

网络技术原理及应用

江景波 葛震明 何 治 编著

同济大学出版社



网络技术原理及应用

江景波 葛震明 何 治 编著

同济大学出版社

内 容 提 要

本书是一本探求和研究网络技术原理、方法和应用的专著。主要内容包括：一、网络技术的基本原理；二、最常用的网络技术；三、网络模型的仿真技术。

本书根据网络技术的理论和应用的发展过程，由浅入深地组织内容，并且都附有相应的计算和应用实例，便于读者自学。可作高等院校经济管理专业学生和研究生学习参考资料，也可供科研单位和企业中管理人员参考应用。

责任编辑 郁 峰

封面设计 王肖生

网络技术原理及应用

江景波 葛震明 何 治 编著

同济大学出版社出版

(上海四平路1239号)

新华书店上海发行所发行

上虞科技外文印刷厂排版

常熟文化印刷厂印刷

开本 850×1168 1/32 印张 11.625 字数 296 千字

1990年8月第1版 1990年8月第一次印刷

印数 1—3,300

定价 2.90 元

INBN 7-5608-0595-7/TP·36

前 言

网络技术是一种非常有效的系统分析和优化技术。特别是三十年前,网络技术被应用到计划和经济管理方面以来,应用范围更加广泛。目前,网络技术已发展成为一门独立的、适用于研究工程技术、经济管理、社会发展等许多方面的有效手段,并成为运筹学的一个重要的分支。它的主要应用范围不仅包括许多工程技术系统(或问题)如电气、水利、通讯、交通等等,还包括各类经济管理系统(或问题),如计划、分配、资源安排、设备布置、存储、设备更新、工程经济、排队系统、投标决策、风险分析等等,以及其它许多问题。

我国在 60 年代初,由著名数学家华罗庚教授首次介绍网络计划技术以来,得到各方面的普遍重视。在华罗庚教授的倡导下,进行了理论研究和推广应用,取得了较好的经济效益。1984年,同济大学江景波教授编写了《网络计划技术》一书,比较系统地阐述了网络计划技术的应用原理和方法。

随着网络技术应用的扩大,理论研究也不断深入,同时由于计算机技术的迅速更新换代,使用更加方便和广泛,更加开拓了网络技术的实用范围。目前,网络技术已发展成为与随机系统、仿真(模拟)技术、计算机应用密切结合的综合性应用技术,也是大系统、大科学分析研究必不可少的有效手段。

本书是在《网络计划技术》一书基础上,根据网络技术新的理论研究和应用成果编写而成。本书不仅综合地概述了网络技术的发展和基本构成原理,并逐步深入地研究网络技术分析各种专门系统和问题的应用原理和方法。

本书于 1986 年编写后,曾作为同济大学经济管理专业研究生的教材试用。在试用中得到了不断修改和完善。

本书第一、二、三章由江景波编写，第四、五、六章由葛震明编写，第七、八、九章由何治编写。全书由江景波主编，葛震明统一整理。

编者

1988年11月

目 录

前 言

第一章 概 述.....1

第二章 网络技术模型的构成及原理12

第一节 网络技术模型的构成.....12

第二节 网络模型的矩阵拓扑原理.....16

第三节 网络模型的应用范畴及应用特点.....25

第三章 网络计划技术..... 40

第一节 网络计划模型的构成.....41

第二节 网络计划模型的时间参数计算.....55

第三节 网络计划模型的时间-费用分析68

第四章 网络的最短线路和最大流.....80

第一节 网络的最短线路分析.....80

第二节 网络的最大流及其应用.....97

第五章 流 线 图120

第一节 概述120

第二节 流线图的分析求解方法124

第三节 流线图的线路转向140

第四节 流线图的应用144

第六章 随机网络及其分析计算方法.....151

- 第一节 随机网络的构成及特点151
- 第二节 随机网络的分析计算方法159
- 第三节 随机网络的应用163
- 第四节 求解有互斥型节点的随机网络系统的计算机程序180
- 第五节 随机网络中特定元素的计数及条件矩母函数183
- 第六节 汇合型和兼有型节点的随机网络的分析计算方法202

第七章 时间仿真随机网络213

- 第一节 时间仿真随机网络的模型与特性213
- 第二节 时间计算仿真方法之一220
- 第三节 时间计算仿真方法之二226
- 第四节 时间仿真随机网络的应用举例241

第八章 排队仿真随机网络258

- 第一节 排队仿真随机网络模型258
- 第二节 单排队仿真网络的基本概念262
- 第三节 单排队仿真网络的扩充263
- 第四节 排队仿真随机网络的应用举例276

