

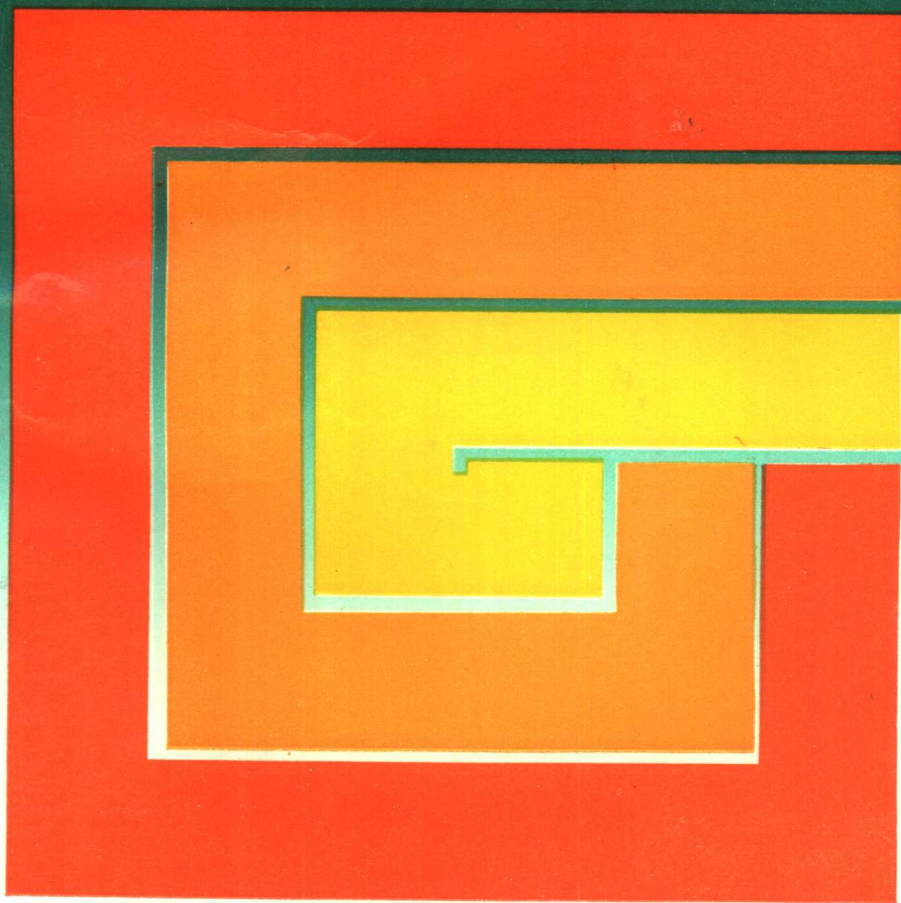
应用图论

图和电网络

〔美〕陈惠开 著

范定松 张玲玲 译

沙玉钧 审校



应 用 图 论

图 和 电 网 络

[美] 陈惠开 著
范定松 张玲玲 译
沙玉钧 审校

人 民 邮 电 出 版 社

内 容 简 介

本书是根据美国伊利诺大学陈惠开(WAI-KAI CHEN)教授所著的《应用图论》(APPLIED GRAPH THEORY)一书译出的。

全书共分七章，主要内容包括：基本理论；电网络理论基础；线性代数方程组的有向图解法；线性系统的拓扑分析法；树和树的生成；具有规定度数的有向图的实现以及网络的状态方程等。书中附有大量的例题，每章末均精选了许多习题，便于读者学习使用。

