



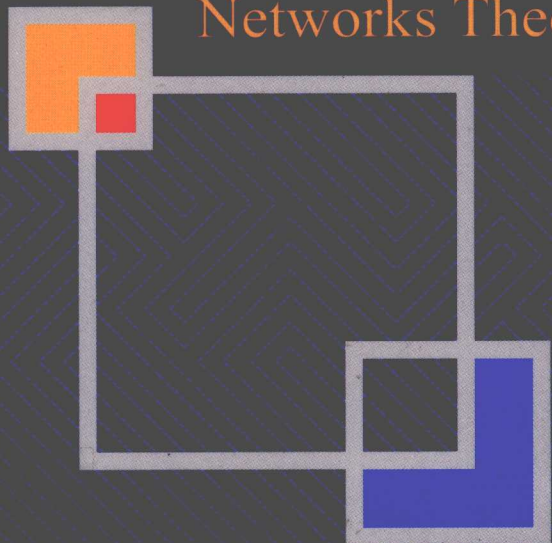
普通高等教育“十一五”
国家级规划教材

周炯槃 主编
张琳 望育梅 禹可 刘雨 编著

通信网 理论基础 (修订版)

国家级特色专业 通信工程 系列教材
21世纪高等院校信息与通信工程规划教材
21st Century University Planned Textbooks of Information and Communication Engineering

Communication
Networks Theory



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



名师名校



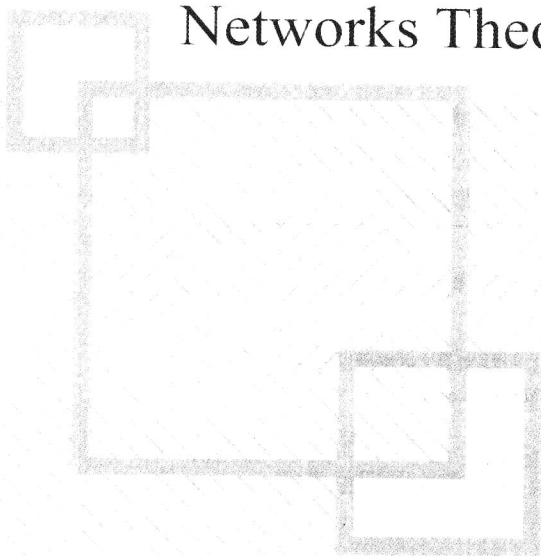
普通高等教育“十一五”
国家级规划教材

周炯槃 主编
张琳 望育梅 禹可 刘雨 编著

通信网 理论基础 (修订版)

国家级特色专业『通信工程』系列教材
21世纪高等院校信息与通信工程规划教材
21st Century University Planned Textbooks of Information and Communication Engineering

Communication
Networks Theory



人民邮电出版社
北京



名师名校

图书在版编目(CIP)数据

通信网理论基础 / 周炯槃主编; 张琳等编著. —修订本.
北京: 人民邮电出版社, 2009. 10
21世纪高等院校信息与通信工程规划教材
ISBN 978-7-115-19758-0

I. 通… II. ①周…②张… III. 通信网—高等学校—教材 IV. TN915

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第036861号

内 容 提 要

本书系统介绍了通信网的理论基础。全书共分为6章, 分别介绍了通信网的概念和网络的基本组成, 网络的业务分析和排队论原理, 多址接入系统分析, 通信网结构, 通信网中的流量优化, 通信网中的可靠性。

本书可作为高等院校信息与通信工程相关专业高年级本科生和研究生的教材, 也可作为通信工程技术人员和科研人员的参考用书。

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

21世纪高等院校信息与通信工程规划教材

通信网理论基础(修订版)

-
- ◆ 主 编 周炯槃
 - 编 著 张 琳 望育梅 禹 可 刘 雨
 - 责任编辑 刘 博
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街14号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京世纪雨田印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 14
字数: 340千字
印数: 1—3 000册
 - 2009年10月第2版
2009年10月北京第1次印刷

