



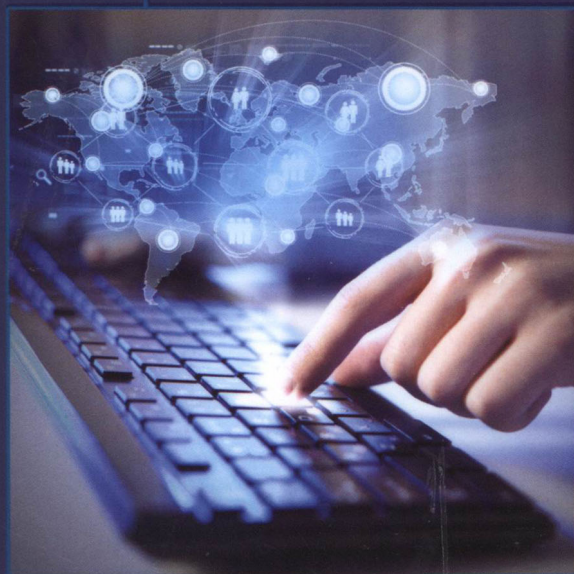
国际信息工程先进技术译丛


WILEY

网络性能分析 原理与应用

Network Performance Analysis

(法) Thomas Bonald 著
Mathieu Feuillet
王玲芳 冯玉芬 译



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



本书特色

本书描述了通信网络和计算机系统性能分析的一些主要数学工具。

通信网络和计算机系统已经变得极端复杂。用户的随机行为以及底层协议和算法等所导致的统计资源共享，会影响服务质量。

本书介绍排队论的主要成果，这对上述这些系统的性能分析是有用的。对于可靠的定量分析 (dimensioning) 规则和工程方法的开发，这些数学工具起到关键性作用。许多范例形象地展示了这些工具的实际用途。



国际信息工程先进技术译丛

网络性能分析原理与应用

(法) Thomas Bonald 著
Mathieu Feuillet 著
王玲芳 冯玉芬 译



机械工业出版社

本书分为两大部分：马尔科夫理论及其在业务量和通信网络中的应用。本书的前四章，仅使用概率论的基本表示法，给出马尔科夫理论的主要结果。后面各章专门论述业务量和通信网络，体现了在网络工程设计、规划、架构、测量、控制等领域中业务量建模和性能评估的重要性。

本书可作为计算机系统和网络通信相关领域高年级学生、研究生的参考书，同时可作为这些领域的工程技术人员的案头用书。

Copy right © ISTE Ltd 2011.

All Rights Reserved. This translation published under license.

Authorized translation from the English language edition, Network Performance Analysis, ISBN 978-1-84821-312-8, Thomas Bonald, Mathieu Feuillet, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书原版由 Wiley 公司出版，并经授权翻译出版，版权所有，侵权必究。

本书中文简体翻译出版授权机械工业出版社独家出版，并限定在中国大陆地区销售，未经出版者书面许可，不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

本书封面贴有 Wiley 公司的防伪标签，无标签者不得销售。

本书版权登记号：图字 01-2012-3764。

图书在版编目 (CIP) 数据

网络性能分析原理与应用/(法)伯纳德(Bonald, T.), (法)费耶(Feuillet, M.)著;王玲芳,冯玉芬译.—北京:机械工业出版社,2013.6

国际信息工程先进技术译丛

书名原文:Network Performance Analysis

ISBN 978-7-111-42051-4

I. ①网… II. ①伯… ②费… ③王… ④冯…
III. ①计算机网络—网络分析 IV. ①TP393.02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 068806 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:张俊红 责任编辑:赵任

版式设计:霍永明 责任校对:闫玥红

封面设计:马精明 责任印制:张楠

北京京丰印刷厂印刷

2013 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·10.5 印张·208 千字

0001—3000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-42051-4

定价:49.80 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

译者序

因特网渗透到了我们生活的方方面面：衣食住行，我们都需要她的帮忙。当我们在春运时节网上订火车票、飞机票时，在票务系统中来自全国各地的订票请求就纷至沓来，可能达到每秒数万次，该票务系统能否服务这么多的请求、是否会出现订票错误等，就是分布式系统性能分析的首要任务。当我们的请求报文在传输到票务系统的过程中，会经过接入网内的交换机、骨干网中的路由器等路由交换设备，在这些设备中，报文要经历排队等待，我们所体验到的就是请求的响应时间，响应时间的长短是网络传输、订票系统处理的综合衡量指标。当有人利用浏览器抢票插件时，就又出现了请求报文的所谓插队现象（高优先级请求），我们会对此不平。但是，这些现象背后蕴涵着哪些实质性的原理，如何利用科学技术手段，避免网络世界的不公平，加快处理速度，提高业务体验，正是网络性能分析的目的所在。