本书内容丰富，既有图论及其应用方面的入门内容，又有供读者进一步深造的专门课题。立论严谨，叙述清楚，既通俗易懂又不失数学的严密性。

本书可作为我国高等院校为研究生和高年级本科生开设网络图论、线性系统和电路课程的教材，也可供有关专业的工程技术人员、科研人员参考。

应用图论

图和电网络

〔美〕陈惠开 著

范定松 张玲玲 译

沙玉钧 审校

*

人民邮电出版社出版发行

北京东长安街27号

北京朝阳展望印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所经销

开本：850×1168 1/32 1990年12月 第一版

印张：19^{20/32} 页数：314 1990年12月北京第1次印刷

字数：521 千字 印数：1—2 000 册

ISBN 7-115-04265-9/G·040

定 价：9.40 元

中译本前言

本书旨在为理工科学生介绍图论及其应用于电网络方面的基本知识。着重强调基本概念，对其中某些与工程应用密切相关的内容作了一定深度的论述，力求使本书既能反映出该学科的本质又有其特色。编写本书的指导思想是强调图论的精髓，分析讨论一些基础性的课题，以致可以引出新的设计和计算方法。因此，本书虽然是1976年出版的，但仍反映了当前的科研成果。

图论与许多数学分支密切相关，包括群论、矩阵论、数值分析、概率论、拓扑学、点阵论和组合论等。由于它所具有的用图表示的直观性，使它在物理学、工程学、社会科学和经济问题等方面的模拟系统中都显得非常有用。事实上，任何一个包括二元关系的系统都可以用图来表示。

很多使用过本书较早版本的教师及学生都对本书提出过许多宝贵的意见和建议，这对我的帮助是很大的，谨对他们表示诚挚的感谢。特别要感谢南京工学院吴叔美教授的推荐及人民邮电出版社的大力支持，使本书得以进入使用汉语的电工学界。最后，如没有范定松先生、张玲玲女士和沙玉钧教授的努力，本书是不可能出版的。他们工作得很完善，我非常清楚地了解这一工作的艰巨性，为此，谨对他们的宝贵贡献致以衷心的感谢。

陈惠开

1988年于伊利诺州奈培威尔

译 者 的 话

《应用图论》是美国伊利诺大学陈惠开教授最重要的著作之一。该书内容丰富，既有图论及其应用方面的入门内容，又有供读者进一步深入钻研的专门课题。立论严谨，叙述清楚，既通俗易懂又不失数学的严密性。本书是作者多年从事图论研究和教学的结晶，也是近代网络图论及其应用方面的经典权威著作之一。全书还配有大量例题和精选的习题，可作为我国各高等学校为研究生或高年级本科生开设网络图论、线性系统和电路课的教材及参考书。

本书第一章、第二章和第七章由张玲玲译；前言、第三章、第四章、第五章和第六章由范定松译。全书由沙玉钧教授审校。在翻译过程中得到吴叔美副教授的鼓励和大力支持，在此表示感谢。

由于译者水平有限，难免有缺点和错误，切望广大读者给予批评指正。

译者

1987年5月于南京工学院

前 言

在过去四十年中，我们一直致力于图论及其应用的研究，近些年来，图论及其应用已进入一个充满活力的新时期。仅在一年半的时间内，就发表了 500 多篇关于图论及其应用方面的论文，这从一个侧面表明了其飞速的发展。由于用图表示的直观性，图论在物理学、工程技术、社会科学以及经济问题中所产生的模拟系统中是极其有用的。事实上任何包含二元关系的系统都可以用图来表示。

本书力图使介绍的内容简单些，因此，避免了所有不必要的定义，宁可文字叙述略为长一点。例如，边不相接回路的并可以定义为圈，但没有这样做，因为列为定义的名词已经太多了。由于图论中目前使用的术语和符号远未统一，这里是根据它们在本书中涉及的五个主要领域内的应用来选用的。例如，用节点代替顶点或点，用回路代替圈，用并联边代替多边，等等，从而使本书具有一种特色即很多使用的术语几乎与日常英语有相同的意思，非常容易记忆。

贯穿本书的指导思想是数学上的严谨，因此，所有结论都严格证明，很多证明都是新颖的。本书在编号中试图以完整和合乎逻辑的方式安排主要课题，表明历史背景，并就本人所知道的前人贡献，给予应有的评价。还尝试以简洁的方式介绍内容，用论述和例题来说明所涉及的概念和原理。本书也包含一些在文献中未有的作者个人的贡献。

