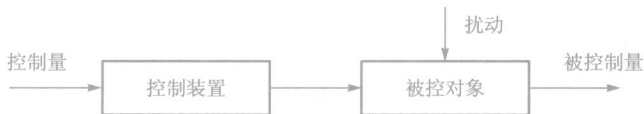


图 1-1 开环控制系统示意图

开环控制又可称为前馈控制, 因为控制作用是由输入信号直接向前输送的, 而不是由输出信号回输到输入信号来进行控制的, 故称为前馈控制。

图 1-2 为一开环控制系统。它是由给定电压通过执行机构控制机械轴的转角。输入电压 u_1 , 加到放大器上, 其输出电压为

$$u_2 = k_1 u_1 \quad (1-1)$$

式中, k_1 为放大器的放大系数。电压 u_2 加到力矩传感器上。如果忽略电动机控制绕组的电感, 则电动机的输出力矩为

$$M = k_2 u_2 = k_1 k_2 u_1 \quad (1-2)$$

式中, k_2 为电动机的系数。

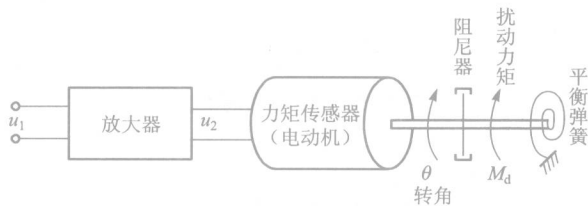


图 1-2 开环控制系统

在电动机电力矩作用下, 机械部分将产生转动。由于受到黏性摩擦和弹簧恢复力矩的作用, 最后停止在平衡位置上。此时, 转角 θ 与力矩 M 的关系为

$$\theta = k_t M = k_1 k_2 k_t u_1 \quad (1-3)$$

式中, k_t 为弹簧系数。式 (1-3) 表示了输入电压与转角的关系, 即表述了该系统输入与输出

的稳态关系。

如果该系统中的放大器、电动机和弹簧等都是线性的，即 k_1 、 k_2 、 k_t 都是常数，那么机械转角就能准确地反映外加电压的大小，系统就没有误差。

若该系统存在着随机扰动，例如机械轴受到随机干扰力矩 M_d 的作用，于是机械轴的转角为 θ ，即

$$\theta = k_1 k_2 k_t u_1 - k_t M_d \quad (1-4)$$

可见，干扰将引起误差。显然，开环控制系统抗干扰能力差。

开环控制系统具有结构简单，易于调整，容易实现，不存在稳定性问题等优点。

控制系统中，如果把系统输出信号反馈到输入端，由输入信号和输出信号的偏差信号对系统进行控制，这种系统称为闭环控制系统，也称为反馈控制系统。

在图 1-2 所示的开环控制系统中，在机械轴上安装一个电位计，用于测量输出转角的实际值，设电位计的反馈系数为 k_f ，电位计的输出电压为 u_f ，并将它反馈到输入端，把反馈电压 u_f 和输入电压 u_1 按相反的极性串接起来，加到放大器的输入端，这样就构成了反馈控制系统，如图 1-3 所示。

