

电力系统自动化

浙江大学主编

电力工业出版社

电力系统自动化

浙江大学主编

电力工业出版社

内 容 提 要

全书共分四篇：第一篇自动控制理论；第二篇电力系统自动操作和调节装置；第三篇电力系统远动技术；第四篇电力系统自动监视和控制。

本书主要阐述惯用的及现代的自动控制理论基础、自动准同期装置、低频减载装置、发电机自动调节励磁装置、发电机组自动调节转速装置、信息传输基础、布线逻辑远动装置原理、存贮程序远动装置原理、远动通道、电力系统自动监视和控制系统的构成及其功能、电力系统信息的收集和处理、电力系统的安全控制、电力系统经济运行和电能质量控制等。

本书为高等学校“发电厂及电力系统(电力系统及其自动化)”专业教材，也可供有关工程技术人员参考。

电 力 系 统 自 动 化

浙 江 大 学 主 编

*

电 力 工 业 出 版 社 出 版

(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 24.25印张 550千字

1980年12月第一版 1980年12月北京第一次印刷

印数 00001—15400册 定价 2.60元

书号 15036·4134

前 言

本书是根据1978年原水利电力部制订的高等学校教材编审出版规划(草案)而编写的。1978年4月在杭州召开了本书的编写大纲讨论会。1980年1月又由上海交通大学主持在上海召开了本书的审稿会。参加审稿会的有22个单位,共29名代表。

全书共分四篇:第一篇自动控制理论;第二篇电力系统自动操作和调节装置;第三篇电力系统远动技术;第四篇电力系统自动监视和控制。

本书由浙江大学和华南工学院编写,主编单位为浙江大学。书中的第一篇由浙江大学于渤执笔,第二篇由华南工学院梁子雄执笔,第三篇由华南工学院李统豪执笔,第四篇由浙江大学韩祯祥执笔。韩祯祥、于渤任主编。

本书由主审单位上海交通大学杨冠城同志主审,该校提兆旭同志参加了部分审阅工作。全书的图表由浙江大学印刷厂张礼明同志绘制。对于审稿和帮助本书编写工作的同志,在此表示衷心的感谢。

本书为高等学校“发电厂及电力系统(电力系统及其自动化)”专业教材,也可供有关的工程技术人员参考。

限于水平和条件,致使书中存在着缺点和错误,希望读者批评指正。

编 者

1980年4月

目 录

前 言

第一篇 自动控制理论

第一章 自动控制理论概论	1
第一节 概述	1
第二节 物理系统的数学模型	3
一、线性系统和非线性系统；二、简单系统数学模型的建立；三、传递函数；四、结构图	
第三节 基本控制作用和反馈的若干作用	17
一、两位控制；二、比例、积分和微分控制；三、反馈的若干作用	
第四节 暂态响应分析和误差分析	21
一、冲激响应函数；二、一阶系统；三、二阶系统；四、高阶系统；五、稳态误差和稳态误差系数	
第一章 习题	33
第二章 线性连续系统	35
第一节 劳斯稳定判据	36
第二节 根轨迹法	39
一、根轨迹图；二、使用根轨迹法的步骤；三、幅角和幅值判据；四、根轨迹的几何性质(构成规则)	
第三节 频率响应法	47
一、对数坐标图；二、极坐标图；三、对数幅值—相位图；四、乃奎斯特稳定判据；五、相对稳定性	
第四节 设计与校正方法	67
一、超前、滞后和滞后-超前校正；二、用根轨迹法设计控制系统；三、用频率响应法设计控制系统	
第二章 习题	78
第三章 非线性连续系统	79
第一节 概述	79
*第二节 描述函数法	80
第三节 相平面法	86
一、相轨迹作图方法；二、由相平面图求时间解；三、奇点和极限环	
第三章 习题	92
第四章 离散系统	93
第一节 z 变换法	93
第二节 用差分方程描述离散系统以及用 z 变换法解差分方程	98
第三节 z 传递函数	101
第四节 离散系统的稳定性分析	104

第四章 习题	106
第五章 现代控制理论导论	107
第一节 状态空间法	107
一、状态变量的选择和状态方程的建立；二、定常系统状态方程的解法；三、传递矩阵；*四、线性时变系统；五、离散系统的状态空间表达式；六、离散系统状态方程的解法；七、连续系统状态方程的离散化	
第二节 可控性和可观测性	129
一、可控性；二、可观测性	
第三节 李雅普诺夫稳定性分析	136
一、预备知识；二、李雅普诺夫稳定性分析的有关概念；三、李雅普诺夫第二方法；四、线性定常系统的稳定性分析；五、非线性系统的稳定性分析	
第四节 最佳控制概述及其他	145
一、最佳控制概述；二、其他	
第五章 习题	147

