



现代电力系统丛书

高等电力网络 分析

张伯明 陈寿孙 著

清华大学出版社

现代电力系统丛书

高等电力网络分析

张伯明 陈寿孙 著



清华大学出版社

(京)新登字 158 号

内 容 简 介

本书系统地叙述了以计算机为工具进行电力系统网络分析的基本原理、算法及实现技术。

全书共十二章,主要内容包括三个部分:第一部分包括电力网络的数学模型;网络方程和网络矩阵;稀疏矩阵和稀疏矢量技术;网络方程的修正解法;网络变换、化简和等值以及大规模电网的分块计算方法。第二部分论述电力系统潮流计算;潮流方程的各种特殊解法;潮流计算中的特殊问题以及潮流计算在各应用领域中的扩展。第三部分介绍了电力系统故障分析的计算机计算方法。

本书将矩阵分析、图论描述和物理概念的解释结合起来,论述深入浅出,并附有例题和习题,便于自学。本书可以作为电力系统及其自动化专业的研究生教材,也可供电力专业科技人员、高等院校有关专业教师和高年级学生参考。

图书在版编目(CIP)数据

高等电力网络分析/张伯明,陈寿孙著. —北京:清华大学出版社,1996.5
(现代电力系统丛书/高景德主编)

ISBN 7-302-02139-2

I. 高… II. ①张… ②陈… III. 电力系统结构-网络分析 IV. TM727

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 04107 号



出版者:清华大学出版社(北京清华大学校内,邮编 100084)

印刷者:北京密云胶印厂

发行者:新华书店总店北京科技发行所

开 本:787×1092 1/16 印张:21 字数:504 千字

版 次:1996 年 8 月第 1 版 1996 年 8 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-302-02139-2/TM·24

印 数:0001—3000

定 价:26.50 元

现代电力系统丛书编委会

主 编 高景德

副 主 编 张凤祥 卢 强 陈寿孙

编 委 (按姓氏笔划)

卢 强	陈寿孙	张凤祥	张宝霖
庞家驹	周孝信	相年德	高景德
倪以信	韩祯祥	韩英铎	

责任编辑 范铁夫 刘元元

致 读 者

我国社会主义现代化建设的蓬勃发展,正在促进电力系统以空前的规模和速度扩大。到本世纪末,我国各大区将建成以 500kV 超高压电网为主网,单机 300~600MW 为主力机组,装机容量达 4 万~5 万 MW 的大型电力系统。超高压直流输电技术将进一步得到应用,大型电力系统间的互联将得到发展,随着三峡水电工程的兴建,西部地区电源的进一步开发,更高电压的输电系统和全国性的联网也将提上日程。对电力系统安全性、经济性和电能质量提出了更高的要求。实践证明,电力系统的规划设计、运行管理、分析和控制手段的现代化是满足这一要求的最佳途径,许多现代科学技术成果迅速在电力系统中得到推广应用,计算机技术、现代应用数学、现代控制理论、电力电子技术、人工智能等日益广泛深入地应用于电力系统,正在促使这一传统产业迅速走向高科技化。在电力系统安全经济水平和现代化水平提高的同时,电力系统学科也得到更新、丰富与发展。当前,亟需一批反映电力系统学科新进展、新成果的系列专著,为此我们组织编写了这套《现代电力系统丛书》。

丛书旨在反映当代国内外电力系统学科的最新发展和科学技术的水平。丛书将以现代科学的新理论、新方法在电力系统中的应用为主要内容,特别对在我国电力系统中已获得应用或将获得应用的最新成果进行重点介绍。

本丛书由科学出版社和清华大学出版社出版。希望本丛书对我国电力系统的发展、电力系统学科水平的提高、科技人员知识结构的改善将有所贡献。

编 委 会

前 言

电力系统分析取决于对电力系统本身客观规律的认识,同时也取决于当时能够采用的研究、分析计算的手段和工具。40年来,随着计算机技术的蓬勃发展和广泛应用,矩阵、图论、数值计算等与计算机相关的数学分支在这个领域里也得到了充分的发展。因此,虽然对电力系统本身客观规律的认识和几十年前没有根本的不同,但是电力系统的分析却面目一新,其数学表达的形式、建立数学模型的方法、相应的计算处理方法等方面发生了很大的变化。正是这种变化适应了现代大规模电力系统(几千个节点,上万条支路)和在线实时控制快速分析的需求。