电位计输出电压为

$$u_f = k_f \theta \quad (1-5)$$

放大器输入端电压为

$$\Delta u = u_1 - u_f \quad (1-6)$$

放大器输出端电压为

$$u_2 = k_1(u_1 - k_f \theta) \quad (1-7)$$

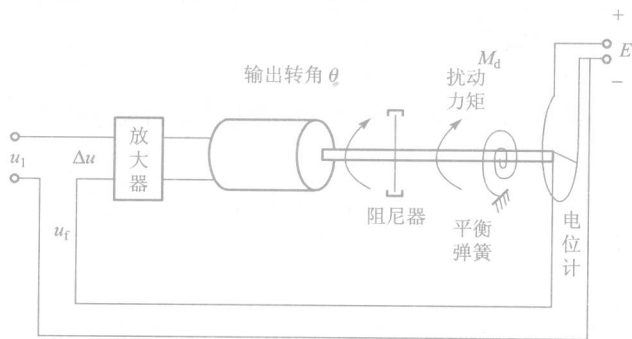


图 1-3 闭环控制系统

电动机的力矩为

$$M = k_1 k_2 (u_1 - k_f \theta) \quad (1-8)$$

存在干扰力矩 M_d 的情况下，机械轴的转角为

$$\theta = k_1 k_2 k_t (u_1 - k_f \theta) + k_t M_d \quad (1-9)$$

变换式 (1-9) 得到

$$\theta = \frac{k_1 k_2 k_t}{1 + k_1 k_2 k_t k_f} u_1 + \frac{k_t}{1 + k_1 k_2 k_t k_f} M_d \quad (1-10)$$

比较式 (1-4) 和式 (1-10) 可以看出，在闭环控制中干扰力矩所产生的输出量偏离仅是开

环控制系统的 $\frac{1}{(1+k_1k_2k_tk_f)}$ 。如果回路增益 $k_1k_2k_tk_f$ 足够大, 干扰力矩使输出角度的偏差就变得

很小了。显然, 闭环控制系统比开环控制系统的抗干扰能力强。

在干扰力矩 $M_d=0$ 时, 闭环控制系统的输入-输出关系为

$$\theta = \frac{k_1k_2k_t}{1+k_1k_2k_tk_f} u_1 \quad (1-11)$$

当控制系统前向通道的哪个元件的放大系数发生变化时, 使总的放大系数变化 $\Delta k_1k_2k_t$, 其相对变化为 $\frac{\Delta k_1k_2k_t}{k_1k_2k_t}$ 。通过简单的微分运算可得出输出量的相应变化量为

$$\frac{\Delta \theta}{\theta} = \frac{1}{1+k_1k_2k_tk_f} \frac{\Delta k_1k_2k_t}{k_1k_2k_t} \quad (1-12)$$

可见, 前向通道的元件的放大系数发生变化时, 在闭环控制系统引起的输出误差, 仅是开环控制系统的 $\frac{1}{(1+k_1k_2k_tk_f)}$ 。因此, 在闭环控制系统中, 对前向通道元件的精度要求不高,

这样就可以用成本较低的元件构成精确的控制系统。

如果回路增益 $k_1k_2k_tk_f \gg 1$, 则式 (1-11) 可简化成

$$\theta \approx \frac{1}{k_f} u_1 \quad (1-13)$$

显然, 闭环控制系统的输入-输出特性仅由反馈元件决定。这也表明前向通道的元件精度对控制系统的精度几乎没有影响。

由式 (1-13) 很容易推导出如下关系式

$$\frac{\Delta \theta}{\theta} = \frac{\Delta k_f}{k_f} \quad (1-14)$$

式 (1-14) 表明反馈元件不稳定将直接引起输出的误差, 如果 k_f 变化 10%, 那么控制系统的输出误差就是 10%, 这个结论和开环控制系统是一致的。因此, 在构成闭环控制系统时, 要特别注意挑选反馈元件, 因为它决定了系统的精度。这是很容易理解的, 我们知道闭环控制系统是根据偏差进行控制的, 而偏差是借助测量元件得到的, 如果测量元件本身不稳定, 那么控制系统的准确性就很难保证了。闭环控制系统有很多优点, 对于要求较高的控制系统都采用闭环控制系统, 但闭环控制系统却有一个突出的问题, 即系统的稳定性。

由上可见开环控制系统的优点是结构简单、经济、调试方便, 缺点是抗干扰能力差、控制精度不高; 闭环控制系统的优点是具有纠正偏差的能力、抗干扰性好、控制精度高, 缺点是结构复杂、价格高、参数应选择适当。

