

热工自动化仪表

华北电力学院 沈自钧 徐书松

电力工业出版社

热 工 自 动 化 仪 表

华北电力学院 沈自钧 徐书崧

电 力 工 业 出 版 社

内 容 提 要

全书共分四篇：第一篇热工自动化仪表的组成原理与分析方法。重点介绍自动化仪表的信号流程图分析法、反馈及其应用；此外，对实际工作中的抗干扰措施、自动化仪表的校验和检修方法等也作了扼要的归纳。第二篇 DDZ-II 型电动单元组合仪表。第三篇组装式电子综合控制装置。第四篇其它不同类型的热工自动化仪表。后三篇分别以几个主要单元为例，对这些单元的工作原理和线路进行了详细分析。

本书可作为高等学校“热工自动化仪表”课程的教材，也可供有关专业技术人员参考。

热工自动化仪表

华北电力学院 沈自钧 徐书蕊

*

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 20印张 452千字 4插页

1980年12月第一版 1980年12月北京第一次印刷

印数 00001—12120册 定价 2.35元

书号 15036·4123

前 言

本书是根据原水利电力部1978年召开的“高等学校电力类热工测量与自动化专业教学计划和教材规划会议”的精神编写的，作为本专业“热工自动化仪表”课程的教材。

本书具有如下特点：

1.为适应自动化仪表迅速发展的形势，本书在叙述一般常用热工自动化仪表的基础上，着重在仪表的组成原理和整机分析上加以阐述，为此，书中增加了“自动化仪表的信号流程图分析法”、“反馈及其应用”等内容，以便对今后遇到的新型自动化仪表能进行较深入的分析；

2.本书内容以DDZ-II型仪表和TF组装式电子综合控制装置为主，对电厂中已使用的、具有代表性的其它类型仪表也都作了介绍，并加强了对上述仪表的理论分析和有关参数的计算；

3.对在使用仪表过程中所需的有关知识，如自动化仪表的抗干扰措施，自动化仪表的校验、检修等也都作了扼要的归纳。

全书经西安交通大学陈焕生同志审阅，此外，南京工学院、西安交通大学、重庆大学、浙江大学、北京工业大学、东北电力学院、武汉水利电力学院、上海电力专科学校等兄弟院校的同志也提出了许多宝贵意见，在此一并表示感谢。

由于我们的业务水平有限，内容中必定会存在不少缺点、错误，诚恳地希望广大读者批评指正。

一九七九年十二月

目 录

前言

第一篇 热工自动化仪表的组成原理与分析方法

第一章 概论	1
第一节 自动化仪表的作用及其与生产发展的关系	1
第二节 我国工业自动化仪表的发展与展望	1
一、我国工业自动化仪表的发展概况；二、对我国工业自动化仪表发展方向的展望	
第二章 自动化仪表的信号流程图分析法	4
第一节 自动化仪表传递函数的列写方法	4
一、变换阻抗；二、线性方程的信号流程图表示法；三、信号流图的简化方法；四、梅森公	
式；五、梅森公式的应用	
第二节 晶体管放大电路的信号流程图分析法	20
一、四端网络和 h 参数；二、 h 微变等效电路和信号流图；三、单元电路的信号流图；四、	
多级放大电路信号流图的作法；五、低频放大电路计算举例	
第三章 反馈及其应用	41
第一节 反馈的分类	41
第二节 反馈原理	44
第三节 反馈对放大器性能的影响	46
第四节 应用反馈组成各种电路	47
一、应用负反馈组成各种运算电路；二、应用负反馈组成函数发生电路；三、应用负反馈	
组成稳压电路和恒流电路；四、应用正反馈组成单稳态触发器及波形发生器；五、应用反	
馈组成其它电路	
第四章 自动化仪表的抗干扰措施	60
第一节 干扰的来源	60
第二节 干扰信号的传输途径	62
第三节 抑制干扰的方法	65
第五章 自动化仪表在使用中的一些问题	71
第一节 自动化仪表的品质指标	71
第二节 自动化仪表的校验	72
第三节 自动化仪表检修的一般方法	72
一、检修的一般步骤；二、寻找故障的几种方法	
第四节 自动化仪表的日常维护	75

第二篇 DDZ-II型电动单元组合仪表

第六章 DDZ-II型电动单元组合仪表概况	76
一、电动单元组合仪表的特点；二、DDZ-II型仪表的品种分类；三、DDZ-II 型仪表的	
主要性能指标；四、DDZ-II型仪表各型号的代表符号	