电力系统分析包括稳态分析和暂态过程的分析。机电动态及暂态过程分析的有关内容将在《动态电力系统理论与分析》一书中介绍。本书主要涉及电力网络稳态分析的有关内容,重点论述以计算机及其相应数学方法为工具进行电力网络稳态分析的原理、方法和实现技巧。应用计算机技术进行电力网络分析吸引了无数学者和专家,提出的各种方法散见于各种教科书和浩瀚的文献之中。作者80年代初以来在清华大学从事研究生教学工作,深感需要一本系统介绍的基础性书籍。本书是作者教学和科研工作的经验总结,有些内容是作者近些年来科研工作的成果。为了适应计算机分析的需要,全书采用与之相适应的数学形式来叙述,这样可以使建立数学模型、确定解算方法、实现编程成为一个整体,并且具有简明的特点,但对初学者来说,较难建立形象直观的概念。为此,我们尽量配合以物理概念的解释,使用网络图加以形象地说明,同时还附有一定的例题和习题。因此,只要具有电力系统的初步知识,用这本书自学也并不困难,但是真正融会贯通,一定还要有计算机编程的实践。

本书由三部分组成。

第一部分从第一章到第六章,论述了电力网络的数学模型和基本解算方法,它是电力网络分析的基础。其中重点介绍了电力网络模型及其数学描述;介绍了网络矩阵的性质、物理意义和形成的方法。为适应现代大规模电力系统和实时控制快速分析的需要,本书对稀疏矩阵和稀疏矢量技术、网络等值变换、网络分块计算、并行处理以及网络局部变化时的修正算法等内容给予了较多的关注。这些内容是必不可少的基本知识,其中一些内容是作者近年来的研究成果。

第二部分从第七章到第十章,论述了电力系统的潮流计算——它是电力系统稳态分析的基本内容,也是一切动态及暂态分析的出发点。关于潮流计算的基本原理和方法在一般的教科书中已经有较详细的叙述,所以本书仅在第七章中作了总结、归纳。第八章和第九章分别介绍了潮流计算的特殊解法和其中的特殊问题。而在第十章中着重论述潮流计算的扩展,它既是实际电力系统安全、经济运行提出的需求,也是潮流计算基本算法解决以后,人们关注的新领域。读者从这一章中可以了解各种扩展潮流计算(例如最优潮流、动态潮流、随机潮流、开断潮流等)与潮流基本算法之间的关系,它们的区别和特点。对于较

成熟、最常用的最优潮流和开断潮流给予了更多的论述。

第三部分包括第十一章和第十二章,讨论了用计算机进行电力系统故障分析中的短路电流计算的方法。电力系统发生故障,将经历一个暂态过程,当仅以求得某一瞬间短路电流的周期性分量为目的时,可以把这一瞬间看作过程中的一个断面,通过采用针对该瞬间的等值电动势和等值参数,而化作一个类似稳态电路的计算问题。由于短路电流计算的基本概念和方法在大学本科的教科书中已经有详细的论述,所以本书仅在第十一章中采用矩阵的形式对它进行了总结,并以此为基础在第十二章中论述了对任意复杂的多重故障的短路电流计算采用统一的数学描述和规范化的系统求解方法。读者可以从中了解到一些实用的有效算法,而且可以根据这里叙述的思路自己研究适合于问题特点的算法。

本书作为《现代电力系统丛书》中的一册得以出版是高景德教授的大力支持。在多年的教学和研究工作中,始终得到清华大学张宝霖教授、周荣光教授、倪以信教授的指导和合作,周荣光教授还审阅了全书的手稿,西安交通大学夏道止教授也曾对本书提出过许多宝贵的意见,助教博士生孙宏斌为本书例题做了解答,清华大学电机系和电力系统及其自动化教研组为本书撰写创造了良好的条件,作者在此对他们一并表示感谢。