1.3 控制系统的分类及组成

1.3.1 控制系统的分类

自动控制系统的类型很多, 它们的结构和完成的任务也各不相同。为了研究方便可以将自动控制系统按照一定的原则分成各种类型。

按控制的方式分为开环控制、闭环控制、复合控制。

按元件的类型分为机械系统、电气系统、机电系统、液压系统、气动系统、生物系统等。
按系统功用分为温度控制系统、压力控制系统、位置控制系统。

按系统的性能可以分为线性系统、非线性系统、连续系统、离散系统、定常系统、时变系统、确定性系统、不确定性系统。

按给定量的变化规律分为恒值控制系统、随动系统、程序控制系统。

1.3.2 控制系统的组成

对于一个控制系统来说, 不管其结构多么复杂, 用途尽管各种各样, 它们都是由一些具有不同职能的基本元件所组成的, 图 1-4 就是一个典型的自动控制系统方框图。

这种闭环控制系统主要由比较元件、放大元件、执行元件和补偿元件等组成。

(1) 比较元件: 又称测量元件或敏感元件。它的作用是将输出与输入信号进行比较, 并将比较所得的系统误差转换成误差信号送到放大器。比较元件中又可分为位置比较元件、速度测量元件、温度测量元件等。常用的位置比较元件有电位计、自整角机、旋转变压器、感应同步器、差动变压器、三自由度陀螺仪等。作为速度测量元件的有测速发电机。作为温度测量元件的有热电偶、电阻温度计等。

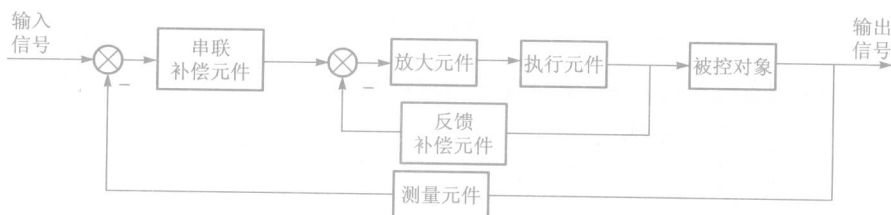


图 1-4 自动控制系统的基本组成

(2) 放大元件: 即放大器, 它的作用是将功率很小的误差信号放大后去推动执行元件, 使执行元件带动被控对象运动。常用的放大元件有电子放大器、磁放大器、可控硅整流器、交磁放大机、液压放大器、气动放大器等。

(3) 执行元件: 执行元件的作用是根据放大元件提供的信号驱动被控对象按输入信号的变化规律运动。常用的执行元件有直流伺服电动机、交流伺服电动机、直流力矩电动机、步进电动机 (用于数字控制系统)、液压马达、液压缸、气动马达等。

(4) 校正元件: 又称校正电路或补偿电路。它的作用是调整原有系统的参数和性能, 使系统满足自动控制的技术要求, 使系统输出在每一瞬时都能跟踪输入。

1.3.3 控制系统的常用术语介绍

(1) 自动控制: 在无人直接参与的情况下, 通过控制器使被控对象或过程自动地按照预定要求进行。

(2) 对象: 通常是一个设备, 它是由一些机器零件有机地组合在一起的, 实现自动控制的机器设备或生产过程, 其作用是完成一个特定的动作。在下面的讨论中, 称任何被控物体 (如加热炉、化学反应器或宇宙飞船) 为对象。

(3) 过程: 称任何被控制的运行状态为过程, 其具体例子如化学过程、经济学过程、生

物学过程。

(4) 系统：完成一定任务的一些元、部件的组合。

(5) 扰动：破坏控制量与被控制量之间正常函数关系的因素，称为系统的扰动。扰动是一种对系统的输出产生不利影响的信号。

(6) 反馈控制：反馈控制是这样一种控制过程，它能够在存在扰动的情况下，力图减小系统的输出量与参考输入量（或者任意变化的希望的状态）之间的偏差，而且其工作正是基于这一偏差基础之上的。

(7) 反馈控制系统：反馈控制系统是一种能对输出量与参考输入量进行比较，并力图保持两者之间既定关系的系统，它利用输出量与输入量的偏差来进行控制。

应当指出，反馈控制系统不限于工程范畴，在各种非工程范畴内，诸如经济学和生物学中，也存在着反馈控制系统。

(8) 随动系统：随动系统是一种反馈控制系统，在这种系统中，输出量是机械位移、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。随动系统在现代工业中被广泛采用。