ISBN 978-7-115-19758-0/TN

定价: 28.00元

读者服务热线: (010)67170985 印装质量热线: (010)67129223
反盗版热线: (010)67171154

前 言

通信意味着信息的传递和交换，这对人类社会是不可缺少的。对远程交换信息的旺盛需求一直推进着通信网络的快速发展和变革。尤其是在近代社会中，信息的交换日益频繁，随着通信技术和计算机技术的发展，人们已经能够克服空间和时间的限制，使得大容量、远距离的信息传递和存取成为可能。可以说，作为信息时代的基石，通信网络极大地推进了人类文明的发展和社会财富的增加。在过去的几十年中通信网一直向着数字化、宽带化方向发展，各种类型的宽带网络正在规划和建设之中。通信网的这种飞速发展推动了通信网络理论的发展，目前通信网络理论已经成为一门专门的学科，其内容十分丰富。近几十年来，国际上信息通信理论得到了飞速发展，信息的网络化处理成为现代通信技术发展的主流。掌握通信网的理论知识对于网络的规划、设计、建设和维护等实践活动具有很大的帮助。

网络的飞速发展需要我们培养一批懂得网络发展规律的人才，以应对现代化网络发展带来的机遇和挑战。而这方面的人才培养，离不开对通信网内部理论规律的认识和了解。为了向本科生、研究生和其他高级工程技术人员进行通信网相关理论的系统介绍，周炯槃院士自20世纪80年代以来主持了指导“通信网的优化设计”、“ISDN交换体系结构的研究”、“宽带ISDN基本理论与发展的研究”等一系列国家自然科学基金、博士点基金和国家“七五”攻关项目的研究，在此研究成果基础上，1991年周炯槃院士编著了《通信网理论基础》一书由人民邮电出版社出版。

《通信网理论基础》一书对20世纪70年代以来发展的图论、排队论、可靠性理论和网络优化理论进行了总结，以此为基础构成了书中通信网理论基础的4个方面，并把它们成功地用于分析通信系统和通信网，从而展开了通信网理论与技术的丰富内容。该书不但及时、准确地总结了当代国内外有关方面的先进成果，而且也是作者数十年来从事通信理论与技术方面研究的结晶。该书有新意，有创见，是一本系统性强、理论水平高、有实践性和启发性的好书。该书在1991年的出版及时地适应了我国通信事业现代化的需要，也解决了通信网方面教学科研工作的急需。该书在正式出版之前，作为讲义就已被众多高校和科学工作者所采纳，作为教材和理论参考。自出版以来已经被国内多所高等院校指定为本科生和研究生的正式教材。北京邮电大学自1986年起，信号与信息处理专业博士生、硕士生的学位课就以此书（或讲义）为教材；信息工程系信息工程专业、信息科学专业、自动化专业的本科生必修课“通信网基础”，选定此书作为教材。《通信网理论基础》一书于1997年获原邮电部科技进步一等奖。

《通信网理论基础》一书自出版以来就受到广大读者的欢迎，多次印刷仍出现脱销现象。我们同人民邮电出版社共同申请在普通高等教育“十一五”国家级规划教材中修订再版该书。本次修订以周炯槃院士1991年版《通信网理论基础》一书为基础，对其中的内容进行

精简、增删、勘误，使关键内容更加精炼。此次修订的主要思路有：首先，自周炯槃院士1991年版《通信网理论基础》成书以来，通信网络发生了重大的变化，以普通电话网为代表的传统通信网正迅速地向以IP网络为核心的现代通信网络转变；移动通信网络、计算机网络的迅猛发展正在日益深刻地影响我们的日常生活和通信方式与通信内容。这部分内容虽在“通信概论”或者“计算机网络”等课程或书籍中有所体现，但是如何与通信网相联系仍是一个值得讨论的话题。因此本次修订也注意了现代网络技术，特别是以IP网络为代表的分组交换网络对网络总体发展的影响，重点讨论了影响现代通信网设计与规划的一些基本问题。其次，网络理论涉及的内容与影响的范围与以前相比也更为广泛和深化，网络建设基本完成后，网络规划与优化成为电信网络运营商非常重要的课题。这部分的工作也都是建立在通信网理论的基础之上的。因此，本次修订也适度增强这部分的内容。第三，根据多年来教学的反馈，注意了学生接受知识的特点，在介绍某些算法原理时调整了表达方式和理论证明思路，让某些理论内容更加形象化、生动化。每章附有的习题将有助于读者对本书内容的理解。最后，我们也参考了近年来出版的相关通信理论书籍。