在编写本书的过程中,我们虽然对体系的安排,素材的选取,文字的叙述都尽了努力,但在正式出版的时候,仍诚恳地期待着对本书提出的指导和批评。

作 者

1995年8月于清华园

目 录

第一篇 电力系统网络方程及其基本解法

第一章 形成网络方程的系统化方法	1
1.1 网络的概念	1
1.1.1 网络的概念	1
1.1.2 网络的物理模型和数学模型	2
1.2 电力网络的拓扑约束	2
1.2.1 图的概念和一些基本定义	2
1.2.2 关联矩阵和关联矢量	3
1.2.3 三种关联矩阵 A, B, Q 之间的关系	5
1.2.4 网络拓扑约束——基尔霍夫定律的表达	6
1.3 电力网络支路特性的约束	8
1.3.1 一般支路及其退化	8
1.3.2 网络支路方程和原始阻抗(导纳)矩阵	9
1.4 网络方程——网络的数学模型	9
1.4.1 节点网络方程	9
1.4.2 回路网络方程	10
1.4.3 割集网络方程	11
1.5 变压器和移相器支路的数学描述	11
1.5.1 一般无源支路的数学描述	11
1.5.2 广义关联矢量和变压器/移相器支路的数学描述	12
1.6 小结	14
习题	14
第二章 电力系统网络矩阵	16
2.1 节点导纳矩阵	16
2.1.1 节点导纳矩阵的性质、特点及物理意义	16
2.1.2 节点导纳矩阵的建立	18
2.1.3 节点导纳矩阵的修改	19
2.2 节点阻抗矩阵	26
2.2.1 节点阻抗矩阵的性质、特点及物理意义	26
2.2.2 用支路追加法建立节点阻抗矩阵	27
2.2.3 连续回代法形成节点阻抗矩阵	36

2.2.4 网络变更时节点阻抗矩阵的修正·····	39
2.3 节点导纳矩阵和节点阻抗矩阵之间的关系·····	41
2.4 小结·····	42
习题·····	42
第三章 电力网络计算中的稀疏技术 ·····	45
3.1 概述·····	45
3.2 稀疏技术·····	46
3.2.1 稀疏矢量和稀疏矩阵的存储·····	46
3.2.2 稀疏矩阵的因子分解·····	49
3.2.3 利用稀疏矩阵因子表求解稀疏线性代数方程组·····	51
3.3 稀疏矩阵技术的图论描述·····	55
3.3.1 基本定义和术语·····	56
3.3.2 因子分解过程的图论描述·····	57
3.3.3 前代回代过程的图论描述·····	61
3.3.4 不对称稀疏矩阵的图上因子分解·····	64
3.3.5 在赋权双向因子图上的前代回代过程·····	70
3.3.6 计算代价的分析·····	72
3.4 稀疏矢量法·····	74
3.4.1 几个定义·····	74
3.4.2 稀疏矢量法中的几个性质和定理·····	74
3.4.3 道路集的形成·····	76
3.4.4 不对称矩阵情况的扩展·····	77
3.4.5 计算代价的分析·····	78
3.5 节点优化编号·····	78
3.5.1 在稀疏矩阵技术中使用的节点优化编号方法·····	78
3.5.2 提高稀疏矢量法计算效力的节点优化编号方法·····	79
3.6 小结·····	81
习题·····	81
第四章 网络方程的修正解法 ·····	83
4.1 补偿法网络方程的修正解·····	83
4.1.1 矩阵求逆辅助定理·····	83
4.1.2 补偿法网络方程的修正计算·····	83
4.1.3 补偿法在电网计算中的应用·····	85
4.1.4 补偿法的物理解释·····	87
4.2 因子表的修正算法·····	91
4.2.1 系数矩阵不增阶时因子表的修正——秩 1 因子修正·····	91