(9) 过程控制：在工业生产过程中，诸如对压力、温度、湿度、流量、频率以及原料、燃料成分比例等方面的控制，称为过程控制。

1.4 对控制系统性能的基本要求

理想情况下，自动控制系统的被控量和给定值相等，没有误差，而且不受干扰的影响。

在实际系统中，组成系统的元件包括有电子、电磁、机电、液压、机械等，它们存在着储能元件，使系统的输出滞后于输入；由于机械部分的质量，存在着惯量，电路中的电感、电容，引起系统工作的滞后。如果系统中结构和各元件参数配合不当，则系统输出与输入不能同步，或使系统产生振荡或发散，形成不稳定，致使其不能正常工作。所以系统稳定性是评定系统性能指标的根本前提。

控制系统的性能要求主要是两个方面，一是精度高，二是速度快。

概括起来，工程上常以稳、准、快三个方面来评价自动控制系统的性能指标。

(1) 稳：是指系统动态过程的振荡倾向和系统重新恢复平衡的能力。在有可能达到平衡的条件下，要求系统动态过程的振荡要小，对被控量的振幅和频率应有要求。过大的波动将使系统运动部分超载，导致运动失灵或破坏。

(2) 准：是指系统的动态和静态精度，即系统过渡到新的平衡状态或在干扰作用下重新恢复平衡后，最终保持的精度，它反映了动态过程基本完成后的性能。这时，系统的被控量与给定值之间的偏差应是很小的。根据系统的工作要求，对偏差值应有所规定。

(3) 快：是指系统动态过程持续时间的长短。稳和快反映系统在控制过程中的性能。既快又稳，则控制过程中被控量偏离给定值小，偏离的时间短，则系统的动态精度高。

1.5 本课程的任务

自动控制原理是研究自动控制基础理论规律的一门工程技术科学，本课程所要研究的两

大任务为系统分析和系统设计问题:

(1) 对于一个具体的控制系统, 如何从理论上对它的动态性能和稳态精度进行定性的分析和定量的计算, 这类问题叫系统分析, 即分析系统的稳定性、振荡倾向、快速性、准确性及其系统结构、参数的关系。分析的目的是了解和认识已有的系统, 并为系统设计打下基础。

(2) 根据对系统性能的要求, 如何合理地设计校正装置, 使系统的性能能全面地满足技术上的要求。也就是在给出被控对象及其技术指标要求的情况下, 构造一个满足技术指标要求的控制系统, 或改造那些未能达到要求的系统, 这就是系统设计问题。

习 题

1.1 回答以下问题:

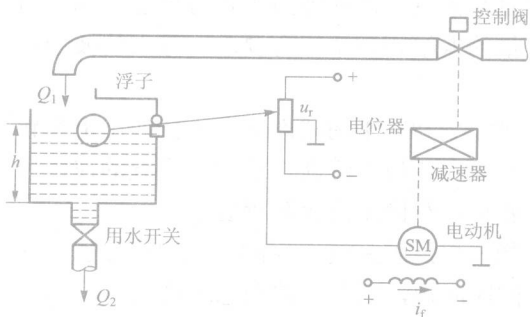
- (1) 什么是开环控制系统和闭环控制系统? 比较它们的主要特点。
- (2) 自动控制系统的组成由哪几部分构成, 各部分主要作用?
- (3) 对自动控制系统性能的基本要求有哪些?

1.2 说明以下控制原理, 并指出哪些是开环控制, 哪些是闭环控制?

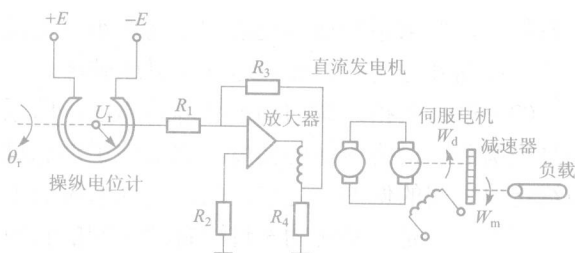
- (1) 空调器的温度调节;
- (2) 火箭运动;
- (3) 司机驾驶汽车;
- (4) 人体温保持在 37°C 的温控系统;
- (5) 汽车刹车防抱死系统。

