

# 网络模糊随机分析

## ——原理、方法与程序

● 刘锡荟 王海燕 著



● 电子工业出版社

# 网络模糊随机分析 ——原理、方法与程序

刘锡荟 王海燕 著

(国家自然科学基金会资助)

## 内容简介

本书系统地讨论了考虑随机性和模糊性的网络分析原理和方法,并给出了多个有关问题的计算机程序。图论方法和网络分析已渗入到诸如计算机和通信网、城市供水供电系统、交通运输、军事决策、生产规划、企业管理等许多重要领域。考虑模糊性和随机性将使网络分析具有更强的解决实际问题的能力。本书首先扼要介绍了图论和模糊数学基础知识,接着讨论了连通性、路由可靠性、最短路径、最可靠路、模糊流和动态网络分析等。程序用 Pascal 编写。

本书适宜于从事计算机、通信、城市规划、生产管理、军事、交通等专业的技术人员阅读;也可作为大学高年级学生和研究生有关课程的教材。

2P88/24

网络模糊随机分析  
——原理、方法与程序  
刘锡荟 王海燕 著  
责任编辑 王昌铭

\*

电子工业出版社出版(北京市万寿路)  
电子工业出版社发行 各地新华书店经销  
机电部科技情报所印刷

开本:787×1092毫米 1/32 印张:8 字数:180千字

1991年5月第1版 1991年5月第1次印刷

印数:2000册 定价:4.50元

ISBN7-5053-1407-6/TP·235

# 前 言

图论和网络分析,已广泛地渗透到运筹学、信息论、控制论和计算机科学等领域,并在工程技术、经济、军事等许多方面,都有着极为重要的应用。现代社会在很大程度上是一个由通讯网络、运输网络、能源和物资分配网络构成的巨大系统。这些网络的复杂性是显而易见的。网络分析就为更有效地使用现有的网络和更合理地设计新的网络提供了一套科学方法。计算机网络的设计与分析,通讯网的设计和性能评估,供电系统的可靠性和成本分析,城市生命线工程的规划和灾害估计,交通运输和物资流的安排,军事行动的规划和决策,大型灌溉系统的安排,库存和商品调配问题等等,都是十分重要的应用领域。由于人们的活动也可用网络来表示,因而在生产规划、企业管理等诸多方面,也有着广泛的应用。总之,在处理物资流、信息流和人们生产活动的问题中,图和网络分析都为增加系统的效率,提高系统的可靠性,并降低成本提供了有力的分析工具。特别是随着计算机技术的发展,图与网络分析及最优化算法,更是取得了迅速发展,各种计算机程序也不断涌现。

人们在运用图论和网络分析解决实际问题时,都逐步注意到了它所包含的不确定性。举例来说,对于通信网,特别是军用通信网的设计、分析和性能评估,就充分考虑了它所涉及的众多的不确定性因素。这当然是一个进步。如交换节点和传输链路被摧毁的概率,作业量和信息流量的统计特征,设备

发生故障和可靠工作的概率,信息因处理和传送时延造成响应时间的不确定,等等。这些不确定性,源于对可能发生的事件和出现的情况难于作出确切的估计。诸如敌方攻击的时间和地点,武器类型及其效应,电子战的情况,被传送的报文长度和到达时间,仪器设备发生故障的位置和时刻,等等,都是事先无法作出确定性估计的。因此,通信网的性能评估、生存性和可靠性分析,都采用了概率的方法。

在其它许多领域中,也都发展了考虑随机的不确定性的方法。像城市生命线工程中,预测供水管网在强烈地震作用下的破坏,就考虑了地震发生及地震波传播的不确定性,也考虑了管材强度的离散。又如物资调度与分配规划,也都考虑了需求量、存储量、流动率的随机变化。再如计划协调技术(PERT),它是首先为军事装备研制计划管理而提出的,目前已广泛用于设备研制、工矿企业生产、建筑施工、军事行动指挥等领域。它也从假设活动持续时间为固定的常数的所谓肯定型的,发展成为活动时间被认为是随机变量的所谓非肯定型的。可以说,考虑随机不确定性的网络分析方法,已普遍地在各方面得到了很好的发展与应用。