本书分为两部分：马尔科夫理论及其在业务量和通信网络中的应用。本书第1章到第4章使用概率论的基本表示法，给出马尔科夫理论的主要结果。第5~11章专门论述业务量和通信网络，体现了在网络工程设计、规划、架构、测量、控制等领域中业务量建模和性能评估的重要性。

本书由王玲芳负责1~5章翻译、全书统稿和校对工作，冯玉芬负责6~11章的翻译工作。本书在翻译过程中，王弟英、李虹、游庆珍、李传经、吴昊、李睿、吴秋义、李冬梅、潘东升、吴璟等同志参加了部分的翻译工作，在此表示感谢。同时感谢机械工业出版社，感谢出版社的编辑和相关同志。

不过，需要指出的是，本书的内容仅代表作者个人的观点和见解，并不代表译者及其所在单位的观点。另外，由于翻译时间比较仓促，疏漏错误之处在所难免，敬请读者原谅和指正。

译者

2013年夏北京

原 书 序

当提到排队时，进入人们脑海的第一个想法是日常生活中的排队：在超市、机场、银行等处的排队。要想象用于计算机系统和通信网络中的排队，是比较困难的。但是，这些排队对于平稳的系统运行和良好的性能，是至关重要的。相比于日常生活中的那些排队情形，在计算机系统和通信网络中的那些排队是更加多样化的和精巧的，这就像比特和数据报要比人类更灵活是一样的道理。

因为业务量是随机的，所以排队分析依赖于概率论，更具体而言，依赖于马尔科夫理论。这个理论具有一条非常简单的原理，但却具有广泛的应用，因此在近一个世纪以来，成为计算机科学和联网的一个基础工具，而且也是其他科学领域（例如统计学、物理学、生物学和经济学）的基础工具。在本书的前四章，我们仅使用概率论的基本表示法，给出马尔科夫理论的主要结果。

专门讨论业务量和通信网络的章节源于我们在法国电信实验室的工作经验，在这里我们体验到网络工程所有领域中业务量建模和性能评估的重要性，这些领域包括设计、规划、架构、测量控制等。对于作为通信网络的那些巨型系统的每部分分析，使我们可更好地理解它们的全局行为，并最后来改进这些系统的性能。

Thomas Bonald
Mathieu Feuillet
于巴黎罗康库

目 录

译者序

原书序

第1章 引言	1
1.1 动机	1
1.2 网络	1
1.3 业务量	2
1.4 队列	3
1.5 本书的结构	3
1.6 参考文献	4
第2章 指数分布	6
2.1 定义	6
2.2 离散类比	7
2.3 一个无记忆分布	7
2.4 指数变量的最小值	8
2.5 指数变量之和	9
2.6 指数变量的随机和	10
2.7 一个有限的分布	11
2.8 一个“恰好的”(very)随机变量	11
2.9 本章习题	12
2.10 习题解答	13
第3章 泊松过程	15
3.1 定义	15
3.2 离散泊松过程	16
3.3 一个无记忆过程	17
3.4 一个泊松过程的点分布	17
3.5 泊松过程的叠加	18
3.6 泊松过程的细分(subdivision)	19
3.7 一个极限过程	19
3.8 一个“恰好的”(very)随机过程	20
3.9 本章习题	20

3.10	习题解答	21
第4章	马尔科夫链	23
4.1	定义	23
4.2	转移概率	23
4.3	周期性	24
4.4	平衡方程	24
4.5	静态度量	25
4.6	稳定性和遍历性	25
4.7	有限状态空间	26
4.8	常返性和瞬时性	26
4.9	转移频率	27
4.10	条件转移公式	28
4.11	反向时间 (reverse time) 中的链	28
4.12	可逆性 (reversibility)	29
4.13	Kolmogorov 准则	29
4.14	一个马尔科夫链的截断	31
4.15	随机遍历 (walk)	32
4.16	本章习题	33
4.17	习题解答	33
第5章	马尔科夫过程	37
5.1	定义	37
5.2	转移率	37
5.3	离散情形	38
5.4	平衡方程	39
5.5	静态度量	39
5.6	静态性和遍历性	39
5.7	常返性 (recurrence) 和瞬时性	40
5.8	转移频率	41
5.9	虚拟 (virtual) 转移	41
5.10	内嵌链	43
5.11	条件转移公式	43
5.12	反向时间中的过程	44
5.13	可逆性	45
5.14	Kolmogorov 准则	45
5.15	一个可逆过程的截断	46