第二篇 电力系统自动操作和调节装置

第六章 电力系统自动并列和低频减载装置	150
第一节 电力系统的并列操作	150
一、准同期并列；二、自同期并列；三、非同期并列	
第二节 准同期并列的基本原理	154
第三节 恒定越前时间准同期装置	159
一、恒定越前时间部分；二、自动同期合闸部分；三、均压部分；四、均频部分	
第四节 准同期并列的计算	169
一、冲击电流的计算；二、允许合闸误差角的计算；三、允许滑差角频率的计算	
第五节 自动低频减载装置	171
一、使用自动低频减载装置的重要性；二、电力系统的负荷静态频率特性；三、自动低频减载装置的基本原理	
第七章 发电机自动调节励磁装置	177
第一节 概述	177
一、引言；二、自动调节励磁系统的主要作用；三、对自动调节励磁装置的基本要求	
第二节 励磁系统的主要结构方式	179
一、主电路部分；二、调节电路部分	
第三节 晶闸管励磁装置	185
一、主电路部分；二、调节电路部分	
第四节 并联运行机组的调压及无功功率分配	202
第八章 发电机组自动调节转速装置	204
第一节 概述	204
第二节 离心式调速器的基本原理与调节特性	206
一、调速器的主要构造原理；二、调速器的调节特性和调整过程	
第三节 功率-频率电液调速装置	213

一、功率-频率电液调速部件；二、电液转换部件；三、液压执行部件；四、功-频电液调速装置的使用	
第四节 并联运行机组的调频及有功功率分配	222
一、有差特性调节；二、无差特性调节	

第三篇 电力系统运动技术

第九章 信息传输基础	227
第一节 概述	227
一、电力系统信息传输过程；二、电力系统信息传输方式；三、抗干扰编码分类	
第二节 分组码	233
一、分组码的基本概念；二、循环码	
第三节 循环码的编译电路	242
一、循环码的编码器；二、循环码的检错译码	
第四节 卷积码	248
第十章 布线逻辑远动装置原理	252
第一节 概述	252
第二节 时序系统	254
一、主脉冲发生器；二、分频器；三、步分配器；四、点分配器	
第三节 遥信遥测发送原理	258
一、遥信编码；二、遥测编码；三、通信和遥测发码	
第四节 越限报警	266
一、模拟量比较报警；二、数字量比较报警	
第五节 遥信遥测接收原理	271
一、接收端的时序系统同步；二、遥信遥测码接收与检验	
第十一章 存贮程序远动装置原理	283
第一节 存贮程序控制原理	283
第二节 存贮程序远动装置的功能及原理图	285
一、主要功能；二、原理框图	
第三节 指令系统	290
一、算术逻辑指令；二、取数指令；三、送数指令；四、输入输出指令	
第四节 控制程序与流程图	294
一、控制程序；二、流程图	
第十二章 远动通道	306
第一节 调制方法	306
一、调幅；二、调频；三、调相	
第二节 调制电路	308
第三节 解调电路	310

第四篇 电力系统自动监视和控制

第十三章 电力系统自动监视和控制系统的构成及其功能	313
第一节 电力系统自动监视和控制系统的的基本功能	313

第二节	电力系统自动监视和控制系统的构成	316
第三节	人机联系的功能	321
第四节	电力系统的分层控制	324
第十四章	电力系统信息的收集和处理	326
第一节	电力系统信息收集系统的基本要求及其配置	326
第二节	电力系统的状态估计	328
第三节	错误数据的检测和识别	340
第十五章	电力系统的安全控制	344
第一节	安全控制的目的与任务	344
第二节	电力系统静态安全分析	350
第三节	电力系统在线稳定性估计	355
第十六章	电力系统经济运行和电能质量控制	357
第一节	电力系统自动调频的任务及调整准则	357
第二节	电力系统的经济运行	363
第三节	电力系统无功功率及电压的控制	367
第四节	电力系统经济运行和质量控制与安全控制的协调——最佳潮流计算	371
附录 I	潮流计算中的有功-无功功率分解法	375
附录 II	线损公式的推导	376

第一篇 自动控制理论

第一章 自动控制理论概论

第一节 概 述

在生产过程中，为了保持正常的工作条件，常常需要将某些量以一定的精度保持在一个定值上，或使它们按一定的规律变化。例如，在电力系统的运行中，需要保证电能的质量（频率、电压），这就需要对电力系统的运行进行控制、调节。对于简单的系统，可以进行人工控制。在没有人的直接参与的情况下，采用自动装置进行控制，就是自动控制。