1.3 如习题图 1-1 是一液位控制系统原理示意图。在任何情况下, 希望液面高度 h 维持不变, 说明系统工作原理并画出系统元件框图。

1.4 有一发电机-电动机调速系统如习题图 1-2 所示。其工作原理是操纵者转动操纵电位计的手柄, 可使电位计的输出电压 U_r 改变大小和方向。经前置放大器和直流发电机两极放大, 使加在伺服电机上的端电压也随之改变大小和方向。从而使负载具有所要求的转速。试说明该系统的给定值、被控量和干扰量, 并画出方块图。



习题图 1-1



发电机-电动机调速系统

习题图 1-2

第2章 控制系统的数学模型

为了从理论上对自动控制系统进行定性分析和定量计算,首先要建立控制系统的数学模型。

系统的数学模型是描述系统输入、输出变量以及内部各变量之间关系的数学表达式。描述诸变量动态关系的数学表达式称为动态模型。常用的动态数学模型有微分方程、传递函数和动态结构图。

建立合理的数学模型,对于系统的分析研究是至关重要的。一般应根据系统的实际结构参数及计算所要求的精度,略去一些次要因素,使模型既能准确地反映系统的动态本质,又能简化分析和计算的工作。

任何元件或系统实际上都是很复杂的,难以对它作出精确、全面的描述,必须进行简化或理想化。简化后的元件或系统为该元件或系统的物理模型。简化是有条件的,要根据问题的性质和求解的精确要求,来确定出合理的物理模型。

许多表面上完全不同的系统(如机械、电气、液压系统)却具有完全相同的数学模型。数学模型表达了该系统的共性,因此数学模型建立后,研究系统主要指研究系统所对应的数学模型,以数学模型为基础,分析并综合系统的各项性能,而不再涉及实际系统的物理性质和具体特点。

建立控制系统数学模型的方法通常有分析法和实验法。就是根据系统中各元件所遵循的物理、化学、生物等各种科学规律和运行机理,列出微分方程式,又称为理论建模,本章只讨论分析法。实验法是人为地给系统施加某种测试信号,记录其输出响应,并用适当的数学模型去逼近,又称为系统辨识。

2.1 列写微分方程的一般方法

用分析法列写系统或元件微分方程的一般步骤如下:

- (1) 根据实际工作情况,确定系统和各元件的输入、输出变量。
- (2) 从输入端开始,按照信号的传递顺序,依据各变量所遵循的物理(或化学)定律,列写出在变化(运动)过程中的动态方程,一般为微分方程组。这些定律包括:电路中的基尔霍夫电路定律,力学中的牛顿定律,流体方面的有关流体力学定律、能量守恒定律等。
- (3) 消去中间变量,写出输入、输出变量的微分方程。
- (4) 标准化。即将与输入有关各项放在等号右侧,与输出有关各项放在等号左侧,并都按降幂排列。最后将系统归化为具有一定物理意义的形式。

在列写某元件的微分方程时,还必须注意与其他元件的相互影响,即所谓负载效应。

下面举例说明建立微分方程的步骤和方法。

例 2.1 试建立如图 2-1 所示 RLC 无源网络的动态方程。已知输入量为 u_i , 输出量为电容器上电压 u_o 的变化。

解：根据基尔霍夫定律得

$$L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) + \frac{1}{C} \int i(t) dt = u_i(t) \quad (2-1)$$

$$u_o(t) = \frac{1}{C} \int i(t) dt \quad (2-2)$$

由式 (2-2) 得

$$i(t) = C \frac{du_o(t)}{dt} \quad (2-3)$$

代入式 (2-1) 得

$$LC \frac{d^2 u_o(t)}{dt^2} + RC \frac{du_o(t)}{dt} + u_o(t) = u_i(t) \quad (2-4)$$