5.16	独立马尔科夫过程的乘积	47
5.17	生灭过程	47
5.18	本章习题	48
5.19	习题解答	50
第6章	队列	55
6.1	肯达尔表示法	55
6.2	业务量和负载	55
6.3	服务规律	56
6.4	基本队列	57
6.5	一般性队列	60
6.6	利陶公式	62
6.7	PASTA 性质	63
6.8	不敏感性 (insensitivity)	63
6.9	Pollaczek-Khinchin 公式	64
6.10	观察者悖论	65
6.11	本章习题	67
6.12	习题解答	69
第7章	排队网络	74
7.1	Jackson 网络	74
7.2	业务量方程	75
7.3	静态分布	76
7.4	MUSTA 性质	77
7.5	封闭的网络	77
7.6	Whittle 网络	78
7.7	Kelly 网络	80
7.8	本章习题	81
7.9	习题解答	82
第8章	电路业务量	86
8.1	爱尔兰模型	86
8.2	爱尔兰公式	87
8.3	恩格塞特 (Engset) 公式	88
8.3.1	没有阻塞情况下的模型	89
8.3.2	有阻塞情况下的模型	90
8.4	爱尔兰等待公式	91
8.4.1	等待概率	91

8.4.2 均值等待时间	92
8.5 多类爱尔兰模型	93
8.6 Kaufman-Roberts 公式	94
8.7 网络模型	95
8.8 解耦逼近 (decoupling approximation)	96
8.9 本章习题	97
8.10 习题解答	99
第9章 实时业务量	103
9.1 流 (flow) 和报文	103
9.2 报文级别的模型	104
9.3 流级别的模型	105
9.4 拥塞率	106
9.5 均值吞吐量	107
9.6 丢失率	108
9.7 多速率模型	109
9.8 递归公式	110
9.9 网络模型	111
9.10 高斯逼近	112
9.11 本章习题	113
9.12 习题解答	114
第10章 弹性 (elastic) 业务量	119
10.1 带宽共享	119
10.2 拥塞率	121
10.3 均值吞吐量	121
10.4 丢失率	123
10.5 多速率模型	124
10.6 递归公式	126
10.7 网络模型	127
10.8 本章习题	128
10.9 习题解答	129
第11章 网络性能	134
11.1 IP 接入网络	134
11.1.1 泊松到达	134
11.1.2 有限总体	135
11.1.3 近似	136

11.2	2G 移动网络	136
11.2.1	语音业务量	137
11.2.2	数据业务量	138
11.3	3G 移动网络	139
11.3.1	上行链路	139
11.3.2	下行链路	140
11.4	3G + 移动网络	141
11.4.1	同态情形	142
11.4.2	异态情形	142
11.5	WiFi 接入网	144
11.5.1	UDP 业务量	145
11.5.2	TCP 业务量	147
11.5.3	随机业务量	148
11.6	数据中心	148
11.6.1	静态选路	148
11.6.2	贪婪选路	149
11.6.3	自适应选路	149
11.7	云计算	150
11.8	本章习题	151
11.9	习题解答	152

第 1 章 引 言

1.1 动机

网络性能分析和基础的排队理论，是在 20 世纪初诞生的，当时两名斯堪的纳维亚工程师爱尔兰 (Erlang)[⊖]和恩格塞特 (Engset)[⊖]独立地发现了计算电话呼叫拒绝率的非常近似的公式。自此以后，他们的结果在分析 (dimensioning) 电话网络中给定某种期望的需求和目标呼叫拒绝率条件下，找出最优容量方面是有指导意义的。

如今，通信网络和计算机系统的工程 (由资源共享算法和流量控制方案的分析 and 设计两方面组成) 方面，依赖于由排队论派生的数学工具。本书的目标是描述这些工具中的一些工具，并表明在求解实际的工程和性能问题中如何使用这些工具。

1.2 网络

粗略来说，共享通信网络的资源有两种技术：

——“电路”技术，是这样组成的：在任何通信之前，预留资源，一旦预留完成，就沿建立的电路传递信息；

——“报文”技术，在没有任何提前预留的条件下，发生通信，以独立报文的形式传递信息，受到报文到目的地路径上拥塞 (延迟、丢失) 的约束。

简而言之，这是 (公共交换) 电话网络和 IP 网络之间的主要差异：带宽预留原则与带宽共享原则，可访问能力 (accessibility) (呼叫拒绝率) 问题与速度 (比特率) 和完整性 (报文延迟、报文丢失率) 等问题。