然而,近年来人们越来越深刻地认识到,随机性只是不确定性的一方面,它所反映的和要处理的只是事件发生的不确定性。而另一种不确定性,即模糊性是不容忽视的。模糊性所反映的和要处理的是事物类属间的不清晰性。由于大量的事物,从属于某一类到不属于某一类是逐步过渡而非突然跳跃的,类别之间并不存在截然的分划界限,模糊性就是必须考虑的。运用图论和网络分析的许多问题中,仅仅考虑随机性的不确定因素,是不完全的,也必须计及模糊性的不确定因素。以通信网为例来说,由于电子战敌方干扰情况是复杂的,核电磁

脉冲的影响程度是不同的,节点和链路从完全可工作到完全不可工作,也并非截然可分,而是有中介状态的。又如供水管网的地震破坏,常常只能用自然语言,诸如“严重破坏”、“基本完好”…等来描述,这样的度量当然是模糊的。

另外,由于分析模型一般都极为复杂,在建模时常常作大量的假设。还以通信网而论,在作传输时延分析时,大都假设信息传输路由为固定的,报文是等长的,每个源点信息量的统计特征是一样的。这与实际情况,相去殊远。在这样的假设前提下分析得到的传输时延,不可能是一个清晰可信的具体量,而只能是模糊的。正如著名模糊数学创始人 L. A. Zadeh 所说的:“当系统的复杂性日趋增长时,我们作出系统特性的精确然而有意义的描述的能力将相应降低,直至达到这样一个阈值,一旦超过它,精确性和有意义性将变成两个几乎互相排斥的特性”。在运用网络分析为工具的问题中,人们常要处理这样的复杂系统,因而模糊性也是不可避免的。

科学的需要,生产技术的需要,就是发展网络模糊随机分析理论、方法,以及实用计算机程序的主要动力。但是,迄今为止,既考虑随机性又考虑模糊性的网络分析尚属鲜见。本书讨论的问题虽然涉及网络分析的多方面,但仍然是跨出的第一步。笔者研究的实际对象是通信网的分析和性能评估,城市生命线工程的震害分析和性能评估,但这里介绍的、侧重的是一般理论和方法,以便有关领域都可应用。

本书一方面详细阐述了网络模糊随机分析的理论,同时又介绍了具体分析方法和有关的算法,并尽量介绍了有关的计算机程序。为了有利于理解和掌握以后各章的内容,第一章图论方法简介,就本书涉及的图论及网络分析的有关内容作了扼要介绍,其重点是最短路、次短路、最大可靠路、最大容量

路、最大流、连通性等几个工程上最有实用意义的方面。这里所介绍的,大都是确定性的方法,既没有考虑随机性,也没有考虑模糊性。但是,以下的讨论却多是以此为基础扩展延伸出去的。除了详细介绍了算法外,每一个问题都给出了计算机程序。第二章模糊数学基础,以十分简练的方式介绍了模糊数学的主要内容,为与以下各章相呼应,对模糊数、模糊关系、模糊决策、模糊概率等作了较为详尽的论述。为了在讨论网络分析时与具体问题密切结合,有些详细论证放在各章有关位置或附录。

第三章到第八章就网络模糊随机分析的重要内容作了逐章的讨论。第三章讨论连通性。连通性是网络性能,如可靠性的重要判据。本章指出了考虑连通性时计及模糊性是必要的,并给出它的表征方法,定义连通强度。它实质上是把非此即彼的连通定义,扩展成反映中介状态的连通定义。以模糊矩阵的传递闭包为手段,能全面反映所研究的网络的连通程度。附录对求传递闭包的方法作了详细的论述。第四章讨论路由的可靠性。这在网络分析中是重要的,本章运用 Monte Carlo 方法很好地容纳了随机性与模糊性于一体。主要运用了模糊事件的概率,这在本章附录中详细地给出了论证。第五章为模糊最短路。当弧的权为模糊的情况下,网络的路长(最短路、次短路、最长路等)就成为模糊的了。实际问题中模糊最短路是重要的,但算法上却有许多困难。这里介绍的方法克服了一系列困难,因而是简单易行的。第六章讨论最可靠路,为弧和节点的可靠概率用语言描述时的分析,提出了一个可行的方法。因为是以语言概率为基础的,因而充分考虑了随机性和模糊性两个方面。第七章是关于网络流的讨论。当弧的容量(允许流过的最大流量)为模糊的,网络最大流量目标也是模糊的时

候,网络流的分析就成为约束和目标都是模糊的环境下的决策问题。第八章讨论网络动态分析和性能的模糊综合评判。当考虑物资流、信息流在网络中传输的时间过程,而且网络的状态也是随时间变化的时候,分析就是一个动态过程。针对这样的模型,并对系统进行了综合评判,为优化提供依据。