第七章 变送单元	78
第一节 压力、差压变送器	78
一、功能及技术特性；二、工作原理；三、结构说明及线路分析	
第二节 温度(差)变送器	96
一、功能及技术特性；二、工作原理；三、线路分析	
第八章 调节单元	109
第一节 DTL调节器	109
一、功能及技术特性；二、工作原理及线路分析；三、动态特性分析；四、整机综述	
第二节 微分器	128
一、功能及技术特性；二、工作原理及线路分析；三、动态分析	
第九章 电动执行器	133
第一节 角行程电动执行器	133
一、功能及技术特性；二、工作原理；三、线路分析	
第二节 直行程电动执行器	147
第十章 计算单元	148
第一节 开方器	148
一、功能及技术特性；二、工作原理；三、线路分析	
第二节 乘除器	162
一、功能及技术特性；二、工作原理；三、线路分析	
第十一章 显示及给定单元	168
第一节 比例积算器	168
一、功能及技术特性；二、工作原理；三、线路分析	
第二节 恒流给定器	178
一、功能及技术特性；二、工作原理及线路分析	
第十二章 操作器	180
第一节 D型操作器	180
一、功能及技术特性；二、工作原理及线路分析	
第二节 Q型操作器	181
一、功能及技术特性；二、工作原理及线路分析	

第三篇 组装式电子综合控制装置

第十三章 组装式电子综合控制装置总体介绍	184
第一节 组装式电子综合控制装置总体概况	184
第二节 TF装置的总体分类	184
一、模拟量功能组件部分；二、数字逻辑组件部分	
第三节 TF装置的命名规则	186
第十四章 转换组件	187
第一节 非隔离式的电流输入转换组件	187
一、功能及技术特性；二、 I_{10}/E 组件的工作原理及线路分析；三、 I_{20}/E 组件的工作原理及线路分析	
第二节 非隔离式的电流输出转换组件	192
一、功能及技术特性；二、 E/I_{10} 组件的工作原理及线路分析；三、 E/I_{20} 组件的工作原理及线路分析	

第十五章 调节及控制组件	197
第一节 普通型PID调节组件	197
一、功能及技术特性；二、工作原理及线路分析；三、整机动态特性；四、整机综述	
第二节 不带延时的自动/手动切换组件	212
一、功能及技术特性；二、工作原理及线路分析	
第三节 带延时的自动/手动切换组件	214
一、功能及技术特性；二、工作原理及线路分析	
第十六章 计算组件	220
第一节 通用函数发生组件	220
一、功能及技术特性；二、工作原理及线路分析；三、通用函数发生组件的应用	
第二节 惯性组件	229
一、功能及技术特性；二、工作原理；三、动态分析	
第十七章 操作器、跟踪系统及监控器	232
第一节 显示操作器	232
一、功能及技术特性；二、工作原理及线路分析	
第二节 直接操作器	234
一、功能及技术特性；二、工作原理及线路分析	
第三节 自动/手动切换及跟踪系统	237
一、概述；二、调节系统的工作状态；三、各操作工况之间的切换	
第四节 固定监控器	239
一、功能及技术特性；二、工作原理；三、线路分析	

第四篇 其它不同类型的热工自动化仪表

第十八章 其它不同类型的热工自动化仪表简介	249
第十九章 热工测量中常用的电子仪表	250
第一节 自动电子电位差计	250
一、工作原理；二、线路分析；三、整机综述	
第二节 自动电子平衡电桥	265
一、工作原理；二、桥路计算	
第二十章 变送器	269
第一节 采用应变片的电子差压（压力）变送器	269
一、功能及技术特性；二、工作原理；三、线路分析	
第二节 DDZ-III型矢量机构差压变送器	276
一、功能及技术特性；二、工作原理；三、线路分析；四、整机综述	
第三节 DDZ-III型两线制温度变送器	285
一、功能及技术特性；二、工作原理；三、线路分析	
第二十一章 调节器及执行器	299
第一节 准连续作用式电子调节器	299
一、功能及技术特性；二、工作原理；三、线路分析；四、动态特性分析；五、整机综述	
第二节 电信号气动长行程执行机构	310
一、功能及技术特性；二、工作原理及结构分析	

第一篇 热工自动化仪表的组成原理与分析方法

第一章 概 论

第一节 自动化仪表的作用及其与生产发展的关系

随着我国社会主义建设事业的发展,工业生产规模日益扩大,各种大容量、高效率和高参数的新型设备越来越多地在工业生产中应用,“自动化”已经成为现代工业生产中不可缺少的一种技术手段。

工业自动化水平的高低,是衡量一个国家科学水平与生产技术先进程度的重要标志之一。随着自动控制理论和自动化仪表的迅速发展,目前已经出现了多种多样的自动控制系统。

自动化仪表在系统中起着“眼”、“脑”和“手”的作用。被控参数的数值,必须用各种变送器来检测;各种数学运算和逻辑判断,必须用各种调节器和逻辑运算器来进行;系统中的执行指令,则必须由各种执行器来完成。

工业自动化仪表是实现工业生产过程自动化的工具。它总是伴随着工业生产和科学技术水平的提高而不断向前发展。由于生产规模的不断扩大、工艺要求日趋复杂以及对劳动生产率和生产安全性提出的更高要求,因此,对工业自动化仪表也不断提出新的课题和任务。

