



信息科学与工程系列专著

电信业务量理论与应用

Tele-traffic Theory and Applications

(上册)

逯昭义 著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

电子信息科技专著出版专项资金资助出版
信息科学与工程系列专著

通信业务量理论与应用

Tele-traffic Theory and Applications

(上册)

逯昭义 著

電子工業出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京 • BEIJING

内 容 简 介

通信业务量理论是以发展的通信技术为物理背景,利用并扩展运筹学、排队论及矩阵理论、概率论等各种数学手段,通过建立数学模型和仿真模型,以发展通信理论的一门应用基础学科。本书系统讲述了通信业务量(Tele-traffic)理论与应用,分为上、下册,共4篇:Ⅰ 基础理论篇;Ⅱ 扩展理论篇;Ⅲ 应用篇;Ⅳ 前沿研究篇。其中上册包括前两篇,主要介绍通信业务量的基础知识,以及各种典型和非典型肯达尔模型的分析、求解方法。

本书取材新颖,具有一定的理论高度,可供高等院校电子、计算机、通信、信息科学、应用数学、管理科学、数量经济与技术经济学、计量生命科学等专业的博士生、教师及有关研究单位科研人员研读,亦可作为研究生、高年级本科生的专业课或选修课的教材或参考书。本书还可作为电子通信信息类科技人员的案头文献。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

通信业务量理论与应用.上册/逯昭义著. —北京:电子工业出版社,2011.7

(信息科学与工程系列专著)

ISBN 978-7-121-13058-8

I. ①通… II. ①逯… III. ①通信技术—业务管理 IV. ①TN

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第038794号

责任编辑: 窦 昊

印 刷:

装 订: 北京中新伟业印刷有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 13 字数: 330千字

印 次: 2011年7月第1次印刷

印 数: 2000册 定价: 49.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

前 言

应用数学的一个重要分支——排队论，早就在各行各业，包括交通、运输、民航、建筑、医疗、信息、通信等各种服务部门被广泛应用，然而在目前的诸多应用中，促进排队论得到重要发展的目前只有通信领域。排队论与通信已经紧密结合，形成了一门重要的学科发展方向——通信业务量理论（Tele-traffic Theory，也称为通信信息量理论）。出现这种情况的原因有二：① 排队论的第一篇论著，即 A. K. Erlang（爱尔兰）的著作“Solution of some problems in the theory of probability of significance in automatic telephone exchanges”，是通过分析电话交换机的运行情况而得到的。电话交换是一种技术实践，在实践的基础上产生理论是符合科学规律的。因此，可以说排队论起源于通信。② 排队论创立后，它在通信领域的应用，有力地促进了通信技术，包括电话交换、计算机网络通信等的发展。这种在理论指导下的再实践也是符合科学发展规律的。总之，实践—理论—再实践—再理论是科学技术发展的必然规律，电信科学也不例外，因此在电信科学中产生业务量理论就不难理解了。

从目前看，通信业务量理论的发展经历了这样几个发展时期：① 通信业务量理论的出现。在 20 世纪初人们把概率论引入电话网而创立早期的通信业务量理论以后，伴随着通信技术的进步，该理论得到了一定发展。然而只是自 20 世纪 50 年代以来，当运筹学（OR）和排队论得到发展后，通信业务量理论才形成一门较完整的理论而登上电信科学的学术舞台。② 通信业务量理论的发展及计算机通信网信息量理论的形成。自 20 世纪 70 年代以来，计算机通信网络得到了很大发展，与此同时，人们把通信业务量理论扩展到计算机通信网络，用它评价网络性能，设计建造性能价格比更优异的计算机网络。经过 20 多年的研究进展，人们发展了通信业务量理论。20 世纪末，当典型排队论（以肯达尔模型为代表）发展到非典型排队论（以扩展肯达尔模型为代表）时，出现了计算机通信网信息量理论，与早期的通信业务量理论相比，它已成为电信科学发展的新起点。由于复杂的网络分层协议代替了简单的电话通信规程，也由于复杂的计算机网络代替了比较简单的电话网系统，所以在计算机通信网信息量理论中，数据单元替代了呼叫，非即时通信或准即时通信代替了即时通信，各种非典型排队模型代替了典型排队模型，数学模型及解析方法也发生了很大改变，等等。③ 后现代通信业务量理论正在建立。自 1995 年以来，正当计算机通信网信息量理论飞快发展之际，研究人员在 ATM（异步交换方式）交换网上发现了信息的猝发现象。这一重要现象表明，对高速综合业务网，采用自相似模型远比马尔可夫模型更符合实际，因此进一步研究自相似业务量问题对宽带综合业务网络更具有重要意义。在通信技术飞速发展，将要在全球实现后现代通信的 21 世纪前叶，通信理论中的通信业务量理论进入第三个发展阶段。显然将自相似理论及近似自相似理论引入后现代通信而使后现代通信得以发展的业务量理论，是当前及今后一个时期的重要研究任务。

发展通信业务量理论的研究，是当前国内外同行学者的研究热点。其中为数有限的中国学者也处于这一研究的前沿领域。但从研究进展看，关键难点是长相关理论。在这方面，目前并未取得突破性进展，要取得突破恐怕还有一个过程。目前很多国外学者进行了诸多近似研究，而国内学者的研究大多处于“开场白”状态，即小综述状态。然而