本书的修订工作是在周炯槃院士的精心组织和具体指导下完成的。在修订过程中，得到了张惠民教授、苏骅希副教授等多位常年在北京邮电大学从事通信网理论基础课程教学工作的老师们的大力帮助，得到了人民邮电出版社普通高等教育十一五国家级规划教材出版项目的资助，在此表示感谢。对书中参考的有关书籍的作者，也一并表示谢意。本书第1章由张琳修订；第2章和第3章由刘雨修订；第4章和第5章由禹可修订；第6章由望育梅修订。

编 者
2009年5月

目 录

第1章 引论	1
1.1 通信网概述	1
1.1.1 系统和网	1
1.1.2 通信网的类型	2
1.1.3 通信网的发展历程	4
1.1.4 对通信网的要求	7
1.2 通信网的组成要素	9
1.2.1 终端设备	9
1.2.2 信道	10
1.2.3 交换设备	13
1.2.4 通信网的约定	16
1.3 本书内容安排	20
第2章 网内业务分析	21
2.1 排队论基础	21
2.1.1 基本概念	21
2.1.2 $M M 1$ 问题	27
2.1.3 $M M m(n)$ 问题	37
2.1.4 一般排队问题	42
2.2 通信网的业务模型与分析	54
2.2.1 各种测度和指标	55
2.2.2 业务分析举例	58
2.3 提高网效率的一些措施	69
2.3.1 大群化效应	69
2.3.2 延迟效应	71
2.3.3 综合效应	72
2.3.4 迂回效应	75
习题	78
第3章 多址接入系统分析	81
3.1 纯阿罗华系统	81
3.2 分槽阿罗华系统	83
3.3 载波监听多址接入系统	84
3.4 轮询方式	92
3.5 各种多址系统的比较	93
习题	96

第4章 通信网结构	97
4.1 图论基础	97
4.1.1 基本定义	98
4.1.2 图的联结性	100
4.1.3 树	103
4.1.4 割和环	104
4.1.5 平面性和对偶性	107
4.1.6 图的矩阵表示	108
4.2 最短径问题	115
4.2.1 最短主树	115
4.2.2 端间的最短径	121
4.3 站址问题	130
4.3.1 单中点问题	131
4.3.2 k 中点问题	137
4.3.3 设站问题	140
习题	141
第5章 通信网中的流量优化	144
5.1 流量优化的一般性问题	144
5.2 最大流问题	145
5.3 最佳流问题	151
5.4 线性规划简介	152
5.4.1 线性规划的标准型	153
5.4.2 单纯形解原理和计算步骤	154
5.4.3 对偶定理	157
5.4.4 罚款的应用	158
5.4.5 计算之例	159
习题	164
第6章 通信网的可靠性	166
6.1 可靠性理论概要	166
6.1.1 不可修复系统的可靠度	166
6.1.2 可修复系统的可靠度	170
6.1.3 复杂系统的分解	172
6.1.4 综合可靠度	182
6.1.5 可靠性设计	183
6.2 通信网的可靠性	186
6.3 通信网的联结性	188
6.3.1 联结度和结合度	188
6.3.2 局和线路故障下网的联结概率	192
6.3.3 可靠网的设计	195

6.4 局间通信和综合可靠度	198
6.4.1 端间联结性的计算	199
6.4.2 端间通信的综合可靠度	199
6.4.3 通信网的综合可靠度	201
6.5 随机图和灾害控制	205
6.5.1 随机图的联结性	205
6.5.2 平均径长	208
6.5.3 灾害控制	209
习题	214
参考文献	216

第 1 章 引 论

通信意味着信息的传递和交换，这对人类社会是不可缺少的。世界已进入以信息产业为主导的新经济时代，信息化是当今经济和社会发展不可逆转的大趋势，它在一定程度上甚至已成为衡量一个国家和地区国际竞争力、现代化程度和经济成长能力的重要尺度。及时、充分而有效的沟通是人类实现资源共享、社会实现集约快速发展的必要条件。在能够“随时”、“随地”、“随意”沟通的世界，人类能够自由共享所有知识，自由传达所有情感。所以人们对通信提出多种多样的要求，而通信网正是满足这些要求所必需的。通信网应不断地合理化，包括信息传递的快速性、有效性、可靠性、多样化以及经济性。研究通信网就成为近代科学技术的一个重要组成部分。