自动控制系统是指由被控对象和控制装置所构成的、能够对被控对象的工作状态进行自动控制的系统。十八世纪出现的蒸汽机及其调速器，就是最早的自动控制系统。

一台同步发电机的电压调节是控制系统的例子。在人工控制电压时，操作者监视着电压表，发现电压高于希望值时就调小励磁电流，反之就调大励磁电流。用适当的自动装置（误差量测机构、自动控制器、执行机构等）来代替上述操作者的眼、脑和手的有关功能，就构成了自动控制系统。在复杂的控制系统中，由于变量之间存在着错综复杂的关系，就很难进行人工控制。即使在简单的系统中，采用自动控制器也有利于消除人工控制造成的误差，如果要求精确控制，就必须采用自动控制系统。

自动控制涉及广泛的领域，不限于物理系统，更不是仅限于电力系统。例如人体就是一个极其复杂的反馈控制系统，包含着许多控制回路。我们来看一个人取物的例子^①，这是图1-1所示的一个系统。手的期望位置是要取的物的位置，它通过眼送入脑；手的实际位置是输出量，它通过眼反馈到脑。脑具有比较器的功能，将这两种位置加以比较，得出误差信号。如果误差信号不为零，脑的另一部分（校正器）就送出信号给肌肉，肌肉把贮藏着的能量转化为功并使手移动。在正常情况下，误差信号将连续地减小，直至手与物足够接近并取得它。如前所述，人体是一个极其复杂的反馈控制系统，这里只是把人体的部分功能抽出来进行讨论的。

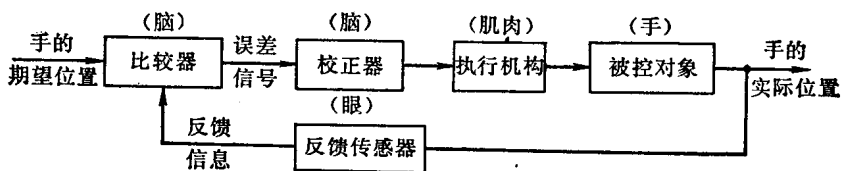


图 1-1 一种反馈系统——人取物

① 这是所谓诺伯特·维纳(Norbert Wiener, 控制论的奠基人)的经典例题。

自动控制理论包括惯用（经典）控制理论和现代控制理论。

二十世纪是自动控制理论快速发展的时期，由于科学技术和生产发展的需要，建立并发展了惯用的（经典的）自动控制理论。到了五十年代，惯用控制理论已趋于成熟。惯用控制理论主要以单输入-单输出定常控制系统为研究对象。在这样的情况下，惯用控制理论的应用是很有效的。惯用控制理论的主要内容有：研究线性系统的频率法以及根轨迹法；研究非线性系统的相平面法以及描述函数法；研究系统稳定性的判据；设计校正方法等等。

1960年前后，现代控制理论开始建立和发展起来。这是由于有了下列诸条件才得以形成的：空间技术发展的需要；惯用控制理论的局限性；现代数学提供的理论和方法；电子数字计算机技术提供的快速、可靠的计算工具。现代控制理论采用反馈原理，这一点与惯用控制理论相同。而现代控制理论与惯用控制理论相比，具有如下优点：前者可用于非线性、时变、多输入-多输出系统；后者一般适用于线性、定常、单输入-单输出系统。前者引用状态变量概念（这是一个重大的变化），采用时域分析法，在综合最佳控制系统时不需要处理几何问题，而且可以采用数字计算机进行数值计算；后者则采用频域分析法，很多情况下要处理几何问题。

现代控制理论具有很多优点，已如上述。但是，对于单输入-单输出定常控制系统来说，惯用控制理论有效而又简单，因而惯用控制理论在这样的情况下仍被广泛地使用着。我们将在第一章至第四章讲述惯用控制理论，在第五章讲述现代控制理论。

为了以后阐述的方便，我们先就自动控制的一些术语作如下的说明。

系统 系统是由相互作用和相互依赖的若干组成部分结合成的具有特定功能的有机整体。例如，励磁机、同步发电机和励磁调节器构成了励磁控制系统。又如，调速器、汽轮机和发电机构成了调速系统。

输入量（输入变量、输入信号、激励）是指作用于一个元件、装置或系统输入端的量。对于物理系统它是物理量。它可以是电量，也可以是非电量。它指的是信息或信号（包括有用信号和干扰）。它一般是时间的函数（确定函数或随机函数）。