这一点并不妨碍那些为数有限的中国学者紧跟国际前沿而不舍弃的奋斗精神。反过来，如果我们不跟随该方向的前沿发展水平，多年后，当国外研究已取得重大进展时，将会后悔和遗憾，因为那时我们将很难占一席之地。出于这样的考虑，也为了吸引诸多青年学者投入这一研究洪流中，本书作者竭尽全力完成了《通信业务量理论与应用》这部专著，以敬献读者。特别要献给为发展通信业务量理论而不辞辛劳的同行学者，希望能起到抛砖引玉的作用。

本书内容较多，分上、下册出版。上册的主要内容：I 基础理论篇——典型肯达尔模型；II 扩展理论篇——非典型（扩展型）肯达尔模型；下册的主要内容：III 应用篇——计算机网络数学建模；IV 前沿研究篇——现代、后现代通信中的部分业务量问题。本书的优势在于其手稿曾作为最近十届研究生“计算机通信网信息量理论”课的讲稿，边讲授边锤炼，先后五次易稿，不断增加新鲜内容；本书作者在最近 25 年间，坚持计算机通信网络理论的研究方向，在国内外一流学术刊物上发表过上百篇学术论文，其中数十篇被 SCI、EI 收录，应该说对通信业务量的发展前沿跟随较紧。为了使内容新颖，这些研究成果与其他重要参考文献一起都反映到了本书中。本书（上册）各章节脱稿后，冯慧芳（博士）、逯迈（博士）、孙丽珺（博士）与作者一起完成了统稿和甄别任务。

在写作手法上，本书与纯数学著作略有不同，许多章节通过“深入浅出”的阐述，强化了物理概念和物理意义的讨论，从而使读者既能把握应用数学的严密性，又能把握明确的物理概念。

在本书的写作过程中，作者曾访问过诸多同行学者。其中，有北京邮电大学通信研究所国家重点实验室陈俊亮教授（中国科学院院士），电子科技大学电子通信研究所光纤国家重点实验室李乐民教授（中国工程院院士），青岛大学复杂性科学研究所张嗣瀛教授（中国科学院院士），天津大学计算机科学与技术系舒炎泰教授（博导），北京航空航天大学理学院王天民教授（博导），云南大学信息学院赵东风教授（博导），暨南大学电子信息学院王思明教授，以及陈永义教授、杨庆德教授、樊建席教授、王立宏教授等，或征询他们的意见，或请求佐证问题。研究生罗秀秀、宁玉新、吕磊（博士）、崔杰、杨兴梅、姜辉、刘海光、刘晓明、高万萍、慕庆阳、于萌、王超、刘飞等参与了本书书稿大量烦琐的计算机文字处理。在统稿过程中，逯进（博士）协助作者完成了书稿电子版的修改工作，郭菊英协助作者参与了校对、清样等辅助工作。在本书出版之际，谨向他们致谢。

本专著是国家自然科学基金项目（No.60902634）的重要研究内容。在国家自然科学基金的支持下，作者加大了写作力度，现在终于能够与广大读者见面了。在此，谨向国家自然科学基金委员会致敬。

个人的水平毕竟有限，书中难免还存在错误和不足之处，敬请广大读者批评指正。

作 者

2011 年 3 月于青岛

全书通用符号

本书出现的参数符号很多,大致分为全书通用符号和各章节专用符号。对通用符号除在此处集中解释外,在书中第一次出现的地方再给予解释,后续出现则不再解释。对专用符号分别在各章节予以集中解释,以加深读者印象。

$F(x)$: 概率变量 X 不超过 x 值的概率,即 $F(x) = P(X \leq x)$, $F(x)$ 称为分布函数,其中 P 表示概率。

$f(x)$: 概率变量 X 为连续型变量,则 $f(x) = dF(x)/dx$ 为概率密度函数。

$f(x_j)$: X 为离散型概率变量, X 取值为 x_j , $j = 0, 1, 2, \dots$, 则 $f(x_j) = P(X = x_j)$ 为概率质量函数。

$E[X]$: 概率变量 X 的平均值。

$V[X]$: 概率变量 X 的方差。

M_k : k 阶阶乘矩符号。

B_k : k 阶二项矩符号。

$C[X, Y]$: X, Y 的协方差。

$R[X, Y]$: X, Y 的相关系数。

LS: 拉普拉斯-斯蒂吉尔斯变换。

$G(Z)$: 概率母函数,与 Z 变换相同。

λ : 顾客到达率, $1/\lambda$ 为到达间隔。

μc : 顾客服务率。设数据单元长度为 $1/\mu$, 数据速率为 c , 则 $1/(\mu c)$ 为数据单元所占时宽,自然, μc 为单位时间传输的数据单元数。在计算机通信信息量理论中,通常把数据单元当做顾客,因此 μc 为服务率。将服务率设为 μc 而不是像通常排队论中设为 μ , 其原因正在于此。

u : 服务员服务强度,也称忙闲度, $u = \lambda/(n\mu c)$ 。当服务员数 $n=1$ 时, $u = \lambda/(\mu c)$ 称为业务量,这时通常以 ρ 代替 u , 即 $\rho = \lambda/\mu c$, 是单服务员的服务强度。