本章的 1.1 节将对通信网的含义、发展、分类和要求作一简述，1.2 节将介绍通信网的组成要素，1.3 节将介绍本书的主要内容及其安排。

1.1 通信网概述

1.1.1 系统和网

要完成信息的传递，必须建立一整套设备。将一个用户的信息送到另一个用户的全部设施通常称为一个通信系统，其中主要包括把信源信息转换成可以在信道上传送的信号的发端机，传输信号所需的线路及其附属设备——信道，以及把信号恢复成用户所需的信息的收端机。在两个用户之间要相互通信，就需要两个通信系统，一个作正向传输，例如从用户 A 到用户 B，另一个作反向传输，从用户 B 到用户 A，这就是双工通信系统。此时，发端机和收端机每个用户都有，一般是装在一起的，常称之为端机或终端。有时为了节省信道费用，可用一条信道，时分地进行正向和反向传输，这就是半双工通信系统。当 n 个用户要相互两两之间通信时，就需要有一个通信网，最简单的方法是建立 $n(n-1)$ 个通信系统或 $\frac{1}{2}n(n-1)$ 个双工或半双工通信系统，构成一个全联结网。这种简单方式在理论上是可行的，但实际上是很浪费的。因为一般用户之间的通信不会连续进行，在相当长一段时间内无信息交换，而且当一个用户已与另一用户在通信时，联结此用户的其他信道将被闲置。所以信道及其有关设施的利用率很低，而建网的造价又很高，尤其是用户数 n 很大时更是如此。

后来引入电路交换、分组交换以及多址随机接入等概念，把各信道有机地结合起来，形

成各式各样的通信网,这样就以较经济的方式,使 n 个用户可相互传递信息。当然全联结网也仍是一种形式,当各用户是较高层的交换点时,业务量甚大,且能同时与其他各点通信,这种形式不但可行,有时还是很好的。尤其在卫星通信中,各地面站之间的联结,基本上就采用这种形式。

由上述可见,通信网可以说是通信系统的系统,是一个非常庞大的系统,它包括了所有的通信设备和通信规程。实际上,每个具体的通信设备,都是网的一部分。在研究这些设备时,若不考虑通信网,这些设备往往不能发挥应有的功能。例如孤立地看一个通信系统,可能是很好的,但若不能与大的通信网联结,或者说不能进网,那就使它只能起到局部作用,不能与网内其他用户互通信息,在使用效率或应用范围上就会显得不足。反之,在研究全网时,也必须了解这些设备的功能,否则网的性能也就无从说起。从这个意义上讲,通信网课程的内容应包括通信专业的所有课程。当然,这样庞大而繁杂的内容是不可能组成一门课程的,所以通常所谓通信网问题,往往只指带有综合性和整体性的问题,不涉及一般具体设备。即使如此,内容还是太繁杂,因此在本书中只能讨论一些主要问题,重点是有广泛意义的、较成熟的理论基础。

研究通信网的重要性,也就体现在整体性这一点,整体上的任何改进、发展或突破,可以大量地节约投资和发挥现有设备的功能。例如从全联结网通过交换的引入而发展为电路交换网,极大地减少了通信建设费用,因此也促进了通信事业的迅速发展。从模拟通信网到数字通信网、从窄带接入到宽带接入、从单一业务到综合业务、从固定服务到移动服务,通信网的每一步发展都极大地改变着人们的生活和工作方式,不断地促进生产力水平的提高。事实上,整体性问题的解决还将指导部件的发展方向,以更好地组成合理的通信网,使之发挥更大的作用,满足更多关于信息传输和处理的要求。又如网结构的规划和优化,往往比按经验设计建网要节约得多;业务量的随机性分析和优化的控制方式,将导致更有效地使用信道和设备;可靠性的研究,可使通信网的作用更趋稳定,在有限地增加投资下,可大量地减小通信的中断率等。