在实际中，电路模式和报文模式之间的边界并不是如此巨大 (distinct)。例如，多协议标签交换 (MPLS) 技术使用 IP 中的虚电路；3G 无线接入网络同时使用电路模式和报文模式；在出现拥塞时，一个因特网服务提供商可阻塞一些视频连续流，而每个连续流构成 IP 网络中的一个虚电路。存在许多这种范例。但是，电路模式和报文模式之间的这种宽泛分类是非常有用的。它对应于我们将研究的两种

⊖ Agner Krarup Erlang, 丹麦工程师和数学家 (1878-1929)。

⊖ Tore Olaus Engset, 挪威工程师和数学家 (1865-1943)。

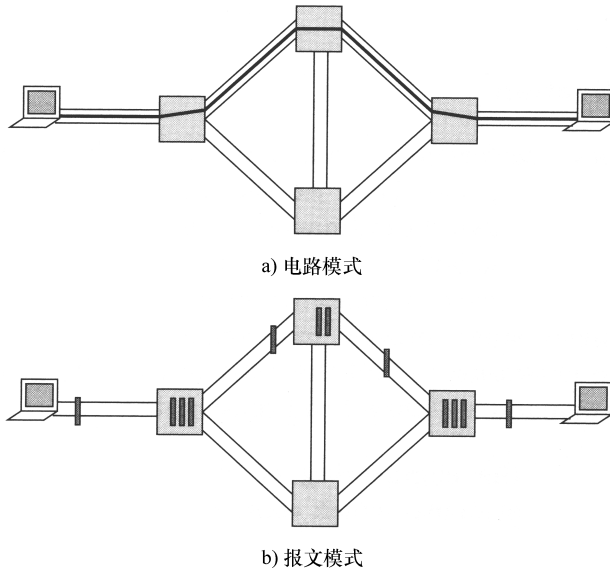


图 1-1 通信技术

流量模型:

——在电路模式中, 第 8 章描述的爱尔兰模型及其扩展;

——在报文模式中, 第 9 章针对实时业务量 (语音、视频) 和第 10 章针对弹性 (elastic, 即变化较大) 业务量 (文件传输) 的 IP 业务量模型。

1.3 业务量

网络性能主要是由用户行为导致的随机业务量波动所驱使的。例如在 1917 年, 爱尔兰为了找到他的公式, 假定呼叫到达遵循一个泊松过程[⊖], 并具有指数时长[⊖]。图 1-2a 给出这样的—个呼叫序列, 呼叫的时长由水平条的长度表示。这些假定使爱尔兰可应用崭新的马尔科夫理论[⊖], 并就可用电路数和业务量强度 (traffic intensity) 方面推导呼叫拒绝率。

另外, 爱尔兰注意到, 除了均值外, 他的公式对呼叫时长的分布是“不敏感的”。在 40 年后被形式化证明的这个性质[⊖], 表明了爱尔兰公式的简单性和可靠性 (robustness), 该公式仅依赖于业务量强度, 而不像呼叫时长那样依赖于精细的业

⊖ 在第 2 章~第 5 章, 我们将讨论这些概念。

⊖ B. A. Sevastyanov, An Ergodic Theorem for Markov Processes and its Application to Telephone Systems with Referrals (马尔科夫过程的遍历定理及其带有拒绝的电话系统应用), 1957。