4.2.2	系数矩阵阶次变化时因子表的修正	98
4.2.3	因子表的局部再分解	103
4.2.4	块稀疏矩阵的因子表修正算法	106
4.3	小结	106
	习题	106
第五章	网络变换、化简和等值	108
5.1	星形接法变成网形接法以及负荷移置	108
5.2	网络化简	110
5.2.1	用导纳矩阵表示的形式	111
5.2.2	用阻抗矩阵表示的形式	111
5.2.3	网络的自适应化简	112
5.3	电力系统外部网络的静态等值	117
5.3.1	WARD 等值	117
5.3.2	REI 等值	120
5.4	诺顿等值、戴维南等值及其推广	122
5.4.1	单端口诺顿等值和戴维南等值	122
5.4.2	多端口诺顿等值和戴维南等值	125
5.5	网络变更时诺顿等值和戴维南等值的修正	131
5.5.1	戴维南等值参数的修正	131
5.5.2	诺顿等值参数的修正	135
5.5.3	面向节点的修正	138
5.6	小结	140
	习题	141
第六章	大规模电力网络的分块计算	144
6.1	网络的分块解法	144
6.1.1	节点分裂法	144
6.1.2	支路切割法	148
6.1.3	统一的网络分块解法	154
6.2	大规模电网的分解协调计算和并行计算	157
6.3	网络方程分块计算的物理解释	161
6.3.1	节点分裂法的物理解释	161
6.3.2	支路切割法的物理解释	162
6.4	大规模电网分块计算的应用	164
6.5	小结	165
	习题	165

第二篇 电力系统潮流计算

第七章 潮流计算的数学模型及基本解法	167
7.1 潮流计算问题的数学模型	168
7.1.1 潮流方程	168
7.1.2 潮流方程的讨论和节点类型的划分	169
7.2 高斯迭代法(Gauss 法)为基础的潮流计算方法	170
7.2.1 基于导纳矩阵的方法	170
7.2.2 基于阻抗矩阵的方法	171
7.2.3 关于高斯法的讨论	173
7.3 牛顿-拉夫逊法潮流计算	177
7.3.1 牛顿-拉夫逊法的一般描述	177
7.3.2 直角坐标的牛顿-拉夫逊法	177
7.3.3 极坐标的牛顿-拉夫逊法	178
7.3.4 牛顿-拉夫逊法和雅可比矩阵的讨论	178
7.4 小结	184
习题	184
第八章 潮流方程的特殊解法	187
8.1 直流潮流	187
8.2 潮流计算的快速分解法	189
8.2.1 快速分解法的理论基础	190
8.2.2 快速分解法的计算流程	194
8.3 潮流计算中的灵敏度分析和分布因子	198
8.3.1 潮流灵敏度矩阵	198
8.3.2 分布因子	202
8.4 小结	207
习题	208
第九章 潮流计算中的特殊问题	210
9.1 负荷的电压静态特性	210
9.1.1 把负荷功率看作节点电压的线性函数	210
9.1.2 把负荷功率看作节点电压的二次函数	211
9.2 节点类型的相互转换和多 V θ 节点问题	211
9.2.1 PV 节点转换成 PQ 节点	211
9.2.2 PQ 节点转换成 PV 节点	213
9.2.3 多 V θ 节点时的潮流计算	215
9.3 中枢点电压和联络线功率的控制	216

• X •

9.3.1	中枢点电压的控制	216
9.3.2	联络线功率的控制	218
9.4	无功电压问题和网损分析	219
9.4.1	电力系统的无功电压问题	219
9.4.2	电力系统网损的分析	221
9.5	潮流方程解的存在性、多值性及病态潮流解法	223
9.5.1	潮流方程解的存在性和多值性	223
9.5.2	病态潮流及其解法	225
9.6	潮流方程中的二次型	227
9.7	小结	228
习题		229
第十章	潮流计算问题的扩展	231
10.1	概述	231
10.1.1	变量的划分	231
10.1.2	潮流方程	232
10.1.3	约束方程	232
10.2	潮流计算问题的扩展	234
10.2.1	常规潮流	234
10.2.2	约束潮流	235
10.2.3	动态潮流	236
10.2.4	随机潮流	237
10.2.5	最优潮流	239
10.2.6	开断潮流	240
10.3	最优潮流及其求解方法	241
10.3.1	最优潮流算法的分类	241
10.3.2	简化梯度法最优潮流	242
10.3.3	牛顿最优潮流算法	248
10.3.4	有功无功交叉逼近最优潮流算法	249
10.3.5	关于最优潮流的目标函数	253
10.4	开断潮流及其求解方法	253
10.4.1	补偿法支路开断时的潮流计算	254
10.4.2	发电机开断的潮流计算	255
10.5	小结	257
习题		257