P_{ij} : 系统状态由 i 转移为 j 的转移概率, $P_{ij} = P(X_{r+1} = j | X_r = i)$, $r = 0, 1, 2, \dots$, r 表示时点,当然 r 也可用字母 n 等取代。

P_i : 系统处于 i 状态的状态概率。 P_i 是绝对概率,不是转移概率, $P_i = \lim_{n \rightarrow \infty} P_i(n)$ 。

P : 系统状态由 i 转移为 j 的转移概率矩阵, $P = [P_{ij}]$ 。

$P_{ij}^{[m]}$: 系统状态由 i 经 m 步转移为 j 的转移概率。

P^m : 系统状态由 i 经 m 步转移为 j 的转移概率矩阵, $P^m = [P_{ij}^{[m]}]$ 。

$P_i(n)$: 第 n 时刻系统处于 i 状态的绝对概率, $P_i(n) = P(X_n = i)$ 。如果以转移步为计时单位,则 $P_i(n)$ 也是系统在第 n 步处于状态 i 的概率。

$\{P_i(n), \forall i, \forall n\}$: 系统在第 n 时刻处于各种状态的概率分布列,用列矩阵表示为

$$[P_0(n) \ P_1(n) \ P_2(n) \ \cdots \ P_j(n) \ \cdots] \stackrel{\text{令}}{=} [P_i(n)] \stackrel{\text{平稳}}{=} [P_i]$$

$P_i(0)$: 初始时刻 0 系统处于 i 状态的绝对概率, 即初始概率。 $P_i(0) = P(X_0 = i)$ 。

$\{P_i(0), \forall i\}$: 系统在初始时刻处于各种状态的概率分布列, 用列矩阵表示为

$$[P_0(0) \ P_1(0) \ P_2(0) \cdots P_j(0) \cdots] \triangleq [P_i(0)]$$

π : 所有服务员都处于忙碌状态, 顾客需要等待的概率。

L : 系统长度, 即系统中有顾客的平均数。

L_q : 排队长度, 队列中有排队顾客的平均数。

W : 顾客滞留时间, 即平均等待时间和平均服务时间之和。

W_q : 平均等待时间。 $L_q = \lambda W_q$, $L = \lambda W$ 。

M: 泊松流或负指数服务。

D: 定常分布。

G: 一般分布。

E_k : k 阶爱尔兰分布。

H: 超几何分布。

L: 二项式分布, 准随机分布。

FCFS: 先来先服务。

LCFS: 后来先服务。

RSS: 随机选择服务。

L-RSS: 局部随机选择服务。

PR: 优先权服务。

Ba: 集体 (批量) 服务或到达。

Sc: 离散型到达。

Fe: 有反馈到达。

Mu: 多路到达。

Pa: 并联排队系统。

In: 间歇服务。

Sh: 移动服务。

Di: 杂乱排队系统。

HD: 中途有脱离的排队系统。

CL: 改换队列的排队系统。

AL: 服务员轮换服务系统。

MC: 多级循环排队系统。

MN: 多级网络排队系统。

MS: 多级串型排队系统。

TRT: 实测令牌循环时间。

TTRT: 目标令牌循环时间。

Δt : 时隙。

$H(t)$: 服务时间分布。

$Q(t)$: 循环时间分布。

$R(t)$: 回归时间分布, 也称间歇时间分布。

目 录

绪论 通信业务量 (Tele-traffic) 理论的发展	1
-------------------------------------	---

I 基础理论篇——典型肯达尔 (Kendall) 模型

第 1 章 基础知识	8
------------------	---

1.1 马尔可夫 (Markov) 过程和嵌入马尔可夫过程	8
1.1.1 马尔可夫过程和马尔可夫链	8
1.1.2 马尔可夫链的状态分类	9
1.1.3 嵌入马尔可夫链 (Imbedded Markov Chain)	13
1.2 生灭过程	13
1.2.1 生灭过程的定义	13
1.2.2 生灭过程的描述	14
1.2.3 生灭过程状态方程的求解	16
1.2.4 生灭过程统计平衡状态的解法	17
1.2.5 生灭过程平衡状态概率的讨论	18
1.3 更新过程	19
1.3.1 更新过程定义	19
1.3.2 重复时间 (Recurrence Time)	21
1.3.3 延迟更新过程	23
1.3.4 虚延迟	23
1.3.5 延迟更新过程的叠加	24
1.4 半马尔可夫过程	25
1.4.1 半马尔可夫过程的定义	25
1.4.2 马氏链的状态滞留时间分布	26

第 2 章 排队论基础——A. K. Erlang (爱尔兰) 时期的主要排队论	27
--	----

2.1 排队的基本形式	27
2.1.1 典型排队系统模型	27
2.1.2 典型排队系统模型的描述	33
2.1.3 典型排队模型	35
2.1.4 非典型排队模型	37
2.2 M/M/n 排队模型	38
2.2.1 M/M/n 的状态方程	38