新技术、新工艺、新材料和新器件的不断出现,也使工业自动化仪表得到了不断更新。

为提高发电机组的效率,电厂热工参数值越来越接近于金属所允许的临界参数值。为了确保发电厂的安全、经济等各项技术指标,对热工自动化仪表提出了“稳、准、灵”的要求。随着高参数、大容量机组的投产和电子计算机的应用,对热工自动化仪表的品种、技术性能以及自动调节系统的组成等各方面都提出了更高的要求。本书将从自动化仪表使用者的角度出发,对自动化仪表的组成原理、分析方法以及目前在大型火力发电厂中常用的热工自动化仪表进行较全面的分析。

第二节 我国工业自动化仪表的发展与展望

一、我国工业自动化仪表的发展概况

解放前,我国仪表制造业相当落后;解放后才引进和仿造了苏联的一些产品,如МИБ 动圈式毫伏计、ЭПП-09电子电位差计、ЦКТИ电气机械式调节器和整套ВТИ电子调节仪表等。

一九五八年以后,我国开展了电动、气动单元组合式检测、调节成套仪表的研究和试制工作。六十年代初期,以电子管作基本电子器件的DDZ-I型电动单元组合仪表试制成功。该系列仪表的主要特点是:采用交流分散供电,单元之间无论距离如何,均采用0~

10mA.D.C作为传输信号；另外，在系统结构上，调节、显示、操作等三种功能是彼此分离的，也就是说，不同的单元有不同的、单一的功能。

DDZ-I型仪表也存在着一些缺点，如该型仪表无论传输距离的远近，均采用电流传输制，这样，就势必在每个单元内增设功率放大级，这不但使仪表体积增大，同时也使热耗增加；另外，结构上的功能分离，使构成一个复杂系统要采用很多个单元。如构成一个简单的PID调节器就需采用两个时间单元和一个比例单元，对于调节回路多的复杂系统，那就会带来更多不便，如仪表盘面过大，操作整定麻烦，盘后接线杂乱等等。

随着半导体器件生产技术的显著进展，一九六五年我国着手研制以晶体管和小型电子器件为基本元件的DDZ-II型电动单元组合仪表。该型仪表在技术和系统结构上的特点是：交流分散供电，单元间以0~10mA.D.C作传输信号。与DDZ-I型仪表不同的是，采用“功能合一”的结构，它可同时完成多种功能，如调节、操作、显示等。为了适应自动化系统提出的新要求，DDZ-II系列增设了许多特殊功能的仪表，在结构上也进行了很大的改进。由于该型仪表实现了晶体管化，所以单元的体积大大缩小，仪表的抗震性和功耗均优于DDZ-I型仪表；但是DDZ-II型系列中的差压、压力变送器仍继承了DDZ-I型仪表的力平衡测量原理，执行器也延用了DDZ-I型执行器的位置反馈原理。

继DDZ-II型仪表之后，我国仪表战线又研制出DDZ-III型仪表。该型仪表与DDZ-II型仪表有较大的区别，首先是它考虑了安全防爆问题，从而使电动单元组合仪表的应用范围扩大到含有可燃、可爆性气体和粉末等危险场合；第二是采用线性集成电路作为线路的核心器件，这就大大提高了线路工作的可靠性；第三，在信号制、供电方式以及在功能品种、仪表结构原理等方面与DDZ-II型仪表均有明显的差别。从整个仪表的水平来看，DDZ-III型仪表比DDZ-II型仪表又前进了一步。

近年来，与DDZ-III型仪表试制的同时，为了适应现代化大型企业自动化的要求，又试制出一种组装式电子综合控制装置。这种装置具有以下几个特点：

(1) 能灵活地组成各种复杂的调节系统 在大型企业的自动化系统中，往往要求把各个单回路系统联系起来进行多参数、多回路、多功能的综合控制，并使各个局部生产过程实现最佳化。而该装置品种多、功能广，能进行各种逻辑判断和函数运算，因此，该装置原则上能胜任上述要求。

(2) 可靠性高 该装置在器件上采用线性组件，尽量不用电解电容、少用接插件，电源采用蓄电池双重后备；组成系统时，充分考虑了本身故障、主设备故障及特大干扰时可能带来的影响；装置中设置了图象显示装置，对参数变化的趋势进行分析，因而增加了对故障的预防能力。

(3) 有利于多、快、好、省 在组装式电子综合控制装置出厂前，就按特定工业对象的自动化要求组成了系统，这样就加快了基本建设的速度。

(4) 有较大的占空系数 由于组件采用了集成电路，体积小，可以密集安装，所以大大缩小了所占空间。

(5) 可方便、经济地与计算机联用 该装置设有专用的接口，计算机通过组装式电子综合控制装置改变运算组件的设定参数，因此，它可与计算机、直接数字控制仪、工业

程序控制装置等配合使用。

由以上所述特点可见，组装式电子综合控制装置在总体水平方面，比电动单元组合仪表又前进了一步。

二、对我国工业自动化仪表发展方向的展望

随着我国经济建设的不断发展，对工业自动化的要求也将日益提高，自动化仪表必须适应系统工程的需要，这就是说，不仅要考虑生产过程的最佳控制，而且要考虑企业管理，实现综合最佳化。