输出量（输出变量、输出信号、响应）是指确定被控元件、装置或系统运动的状态的量。对于物理系统它是物理量，它是在元件或系统输出端出现的电量（例如在电力系统中，电压、频率等）或非电量（温度、压力、成分或位移等）。它是系统初始状态和输入量的函数。

被控制量是指被控对象所要求自动控制的量。对于物理系统它是物理量。它通常是决定被控对象工作状态的主要变量，例如，火箭、导弹和飞船的方向、速度及轨道参数，电机的转速，轧钢机的钢板厚度，化学反应器内的浓度等。被控制量也就是自动控制系统的一部分输出量。当被控对象只要求实现自动调节，即要求某些参数保持给定数值或按一定规律变化时，被控制量就是被调节量（被调量）。

控制量（控制作用）是指控制器的输出量，它通过执行机构改变输入于被控对象的物料或能量（如温度控制系统的进出物料，加热蒸汽或燃料的流量，电动机转速控制系统中的励磁电流等），从而对被控对象进行控制。控制器视作调节器时控制量也就是调节量

(调节作用)。

干扰(扰动) 引起被调量变化的除调节量外的所有变量,以及影响各部件输出量变化的因素都可视作干扰。例如装置的电源电压的振幅值和频率的变化,环境温度、湿度、气压的变化以及负载的变化等等。干扰产生在系统内部称为内扰,干扰产生在系统外部则称为外扰。有效的自动调节与控制系统应具有补偿和克服内外干扰的能力,使被控对象处于良好的工作状态。

反馈 把系统的输出信号送回到输入端,以增强或减弱输入信号的效应称为反馈。使输入信号增强者称正反馈;使输入信号减弱者称负反馈。反馈信号(即反馈元件的输出量)与系统输出量(即反馈元件的输入量)成比例者称为硬反馈或刚性反馈;反馈信号为输出量的导数者称为软反馈或柔性反馈。

反馈控制 在自动调节与控制系统中,将被控对象的输出量送回到输入端,与给定值比较,形成偏差信号。偏差信号通过调节器的作用,调节被控对象的输出量,使输出量与给定值的偏差保持在容许范围以内。这样的控制称为反馈控制。反馈控制是针对无法预计的干扰而设计的,对于可以预计的或者已知的干扰,则可以在系统中加以校正。

反馈控制系统 实行反馈控制的系统称为反馈控制系统。

自动调节系统 能使被调对象的被调量维持在规定值或按一定规律变化的反馈控制系统称为自动调节系统。例如:压力自动调节系统,电压自动调节系统等。

对这些术语现在只是作一般的了解,随着以后有关论述的逐步深入,我们可以加深对于它们的理解。

第二节 物理系统的数学模型

物理系统的某些变量之间的关系,可以用公式表示,也可以用表格或图形表示。这些公式、表格或图形称为物理系统的数学模型。换言之,物理系统的数学模型是系统的变量之间相互关系和变化规律的一种数学描述,它把系统中物理现象的分析归结为某种形式的数学问题。数学模型分为静态模型和动态模型。静态模型是各个有关参数(变量)在静态时(即它们对时间的各阶导数均为零时)的关系。而动态模型则是各个有关参数在动态过程中的关系。在建立数学模型时,要兼顾模型的简化和结果的准确性。应该根据课题的要求来确定数学模型的简化程度,要力求简化,但必须满足课题的要求。在建立简化模型时,常要忽略系统的一些固有的物理特性。例如,采用线性集中参数数学模型时,要忽略掉物理系统中存在着的一定的非线性因素和分布参数效应。如果这些被忽略掉的因素对输出量的影响较小,则数学模型将能表征系统的行为。

一、线性系统和非线性系统

(一)线性系统 我们都很熟悉欧姆定律,它说明电阻两端电压与其中通过的电流之间的关系。由于电阻两端电压与其中通过的电流成正比,因此它是一种线性关系。还有虎克定律,它说明弹簧形变与应力成正比,也是一种线性关系。

一个系统被称为线性的,是表明它具有可加性和均匀性(或称齐次性)。

所谓可加性，是指几个激励函数叠加产生的总响应是各个激励函数单独作用所产生的响应函数的叠加。如果 $c_1(t)$ 和 $c_2(t)$ 分别是系统对于激励 $r_1(t)$ 和 $r_2(t)$ 的响应，则系统对于激励 $r_1(t)+r_2(t)$ 的响应为 $c_1(t)+c_2(t)$ 。以上所述意味着，在线性系统内一个激励的存在并不影响另一个激励引起的响应，各个激励产生的响应是互不影响的。