第二章到第五章，每一章的内容虽然不完全是独立的，但实际上都各自与第一章相连接而自成系统。这样使只对书中个别课题感兴趣的人们也能有用。

第一章建立了描述图的基本词汇，提供了一些在后续分析中需要用到的结论。为了减少这些预备知识的单调乏味，只介绍一些最

基本的术语，其它一些术语在后面章节需要时再给出定义。因此，要求读者在进入学习其它章节之前仔细学习这一章的内容。

第二、三和四章约占全书篇幅的三分之二，讨论了对电网络理论的各种应用，这正好是作者感兴趣的主要领域。事实上，图论在物理学中最重要的应用，是用于电网络问题的拓扑公式的表示和求解。虽然所讨论的方法可以很容易推广到其它学科，但主要课题无疑是电网络理论。在这些章节的每一部分，都假定读者已熟悉所论证主题的基本概念，而把讨论集中于与图论有较强联系的那些理论方面。

本书的一个特点是，几乎所有的结论都散见于已发表的文献，书中引用的所有参考资料都列在参考文献目录中，因此，本书特别适合于希望继续进行专题研究和将图论应用到其它领域中去 的读者。

虽然基本上打算把本书作为科研人员的参考书，但本书同样也可作为研究生的网络拓扑和线性系统及电路课程的教材。后面某几章适合于作为本科高年级研究讨论的课题。阅读这本书唯一的必备条件是扎实的数学知识。

在每章末，提供了大量习题。

本书中大量内容是在过去六年中由国家科学基金会，国家宇航局和俄亥俄州立大学研究会提供给作者研究经费研究得出的。在这期间我有机会访问普渡大学，受到了友好的招待。对此，我特别感谢 L.O.Chua 教授和 B.J Leon 教授使这次访问成功。没有俄亥俄州立大学的院长 R.L Savage，系主任 B. Davison 和 J.C.Gilfert 博士的鼓励和帮助，是不可能写出这本书的。对伊利诺斯州立大学的 W.Mayeda 教授和普林斯顿大学的 M.E Van Valkenburg 教授的大力支持表示感谢。许多朋友和同事都提出了非常有益的意见，在此一并表示感谢，他们是 K.E Eldridge 教授，G.V.S.Raju 教授，H.C.Chen 教授，F.Y.Chen 教授以及我的学生 S.K Mark 博士和 H.C.Li 硕士。H.C.li 硕士帮助绘制插图的草图。特别要提出的是

K.E.Eldrige 教授和 S.K.Mark 博士，他们认真地校对原稿，提供了有益的意见。普渡大学的 P.M.Lin 教授仔细阅读了全书，给予了相当大的帮助。我也同时希望对 C.Korswage 博士和 North-Hollaand 出版公司，在出版本书的各项细节中，细致耐心和真诚合作表示感谢。最后，我想感谢我的妻子 Shiao-Ling，由于她仔细校对书稿，对我这一工作的无限耐心和理解，谨以本书奉献给她。

W.K.C.

1971 年 4 月

再 版 前 言

自第一版发行后的过去四年中，我们已亲眼看到图论及其应用方面已有三十多本新书出版(参见参考文献目录)，预示未来某一时期它会继续得到飞速发展，这种加速发展的步调，证实了在第一版中所采用的一般方法，即在与工程应用紧密联系的较小范围内给予较深入的考虑，是有价值的。

在修订第一版的过程中，我想要补充的内容很多，根据读者的兴趣来推测，我决定集中在近年内受到广泛注意以及很大程度上依赖于图论的线性系统和网络分析方面，即网络的状态方程分析，作为第七章的主要内容来介绍这个论题。为了保持本书的合理篇幅，没有讨论状态方程的解法，因为它们可在关于常微分方程的很多优秀书籍中找到。

本版对原编写的整个内容也作了不少重要的修正，此外，还修改参考文献目录使之适合新的要求，包括详列了参考书目。

由于增添了主要内容，一个不可避免的结果是增加了本书的篇幅，这对于一学期每周三小时的线性系统与网络课程，材料足够有余，允许教师机动灵活地选取有关内容，以适应其特殊需要和客观条件。