强调整体性研究的重要性,决不是忽视局部系统的技术问题。事实上,网的研究必须建立在现实技术条件的基础上。当技术条件还不成熟时,任何优良的网也是不能实现的。当集成电路尚未较完善时,已在谈论数字通信的优越性,但当语音的脉冲编码调制技术还不能经济地实现时,数字通信网不管有多大的优点,也是不易实现的。当今人们对通信的要求越来越高,除原有的语音、数据、传真业务外,还要求综合传输高清晰度电视、广播电视、高速数据传真等宽带业务。计算机技术、微电子技术、宽带通信技术和光纤传输的发展,为满足这些迅猛增长的通信需求提供了基础。

1.1.2 通信网的类型

对网提出恰当的要求之前,看一下现有通信网的状态及其存在的问题是有益的。由于通信网是逐步形成的,而且总是根据需要而建设的,所以现有通信网有各种类型。

通信网从通信的内容来分,有电话网、数据通信网、计算机网、广播和电视节目网等。不论国内或国外,当前还是以电话网为主体,因而人们在谈论通信网时,往往就认为是电话网。但从发展来看,其他信息传输的增加率已超过电话业务的增加率,这是有其历史原因

的。人类交换信息的主要手段是语言，虽然它所包含的信息量比视觉所感受的信息量小得多，但易于传输，因而电话成为通信的主要方式。随着社会的进步，其他信息的需求逐渐增加，因而有传真、电视节目等网出现。信息量小而且最易于传输的电报，是第一次实现的电信业务。由于它包含的信息量小，不能完全满足人类的需要，因而发展不如电话网快。而计算机的发展，及由此而演变出的数据网和计算机网，是当前发展最快的一类网。计算机网所传送的也是二元数据，这与电报相似，但速率比传统电报高得多，这对于各计算机之间相互享用软件和数据库起着重要的作用。

以上这些类型的网，往往不能相互调节，即某种网的业务有溢出时不易利用另一类型的网。这是因为各类网所传送的信息不同，对网内信道等设施的要求不同，有许多规程也不同。例如对于语音信号，非线性失真对质量影响很大，但相位失真就几乎毫无影响，因人耳对后者是不敏感的；而对于数据信号，相位失真可引起显著的误码，非线性失真倒是次要的；图像信号也有类似的情况；广播节目虽然也是声音，但动态范围和频率范围的要求与语言信号不同。为了节省投资，建立一种通信网时，常只希望符合所传信号的要求就行，并不要求信道等设施是无失真的，这就使其他信号要在这种网内传输碰到困难。或者要降低质量，或者需加昂贵的附加设备如各种均衡网络来补偿各种失真。此外，相互应答并接通的方式也不尽相同，甚至使其他信息无法在特定的网内传送，除非加上很复杂的转换接口设施。

从范围来分，通信网可分为个域网（Personal Area Network, PAN）、专用网（Private Network）、局域网（Local Area Network, LAN）、城域网（Metropolitan Area Network）和骨干网（Backbone Network）等。其中个域网、专用网、局域网通常称为私有网络，而其他网络都是服务于公共社会的。个域网是一种近年来才发展起来的网络，主要用于家庭或办公室各通信设备之间的联网。专用网是一些特殊行业或面对特殊应用而专门建立起来的网络，如金融和银行系统通常拥有自己的专用网络；当然也可以通过其他公共网络利用某些技术来搭建虚拟专用网（VPN）。局域网是将分散在有限地理范围内（如一栋大楼，一个部门）的多台计算机通过传输媒体连接起来的通信网络，可以包含多个子网，通过功能完善的网络软件，实现计算机之间的相互通信和资源共享。局域网的覆盖范围相对较小，通常不超过 25 km。采用无线连接组成的无线局域网，其覆盖面积更小，半径大约在 100 m 之内。城域网是一种比局域网更大的网，通常覆盖一个城市，从几十 km 到 100 km 不等，可能会有多种介质，用户的数目也比局域网更多。ITU-T 到目前为止，并没有在建议中具体指出在电信网络中城域网的定义。通常认为的城域网是指在地域上覆盖城市及其郊区范围、为城域多业务提供综合传送平台的网络，主要应用于大中型城市地区。城域网以多业务光传送网络为基础，实现语音、数据、图像、多媒体、IP 等接入，在功能上主要完成接入网中的企业和个人用户与在骨干网络上的运营商之间全方位的协议互通。骨干网主要是指用于国际联网或国内主要城市之间的联网，是实施信息传送的主体网络。