所谓均匀性（或称齐次性），是指系统响应的增减与激励的增减成正比。如果 $c_1(t)$ 是系统对于激励 $r_1(t)$ 的响应，则系统对于 $a_1 r_1(t)$ 的响应为 $a_1 c_1(t)$ ，这里 a_1 是任意实数。

可以用叠加性这样一个概念来概括上面所述的可加性和均匀性（齐次性）。这是说如果 $c_1(t)$ 和 $c_2(t)$ 分别是系统对于激励 $r_1(t)$ 和 $r_2(t)$ 的响应，则系统对于激励 $a_1 r_1(t) + a_2 r_2(t)$ 的响应为 $a_1 c_1(t) + a_2 c_2(t)$ ，这里 a_1 、 a_2 分别是任意实数。

我们说上面所述的两种提法是等价的，这是因为，如果一个系统具有可加性和均匀性，则容易得出结论：系统对于激励 $a_1 r_1(t) + a_2 r_2(t)$ 的响应为 $a_1 c_1(t) + a_2 c_2(t)$ （记号的含义同前），即系统具有叠加性；反之，如果系统具有叠加性，则令 $a_1 = a_2 = 1$ ，就可以导出可加性，令 $a_2 = 0$ ，就可以导出均匀性。

系统具有叠加性又可以说成是系统适用叠加原理。

可加性和均匀性是线性系统两个独立的性质，有的系统，具有可加性，但不具有均匀性，这样的系统不能称之为线性系统^①。具有均匀性，但不具有可加性的系统，也不能称之为线性系统。

线性系统以线性方程作为其数学模型。

由定常（不随时间变化）集中参数元件组成，可以用线性常系数微分方程或代数方程来描述的这类线性系统，叫做线性定常系统。如果描述线性系统的微分方程的系数是时间的函数，则称这类系统为线性时变系统。例如宇宙飞船控制系统就是时变控制系统，随着燃料的消耗，飞船的质量在发生变化，当飞船飞出地球后，重力也发生变化。

（二）非线性系统 不符合线性系统条件的系统，就是非线性系统。

在大多数情况下，线性系统只是在一定的工作范围内才符合它应该满足的条件。例如，电阻两端电压与其中通过的电流之间，也不是在任何条件下都呈线性关系的。当电阻中电流大大增加时，就不再呈线性关系了。许多机电系统、液压系统、气动系统等，在变量之间存在着非线性关系，例如，在大输入信号作用下，元件的输出量可能饱和。此外，元件中还可能存在着死区，影响小信号的正常工作的（元件的死区是指其输入变量的某个小的区间，在这区间内，元件对输入变量的变化不敏感）。在某些元件中，也可能存在着平方关系这样一种非线性关系，如此等等。这些非线性关系的特性如图1-2所示。

有些重要的控制系统，对于任意大小的输入信号，系统都是非线性的。例如，在继电控制系统中，控制作用不是接通就是断开，控制器的输入量与输出量的关系总是非线性的。

非线性系统不能应用叠加原理。因此，对包含有非线性系统的问题求解，常常是很复

① 可参阅郑钧著，毛培法译《线性系统分析》。

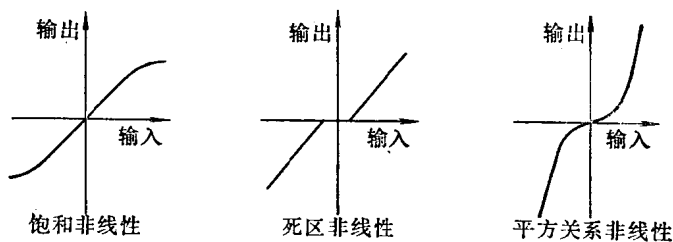


图 1-2 一些非线性关系的特性曲线

杂的。有时需引入“等效”线性系统来代替非线性系统，但采用这种等效线性系统，只在一定的工作范围内才是正确的。

二、简单系统数学模型的建立

下面举一些例子来说明简单系统数学模型的建立，并结合介绍自动控制系统的基本环节。复杂的系统往往可以看作是由多个基本环节联接而成的。

(一) 比例环节 这种环节的输出量与输入量成比例，可以用下述代数方程来描述：

$$y = Kx \quad (1-1)$$

式中 y —— 输出量；

x —— 输入量；

K —— 该环节的放大系数。

机械杠杆、齿轮系、电位计以及电子放大器（工作在特性曲线的直线部分）等都是比例环节，也称无惯性环节。严格地说，任何一个环节总多少存在机械惯性或电磁惯性，但在一个调节系统中比例环节的惯性与其他环节相比要小得多，因而可以忽略。