自第一版公开发行以来，许多人经常花费相当大的时间和精力，相当友好地给了我有益的评价和意见，为此，新版的书名更加准确地反映了其内容。尤其是我感谢我的学生和促进本版改进的使用者，特别感谢我的博士生 S.Chandra，他对全书进行了仔细的校对。同时，我感谢 North-Holland 出版公司的 E.Fredriksson 博士，

他以相当低廉的价格出版了适合学生的版本。最后，我对我的家属，在编写本书期间表示的耐心和理解表示感谢。

W.K.Chen

1975 年

目 录

第一章 基本理论	1
§ 1. 引言.....	1
§ 2. 抽象图的基本概念.....	3
2.1 一般定义.....	3
2.2 同构.....	7
2.3 连通性.....	8
2.4 秩和零度.....	12
2.5 度.....	13
§ 3. 图的运算.....	14
§ 4. 重要的几类图.....	18
4.1 平面图.....	18
4.2 可分图和不可分图.....	21
4.3 二分图.....	24
§ 5. 有向图.....	25
5.1 基本概念.....	26
5.2 有向边序列.....	29
5.3 出度和入度.....	31
5.4 强连通有向图.....	32
5.5 重要的几类有向图.....	33
§ 6. 混合图.....	34
§ 7. 结束语.....	35
习题.....	35
第二章 电网络理论基础	39
§ 1. 矩阵和有向图.....	40

1.1	节点-边关联矩阵	40
1.2	回路-边关联矩阵	44
1.3	切割-边关联矩阵	49
1.4	矩阵 A, B_r 和 Q_r 之间的相互关系	57
1.5	与矩阵 B_s 和 Q_s 相联系的矢量空间	62
§ 2	电网络问题	64
§ 3	电网络问题的解	68
3.1	支路电流和支路电压方程组	68
3.2	回路方程组	69
3.3	切割方程组	76
3.4	附加考虑	83
§ 4	网络行列式及其广义代数余子式的不变性和相互关系	84
4.1	简史	85
4.2	初步考虑	85
4.3	回路和切割变换	91
4.4	网络矩阵	93
4.5	网络矩阵元素的广义代数余子式	103
§ 5	不变性和关联函数	118
§ 6	RLC 网络的拓扑公式	122
6.1	网络行列式及树和补树	123
6.2	广义代数余子式及 2-树和 2-补树	126
6.3	RLC 二端口网络的拓扑公式	135
§ 7	网络解的存在性和唯一性	138
§ 8	结束语	146
	习题	147
第三章	线性代数方程组的有向图解法	155
§ 1	伴随 COATES 图	156
1.1	求行列式值的拓扑法	157

1.2	求余子式值的拓扑法	162
1.3	求线性代数方程组解的拓扑法	165
1.4	等效和变换	171
§ 2.	伴随MASON图	185
2.1	求行列式值的拓扑法	187
2.2	求余子式值的拓扑法	190
2.3	求线性代数方程组解的拓扑法	192
2.4	等效和转换	195
§ 3.	COATES图和MASON图的改进	209
3.1	COATES图的改进	209
3.2	MASON图的改进	218
§ 4.	有向图子图的产生	220
4.1	1-因子和1-因子连接的产生	222
4.2	部分因子和K-部分因子的产生	225
§ 5.	特征值问题	228
§ 6.	矩阵求逆	233
§ 7.	结束语	239
	习题	240
第四章	线性系统的拓扑分析法	249
§ 1.	等代数余子式矩阵	250
§ 2.	伴随有向图	255
2.1	有向树和一阶代数余子式	257
2.2	有向2-树和二阶代数余子式	271
§ 3.	等效和变换	279
§ 4.	伴随有向图和COATES图	292
4.1	有向树, 1-因子和部分因子	292
4.2	有向2-树, 1-因子连接和1-部分因子	297
§ 5.	有向树和有向2-树的产生	300
5.1	代数法	300