当前，模拟仪表在使用中出现了如下一些问题：

(1) 生产过程要求能构成多参数、多回路的复杂调节系统，要求调节器能具有除PID规律以外的一些特殊调节规律，如前馈、大滞后、非线性、相关、计算值调节等。用模拟仪表来实现上述一些特殊调节规律存在着较大的困难，而电子计算机则能胜任。

(2) 对于一些大规模的生产过程，如采用模拟仪表，所用的表计数量很多，例如，某电厂一台三十万千瓦的发电机组，采用DDZ-II型仪表对热力参数进行自动控制，其仪表盘长达十几米，操作把手多达四百余个，如果机组容量再大，仪表盘的长度则可达几十米。这样，人-机联系就变得十分困难，不仅增加了操作人员的精神负担，而且也使事故的几率增加。如果采用计算机集中控制和监视，采用字符、图象显示等，则可大大改善人-机联系的条件。

(3) 随着电子计算机应用技术的发展，要求生产控制系统跟大型管理或控制用计算机相连接，互通信息，若用模拟仪表来实现，就会使接口多样而复杂，发生较大的困难。

(4) 用模拟仪表组成的控制系统，各局部间没有实时通信能力。

目前，在比较复杂的生产系统，例如容量大于十几万或二十万千瓦的单元机组，有的采用电子计算机集中控制系统。采用这种系统的优点如下：

(1) 控制多变量系统时具有较好的处理能力。

(2) 能较好地实现监控。

(3) 具有多种能力和备用。

(4) 人-机接口较丰富。

采用电子计算机集中控制系统的缺点是：

(1) 计算机本身的可靠性没有完全解决。由于系统功能过于集中，一旦计算机出现故障，则影响面太大，因此目前仍必须有一整套常规的调节仪表作为备用。

(2) 计算机控制与模拟仪表控制在技术上有很大差别，与广大操作人员的操作习惯和水平不相适应，因而影响了计算机的推广、使用。

(3) 需有熟练的硬件和软件管理人员。

(4) 电子计算机控制系统比模拟仪表控制系统的成本高，价格昂贵。

目前在国内、外电厂使用计算机的控制系统中，计算机多是作为开环使用（即计算机不包括在控制闭合回路中）。

随着大规模集成电路生产技术的不断成熟，制造成本低、可靠性高的微型电子计算机

成为可能, 数据通信技术的飞速发展, 使得各微型电子计算机之间的联系非常方便。字符、图象、显示技术 (CRT) 的发展和普及化, 使人与微型、大型电子计算机之间的联系也很方便。在此基础上, 产生了以微型电子计算机为核心的分散型综合控制系统。这种系统, 兼取了模拟仪表控制和电子计算机集中控制的优点, 弥补它们各自的缺点。目前, 在日本、美国等国家中已经开始应用这种系统, 我国也正在大力研究。

分散型综合控制系统的主要特点是:

(1) 在系统中大量采用微处理机或微计算机进行分级控制和管理, 这样, 智能的分散必然会带来危险的分散, 从而提高了系统的安全性。

(2) 系统具有故障自诊断能力, 可以早期发现故障。一旦系统出现故障, 可依靠本身多重化的结构, 自动或手动投入备用系统。

(3) 在系统中, 上位机和下位机之间、各局部之间都可以方便地进行实时数据通信, 从而可以方便地实现集中管理和分散控制两种方式。

(4) 通过CRT显示操作台跟各有关计算机和高速数据通道相连, 可以方便地进行人一机联系。

(5) 操作人员即使不经过专门的软件训练, 也可以直接使用标准软件包。按照系统要求, 用简单的填表方式, 就可方便地选用各种控制方案和调节规律, 从而简化了烦琐的程序编制工作。

(6) 充分考虑了操作人员的操作习惯, 系统中很多部分均采用模拟仪表的操作方式。

目前我国大规模集成电路技术已经达到一个新的水平, 微型计算机已经问世, 数据通信技术和新的显示技术也正在迅速发展, 可以预料, 以微型计算机和微处理机为核心的新型自动化仪表系列, 不久即可出现在我国自动化仪表的型谱之列。

第二章 自动化仪表的信号流程图分析法

第一节 自动化仪表传递函数的列写方法

一、变换阻抗

分析自动化仪表时, 经常要用到仪表的传递函数, 本节将针对自动化仪表中所用的电子线路, 介绍运用梅森公式求取传递函数的方法。

列写自动化仪表传递函数的一般步骤是, 根据仪表的内在联系画出此仪表的组成方框图; 对各方框图内的物理性质用相应的物理定律进行分析, 求得表示这个方框输入和输出之间关系的方程式; 将方程式进行拉氏变换, 求得各方框的传递函数; 进一步推导出整机的传递函数。

热工自动化仪表中, 绝大部分都是电子式仪表。在电子线路中, 经常碰到电阻 R 、电容 C 和电感 L 。电流流过上述三种元件时, 在元件的两端产生电压 u 。电阻、电容、电感