这是一个二阶线性常系数微分方程，对应的系统称为二阶线性定常系统。

例 2.2 试列出图 2-2 中无源网络的微分方程。

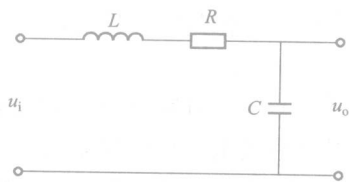


图 2-1 RLC 无源网络

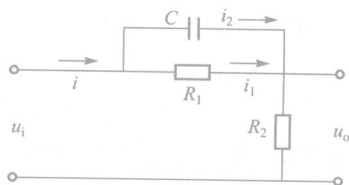


图 2-2 RC 无源网络

解：根据电压平衡方程，可得

$$R_1 i_1 = \frac{1}{C} \int i_2 dt \quad (2-5)$$

$$i = i_1 + i_2 \quad (2-6)$$

$$u_o = R_2 i \quad (2-7)$$

$$u_i = R_1 i_1 + u_o \quad (2-8)$$

由式 (2-5) 得

$$i_2 = R_1 C \frac{di_1}{dt} \quad (2-9)$$

将式 (2-9) 代入式 (2-6) 可得

$$i = i_1 + R_1 C \frac{di_1}{dt} \quad (2-10)$$

又由式 (2-8) 得

$$i_1 = \frac{u_i - u_o}{R_1}$$

将 i_1 代入式 (2-10)，再代入式 (2-7) 可得

$$u_o = R_2 \left[\frac{u_i - u_o}{R_1} + R_1 C \frac{1}{R_1} \frac{d(u_i - u_o)}{dt} \right] \quad (2-11)$$

整理可得所求无源网络的微分方程为

$$R_1 R_2 C \frac{du_o}{dt} + (R_1 + R_2) u_o = R_1 R_2 C \frac{du_i}{dt} + R_2 u_i \quad (2-12)$$

例 2.3 铁芯线圈如图 2-3 所示, 已知输入为 u_i , 列写输出为电流 i 的线圈动态微分方程。

解:

$$u_i = u_L + Ri$$

式中, u_L 为铁芯线圈的感应电动势, 它等于线圈中磁链的变化率, 即

$$u_L = \frac{d\psi(i)}{dt} \quad (2-13)$$

铁芯线圈的磁链是流经线圈电流 i 的非线性函数

$$\frac{d\psi(i)}{dt} + Ri = \frac{d\psi(i)}{dt} \frac{di}{dt} + Ri = u_i \quad (2-14)$$

这是一个非线性微分方程, 只有在一定条件下才可近似将磁链表示为

$$\psi(i) = Li \quad (2-15)$$

例 2.4 一个系统由弹簧-质量-阻尼器组成, 如图 2-4 所示。 m 为物体质量, k_t 为弹簧系数, f 为黏性摩擦系数, 外力 F 为输入, 位移 x 为输出, 列写系统的微分方程。

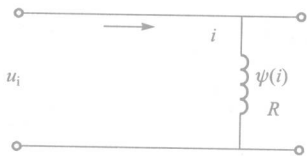


图 2-3 铁芯线圈

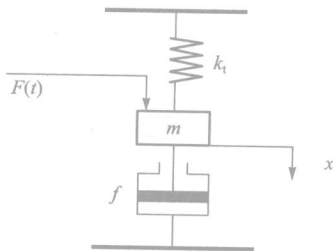


图 2-4 弹簧-质量-阻尼器

解: 在外力 $F(t)$ 作用下, 如果弹簧恢复力和阻尼器阻力与 $F(t)$ 不能平衡, 则质量 m 将有加速度, 进而使速度和位移发生变化。

根据牛顿第二定律, 有

$$F(t) + F_1(t) + F_2(t) = m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} \quad (2-16)$$

式中, $F_1(t)$ 为阻尼器阻力, $F_1(t) = -f \frac{dx(t)}{dt}$; $F_2(t)$ 为弹簧恢复力, $F_2(t) = -k_t x(t)$; f 为阻尼系数; k_t 为弹簧系数, 即弹簧刚度

$$F(t) - f \frac{dx(t)}{dt} - k_t x(t) = m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} \quad (2-17)$$

将式 (2-17) 标准化, 得

$$\frac{m}{k_t} \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + \frac{f}{k_t} \frac{dx(t)}{dt} + x(t) = \frac{1}{k_t} F(t) \quad (2-18)$$

例 2.5 试证明图 2-5 (a)、(b) 所示的机械、电气系统是相似系统 (即两系统具有相同的数学模型)。