(二) 一阶惯性环节 在这种环节中，输入量的作用不立即在输出端全部表现出来，而是有一些延缓，就是说有惯性。

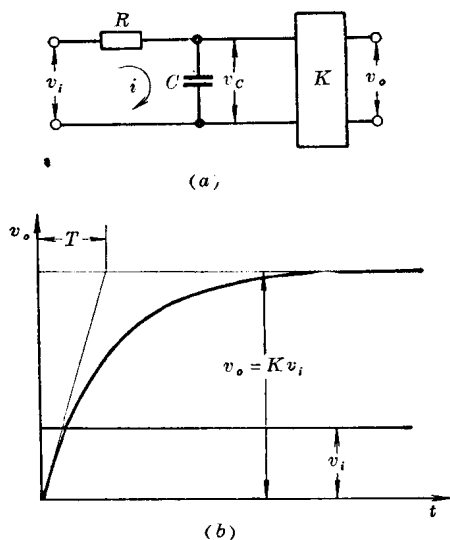


图 1-3 RC 串联的惯性环节 (a) 和动态特性 (b)

图1-3 (a) 是由 RC 串联电路组成惯性环节的例子。可以写出电容器上的电压 v_c 与输入电压 v_i 的关系式为：

$$T \frac{dv_c}{dt} + v_c = v_i$$

式中 $T = RC$ —— 电路的时间常数。

因为还经过一个放大系数为 K 的无惯性放大器才输出，所以输出电压 $v_o = K v_c$ ，因而得到 v_o 与 v_i 的关系为：

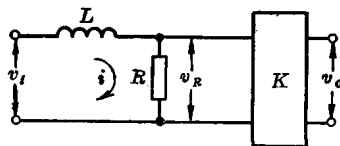


图 1-4 RL 串联的惯性环节

$$T \frac{dv_o}{dt} + v_o = K v_i \quad (1-2)$$

图1-3(b)表明,在输入端加上一个阶跃量 v_i ,输出量不会马上达到稳定值,而是按指数规律逐渐上升的。

图1-4是由 RL 串联电路组成惯性环节的例子。除了时间常数不同($T=L/R$)而外,与图1-3情况完全相同。

(三) 微分环节 这种环节的输出量不是与输入量的数值成正比,而是与其变化速度,即与输入量关于时间的导数成正比。

对于图1-5所示的 RC 串联电路可以写出如下方程:

$$T \frac{dv_o}{dt} + v_o = K T \frac{dv_i}{dt} \quad (1-3)$$

这样的环节称为惯性微分环节。当时间常数 $T=RC$ 数值很小而放大系数 K 很大时,左边第一项可以忽略,这时可以写成

$$v_o = K T \frac{dv_i}{dt} \quad (1-4)$$

这样的环节称为微分环节。

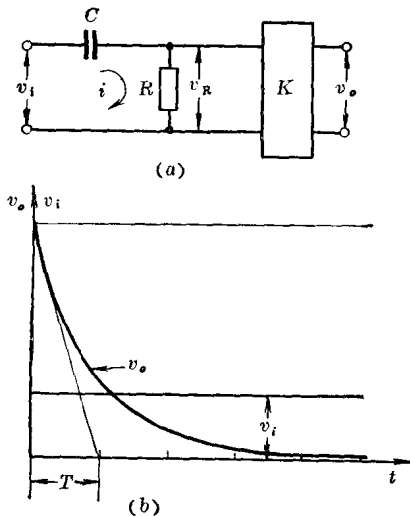


图 1-5 RC 串联的微分环节 (a) 和动态特性 (b)

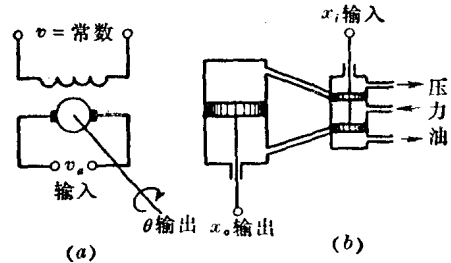


图 1-6 积分环节
(a)他励直流电动机; (b)油动机

(四) 积分环节 这种环节的输出量与输入量的积分成比例。

图1-6(a)中他励直流电动机是积分环节的例子。取电枢电压 v_a 为环节的输入量,当在电动机的励磁绕组上加以恒值直流电压并忽略电枢回路的时间常数(即认为电枢电流是瞬时增长到稳定值的)时,电动机电枢转过的角度 θ ,即环节的输出量为

$$\theta = K \int v_a dt \quad (1-5)$$

汽轮机调速器中带错油门的液动油动机,如忽略运动部分的质量和油的粘性的影响,也是积分环节的例子,如图1-6(b)所示。

错油门的位移为输入量 x_i ,油动机活塞的位移为输出量 x_o ,它们之间的关系如下:

$$x_o = K \int x_i dt \quad (1-6)$$

式中 K —— 常数。

输入量为常数时,积分环节的输出量是按一定斜率增长的直线,如图1-7所示。

(五) 二阶环节 振荡环节是一种二阶环节, 这种环节含有两种不同类型的储能元件。例如一个储藏电场能量, 另一个储藏磁场能量, 能量的储藏方式反复地变换, 就会产生振荡。电感 L 、电容 C 和电阻 R 串联组成的电路就是这种环节的例子 (图1-8)。