第三篇 电力系统故障分析

第十一章 对称分量法及相序网络	259
11.1 对称分量法.....	259
11.2 电力系统元件的序参数和序网.....	266
11.2.1 同步发电机和负荷的序参数.....	266
11.2.2 输电线元件的序参数.....	267
11.2.3 变压器元件的序参数.....	268
11.2.4 电力系统的序网络及其节点导纳矩阵.....	274
11.3 故障电路的对称分量模型.....	275
11.3.1 横向故障电路的相分量模型.....	276
11.3.2 横向故障电路的序分量模型.....	278
11.3.3 纵向故障电路的相分量和序分量模型.....	279
11.4 小结.....	280
第十二章 电力系统故障分析的计算机计算方法	282
12.1 电力系统故障分析的一般方法.....	282
12.2 规范化的计算机故障分析计算方法.....	291
12.2.1 一条输电线元件发生故障的情况.....	292
12.2.2 不同故障时 Y_f 的分析.....	295
12.2.3 故障影响一组元件的情况.....	296
12.3 小结.....	304
习题.....	304
附录 I 分块矩阵求逆公式	307
附录 II 矩阵求逆辅助定理的证明	308
附录 III IEEE14 母线和 30 母线标准试验系统数据	309
参考文献	314

第一篇 电力系统网络方程及其基本解法

第一章 形成网络方程的系统化方法

1.1 网络的概念

1.1.1 网络的概念

网络是指把若干元件有目的地、按一定的形式联结起来、完成特定任务的总体。

电力系统由电源、电力网络、负荷三部分组成。电力网络包括了输电和配电线路、变压器和移相器、开关、并联和串联电容器、并联和串联电抗器等元件,它们按一定的形式联结成一个总体,达到输送和分配电能的目的。因此电力网络包含了两个内容:元件以及元件之间的联结。电力网络的电气运行性能受到两个约束,即元件特性的约束和联结关系的约束(拓扑约束)。

1. 元件特性的约束

电力网络元件的电气特性在一定的条件下,可以用一条或几条等值支路来表示。例如不太长的输电线路研究其在工频下的电气特性,可以用一条支路或三条支路组成的 π 电路来表示。支路的参数(R, L, C)是元件特性的表现,它制约着支路电压 u 和支路电流 i 之间的关系。对支路 j 来说有下列表达式:

$$\begin{aligned} R_j i_j &= u_j \\ \frac{dL_j i_j}{dt} &= u_j \\ \int_i \frac{1}{C_j} i_j dt &= u_j \end{aligned} \quad (1-1)$$

当参数 R_j, L_j, C_j 与电量无关,则该支路为线性支路;组成该元件的支路均为线性支路,则该元件为线性元件;网络中所有元件均为线性元件,则该网络称为线性网络。若网络中至少包含了一个非线性支路,即该支路的参数是电量的函数,则该网络是非线性网络。元件特性的约束与支路的联结无关。

2. 网络拓扑的约束

它反映网络中各元件,即各支路之间的联结关系。它与元件的特性,即与各支路的参数无关,因此,当不考虑网络中各支路的参数,网络可以抽象成一些抽象的支路和由它们联结成的节点。网络的拓扑约束集中表现为基尔霍夫定律(Kirchhoff's Laws)。

对于节点 j (包括广义节点),与节点 j 相关联的各支路电流 i_i 之间符合基尔霍夫电流

定律(Kirchhoff Current Law, KCL):

$$\sum_{i \in j} i_i = 0 \quad (1-2)$$

$i \in j$ 表示所有和节点 j 相关联的支路。对于闭合回路 l , 回路中的各支路电压 u_i 之间符合基尔霍夫电压定律(Kirchhoff Voltage Law, KVL):

$$\sum_{i \in l} u_i = 0 \quad (1-3)$$

式中 $i \in l$ 表示所有在回路 l 中的支路。

1.1.2 网络的物理模型和数学模型

选取物理量、建立物理的和数学的模型是研究、分析一个客体过程中关键的一步, 是得到定量关系的基础。

网络的状态是用所选定的物理量来表示的。

物理模型是被研究的客体的一种简化和抽象, 选取何种物理模型取决于研究的目的和内容。例如输电线路是由载流导体、绝缘结构和机械构架等组成的一个客体。当研究其电气特性时, 可以根据研究的具体内容, 把输电线抽象成分布参数的长线、多个 π 型电路的链式电路, 直到一个集中的电抗等不同的模型。