2.2.2	$M/M/n$ 状态方程的非平衡状态的解	39
2.2.3	忙期(即持续服务时间)时间长度的分布	43
2.2.4	$M/M/n$ 状态方程平衡状态的解	45
2.2.5	$M/M/n$ 的顾客离开过程	49
2.2.6	排队室大小各异的 $M/M/n$ 排队模型	50
2.2.7	$M/M/1$ 排队模型的扩展	52
2.3	泊松到达、指数服务的其他单排队系统	54
2.3.1	$M[\text{集体到达}]/M/n/\infty/\text{FCFS}$	54
2.3.2	$M/M[\text{Ba}]/1/\infty/\text{FCFS}$	57
2.3.3	$M[\text{有限输入源 } m]/M/n/\infty/\text{FCFS}$	59
2.4	$M/M/n/\infty/\text{FCFS}$ 的简单排队网络	61
2.4.1	开放型杰克逊(Jackson)排队网络	61
2.4.2	封闭型杰克逊排队网络	65
2.4.3	有反馈的简单循环排队网络	67
第 3 章	重要排队模型之一——肯达尔(D. G. Kendall)发展的主要排队论	69
3.1	$M/G/1$	69
3.1.1	肯达尔的解析结果	69
3.1.2	平衡状态的分布	71
3.1.3	$M/G/1$ 非平衡状态的解析	74
3.2	$M/G/n$ 的近似求解	76
3.2.1	$M/G/n$ 的近似解法 1——利用剩余时间分布分析法的解法	76
3.2.2	$M/G/n$ 的近似解法 2——利用相位法的解法	78
3.2.3	$M/G/n$ 的近似解法 3——求得一般结论的解法	80
3.3	$M/G/\infty$	87
第 4 章	重要排队模型之二——肯达尔时期的主要排队论	90
4.1	$M/E_k/1/\infty$	90
4.1.1	k 阶爱尔兰分布与相位法	90
4.1.2	$M/E_k/1/\infty$	91
4.1.3	$M/E_k/1$ 与 $M[\text{Ba}, k]/M/1$ 的关系	95
4.2	$M/E_k/n$	96
4.2.1	$M/E_2/2$	96
4.2.2	$M/E_2/n/\infty$	97
4.2.3	$M/E_k/n/\infty$	99
4.3	$M/D/n$	100
4.3.1	$M/D/n$ 平衡状态的求解	100
4.3.2	$M/D/1$ 的系统平均值	103

4.4	$G/M/n/\infty$	103
4.4.1	嵌入时点的选择和状态转移概率	103
4.4.2	求平衡状态概率 P_j	104
4.4.3	$G/M/n$ 的平均等待时间	106
4.5	$E_t/M/n/\infty$ 与 $D/M/n/\infty$	107
4.5.1	$E_t/M/n$	107
4.5.2	$D/M/n$	110
4.6	$L/M/n/\infty/FCFS$	110
4.7	$L/M/n/0$, $L/M/n/S(S>N)$ 和 $L/M/n/S$ [中途有顾客脱离]	111
4.7.1	$L/M/n/0$	111
4.7.2	$L/M/n/S(S>N)$	112
4.7.3	$L/M/n/S$ [中途有顾客脱离]	113

II 扩展理论篇——非典型（扩展型）肯达尔模型

第5章	$M/G/1$ 的扩展模型	118
5.1	M/G [并列多重排队]/1 [移动服务]/ ∞	118
5.1.1	M/G [并列多重排队]/1 [移动服务] 模型的物理背景	118
5.1.2	对称限制式移动服务多重排队模型的数学解析	119
5.1.3	非对称式限制式排队模型的数学解析	122
5.2	M [反馈式到达]/ $G/1$ [间歇式服务]/ $S/FCFS$	127
5.2.1	解析参数的设定	127
5.2.2	数学解析	128
5.3	$M[Ba]/G/1/\infty/S/FCFS$	132
5.3.1	参数的补充设定	132
5.3.2	数学解析	132
第6章	随机选择服务的排队模型	135
6.1	$M/M/n/\infty/RSS$, $M/M/1/\infty/RSS$	135
6.1.1	解析参数设定	135
6.1.2	数学解析	136
6.2	$GI/M/n/\infty/RSS$, $GI/M/1/\infty/RSS$	137
6.2.1	$GI/M/n/\infty/RSS$	137
6.2.2	$GI/M/1/\infty/RSS$	139
6.3	$M/G/1/\infty/RSS$	140
6.4	$L/D/1/S/RSS$	143
6.4.1	假设和规定	143
6.4.2	数学模型的建立说明	144
6.4.3	局部随机选择服务 (L-RSS) 简介	145