务量统计特征。这也解释了为什么这个公式如今仍然还在使用，虽然如今的电话流量与爱尔兰时期的电话业务量没有什么关系。

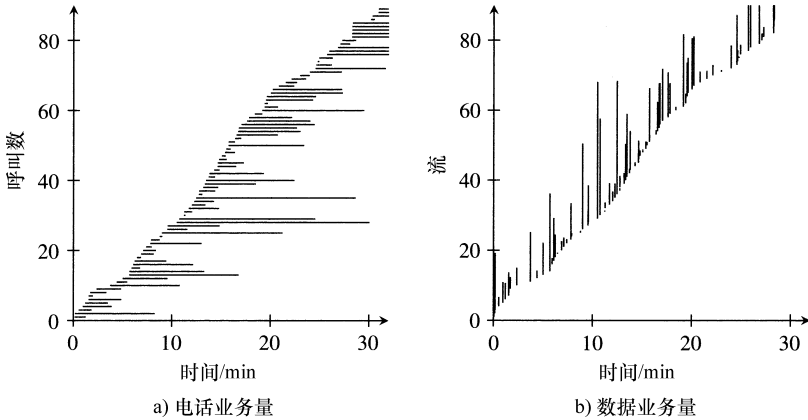


图 1-2 业务量的随机本质

类似地，IP 网络的性能取决于业务量的随机本质。例如，图 1-2b 给出依据泊松过程到达的数据流，它具有指数尺寸（以字节表示的大小体积），在图中以垂直线的长度表示。我们将看到，在数据流共享带宽方式的一些假定之下，除了均值外，多数性能指标对于流尺寸的分布也是不敏感的，它们仅通过业务量强度而取决于业务量统计特征。这些结果可被看作爱尔兰公式对 IP 网络的自然扩展，具有同样令人期望的简单性和可靠性特征。

1.4 队列

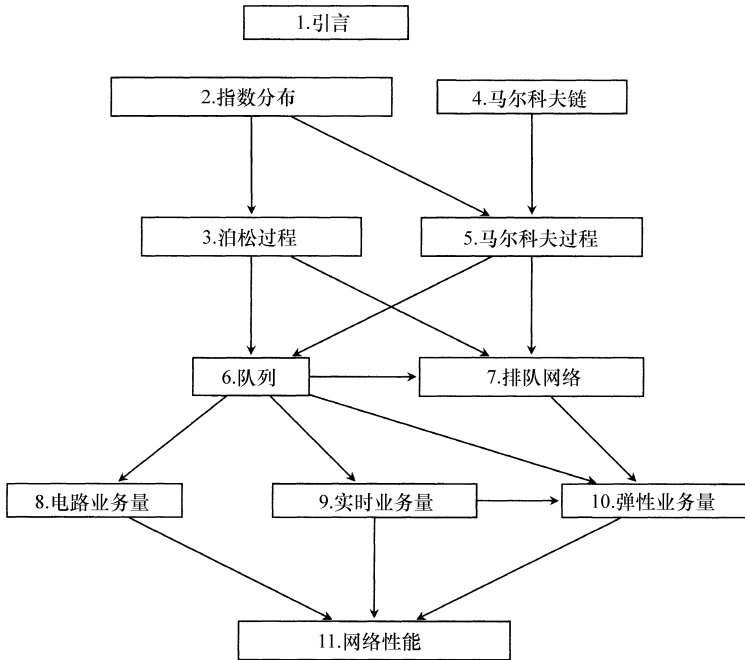
在报文交换网络中，队列无处不在。它们处于任何计算机、交换机、路由器和接入点的核心部分。这是共享策略通过报文调度和主动的（active）队列管理而实施的位置。更一般而言，共享相同链路的一个数据流集合，由于链路容量约束，可被看做是一个虚拟队列，每条流所需的服务对应于一定数据量的传递。

通过扩展，电路交换网络的模型（其中接纳呼叫或拒绝呼叫）可被看做是特定的队列，其中顾客不会等待，但可能丢失。正式地说，我们应该称之为“丢失的”或“等待的”队列；普遍使用的是比较简单的术语“队列”。

1.5 本书的结构

本书结构如下：

第1章：引言；
 第2章～第5章：泊松过程和马尔科夫理论；
 第6章和第7章：排队理论的组成；
 第8章～第10章：业务量模型；
 第11章：将理论应用到网络的情形。
 各章之间的关系如下所示：



每章（本章除外）都包含带有练习的解的一系列练习。在整部书中，我们使用缩略语 a. s 表示“几乎确定的”（almost surely）和 i. i. d 表示“独立同分布的”（independent and identically distributed）。我们以 $I(\cdot)$ 表示指标函数，以 $P(\cdot)$ 表示概率，以 $E(\cdot)$ 表示期望。

1.6 参考文献

欲了解更多信息，感兴趣的读者可参考如下书籍：

BRÉMAUD P., *Markov Chains, Gibbs Fields, Monte Carlo Simulation, and Queues*, Springer-Verlag, 1999.

KELLY F., *Reversibility and Stochastic Networks*, Wiley, 1979.

-
- KLEINROCK L., *Queueing Systems: Volume I – Theory*, Wiley Interscience, 1975.
- ROSS K.W., *Multiservice Loss Networks for Broadband Telecommunications Networks*, Springer-Verlag, 1995.
- SERFOZO R., *Introduction to Stochastic Networks*, Springer-Verlag, 1999.