两端的电压 u 和电流 i 之间的关系可分别表示为

$$u = Ri \quad (2-1)$$

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

$$u = L \frac{di}{dt} \quad (2-3)$$

把上述三个方程分别进行拉氏变换, 可得

$$U = RI \quad (2-4)$$

$$U = \frac{1}{CS} I \quad (2-5)$$

$$U = LSI \quad (2-6)$$

如把 R 、 $1/CS$ 、 LS 称为变换阻抗 Z , 三个方程可统一用直流电路中欧姆定律的形式表示

$$U = ZI \quad (2-7)$$

如运用变换阻抗的概念, 对那些凡具有 R 、 L 、 C 的电路, 都可以用直流电路的方法进行运算, 这样, 就省略了推导微分方程式的过程, 使计算大为简化。当电路中的阻抗有串、并联时, 上述结果也适用, 如图2-1所示。

对于 (a) 图

$$Z = R + \frac{1}{CS} + LS$$

对于 (b) 图

$$Z = \frac{LS \frac{1}{CS}}{LS + \frac{1}{CS}} = \frac{LS}{LCS^2 + 1}$$

对于 (c) 图

$$Z = \frac{\frac{1}{CS} R}{\frac{1}{CS} + R} = \frac{R}{RCS + 1}$$

下面, 以几个简单电路为例说明。

【例 2-1】 求解图2-2所示微分回路的传递函数。

【解】 $I = \frac{U_i}{\frac{1}{CS} + R}$

$$U_o = IR = \frac{U_i}{\frac{1}{CS} + R} R$$

$$W(S) = \frac{U_o}{U_i} = \frac{RCS}{RCS + 1} \quad (2-8)$$

【例 2-2】 求解图2-3所示振荡回路的传递函数。

【解】 $I = \frac{U_i}{LS + R + \frac{1}{CS}}$

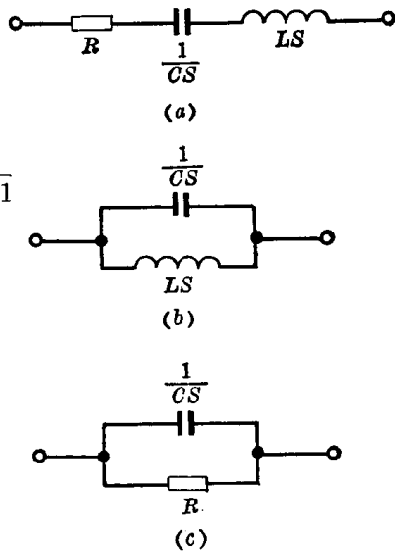


图 2-1 变换阻抗计算

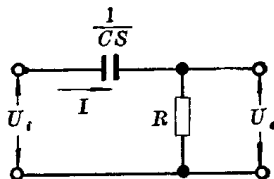


图 2-2 微分回路

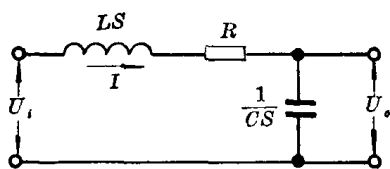


图 2-3 振荡回路

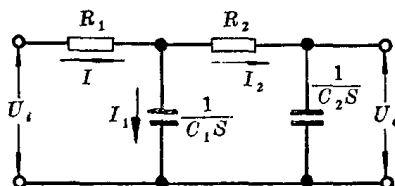


图 2-4 串级RC回路

$$U_o = I \frac{1}{CS} = \frac{U_i}{LS + R + \frac{1}{CS}} \times \frac{1}{CS}$$

$$W(S) = \frac{U_o}{U_i} = \frac{1}{LCS^2 + RCS + 1} \quad (2-9)$$

【例 2-3】 求解图2-4所示串级RC回路的传递函数。

$$\text{【解】 } \frac{1}{C_1S} \parallel \left(R_2 + \frac{1}{C_2S} \right) = \frac{R_2C_2S + 1}{R_2C_1C_2S^2 + (C_1 + C_2)S} \quad (2-10)$$

$$I = \frac{U_i}{R_1 + \frac{R_2C_2S + 1}{R_2C_1C_2S^2 + (C_1 + C_2)S}} \quad (2-11)$$

$$I_2 = \frac{U_o}{\frac{1}{C_2S}} \quad (2-12)$$

$$I_1 \frac{1}{C_1S} = I_2 \left(R_2 + \frac{1}{C_2S} \right) \quad (2-13)$$

将式(2-12)代入式(2-13), 得

$$I_1 = U_o (R_2C_1C_2S^2 + C_1S)$$

$$I = I_1 + I_2$$

$$\begin{aligned} \frac{U_i}{R_1 + \frac{R_2C_2S + 1}{R_2C_1C_2S^2 + (C_1 + C_2)S}} &= U_o (R_2C_1C_2S^2 + C_1S) + \frac{U_o}{\frac{1}{C_2S}} \\ &= U_o [R_2C_1C_2S^2 + (C_1 + C_2)S] \end{aligned}$$

$$W(S) = \frac{U_o}{U_i} = \frac{1}{R_1R_2C_1C_2S^2 + (R_1C_1 + R_1C_2 + R_2C_2)S + 1} \quad (2-14)$$