第 7 章 优先级选择服务的排队模型.....146

7.1 概述146

7.1.1 时间优先级服务概述146

7.1.2 空间优先级控制概述148

7.1.3 综合优先级控制策略150

7.2 占先服务的 M/M/n/∞/PR、M/M/1/∞/PR151

7.2.1 占先服务的 M/M/1/∞/PR 的平均值解法151

7.2.2 占先服务的 M/M/1/∞/PR 的状态概率153

7.3 非占先服务的 M/M/1/∞/PR、M/M/n/∞/PR154

7.3.1 有两种优先级的求解154

7.3.2 有多种优先级的求解155

7.4 即时式服务的 M/M/n/0/PR157

7.4.1 有两种优先级的求解157

7.4.2 有多种优先级的求解158

7.5 M/G/1/∞/PR.....159

7.6 M[C₁, C₂]/G/1[间歇式服务]/∞/PR161

附录 A 有关概率论的基础知识165

A.1 随机事件和概率165

A.2 概率变量168

A.3 分布函数171

A.4 数学期望179

A.5 常见概率分布185

上册参考文献194

绪论 通信业务量（Tele-traffic）理论的发展

1. 近代、现代、后现代通信技术的发展

进入 21 世纪，回顾 20 世纪以前的历程，人类科技发展的最大进步之一是通信技术经历了近代文明发展阶段，也经历了现代通信的重要发展，即将进入后现代通信的大发展时期。与之相适应，通信业务量（Tele-traffic）理论也在向后现代通信业务量理论的建立而急速发展。

应该说，现代信息社会是由通信技术和电子计算机技术两大柱石所支撑的。然而它们的前期都经过了一个发展进程。

通信	1835 年	莫尔斯发明了电报机，是有线数字式通信。
	1876 年	贝尔发明了电话机，是有线模拟通信。
	1895 年	意大利人马可尼（或说俄国人波波夫）把电磁波用于通信，是无线数字式通信。
	1925 年	美国人首先实现了载波通信，使长距离通信变成了现实，是模拟通信。在此之前同时出现了无线电电报。
	1945 年	在此之前出现了雷达、电视、传真、广播、导航、自动电话交换、微波接力通信等。
	1950 年	出现了 PCM 通信（脉冲编码调制通信）。
	1970 年	出现了数据通信的计算机网络，实现了计算机通信，是数字方式或数 / 模转换方式。
	20 世纪末	迈向综合业务通信。
电子计算机	1946 年	计算机始于美国的弹道计算，主要用于数据计算。
	以后	计算机还用于信息处理，1970 年以来出现了计算机网络。
	现在	计算机得到了飞速发展，正向超高速、小型化、智能化不断前进。

由此可见，通信技术经过了一百多年的发展，目前正在迈向一个新的发展阶段，即综合化、宽带化。

就综合化而言，它的发展历程经历了数字化（如电报）→模拟化（如电话）→数据化（如数据通信网），也就是数字模拟交替发展的过程。之后才进入到目前发展的综合业务化，出现了传送数据、语音、图像等的综合业务数据网 ISDN。与此相关，就通信介质构成而言，经历了有线通信网与无线通信网交替发展的过程。其中有有线网为：电话网→同轴电缆网→光纤网等；无线网为：中、长、短波通信→微波中继通信→卫星通信等，目前已进入混合介质通信。

就宽带化而言，信息传输也经历了一个由低频（窄带）向高频（宽带）发展的过程。通信业务的大量增加，通信信道的不断扩充，通信速率向大容量、宽带化发展是无法阻挡的趋势。通信频率及频带扩充的过程如图 0-1 所示，图中粗线箭头显示出宽带化发展的过程。

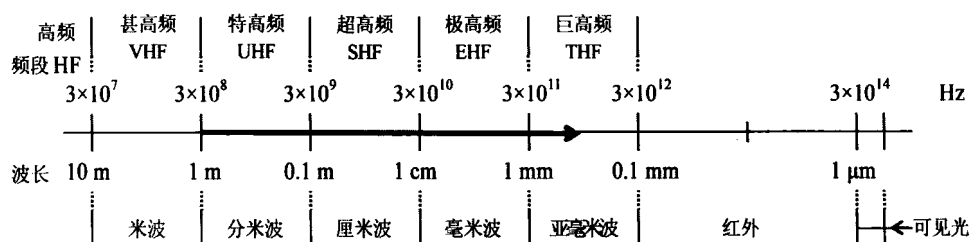


图 0-1 频段与波长的对应关系

虽然人类已经在极宽的频率范围内对通信技术的发展进行了探索和实践，但研究工作还远远没有终结。21 世纪人类进入所谓的“海量信息时代”，信息交换与传输中大幅度提高信息传输速率仍是最重要的前沿研究课题，这是一个近代、现代、后现代通信中经久不衰的课题。

一百多年的发展历程，在通信技术中出现的最具有代表性的东西是非常普及和实用的电话通信网。电话网采用电路交换方式，在 20 世纪 50 年代前已非常成熟，在 50~70 年代又得到了更完善的发展，时至今日仍在人类通信中占据重要地位。

1945 年之后，最引人入胜的电子计算机问世。计算机技术的飞速发展，造就了现代通信技术划时代变革的物理基础。20 世纪 70 年代初，计算机技术与通信技术相结合，产生了计算机通信网络（简称计算机网络），一场现代通信的变革就从这里开始了。计算机通信网络的出现预示着人类进入了现代通信的重要发展阶段。如果说人类在 20 世纪 70 年代以前的百年间经历了近代通信的大发展时期，那么 20 世纪 70 年代以来就是现代通信形成、发展、日趋成熟的时期。众所周知，现代通信即计算机网络通信经历了三个重要发展时期，即面向终端的计算机网络、分组交换网、互联网络。虽然经历三个时期的发展使计算机通信网络越来越成熟，但它采用的分组交换方式基本上变化不大。因此可以说：现代通信最具代表性的、已进入实用阶段的是分组交换方式的计算机网络。分组交换代替了电路交换，计算机通信代替了电话通信，这是现代通信的最突出特征。