第九章 循环仿真随机网络282

- 第一节 循环仿真随机网络模型282
- 第二节 循环随机网络的动态仿真方法288
- 第三节 循环仿真随机网络的应用举例294

第十章 风险评审技术(VERT).....302

第一节	风险评审技术网络模型与特点	302
第二节	风险决策技术的仿真	310
第三节	风险决策技术的应用	313
附录一	随机变量的常见的概率分布	323
附录二	随机数的产生	336
附录三	仿真参数的基本统计公式	355
参考文献		361

第一章 概 述

一、什么是网络技术

网络技术是应用网络模型形象地、直观地、正确地描述各种工程技术、生产组织、经营管理问题或系统,简捷地分析、求解、优化这类问题或系统的有效技术。

众所周知,随着科学技术的进步和社会化大生产的发展,现代化的工程技术,生产组织,经营管理问题具有规模大、工艺复杂、影响因素多、时间观念强等特点,从系统的角度来看,这些问题都是由众多互相关联、互相制约的要素组成的复杂系统,有的甚至是大系统。而且这类问题,在科学研究、生产管理、经济研究中比比皆是,要求人们认真地思考、分析和研究,以取得较满意的结果或较好的经济效益。

如何描述、分析和研究这类问题有各种方法,即可以应用各种模型,如最常见的各种数学模型、物理模型、模拟模型等等。这些模型都各有特点,可在各种不同情况下加以应用。但是,对于复杂的工程技术、生产组织、科学研究,应用单一的模型,往往无法加以正确描述和分析,这时,就需要同时采用多种模型。例如一项工程的设计,既要有图示模型,即各种设计图纸,还需要用模拟模型以展示其外观并进行试验;同时需要各种数学模型进行计算。通常,随着对问题和系统研究的深入,模型也需要不断地修改和完善。

网络模型既是图示模型,又是能反映出各组成要素和参数间的相互关系并按照一定的拓扑逻辑关系进行分析和计算的标准模型。

标准模型是指能在某一特定条件下,对问题提供“最佳”回

答,同时也能提供有关行动或方案的进展和过程的模型。这是在科学研究、工程技术、生产工艺、经营管理中应用最广泛、最常见、最理想的模型。许多科学理论就是研究如何更有效地建立和求解各种问题及系统的标准模型。例如线性规划模型就是一种可广泛应用的标准模型。但是大多数模型在开始研究阶段都仅适用于某个特殊或专门问题,而不可能成为广泛通用的标准模型。随着对模型的应用,不断地总结和深入研究,才逐步发展成为标准模型。

最初的网络模型来自电气工程,这类工程中的电气设备、供电线路以及线路上的电流、电压构成了一个电气工程网络。随着应用的扩大和研究的深入,网络模型也发展成为能反映各类问题、并能对问题进行逻辑分析如数学计算、提供最优解的标准模型。

应用网络模型不仅可以直接表明各变量、各约束条件间的相互关系,同时可以应用网络理论(最短线路理论、最大流理论、流线图原理等)对系统或问题进行分析、计算、求解和优化。

网络模型既可以反映肯定型问题,也可以表达非肯定型问题。随机网络技术是一种研究各种随机系统和随机问题的非常有效的方法。广义地理解,肯定型网络模型仅仅是随机网络模型的特例。

网络模型也可以反映动态的问题。网络模型中的箭头(枝线)的方向,反映了问题的进程和发展。

由此可见,网络模型又是一种综合性的标准模型,可以广泛地应用于许多方面。

二、网络技术的特点

近三十年来,网络技术不断地发展和完善且应用日益广泛的原因是它具有如下一些显著的特点。

1. 形象直观,易于理解

网络技术首先是用网络图,非常直观而形象地描述系统,反映系统中各要素(组成部分、变量)之间的相互关系。例如,对于一项

非常复杂的包括成千上万个组成部分的工程系统的研究计划，长期以来，领导和决策人员首先感到棘手的是无法正确、完整和形象地表达各项要素间的关系，因此也就无法对它们实行有效地控制和协调。应用网络技术，就能非常简明、直观地描述这个系统。美国在 50 年代末研制的北极星导弹计划和 60 年代研制的阿波罗空间探索计划，都是由于成功地应用了网络技术，使这些相当复杂的研制任务，获得了满意的控制和协调。其它诸如各种最短线路问题、最大流量问题，都能应用网络技术加以正确而形象地表达。