5.2	迭代法	303
5.3	部分因子分解	311
§ 6.	电网络的直接分析法	313
6.1	开路转移阻抗和电压增益函数	314
6.2	短路转移导纳和电流增益函数	322
6.3	开路阻抗矩阵和短路导纳矩阵	327
6.4	伴随有向图的物理意义	331
6.5	伴随有向图的直接分析	337
§ 7.	结束语	346
	习题	347
第五章	树和树的生成	356
§ 1.	树的特征	356
§ 2.	树结构的编码	361
2.1	用路径来编码	362
2.2	用终端边来编码	364
§ 3.	分解为路径	367
§ 4.	Wang-代数公式	369
4.1	Wang-代数	370
4.2	线性相关	371
4.3	树和补树	376
4.4	K-树和K-补树	377
4.5	分块	382
§ 5.	利用分块法不产生重复项的树生成法	392
5.1	基本互补划分	392
5.2	算法	395
5.3	没有重复项的分块	399
§ 6.	矩阵表示法	405
6.1	计算任一矩阵的大子阵	405
6.2	树和补树	408

6.3 有向树和有向 2-树	411
§ 7. 初等变换	414
§ 8. 有向树图中的哈密顿回路	421
§ 9. 有向树和有向尤拉路	426
§ 10. 结束语	431
习题	432
第六章 具有规定度数的有向图的实现	442
§ 1. (p,s) -有向图的存在性和可实现性	442
1.1 有向图和有向二分图	444
1.2 存在性	445
1.3 用于实现的一种简单算法	459
1.4 度不变变换	465
1.5 连通 (p,s) -有向图的实现	469
§ 2. 对称 (p,s) -有向图的可实现性	474
2.1 存在性	475
2.2 可实现性	481
2.3 连通图、可分图和不可分图的可实现性	484
§ 3. 无自环图的唯一可实现性	488
3.1 初步考虑	489
3.2 连通图的唯一实现性	491
3.3 图的唯一可实现性	496
§ 4. (p,s) -矩阵的存在性和可实现性	497
§ 5. 加权有向图的可实现性	502
§ 6. 结束语	504
习题	505
第七章 网络的状态方程	516
§ 1. 标准形式的状态方程	516
§ 2. 列写状态方程的方法	524
§ 3. 状态方程的显式	532

§ 4. 状态方程的另一种表示式	543
§ 5. 参数矩阵的物理解释	544
§ 6. 复杂度	551
6.1 $\det H(s)$ 和网络行列式之间的关系	556
6.2 RLC网络	560
6.3 有源网络	563
§ 7. 结束语	565
习题	566
参考文献	570
符号索引	584
英中名词索引	591

第一章 基本理论

本章介绍描绘图的基本词汇，并提供后面分析时所需要的一些基本结论，但略去了图论中那些与本书的应用无关的内容。由于当前图论中所用的术语和符号表示还很不标准化，要求读者在学习其它章节以前必须仔细研究本章的内容。

§ 1. 引言

本书叙事中所用的术语“图”与人们所熟悉的解析几何或函数理论中的那些图完全不同。我们即将讨论的图仅是由点(节点)或连接其中某些节点的线(边)所组成的简单的几何图形，它们有时被称为“线图”。这种图解形式的表示法对物理学(BUSACKER 和 SAATY [1965]以及 HARARY [1967]、工程学(ESHU 和 REED [1961]以及 ROBICHAUD 等人 [1962])、社会学(HARARY 和 NORMAN [1953]以及 FLAMENT [1963])和经济问题(AVONDO-BODINO [1962]以及 FORD 和 FULLERSON [1962])中系统的模拟特别有用。实际上包含有二元关系的任何一个系统都能用图来表示。

图论方面的第一篇文章是著名的瑞士数学家 Leonhard Euler (1707—1783)发表的。他从一个当时尚未解决的众所周知的问题开始，此问题名叫哥尼斯堡桥问题。东普鲁士的哥尼斯堡(现名叫加里宁格勒)座落在布列卡尔河岸和两座岛屿上。它的各个部份由七座桥连通，如图 1.1 所示。问题是能否走遍七座桥，但每一座桥都要经过一次且只能经过一次。看起来有很多无需“解”它就可以去尝试的办法。1736 年 EULER 解决了这一问题，证明这是不可能的，奠定了图论的基础。我们在这里仅仅提一下解这一问题的思路，不