可以写出 RLC 串联电路二阶环节的方程:

$$T_1 T_2 \frac{d^2 v_o}{dt^2} + T_1 \frac{dv_o}{dt} + v_o = K v_i \quad (1-7)$$

式中 $T_1 = RC$, $T_2 = L/R$ 。

上式的特征方程有两个根 P_1 和 P_2 。由数学知识可知: 如 P_1 和 P_2 都是负实数, 则 v_o 的暂态分量是非周期性的; 如 P_1 和 P_2 是共轭复数且其实部为负, 则 v_o 将是逐渐衰减的振荡过程, 如图1-8 (b) 所示。

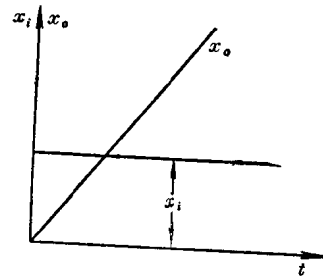


图 1-7 积分环节的动态特性

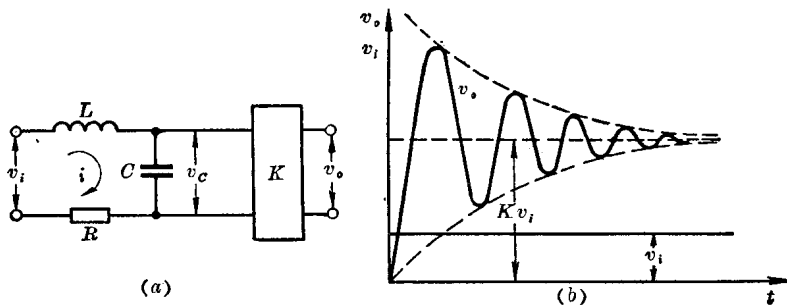


图 1-8 RLC 串联的振荡环节 (a) 和动态特性 (b)

(六) 纯滞后环节或纯延迟环节 环节的方程为:

$$y(t) = x(t - \tau) \quad (1-8)$$

式中 $y(t)$ —— 输出量;

$x(t)$ —— 输入量;

τ —— 纯滞后时间。

有了各个环节的数学模型以后, 就可借以建立整个系统的数学模型。

三、传递函数

前面举了一些建立简单系统 (基本环节) 数学模型例子, 所用的方法是写出描述系统 (环节) 的微分方程。解出这些微分方程, 就可以阐明系统的性能和行为。但是, 解微分方程常常是不容易的。为了避免解微分方程的困难, 常采用一些其它办法。相应地, 数学模型也用其它形式来表示, 下面将分别加以介绍, 这里首先讨论传递函数。

在高等数学教程中, 讲了拉普拉斯变换, 简称拉氏变换。拉氏变换法是一种解常系数线性微分方程的简便方法, 它能使微积分的运算由代数运算来代替。于是, 求解线性微分方程就转变成求解代数方程, 从而使分析系统特性的工作大为简化。

线性定常系统的传递函数定义为: 初始条件为零时, 输出量 (响应函数) 的拉氏变换

与输入量（驱动函数，激励函数）的拉氏变换之比。

设有一线性定常系统，它的微分方程为：

$$\begin{aligned} a_0 \frac{d^n}{dt^n} y + a_1 \frac{d^{n-1}}{dt^{n-1}} y + \dots + a_{n-1} \frac{dy}{dt} + a_n y \\ = b_0 \frac{d^m}{dt^m} x + b_1 \frac{d^{m-1}}{dt^{m-1}} x + \dots + b_{m-1} \frac{dx}{dt} + b_m x \quad (n \geq m) \end{aligned} \quad (1-9)$$

式中 $y=y(t)$ ——系统的输出量；

$x=x(t)$ ——系统的输入量。

初始条件为零时，对上式两端分别取拉氏变换，可得

$$(a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n) Y(s) = (b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \dots + b_{m-1} s + b_m) X(s) \quad (1-10)$$