再从组成网的信道来分，通信网可分为电缆网、无线短波网、微波中继网、卫星网、光缆网等。这些网在传输和使用上各有特点。例如无线短波网很容易建立，但由于衰落现象而质量上不易保证；卫星网很适宜于远距离的全联结网；光缆网的潜在容量很大而干扰甚小等。当然，各种通信网根据条件和需要分别建立，可作为相互补充和备用，但作为一个网，它们之间互连往往会因为质量不一致，传输指标不一致，接口转换等复杂因素而造成困难。

1.1.3 通信网的发展历程

1. 电话网的发展历程

人类对于远程传递语音的研究从远古时代就开始了,中国古代就有“顺风耳”的传说。对于远距离传送声音的现代研究始于 17 世纪的欧洲。英国著名的物理学家和化学家罗伯特·胡克首先提出了远距离传送语音的建议。而在 1796 年,休斯提出了用话筒接力传送语音信息的办法,并且把这种通信方式称为 Telephone,一直沿用至今。对于电话的发明者究竟是谁,历史上一直争论不休。通常人们将亚历山大·格拉汉姆·贝尔(Alexander Graham Bell)认为是电话的发明者。1879 年,爱迪生利用电磁效应制成炭精送话器,使送话效果显著提高。爱迪生炭精话筒的原理及其器件一直沿用至今。

随着社会需求的日益增长和科技水平的不断提高,电话交换技术处于迅速的变革和发展之中。其历程可分为 3 个阶段:人工交换、机电交换、电子交换。1878 年 1 月 28 日,美国康涅狄格州的纽好恩,开通第一个市内电话交换所,当时只有 20 个用户。第一个研究发明自动电话的人是一个名叫阿尔蒙·B·史端乔的美国人,他是美国堪萨斯城一家殡仪馆的老板。他发现,电话局的话务员不知是有意还是无意,常常把他的生意电话接到他的竞争者那里,使他的多笔生意因此丢掉。为此他大为恼火,发誓要发明一种不要话务员接线的自动接线设备。1891 年 3 月 10 日,他获得了发明“步进制自动电话接线器”的专利权。1892 年 11 月 3 日,用史端乔发明的接线器制成的“步进制自动电话交换机”在美国印第安纳州的拉波特城投入使用,这便是世界上第一个自动电话局。1919 年,瑞典的电话工程师帕尔姆格伦和贝塔兰德发明了一种自动接线器,叫做“纵横制接线器”并申请了专利。1929 年,瑞典松兹瓦尔市建成了世界上第一个大型纵横制电话局,拥有 3 500 个用户。“纵横制”和“步进制”都是利用电磁机械动作接线的,所以它们同属于“机电制自动电话交换机”,但是纵横制的机械动作很小,又采用贵重金属的接触点,因此比步进制交换机的动作噪声小、磨损和机械维修工作量也小,而且工作寿命也较长。另外,纵横制与步进制的控制方式也不同:步进制是由用户拨号直接控制它的机械动作,叫做“直接控制式”;而纵横制是用户拨号要通过一个公共控制设备间接地控制接线器动作,因而叫做“间接控制式”。这种“间接控制方式”比“直接控制方式”有明显的优点。例如,它的工作比较灵活,便于在有多个电话局组成的电话网中实现灵活的交换,便于实现长途电话自动化,还便于配合使用新技术、开放新业务等。因而,它的出现使自动电话交换技术提高到一个新的水平。由于纵横制交换机具有一系列优点,因而它在电话交换发展上占有重要的地位,得到了广泛的应用。直到 20 世纪 90 年代,世界上还有相当多的国家和我国少数地区的公用电话通信网仍主要使用纵横制交换机。

半导体器件和计算机技术的诞生与迅速发展,猛烈地冲击着传统的机电式交换结构,使之走向电子化。美国贝尔公司经过艰苦努力于 1965 年生产了世界上第一台商用存储程序控制的电子交换机(No. 1 ESS),这一成果标志着电话交换机从机电时代跃入电子时代,使交换技术发生时代的变革。程控时分交换机一般在话路部分中传送和交换的是数字语音信号,因而习惯称之为程控数字交换机,它标志着交换技术从传统的模拟交换进入数字交换时代。程控数字交换技术的先进性和设备的经济性,使电话交换跨上了一个新的台阶,而且为开通