2. 便于分析和计算

对于大多数工程技术、经营管理系统和问题，应用网络技术进行分析和计算，比应用其它优化技术具有更为迅速简便等特点。例如、对于一个大型的优化问题，如资源分配等问题，往往包括几千个变量和约束条件，应用常用的数学规划（线性规划等）方法，虽然也能求得最优解，并进行优化。但如应用网络技术，速度就可以提高几十倍甚至几百倍。若使用计算机，虽然对每种优化技术都可以避免冗长无味的计算，节约时间和人力。但同样的问题如采用网络模型更具有减少输入、缩短运算时间等优点。

3. 配合需要，机动调整

任何系统和问题研究，往往在不同的管理层次、不同的管理部门、不同的时期，有不同的要求。一般情况下，上级部门需要有比较综合和概要的信息；具体执行部门要求比较详细、正确的安排。现阶段正在执行的任务应有具体和直接能起指导作用的计划；今后的任务则可以粗略一些。应用网络模型可以根据不同的需要，绘制相应具有不同综合程度的模型。

正是由于上述基本特点，使网络技术能在较短时间内，很快得到广大工程技术人员、领导人员、管理决策人员普遍的接受和广泛的应用。

目前，网络技术已经在下列各种系统和问题中得到有效应用：

- ① 生产及分配系统；
- ② 军事后勤系统；

- ③ 城市交通运输系统；
- ④ 铁路运输系统；
- ⑤ 通讯系统；
- ⑥ 水利系统；
- ⑦ 设备布置系统；
- ⑧ 资料分类系统；
- ⑨ 计划系统；
- ⑩ 计算机系统；
- ⑪ 电力工程系统。

虽然网络技术应用十分广泛，可对各种不同类型的系统或问题进行分析研究。但其基本的原理是相同的。本书仅介绍网络技术的基本原理、基本方法以及其主要的方面。

三、网络技术的发展

网络技术的产生与发展都来自于工程技术和管理实践。如前所述，最初始的网络技术起源于电气工程，在本世纪 50 年代后期，根据工程计划管理的实际需求而产生了网络计划技术。此后，随着对网络技术理论研究的不断突破以及实际应用的迅速扩大，网络技术不断完善、深化，并逐步发展成为目前与随机排队系统、各种资源优化系统、模拟技术及电子计算机密切结合并获得广泛应用的网络技术系统。

回顾网络技术的发展，与其理论研究的发展是相互制约和相互促进的。表 1-1 列出了网络技术发展的框图。

科学管理中最早的计划模型是甘特图(GANTT CHART)。甘特图，又称横道图，把组成系统或工程的活动（或称工作）都用一条线条表示，并以线条的长短表示时间的数量，线条始端和末端表示了各活动的开始和结束时间。但这种方法不能表达各活动之间的逻辑关系，因而对于活动之间逻辑关系比较复杂的工程或任务，应用甘特图无法进行正确和有效的分析。

1957 年提出的关键线路方法(简称 CPM) 最早应用网络模型

网络技术名称	开发年份	功能特点	所需应用的理论和技术
GANTT图	50年代	能表示工作的时间关系	
CPM	1956—	能表示工作、事件之间的逻辑与时间关系	图论、网络流理论
PERT	1958—	工作时间可以是非确定量, 其它与CPM相似	图论、概率论
GNA	1962—6	事件(节点)可以是非确定量	图论、概率论
DCPM	1967—	具有决策节点的CPM	图论、决策理论
GERT	1964—6	工作、事件都可以是随机变量	图论、流程图、概率论
GERTS	1968—6	具有仿真能力的GERT	仿真理论、FORTRAN与GASP语言、其它同GERT
GERTSⅢC	1970	具有成本核算功能的GERT仿真	成本控制理论、其它同GERTS
GERTSⅢQ	1970	具有排队功能的GERTS	排队理论、其它同GERTS
GERTSⅢR	1970	具有资源分配功能的GERTS	资源分配理论、其它同GERTS
MATHNET	1970	工作完成具有风险的网络软件	风险理论、其它同GERTS
R/SCA	1970	同上	同上
STATNET	1971	同上	同上
VERT	1972—	工作完成效果与时间、费用相联系的网络仿真	性能测定理论、其它同GERTS
GERTSⅢZ	1974	具有成本、资源综合优化的GERTS	成本、资源控制理论、GERTS
GRASP	1974—82	具有系统可靠性分析的功能	可靠性理论、GERTSⅢZ
P-GERT	1974	具有计划功能的时间仿真软件	计划理论、GERTSⅢZ
SAINT	1974—7	具有人-机对话的功能	人-机技术、GERTSⅢZ、GASPIV
SMOOTH	1974	具有综合连续与离散系统的网络仿真语言	GERTSⅢZ、GASPIV
GERTSⅢQP	1975	具有资源、排队综合优化的GERTS	GERTSⅢR、GERTSⅢQ
R-GERT	1975	具有多资源分配的功能	多资源分配理论、GERTSⅢR
Q-GERT	1977—7	具有各种排队功能的GERT	GPSS语言、GERTSⅢQ
SLAM	1979	具有多种建模功能的综合分析软件	GASPIV、GPSS语言、Q-GERT
CYCLONE	1980—	具有描述循环运行系统的综合优化功能	成本、资源、排队理论、GERTS