二、线性方程的信号流图表示法

如果一线性方程组所包含方程的数量不多, 用代数法求解比较方便; 如一线性方程组由很多个方程组成, 则用矩阵或信号流图的方法求解就会显得优越。信号流图是用来表示一组线性方程的图形, 它的特点是: 直观、灵活、简便。

例如

$$y = ax \quad (2-15)$$

为线性方程, 如用两个节点分别表示方程中的两个变量 x 、 y , 变量之间的关系用带有箭头的连线和连线上的字母 a 表示, 这样, 方程(2-15)可用图2-5(a)表示。以后, 把两

节点之间的连线叫做支路，支路上的数字 a 称为支路传输或支路增益^①；凡具有流出信号而没有流入信号的节点叫做源点，显然源点代表线性方程式中的自变量；凡具有流入信号而没有流出信号的节点叫做阱点。图2-5(b)表示了式(2-15)的另一种写法，它们的自变量不同，(a)图中， x 为源点、 y 为阱点；(b)图中， y 为源点， x 为阱点。

为了使信号流图和线性方程组之间有严格的对应关系，现作如下三点规定：

- (1) 信号必须顺着箭头所示的方向传输。
- (2) 从某一节点流出的每一个信号都必须等于该节点的变量（例如图2-5 a 中的 x ）乘以该支路的传输（例如图2-5 a 中的 a ）。
- (3) 一个节点的信号是流入此节点所有信号的代数和，而与从此节点流出的信号无关。

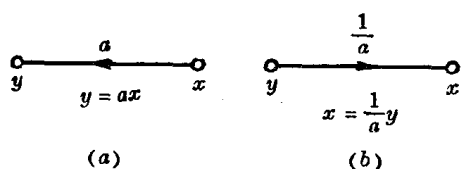


图 2-5 方程式和信号流图

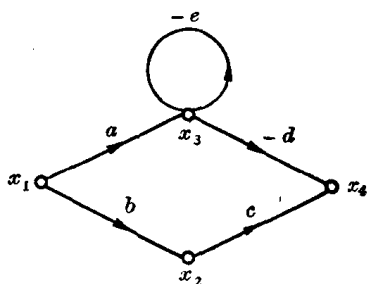


图 2-6 方程组的信号流图

根据上述规定，下列方程组可以画成图2-6所示的信号流图

$$\left. \begin{aligned} x_2 &= bx_1 \\ x_3 &= ax_1 - ex_3 \\ x_4 &= cx_2 - dx_3 \end{aligned} \right\} \quad (2-16)$$

图中， x_1 是源点， x_4 是阱点， x_2 、 x_3 都为非源节点。支路 $-e$ 称做自回路，它是从节点 x_3 出发又回到节点 x_3 的回路。已知一组方程，可根据上述方法画出该方程组的信号流图。同理，也可以从信号流图直接列写出方程组，如图2-7(a)所代表的方程组为

$$\left. \begin{aligned} U_3 &= R_4 I_3 \\ I_3 &= \frac{1}{R_3 + R_4} U_2 \\ U_2 &= I_2 R_2 \\ I_2 &= I_1 - I_3 \\ I_1 &= \frac{1}{R_1} (U_1 - U_2) \end{aligned} \right\} \quad (2-17)$$

对照图2-7(b)不难发现，上述方程组即代表了该电路中各电量之间的关系。

根据实际的需要，能否从一个已知的电路直接画出所希望的信号流图呢？一般来说，只要按照下列步骤进行，即可直接画出信号流图。

- (1) 明确目的，找出源、阱两点，从阱点推向源点。

① 用线性方程描述电路的信号流图时，按具体情况，其传输可分别为一般所指的转换系数、衰减系数等。若编制流图时，其线性方程组是由微分方程经拉氏变换而得，则此时的传输即为传递函数。在后文中，这几个名词都用。

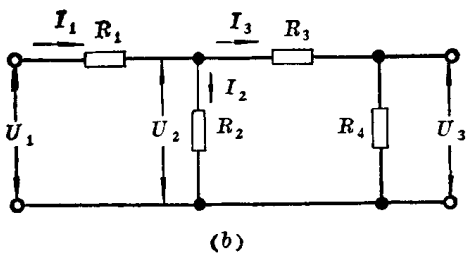
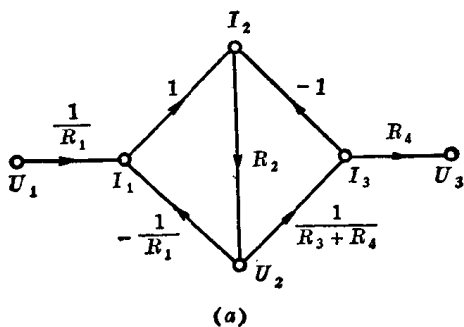