每章都给出了计算机程序框图,并对主要部份,直接给出了程序。所有程序都是用 Pascal 编的,例题都是在微机上计算的。

既考虑随机性又考虑模糊性的网络分析,仅仅是开始研究。我们期望它在实践中丰富和完善。

云水同志帮助整理并誊写了全部稿件,在此表示感谢。



# 符 号

		章 次
$G, G(N, L)$	图, $N$ —节点集, $L$ —链路集	—
$n_i$	节点, 序号 $i$	—
$l_{ij}$	联接节点 $i, j$ 的链路	—
$G'$	$G$ 的支部(或连通分支)	—
$L'$	$G$ 的链路割集	—
$d_{ij}$	节点 $n_i, n_j$ 间的链路长度(弧长)	—
$A, B$	图的距离矩阵	—
$p_{ij}$	链路 $l_{ij}$ 的可靠概率	—
$\tilde{P}_n$	节点 $n_s$ 到节点 $n_t$ 的路由的可靠概率	—
$c_{ij}$	链路 $l_{ij}$ 的容量	—
$C$ 或 $c$	最大允许流量	—
$f(i, j), f_{ij}$	通过链路 $l_{ij}$ 的流量	—
$w(i, j), w_{ij}$	通过链路 $l_{ij}$ 的单位流的费用	—
$U, V, X, Y \dots$	论域	二
$A, B, C, \dots$	集合(或集)	二
$a, b, \dots$	集的元素	二
$\in$	属于	二
$\notin$	不属于	二
$\subseteq, \subset$	包含	二
$\emptyset$	空集	二
$\mathcal{P}(A)$	集 $A$ 的幂集	二
$\chi_A(x)$	元素 $x$ 对集 $A$ 的特征函数	二
$\triangleq$	定义为	二
$\cup$	并	二
$\cap$	交	二

$A^c$	集 $A$ 的余	二
$\underline{A}, \underline{B}, \dots$	模糊集	二
$\mu_{\underline{A}}$	模糊集 $\underline{A}$ 的隶属函数	二
$\mathcal{F}(U)$	论域 $U$ 上的模糊幂集	二
$\wedge, \vee$	取小, 取大	二
$(\underline{A})_\alpha, (\underline{A})'_\alpha$	$\underline{A}$ 的 $\alpha$ -截集, $\alpha$ -强截集	二
$f: A \rightarrow B$	由 $A$ 到 $B$ 的映射	二
$f(a) = b$	$b$ 为 $a$ 的象, $a (= f^{-1}(b))$ 为 $b$ 的原象	二
$X \times Y$	$X$ 与 $Y$ 的直积 (或笛卡儿积)	二
$X \stackrel{R}{\sim} Y$	$R$ 为 $X$ 到 $Y$ 的二元关系	二
$R \circ Q$	关系 $R$ 与关系 $Q$ 的合成	二
$\underline{R}, \underline{Q}$	模糊关系	二
$\exists$	存在着	二
$\underline{R} = (r_{ij})_{m \times n}$	模糊矩阵	二
$[x]_{\underline{R}}$	等价关系 $\underline{R}$ 的元素 $x$ 的等价类	二
$\sigma(\underline{A}, \underline{B})$	模糊集 $\underline{A}, \underline{B}$ 的贴近度	二
*	综合评判算子	二
$\underline{\geq}, \underline{\leq}$	近似大于等于, 近似小于等于	二
$P(\underline{A})$	模糊事件 $\underline{A}$ 的概率	二
$E$	数学期望值	二
$T(\mathcal{B})$	语言变量 $\mathcal{B}$ 的辞集	二
$\mathcal{P}_i$	语言概率	二
$\underline{1}, \underline{J}$	模糊数	二
$\underline{X}$	集合类	二
$g, g_\lambda$	模糊测度, $\lambda$ -模糊测度	二
$\int$	模糊积分	二
$\Pi_X$	变量 $X$ 的可能性分布	二
$\pi_X$	可能性分布函数	二