于工程紧急维修任务,并且编制了相应的计算机计算程序,取得了较好的应用效果。1958年,为适应美国北极星导弹的研制,提出了应用计划评审技术(简称为PERT)编制计划,使该项极其复杂

的研究计划得到了较好的控制和协调。

关键线路方法与计划评审方法是网络技术中最基本的方法，为以后各种网络技术的发展奠定了基础。

自 60 年代起，各种网络技术蓬勃发展，主要有如下几种：

(1) 节点式网络模型(简称 AON 网络)，在我国称为单代号网络模型。它是以节点表示活动(或工作)的网络模型。而关键线路方法和计划评审方法等网络模型都是以箭杆(或称枝线)表示活动(或工作)，因此又称为箭杆式网络模型，在我国称为双代号网络模型。节点式网络模型在绘制网络图、表示活动间逻辑关系方面都比箭杆式网络模型有很大改进，因此，在许多网络模型中得到广泛应用，如搭接网络模型和决策网络模型都采用节点式网络模型。

(2) 资源优化与成本优化网络模型。应用网络模型能对系统和问题进行资源和成本优化，这是它的重要特点之一。其后又进一步发展到资源强度可变及多资源分配等优化问题。在成本优化方面，从假定的时间-成本呈直线变化关系发展到时间-成本呈各种关系的优化，以及进行成本计算、成本分析和成本控制等。

(3) 决策网络模型(简称 DCPM)，又称决策关键线路方法。这是在网络模型中引进了决策节点表示不同的方案，并从中作出最优的选择。

(4) 综合网络技术模型(简称 GNA)。它是在网络模型中引进了概率节点与概率枝线，使网络模型能广泛地反映工程实际情况。这就是在以后得到广泛应用的随机网络的前身。

(5) 搭接网络(简称 OLN)。它可以表示实际工程中各种活动之间存在的各种搭接的逻辑关系，在此以前，各种网络模型只能表示单一的“结束-开始”的逻辑关系，即前面活动(工作)结束后，后面活动(工作)才能开始。由于搭接网络模型能表达工程中普遍存在的各种搭接关系，因而进一步扩大了网络技术模型的应用，如群体网络等。

(6) 随机网络模型(简称 GERT)，在我国又称为图示评审技术。这是网络技术又一次蓬勃发展的先驱。随机网络技术中，不

仅活动的各参数(如实现时间、费用等)具有随机性,而且允许活动的实现也有随机性,即网络模型中的枝线和节点都具有随机功能。由于描述能力大大提高,因而,应用非常广泛,而前面所述的基本网络模型 CPM/PERT 仅仅是随机网络模型的特例。另外,随机网络模型的计算,需要应用概率论、流程图理论等知识和理论,对于复杂的随机网络模型的计算和分析,需要应用模拟(仿真)技术、排队理论等,因而大大丰富了网络技术的研究内容和扩大了应用范围。

自 60 年代起,网络技术一直取得稳定的发展,通过理论研究和广泛的实际应用,不仅巩固了网络技术的卓有成效的方面,同时还针对某些不足之处进行了客观的分析、研究和改进,逐步地取得了各种新的发展,其中最重要的是搭接网络模型和随机网络模型。

进入 70 年代,随着计算机技术的突飞猛进,使大规模的、复杂的网络逻辑运算成为可能和更加方便。这不仅使那些以前使人望而生畏的大型项目或复杂系统的模型如群体网络等,能得到正确描述,同时还能对这类网络模型进行综合、分解、资源分配、成本优化,并且结合应用还研究了各种计算机应用软件。

另一方面,在随机网络技术的基础上又产生了多种网络技术。其中随机网络仿真技术(简称 GERTS)是其代表之一。它是仿真技术与网络技术的结合,从而使随机网络模型中节点与枝线的形式和作用进一步拓宽,使之与现实情况更为相似。这种网络技术有多种功能,如反馈功能、节点可多次实现功能、节点统计功能、节点条件实现功能等等。这样,就统一了确定型节点与随机型节点,例如,当到达节点的枝线等于要求完成的前导的活动数时,该节点就成为一个确定型节点;如当要求完成的前导活动数少于总的前导活动数时,该节点就实现,这就相当于随机型节点。此外,还引进了活动在一定的逻辑条件下可中途暂停或中途激发等概念。