不难看出，通信文明仅经历了短短 100 年的发展，就催生了两代通信方式，即以电路交换为代表的电话网络和以分组交换为代表的计算机通信网络。这一点足以说明信息交换对人类文明社会是何等重要，何等迫切。

然而，人类对通信的最高要求是“无论什么人，无论什么时候，无论在什么地方都能进行优质的综合业务（数据、语音、传真、电视图像等）通信”。显然这种通信所处的环境是所谓“海量信息”的环境。虽然现在与这一目标还有相当距离，但人类对科技的追求和创新是无止境的。本书重点阐述的后现代通信正是这种追求的延续和具体体现。

从目前来看，后现代通信起步于第四发展时期的计算机通信网络，即宽带综合业务数字网（B-ISDN）。这项研究工作实际上从 1985 年就开始起步，1989 年 CCITT 正式提出了一种适用于 B-ISDN 的新的交换方式——异步转移模式（ATM）。1993 年世界范围内信息高速公路的兴起，加快了 ATM 交换技术的不断成熟，然而目前 B-ISDN 的发展还不能取代电话网、电视网、分组交换网（数据传输网），也就是不能多网合一，实现后现代通信。目前已经比较成熟实用的 TCP/IP 协议支持的英特网（Internet）是 IPv4→IPv6 的互联网，它属于分组交换网。这种网络目前仍属窄带传输，自然还不能实现后现代通信。

在 B-ISDN 中综合业务替代了单一业务，ATM 替代了电路交换和分组交换，业务试

验表明,它对现代通信的发展呈现出令人信服的美好前景。网络与通信专家普遍认为,通过 21 世纪前半叶的不懈研制,B-ISDN、ATM 与宽带 IP 等相关技术,有可能会发展成熟到取代其他通信技术而成为后现代通信的实用技术。

2. 通信业务量理论的发展过程

伴随着通信技术的发展,有关通信业务量(Tele-traffic)理论问题,也经历了 20 世纪约 100 年的发展历程,跨越了两个重要发展阶段,即以电话网为核心的“通信业务量理论”和以计算机分组交换网为核心的“计算机通信网信息量理论”。那么什么是通信业务量理论?

通信业务量理论解决的是为了对用户维持必要的服务水平,通信设备应该具备多大规模的问题。然而服务水平是以用户满意的程度、经济水平、通信运营政策等因素为前提的。为此,首先要弄清楚通话要求、服务水平、设备规模的定量关系,然后根据已知的前提条件,计算出设备规模,完成系统设计。

在通信系统中,由于通话要求等具有统计性,故能应用概率论、排队论等对系统进行分析。但严格地讲,需要规定通话要求的产生方式,通话时间的分布,阻塞出现的处理(不再接续还是等待)等很多条件。考虑这些条件,定量解析研究通话要求、服务水平、设备规模等之间关系的理论就是通信业务量理论。简单地讲,通信业务量理论是在通信系统中定量研究通话要求、服务水平、设备规模诸量之间的关系,且为设计通信系统提供设计和提高性能评价依据的理论。它能解决高速化、高可靠性等通信的理论问题。当通信系统为计算机通信网络时,通信业务量理论就发展为计算机通信网信息量理论。

20 世纪 60 年代以前,在电话网等通信发展的过程中,人们将概率论、肯达尔排队模型(包括马尔可夫(简称马氏)过程和嵌入马尔可夫过程等)引入电话网而创立了“通信业务量理论”,目前它已很成熟^[1-3]。这就是近代通信的业务量理论。

20 世纪 70 年代以来,伴随着计算机网络技术的兴起与发展,人们把通信业务量理论扩展到计算机网络,使其评价网络性能、指导设计、建造性价比优异的计算机网络的创新工作取得了较大进展。然而评价过程和研究进展表明,原有的通信业务量理论已不能完全胜任或者完全不能胜任计算机网络日益发展的需要。在计算机通信网络的现实背景下,计算机网络理论和应用数学的研究人员对所涉及的排队模型进行了广泛研究和模拟实验,取得了丰硕成果,提出了很多扩展肯达尔排队模型。当排队论的肯达尔模型发展到扩展肯达尔模型时,计算机通信网信息量理论必然要取代通信业务量理论。计算机通信网信息量理论正是定量研究计算机分组交换网的理论。

由于复杂的网络分层协议代替了比较简单的电话通信规程,也由于复杂的计算机网络代替了比较简单的电话网络,更由于报文分组交换替代了电路交换,因此计算机通信网信息量理论要比通信业务量理论复杂,所涉及的排队模型也是各种各样。数学建模和解析方法也发生了很大变化,使排队论的研究工作上升到一个新的理论平台,除了嵌入马氏过程外,还引入了半马氏过程或嵌入半马氏过程。数学建模和解析方法由状态方程求解法、平均值分析法、动量守恒分析法、转移概率分析法等扩展到等效简化法、近似逼近法(系统逼近法、过程逼近法—流体流方法)、矩阵几何法等。目前计算机通信网信息量理论的研究工作仍处于极盛状态。顺便指出,由于业务量理论所涉及的数学面比较广,且有一定深度,所涉及的计算机网络体系结构正在迅猛发展,需要不断跟踪,因此