式中 $Y(s)$ 、 $X(s)$ 分别是 $y(t)$ 、 $x(t)$ 的象函数，我们可以将上式改写为

$$Y(s) = G(s) X(s) \quad (1-11)$$

$$\text{式中 } G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \dots + b_{m-1} s + b_m}{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n} \quad (1-12)$$

可以看出， $X(s)$ 乘以 $G(s)$ ，就得 $Y(s)$ ， $G(s)$ 起着输入量到输出量的传递作用，因而称它为传递函数。传递函数分母中 s 的最高阶数 n ，就是输出量最高阶导数的阶数，这种系统就叫 n 阶系统。传递函数表达了系统本身的特性，它不随输入量（驱动函数）的不同而变化。传递函数表达了输出量与输入量的关系，但必须明确它是输出量的拉氏变换 $Y(s)$ 与输入量的拉氏变换 $X(s)$ 的比值，不要误以为传递函数是 $y(t)/x(t)$ 。传递函数不能表明系统的物理结构，许多物理性质不同的系统，可以有相同的传递函数。

我们来看一个例子，重写图1-8所示二阶环节的微分方程

$$T_1 T_2 \frac{d^2 v_o}{dt^2} + T_1 \frac{dv_o}{dt} + v_o = K v_i$$

设初始条件为零，对上述方程两端取拉氏变换，得

$$T_1 T_2 s^2 V_o(s) + T_1 s V_o(s) + V_o(s) = K V_i(s)$$

这一环节的传递函数

$$G(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{K}{T_1 T_2 s^2 + T_1 s + 1} \quad (1-13)$$

再看另一个例子，纯滞后环节或纯延迟环节的方程为

$$y(t) = x(t - \tau)$$

由拉氏变换的位移性质可知

$$Y(s) = e^{-\tau s} X(s)$$

这一环节的传递函数为

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = e^{-\tau s} \quad (1-14)$$

几种环节的传递函数如表1-1所示。

表 1-1

几种环节的传递函数

环节类型	图号	方程	传递函数
比例环节		$y = Kx$	K
一阶惯性环节	图 1-3 1-4	$T \frac{dv_o}{dt} + v_o = K v_i$	$\frac{K}{Ts+1}$
微分环节	图 1-5	$v_o = KT \frac{dv_i}{dt}$	KTs
惯性微分环节	图 1-5	$T \frac{dv_o}{dt} + v_o = KT \frac{dv_i}{dt}$	$\frac{KTs}{Ts+1}$
积分环节	图 1-6	$\theta = K \int v_o dt, \quad x_o = K \int x_i dt$	$\frac{K}{s}$
二阶环节	图 1-8	$T_1 T_2 \frac{d^2 v_o}{dt^2} + T_1 \frac{dv_o}{dt} + v_o = K v_i$	$\frac{K}{T_1 T_2 s^2 + T_1 s + 1}$
纯滞后环节 (纯延迟环节)		$y(t) = x(t - \tau)$	$e^{-\tau s}$

下面再举一些简单的例子。

【例 1-1】 描述某一系统的输出量 y 与输入量 x 之间关系的微分方程为

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + 3 \frac{dy}{dt} + 3y = x + \frac{dx}{dt}$$

求系统的传递函数。

解： 设初始条件为零，对方程取拉氏变换，得

$$s^2 Y(s) + 3sY(s) + 3Y(s) = X(s) + sX(s)$$

系统的传递函数为

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{s+1}{s^2+3s+3}$$

【例 1-2】 一具有时滞的系统，微分方程为

$$\frac{d}{dt} y(t) + y(t) = x(t - T)$$

求系统的传递函数。

解： 设初始条件为零，对方程取拉氏变换，得

$$sY(s) + Y(s) = e^{-sT} X(s)$$

系统的传递函数为

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{e^{-sT}}{s+1}$$

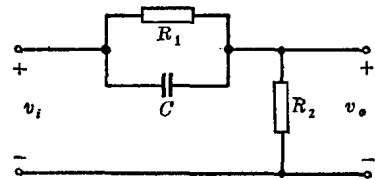


图 1-9 超前校正器网络

【例 1-3】 求图1-9所示的 RC 网络（这是所谓超前校正器）的传递函数。

解： 通常在推导四端网络的传递函数时，假设电源阻抗为零，负载阻抗为无穷大。由基尔霍夫定律得

$$C \frac{d}{dt} (v_i - v_o) + \frac{1}{R_1} (v_i - v_o) = \frac{1}{R_2} v_o$$

设初始条件为零，对上述方程取拉氏变换

$$Cs[V_i(s) - V_o(s)] + \frac{1}{R_1}[V_i(s) - V_o(s)] = \frac{1}{R_2} V_o(s)$$