$poss$	可能性测度	二
$A$	图的关联矩阵	三
$G(N, L)$	模糊图	三
$L_{ij}$	从节点 $n_i$ 到节点 $n_j$ 的路由	三
$S(L_{ij})$	路由 $L_{ij}$ 的连通强度	三
$\mathcal{L}$	路由族	三
$\hat{R}$	模糊矩阵 $R$ 的传递闭包	三
$\Rightarrow$	蕴含	三
$Q_n$	节点对 $n_i, n_j$ 的端点可靠性	四
$\{\Omega, \mathcal{B}, P\}$	概率空间	四
$\Omega$	基本事件的集合	四
$\mathcal{B}$	波来尔集合系	四
$P$	概率测度	四
$E$	模糊事件	四
$\sigma_Z$	随机变量 $Z$ 的均方差	四
$\bar{Z}$	随机变量 $Z$ 的均值	四
$\sigma$	基本事件 $\Omega$ 上的 $\sigma$ -代数	四
$\tilde{d}_{ij}$	链路的模糊长度	五
$\tilde{L}$	最短路	五
$L$	最长路	五
$\tilde{C}$	决策模	五
$\tilde{P}$	模糊概率	六
$T(\tilde{P})$	模糊概率的词集	六
$\tilde{P}$	$P$ 的原辞	六
$h_i$	程度词	六
$L^0$	最可靠路	六
$\tilde{c}_{ij}$	链路 $l_{ij}$ 的模糊容量	七
$\tilde{F}$	最大流的模糊约束	七

$\cap$	多个模糊集之交	七
$\wedge$	多个隶属度取小	七
$f_v$	可行流	七
$r, \tilde{r}$	增广路, 广义增广路	七
$r^+, r^-, \tilde{r}^+, \tilde{r}^-$	$r$ 上的前向弧和背向弧, $\tilde{r}$ 上的前向弧和背向弧	七
$\Sigma$	取和	七
$\Pi$	取积	七
$q_t^d$	时刻 $t$ 的摧毁概率	八
$q_t^r$	时刻 $t$ 的修复概率	八
$q_t^w$	时刻 $t$ 的完好概率	八

# 目 录

符号 .....	( I - IV )
<b>第一章 图论方法简介</b> .....	( 1 )
§ 1-1 图论定义及性质 .....	( 1 )
§ 1-2 路由 .....	( 3 )
§ 1-3 网络流 .....	( 30 )
§ 1-4 网的可靠性 .....	( 47 )
<b>第二章 模糊数学基础</b> .....	( 58 )
§ 2-1 模糊集及其运算 .....	( 58 )
§ 2-2 分解定理与扩展原理 .....	( 63 )
§ 2-3 模糊关系 .....	( 65 )
§ 2-4 模糊聚类与模糊识别 .....	( 70 )
§ 2-5 模糊决策 .....	( 78 )
§ 2-6 模糊概率 .....	( 85 )
§ 2-7 模糊数 .....	( 90 )
§ 2-8 模糊积分与模糊测度 .....	( 96 )
<b>第三章 模糊连通性分析</b> .....	( 101 )
§ 3-1 普通图的连通性和算法 .....	( 101 )
§ 3-2 连通的模糊性 .....	( 107 )
§ 3-3 模糊图及模糊矩阵表示 .....	( 107 )
§ 3-4 模糊图的连通性分析 .....	( 109 )
§ 3-5 模糊连通性分析的几个问题 .....	( 110 )
§ 3-6 计算机程序和算例 .....	( 116 )
附录 3-1 自反模糊关系 $R$ 的传递闭包及其性质 .....	( 125 )
<b>第四章 模糊路由可靠性</b> .....	( 132 )

§ 4-1	普通图的端点可靠性及分析方法	(132)
§ 4-2	模糊端点可靠性的定义	(134)
§ 4-3	模糊端点可靠性分析步骤	(135)
§ 4-4	程序和算例	(138)
附录 4-1	关于模糊端点可靠性计算公式的说明	(142)
<b>第五章</b>	<b>模糊最短路分析</b>	<b>(144)</b>
§ 5-1	模糊弧长的表征方法	(144)
§ 5-2	模糊最短路的定义	(149)
§ 5-3	模糊最短路算法	(150)
§ 5-4	模糊最长路	(152)
§ 5-5	模糊路由的解释与决策	(153)
§ 5-6	计算机程序和算例	(157)
附录 5-1	关于模糊弧长的说明	(171)
附录 5-2	多维模糊变量的可能性分布	(173)
附录 5-3	模糊最短路算法的证明	(175)
<b>第六章</b>	<b>模糊最可靠路分析</b>	<b>(178)</b>
§ 6-1	弧的模糊可靠概率	(178)
§ 6-2	模糊最可靠路计算	(184)
§ 6-3	关于模糊最可靠路的讨论	(188)
§ 6-4	计算机程序和算例	(189)
<b>第七章</b>	<b>模糊网络流分析</b>	<b>(194)</b>
§ 7-1	链路容量和网络最大流的模糊约束	(194)
§ 7-2	模糊流分析模型	(197)
§ 7-3	模糊流分析的基本原理	(199)
§ 7-4	模糊流算法	(206)
§ 7-5	模糊流用于网络可靠性分析	(207)
§ 7-6	计算机程序和算例	(211)
<b>第八章</b>	<b>网络可靠性动态分析及综合评价方法</b>	<b>(222)</b>
§ 8-1	动态可靠性分析的基本原理	(222)