图 2-7 电路参数的信号流图表示方法

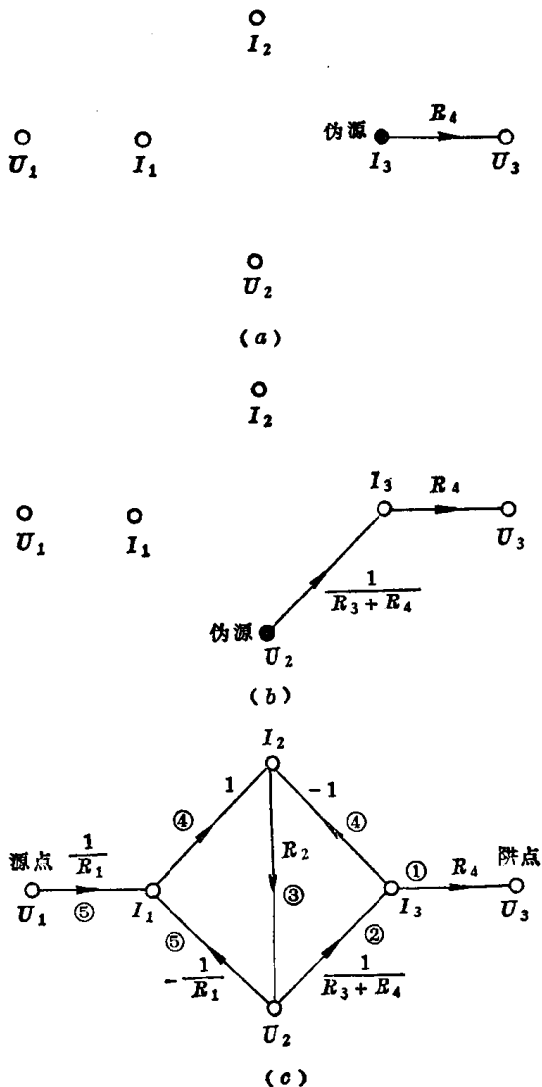


图 2-8 信号流图的画法

仍以图2-7为例讨论。若画信号流图的目的是为了求此电路的衰减系数 $\frac{U_3}{U_1}$ ，从图2-7(a)可以看出： U_3 为阱点， U_1 为源点，衰减系数为阱点 U_3 与源点 U_1 之比，其它节点都是非源节点。在画图时，只要找出两点（ U_3 、 U_1 ），合理地设置一些中间变量（例如 U_2 、 I_1 、 I_2 、 I_3 ），从阱点（衰减系数的分子）一直画到源点（衰减系数的分母），这是画图的方向问题。

(2) 从阱点开始，逐步消除推导过程中出现的伪源，一直画到源点为止。

实际上，这是逐个列写方程的过程。如图2-8(a)，根据方程 $U_3 = R_4 I_3$ 画出从 I_3 到 U_3 的支路，出现了“源点” I_3 ，但它不是电路中的真源点（真源点是 U_1 ），而是一个伪源。为了消除此伪源，必须进一步列出第二个方程 $I_3 = \frac{1}{R_3 + R_4} U_2$ 。显然，伪源 I_3 消除了，又出现了一个新的伪源 U_2 （如图2-8b），照此办法，可根据方程组(2-17)逐步消除画图时出现的所有伪源，直至 U_1 （见式2-17和图2-8c）为止。图2-8(c)中的编号①~

⑤表示了画各支路时的先后次序。

上述方法，实际上是一个列写联立方程式的过程，对于简单电路，联立方程式不一定要列写出来；对于复杂的电路，最好是写出联立方程式。在画信号流图的过程中，必须注意下面两点：

(1) 如果在两节点之间出现了两条方向相反、传输值互为倒数的支路（如图 2-9 中 x_1 和 x_3 之间的两条支路），则说明有一方程重复运用，必须及时纠正。

(2) 对于同一电路，如果中间变量设置不同，会画出不同形式的信号流图，但最后的答案是相同的。

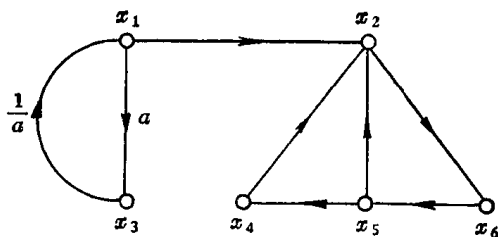


图 2-9 同一方程应用两次的信号流图

三、信号流图的简化方法

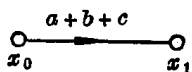
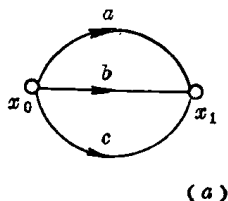
1. 并联支路的简化