在随机网络仿真技术(GERTS)基础上,各种特殊用途的仿真随机网络模型技术与应用技术相继产生和发展。其中有模型的创

新,有方法的改进、有程序的开发和应用,下面列出一些具有代表性的网络模型分支与程序。

(1) 成本优化仿真随机网络(简称 GERTSⅢC)。这是具有成本核算功能及相应的 GERTS 软件。

(2) 资源优化仿真随机网络(简称 GERTSⅢR, R-GERTS)。这是具有资源优化功能及相应的软件。

(3) 排队仿真随机网络(简称 GERTSⅢQ, Q-GERT1)。这是排队理论与网络技术的结合,就是在网络模型中增加了具有等待功能的节点,用网络模型描述排队系统,并用仿真技术对系统进行仿真和分析。在此基础上,又研究开发了选择模型仿真语言(简称 SLAM)及循环作业网络模型(简称 CYCLONE)。

(4) 选择模型仿真语言(简称 SLAM)。这是一种具有多种建模功能和综合分析的软件。

(5) 循环作业网络模型(简称 CYCLONE)。这是具有描述循环运行系统的网络技术。它综合了循环作业中的排队功能与资源优化,并发展了相应的软件。

综合优化仿真随机网络模型(简称 GERTSⅢZ)。这是仿真随机网络模型(GERTS)的综合通用仿真软件。在此基础上,开发了具有更实用意义的综合随机系统的仿真技术(简称 SMOOTH)、多任务综合网络系统分析(简称 SAINT)以及图示可靠性分析仿真程序(简称 GRASP)等。

多任务综合网络的系统分析(SAINT)是一种以人机对话技术为基础的网络分析软件。它可用于人(系统的执行者)对系统的影响以及系统对人的影响。

图示可靠性分析仿真程序(GRASP)是可靠性理论与网络技术结合而产生的一种可靠性分析的仿真软件。它是应用网络模型仿真研究系统的可靠性、系统寿命和可维修性等。

在 GERT 基础上,又产生了新的网络技术——风险评审技术(简称 VERT)。这是在网络模型中引进了完成活动具有风险的概念,这样就把完成活动的时间、费用及效果联系起来。风险评审

技术可以建立网络模型中任一活动的时间、费用与完成效果之间的数学关系,以及任一活动与其它活动之间(费用、时间及运行效果)的数学关系,同时开发相应的计算机软件,从而大大增强网络技术描述与分析现实系统和客观世界的能力。

进入 80 年代以来,网络技术的应用领域更加宽广,各种方法与软件都各有千秋。网络技术的发展和应用主要是两个方面。一个是“大”,即网络技术适用的项目或系统越来越大,且描述及分析的功能也更加完善和综合。另一方向是“小”,即应用于计算和分析各种网络模型的计算机软件向着小型机和微机方向发展。以前,网络技术仿真软件往往需要在容量较大的计算机上运行,近年来,国内外研究和开发了多种可在微机上进行分析和优化的网络模型仿真软件,这就大大增加了实际应用的可能性。由于网络技术适用范围更大,功能更齐,应用更方便,这就促进和保证了网络技术的应用前景。

综上所述,几乎所有的网络技术都是产生于实际,从实践中总结出来,因此,网络技术是一门实用技术。如前所述,计划评审技术是按照美国海军在研制北极星导弹系统的需要而产生和得到应用,而随机网络技术中的图示评审技术(GERT)是在“阿波罗”载人登月计划中产生和得到应用。由于网络技术在实际应用中都取得显著成果,因而很快得到许多国家的重视。

美国是研究和应用网络技术最早的国家。早在 1962 年,美国政府就规定,今后一切大中型新建工程必须采用网络技术,对网络技术的推广应用起到一定的促进作用。根据美国对 400 家最大建筑企业的调查表明,在 1965 年,应用网络技术的企业约占 45%,到 1970 年,使用者达 80%。又根据美国管理科学研究所和运筹学协会(TIMES/ORSA)在 1978 年的一项全国调查的结果是关键线路方法和计划评审技术(CPM/PERT)应用范围在各种科学管理方法中占第六位,列在数学规划和排队论等之前。但包括仿真技术的网络技术的应用地位,仅次于经济分析和统计分析,占第三位。