像其他基础研究一样要在这一领域造就浓厚的学术环境，让有志之士成长，并作出创新贡献。

正当计算机通信网信息量理论飞速发展之际，1995 年以来^[4]，研究人员在 ATM 交换网与 B-ISDN 上发现了信息量的猝发现象，也就是信息流严重存在自相似性。这一重要的实验发现表明，对于高速综合业务网，采用自相似模型远比马尔可夫模型更符合实际通信业务量问题，因此研究自相似业务量问题对 B-ISDN 更具有重要意义。在通信技术飞速发展，将要在全球实现后现代通信的 21 世纪前叶，通信业务量理论已开始进入第三发展阶段，也就是将自相似理论（即长相关理论）及其近似理论引入后现代通信（即计算机通信网络的 ATM 交换网、B-ISDN、宽带 IP 网等）而创建“后现代通信的业务量理论”。显然后现代通信的业务量理论是通信业务量理论发展的第三个里程碑，即通信业务量理论→计算机通信网信息量理论→后现代通信业务量理论。将这三个发展阶段的主要理论问题归纳起来，如图 0-2 所示。

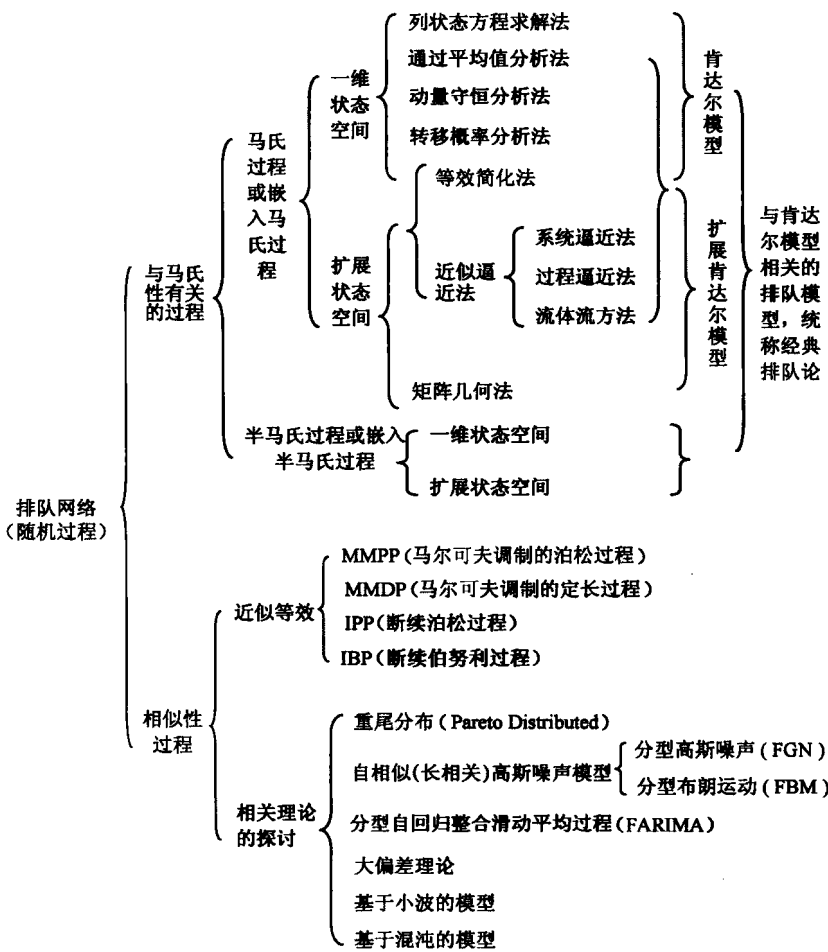


图 0-2 排队网络汇总

由此可见，通信业务量理论是以通信技术的发展为物理背景，利用并扩展运筹学、排队论及矩阵理论等各种数学手段，通过建立数学模型和仿真模型，以发展通信理论的

一门应用基础学科；同时由于它还能有力促进非经典排队论的发展，因此它又是一门交叉学科。

3. 后现代通信业务量理论的建立及前沿研究课题

目前后现代通信业务量理论的发展还处于初期阶段，主要原因是长相关理论（即自相似理论）方面，并未在数学问题上取得突破性进展。这一点很像早期通信业务量理论建立的过程。众所周知，人们把概率论引入电话网而试图创立通信业务量理论之时，虽然伴随着通信技术的进步而使业务量理论有了一定程度的发展，就 $M/M/n$ 的问题进行了数学解析，然而近半个世纪（20 世纪前半叶）并未在其他方面取得突破性进展。只是在 20 世纪 50 年代以来运筹学（OR）得到发展后，特别是 1953 年肯达尔提出嵌入马尔可夫链之后，通信业务量理论才形成一门完整的理论登上电信科学的学术舞台。