在两节点之间，如果有 n 条传输方向相同的并联支路，可以把它们等效成一条新的支路，该等效支路的传输为 n 条并联支路的传输之和。

在图 2-10 (a) 中，节点 x_0 和 x_1 之间有三条支路，它们之间的关系是

$$x_1 = ax_0 + bx_0 + cx_0$$

$$x_1 = (a + b + c)x_0$$



上述两个方程，分别代表 (a) 图中的两种不同形式，可见，两者是等效的。

图 2-10 (b) 中，节点 x_1 上有两个自回路，用上述相同的方法，可以把它们等效成一个自回路，该等效自回路的传输为 $(b + c)$ 。

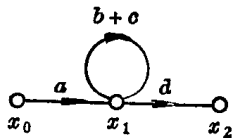
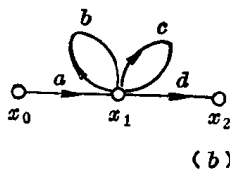


图 2-10 并联支路的简化

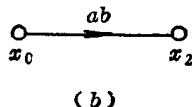
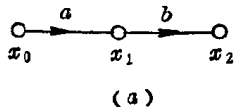


图 2-11 串联支路的简化

2. 串联支路的简化

在两个节点之间，如果有 n 条首尾相接的串联支路，它们通过 $(n-1)$ 个中间节点相连，可以把它们等效成一条新的支路，其传输为 n 条支路传输之乘积。

图 2-11 为两条首尾相接的支路，通过中间节点 x_1 相连，从 (a) 图可以得出

$$x_2 = bx_1$$

$$x_1 = ax_0$$

即

$$x_2 = abx_0$$

这个方程可用 (b) 图所示的形式表示。

可见, 通过上述简化, 消除了中间变量 x_1 。

3. 节点的吸收

在简化信号流图时, 往往需要消除一些不必要的中间节点, 例如图2-12中的 x_4 , 处理的方法可通过下列公式推导得出。

对于 (a) 图

$$x_4 = ax_1$$

$$x_2 = bx_4 = abx_1$$

$$x_3 = cx_4 = acx_1$$

对于 (b) 图

$$x_4 = ax_1 + bx_2$$

$$x_3 = cx_4 = acx_1 + bcx_2$$

可见, 中间节点 x_4 吸收后, 等效支路的传输按串联支路的简化方法处理。

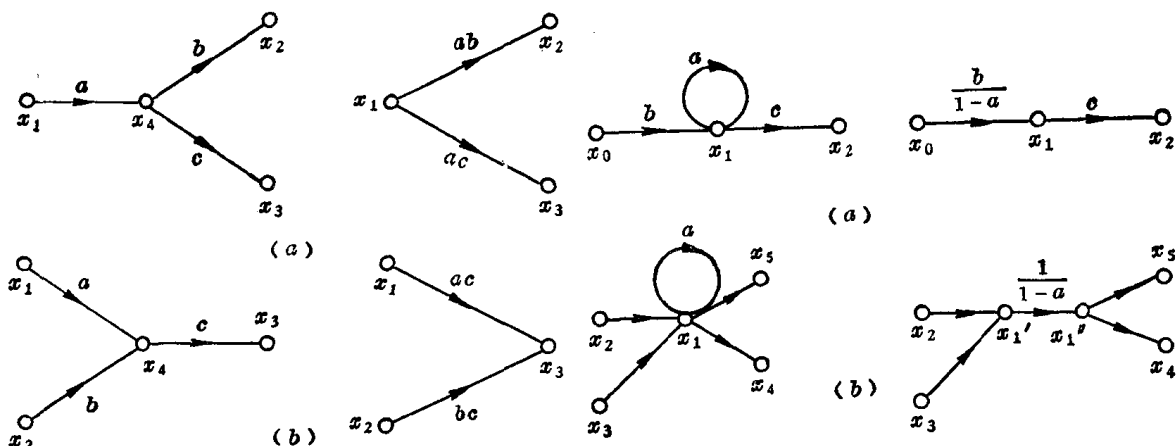


图 2-12 节点的吸收

图 2-13 自回路的消除

4. 自回路的消除

在信号流图的计算中, 经常会碰到自回路, 如图2-13所示。消除自回路的方法可通过下列公式推导得出。

对于 (a) 图

$$x_1 = bx_0 + ax_1$$

$$x_1 = \frac{b}{1-a} x_0$$

$$x_2 = cx_1$$

可见, 自回路消除后, 所有流入 x_1 的支路的传输都必须乘以 $\frac{1}{1-a}$ (a 为被消除的自回路的传输), 凡从 x_1 流出的支路的传输不变。

根据上述结论可知, 若消除自回路, 可以把带有自回路的节点 x_1 分裂成两个节点, 如把图2-13 (b) 中的节点 x_1 分裂成 x_1' 和 x_1'' 。仅对 x_1' 和 x_1'' 节点而言, x_1' 为源点, 把它与所有流入的支路相连, x_1'' 为阱点, 把它与所有流出的支路相连, 然后, 在 x_1' 和 x_1'' 之间再连一条传输为 $\frac{1}{1-a}$ 的支路, 如图 (b) 中右边的图形, 该图为自回路消除后的等效形式。

运用上述四种简化方法, 逐步逐个地消除中间节点和支路, 可以把较复杂的信号流图简