数学模型的建立就是找到一种合适的数学形式, 来表达物理模型中物理量之间的关系, 把一个物理问题抽象成一个数学问题。网络方程就是网络的数学模型, 列写网络方程就是按照选定的数学型式, 把网络的两种约束全部表达出来, 而不包含不必要的约束。

物理量的选取, 物理模型和数学模型的建立都不是唯一的, 取决于研究的目的和内容, 也取决于当时能够采用的研究、计算的手段和工具。物理模型和数学模型本身就标志着对问题认识的深度和科学技术发展的水平。

网络分析的基本内容, 除了选取物理量、建立物理和数学模型以外还包括根据物理模型进行物理模拟试验和根据数学模型研究并确定算法、编制计算机程序、进行计算机实践试验。分析是通过试验和计算提供认识研究对象本质更多的信息, 而分析得到的结论还需要在实践中, 包括现场试验和应用中验证。

1.2 电力网络的拓扑约束

1.2.1 图的概念和一些基本定义

我们只研究网络的拓扑约束时, 与网络元件的特性, 即具体的支路参数无关, 可以把网络的联结关系抽象成一个图(Graph)。图的理论和应用随着计算机技术的兴起而得到很大的发展, 在许多专门著作^[12]中有详细的叙述。下面仅就本书中用到的一些术语作简要的介绍。

图(Graph)是抽象支路和节点的集合。它反映图所包含的各支路之间的联结关系, 即节点与支路之间的关系。

节点(Node), 亦称**顶点(Vertex)**, 是支路的连接点。

支路(Branch),亦称**边**(Edge),一条支路有两个端点,即它与两个节点关联[不包括自回路(Self-Loop)]。

关联(Incident),用 $k(i, j)$ 表示,即支路 k 与节点 i, j 关联。

节点的度(Degree),节点所关联的支路数。

路径(Path),在图 G 中,从始点出发经过若干支路和节点到达终点,其中的支路和节点均不能重复出现,形成的一个开边列(Open Edge Train)称为路径。显然,路径中的内部顶点(Interior Vertices)的度只能是 2,而始点和终点的度为 1。

回路(Loop),即闭合的路径(Closed Path),路径中的始点和终点重合,回路中所有节点的度均为 2。

连通图(Connected Graph),图 G 中任何一对顶点之间至少有一条路径,则该图为连通图。

有向图(Oriented Graph),图 G 中的每一个支路都有规定的方向。

我们研究的电力网络一般均抽象成有向的连通图。

子图(Subgraph),图 G_i 的边集和节点集均属于图 G 的边集和节点集,并为其子集,则图 G_i 为图 G 的子图。

树(Tree)和**树枝**(Tree Branches, Twigs),具有 $N+1$ 个节点, b 条支路的连通图 G 的一个连通子图 G_i ,它包含 G 中的所有节点,但不包含任何回路,则该连通子图 G_i 称为图 G 的一棵树。树中所含的支路称为树枝,它一定只具有 N 条,即树枝数一定为 N 。

补树(Cotree)和**连支**(Link),包含所有存在于图 G (有 $N+1$ 个节点, b 条支路)中而不存在于其对应的树 G_i 中的支路的子图称为图 G 的树 G_i 的补树。补树中所含的支路称为连支,连支数一定为 $b-N$ 。

对于一个具体图 G 来说,其树的选定有任意性,即可以有多种选择,但一旦选定以后,则树枝和连支就有确定性。

基本回路(Basic Loop),每一个回路必然包含不少于一条连支。只包含一条连支的回路称为基本回路。对于一个连通图 G 来说,基本回路数必然与其连支数相对应。

割集(Cutset)和**基本割集**(Basic Cutset),连通图 G 中的一个支路的最小集合,它把图 G 分割成两个互不连通的子图(其中一个子图可以是一个孤立的节点),这个支路集合称为图 G 的一个割集。割集是分割出来的部分与图 G 其他部分之间的联系,分割出来的部分是图 G 的一个广义节点。每一个割集至少包含一条树枝。仅包含一条树枝的割集称为基本割集。对于图 G 来说基本割集数必然与树枝数相对应。