§ 8-2	系统特性的描述	(230)
§ 8-3	动态评价算法	(234)
§ 8-4	程序说明与算例分析	(234)
<b>参考文献</b>		<b>(240)</b>

# 第一章 图论方法简介

图论是一个非常重要的数学分支,是专门研究由一组点和联接着点的一组线所组成的图的问题的学科。现实中有许多问题都是研究某些事物和事物间的相互关系的,如果用点表示这些事物,用线表示它们之间的相互关系,就可以把所研究的问题抽象为图,运用图论方法,使问题得以解决。正因为如此,近 20 年来,图论的应用非常活跃,它被广泛地应用于系统工程、通信工程、建筑工程、运筹学、电路网络、计算机科学、信息论、控制论、物理学、化学、以及经济学、社会学、语言学、心理学等各个领域。

图论的内容涉及面非常广泛,优化算法很多。本章旨在为后面的网络模糊随机分析提供数学工具,因此仅选择了实用性强的部分算法。考虑到 Pascal 语言编程灵活,且易读性好,本章的全部算法程序均采用 Pascal 编写,算法后面给出的例题,可验证程序的正确性,也可以帮助读者使用程序。

## § 1-1 图论定义及性质

### 一、图和网

图是由点和连接它们的线的有限集所组成的。点通常称为节点或顶点;线称为链路或边等。如果图中的链路具有方向性,则称此图为有向图,否则称为无向图。一般来说,当节点集为  $N$  和链路集为  $L$  时,我们将把图记作  $G(N, L)$ 。 $G(N, L)$  的



一个子图就是具有节点集为  $N$  的子集和链路集为  $L$  的适当子集的一个图。

例如通信网是由连接诸如交换中心、集中器或终端等位置的传输路径所组成。图可作为网的一种表现形式,其中节点相当于交换中心、集中器、终端等,链路则相当于传输路径。

## 二、路由、支部和割集

在图  $G$  中,一个点和边的交替序列:  $(n_i, l_{i,i_1}, n_{i_1}, \dots, n_{i_k}, l_{i_k,j}, n_j)$  称为  $G$  中由  $n_i$  到  $n_j$  的一条路或路由。如果该路中的边不重,则称为简单路;如果该路中的点不重,则称为初级路。如果  $n_i$  与  $n_j$  之间存在一条路,则称点  $n_i$  和点  $n_j$  是连通的。在有向图  $G$  中,如果既存在一条  $n_i$  到  $n_j$  的有向路,也存在一条  $n_j$  到  $n_i$  的有向路,则称点  $n_i$  和点  $n_j$  是强连通的。如果  $G$  中任意两点都是连通的,则称  $G$  是连通的。

$G$  的极大连通子图  $G'$  (没有其它包含  $G'$  的子图还是连通的)称为  $G$  的一个支部或连通分支。

如果  $L'$  是连通图  $G$  的一个链路子集,使得去掉  $L'$  中的链路将造成具有两个或多个支部的图,且  $L'$  是具有这种性质的最小链路集,则称  $L'$  是  $G$  的一个链路割集。

如果  $N'$  是连通图  $G$  的一个节点子集,使得去掉  $N'$  中的节点将造成具有两个或多个支部的图,且除了  $N'$  本身再没有  $N'$  的子集具有这种性质,则称  $N'$  是  $G$  的一个节点割集。

## 三、图中的权

对图的每个链路分派一个称为链路的权的实数,这样做通常是有意义的。例如,权可以是链路的长度、费用、传输容量、传输时延、物质流,或者其它有用的量。路由的权就是它的