一部分应用数学工作者，特别是从事运筹学和排队论的研究人员，以及从事计算机网络理论的研究人员对相关性问题进行着诸多研究。从目前的研究进展和研究水平看，在长相关问题上要取得突破，恐怕还有一个过程。笔者认为：后现代通信业务量理论的建立还需要经历一段逐渐发展的过程，待条件成熟后，才有可能取得突破性进展。这样说，是否意味着目前一段时间我们中国学者就无事可做呢？结论并非如此。为了促进后现代通信业务量理论的发展，目前至少有如下课题要大力展开研究。

（1）坚持相关理论的研究，不断跟随国外的研究进展，待条件比较成熟时，进行突破性创新研究。

（2）就业务量的猝发性排队模型进行近似研究。当然这些近似已超出典型排队论的范畴，近期应强化研究。

① 对信元到达流的近似。由于 B-ISDN 中可以同时传输多种业务的信元，信元的到达比较复杂，用经典排队论的泊松到达、爱尔兰到达、二项式到达来描述显然是粗糙的。如何比较正确地描述信元到达规律是后现代通信业务量理论尚待解决的问题之一。目前想到的主要思路有这样几种：

- 对综合业务分类考虑。设定不同信元按多路多种规律到达，也就是顾客到达出现多类顾客多队列到达。最简单的情况是将信元分为两类，分别按两路的到达规律到达。进一步将信元分为三类，即声音、数据、图像（可动图像）各为一类，分别按自己的到达规律到达，则可能更趋近于 B-ISDN 的实际情况。
- 对综合业务综合考虑。设定信元到达为断续泊松过程 IPP（Interrupted Poisson Process）或断续伯努利过程 IBP（Interrupted Bernoulli Process）。由于断续过程在一定程度上能反映综合业务的猝发现象，因而可望在短期内取得近似程度较好的结果。当然也可在分类后，将各类信元按断续泊松过程处理。
- 对综合业务综合考虑。设定信元按马尔可夫调制的泊松过程（MMPP）到达或设定信元按马尔可夫调制的定常速率过程（MMDP）到达。
- 就长相关理论进行探讨。在重尾分布、大偏差理论、长相关高斯噪声模型、基于小波的模型等方面进行理论探讨。其创新过程是渐进式的。大偏差理论（Large Deviations）是一种近似分析法，该方法不以马尔可夫性为分析前提，因此对信息长相关性（Long Range Dependence, LRD）的研究有特殊意义。目前利用该方法能求出信元丢失率的近似值，在分析过程中可能遇到的超越方程，需要仿真计算。

为了将该方法引入到长相关性信息流的建模研究中，尚需做深入研究工作。

- 过程逼近法的研究。众所周知，近似逼近法分为系统逼近法和过程逼近法。在排队论分析方法中人们已经利用的流体流方法（Fluid Flow Method）就是一种过程逼近法。它是一种近似分析法。它近似认为离散的到达过程及离散的排队过程为连续变化过程，可以简化计算。而且计算复杂程度与排队室大小无关，因此可将排队室认定为 ∞ 来简化计算分析。流体流方法可用于所有 MMDP 信源的排队分析。

② 服务规约。在 B-ISDN 中一般要考虑信元（顾客）服务的优先级，也就是对信元按优先权服务。关于优先级问题，我们提出了空间+时间+人力优先的综合方案。信元到达系统后，就要根据优先级策略采取相应的排队策略。根据空间优先级对不同信元的排队室有不同要求；根据时间优先级对不同信元的排队顺序有不同的要求；根据人力优先级的策略对不同信元提供不同数量的服务员等。总之，从三方面确保优先级的服务规约，能较好地确保复杂信元（即综合业务）按轻重缓急服务，确保信元丢失的合理性及综合业务流量控制的合理性，在有限资源内提高网络服务效率。这也是后现代通信业务量理论尚待进一步解决的问题之一。关于优先级服务，本书将在第 7 章进行专门讲述。ATM 网与 B-ISDN 中的优先级策略目前引起了很多学者的关注。在经典排队论的框架下设定扩展肯达尔模型且进行建模解析和模拟实验的研究处于极盛状态。最近几年在国外权威期刊发表的论文可从网上下载几百篇，其研究深度和广度令人敬佩。虽然它们大都还未进入长相关模型或近似进入长相关模型，但有很高的理论价值，为发展扩展肯达尔模型做出了宝贵贡献。同样，为数有限的中国学者也在该领域做出了宝贵的创新贡献。

③ 服务员数量 n 。 $n \geq 1$ ，首先分析 $n = 1$ 的情况，而后分析 $n > 1$ 的情况，比如 $n = 2$ 、 $n = 3$ 等，依次增大 n ，得到近似解。

除了网络延时、系统状态等性能外，在计算机网络流量控制、差错恢复、径路选择等方面同样进行着性能改进与分析的研究，当然它们也离不开扩展肯达尔模型的建立与解析。

此外对极高频（EHF）传输的无线网络中的宽频带问题，传输介质与设备等的性能分析与设计问题也应该能进行建模研究。