在网络分析中,对于包括有 $N+1$ 个节点 b 条支路的图 G ,为了使每个节点量有确定的意义,一定要确定一个参考节点,即图 G 的独立节点数为 N ,称为图 G 的**秩**(Rank),因此有如下的关系:

独立节点数 = 树枝数 = 基本割集数 = 秩 = N ;

基本回路数 = 连支数 = $b - N = L$ 。

1.2.2 关联矩阵和关联矢量

网络的拓扑特性(联结关系)可以用一个图来形象表示,但为了便于应用计算机,也可

以用一张表——矩阵来表示,描述网络拓扑结构的矩阵为**关联矩阵**(Incident Matrix)。由于可以从不同的角度、用不同的形式来说明联结关系,因此就有不同的关联矩阵。

为了叙述方便,本书中所有在矩阵下标中有运算符 $\times$ 的表示矩阵的阶次,例如, $A_{(N+1) \times b}$ 表示矩阵 A 是 $N+1$ 行 b 列矩阵。

节(点)-支(路)关联矩阵 $\tilde{A}$ (Node-Branch Incident Matrix),有向连通图 G 有 $N+1$ 个节点, b 条支路,其中第 l 条支路从节点 i 出发,到节点 j 终止。则其 $(N+1) \times b$ 阶节-支关联矩阵 $\tilde{A}$ 有如下形式:

$$\tilde{A}_{(N+1) \times b} = \begin{array}{c|cccccc} & \text{支路} & 1 & 2 & \cdots & l & \cdots & b \\ \hline \text{节点} & & & & & & & \\ 1 & & & & & 0 & & \\ \vdots & & & & & \vdots & & \\ i & & & & & 1 & & \\ \vdots & & & & & \vdots & & \\ j & & & & & -1 & & \\ \vdots & & & & & \vdots & & \\ N+1 & & & & & 0 & & \end{array} \quad (1-4)$$

这里只给出了第 l 个列中非零元素的情况。 $\tilde{A}$ 矩阵有 $N+1$ 个行矢量,表示每一个节点和哪些支路相关联;有 b 个列矢量,表示每一条支路和哪两个节点相关联;非零元素的正负表示支路的方向;这些列矢量称为**关联矢量**(Incident Vector)。

由于每一个列矢量只有两个非零元素,每一个行矢量的非零元素数等于该节点的度,所以节-支关联矩阵 $\tilde{A}$ 是非常稀疏的。另外, $N+1$ 个行矢量是线性相关的,为了使之线性无关,就要将参考节点从节-支关联矩阵中删除,我们称删除了参考节点所对应的行的节-支关联矩阵为**降阶节-支关联矩阵** A ,它是 $N \times b$ 阶矩阵。如果在支路的安排上适当地调正,把树支放在前面,连支集中在后面,则有如下的形式:

$$A_{N \times b} = \begin{array}{c|cccccc} & \text{支路} & 1 & \cdots & N & N+1 & \cdots & b \\ \hline \text{节点} & & & & & & & \\ 1 & & & & & & & \\ \vdots & & & & & & & \\ \vdots & & & & & & & \\ \vdots & & & & & & & \\ N & & & & & & & \end{array} = [A_T \quad A_L] \quad (1-5)$$

A_T
($N \times N$)
 A_L
($N \times L$)

树支
连支

式中 A_T 和 A_L 分别表示 A 矩阵中和树支有关的部分以及和连支有关的部分。由于电力网络分析中最常用是节点分析法,所以节-支关联矩阵和关联矢量用得最广泛。电力网络分析中有时也可以用回路分析法^[26,27]和割集分析法,所以还有回-支关联矩阵和割-支关联矩阵。

回(基本回路)-支(路)关联矩阵 B (Basic Loop-Branch Incident Matrix),由于基本回