非话业务,实现综合业务数字交换奠定了基础。随着微处理器技术和专用集成电路的飞跃发展,程控数字交换的优越性愈加明显的展现出来。

1995年以色列 VocalTec 公司所推出的 Internet Phone,揭开了电信 IP 化的序幕。Voice over IP 可以简单理解为透过 IP 网络传输的语音或视频信号。VoIP 不仅帮助人们享受到更便宜、甚至完全免费的通话及多媒体服务,甚至改变了电信业的服务内容及面貌。一开始的 VoIP 是以软件的形式呈现,同时仅限于 PC to PC 间的通话,换句话说,人们只要分别在两端不同的 PC 上,安装 VoIP 软件,即可经由 IP 网络进行对话。随著宽带网技术的演进,VoIP 也由单纯 PC to PC 的通话形式,发展出 IP to PSTN、PSTN to IP、PSTN to PSTN 等各种形式,当然他们的共通点,就是以 IP 网络为传输介质,这样,电信业长久以 PSTN 电路交换网络为传输介质的独占性也逐渐被打破。

2. 计算机网的发展历程

计算机网络是计算机技术与通信技术相结合的产物,它实现了远程通信、远程信息处理和资源共享等。它自 20 世纪 60 年代产生以来,越来越多地被应用到经济、军事、生产、教育、科学技术及日常生活等各个领域。所谓计算机网络就是利用通信线路和通信设备将不同地理位置的、具有独立功能的多台计算机或共享设备互连起来,配以功能完善的网络软件,使之实现资源共享、信息传递和分布式处理的系统。计算机网络的发展经历了从简单到复杂、从单机到多机、从终端与计算机之间通信到计算机与计算机直接通信的发展阶段。

第一代计算机网络:早期的计算机系统是高度集中的,所有的设备安装在单独的机房中。20 世纪 50 年代中后期,许多系统都将地理上分散的多个终端通过通信线路连接到一台中心计算机上,出现了第一代计算机网络,它是以单个计算机为中心的远程联机系统。典型应用是美国航空公司与 IBM 在 20 世纪 50 年代初开始联合研究,20 世纪 60 年代投入使用的飞机订票系统 SABRE-I,它由一台计算机和全美范围内 2 000 个终端组成。该系统中的终端是指由一台计算机外部设备组成的简单计算机,仅包括 CRT 控制器、键盘,没有 CPU、内存和硬盘。当时的计算机网络定义为“以传输信息为目的而连接起来,以实现远程信息处理或进一步达到资源共享的计算机系统”,这样的计算机系统具备了通信的雏形。

第二代计算机网络:现代意义上的计算机网络是由 1969 年美国国防部高级研究计划局(DARPA)建成的 ARPAnet 实验网开始的,该网络当时只有 4 个结点,以电话线路为主干网络,其特点主要是资源共享、分散控制、分组交换、采用专门的通信控制处理机和分层的网络协议,这些特点被认为是现代计算机网络的一般特征。

第三代计算机网络:随着计算机网络技术的成熟,网络应用越来越广泛,网络规模增大,通信变得复杂。各大计算机公司纷纷制定了自己的网络技术标准,这些网络技术标准只是在一个公司范围内有效,遵从某种标准的、能够互连的网络通信产品,只是同一公司生产的同构型设备。1977 年国际标准化组织(ISO)开始着手制定开放系统互连参考模型(OSI/RM),标志着第三代计算机网络的诞生。OSI/RM 把网络划分为 7 个层次,并规定计算机之间只能在对应层之间进行通信,大大简化了网络通信原理,是公认的新一代计算机网络体系结构的基础,为普及局域网奠定了基础。

第四代计算机网络:20 世纪 80 年代末,局域网技术发展成熟,出现了光纤及高速网络技术,整个网络就像一个对用户透明的、大的计算机系统,发展以 Internet 为代表的因特

网, 这就是直到现在的第四代计算机网络时期。此时计算机网络定义为“将多个具有独立工作能力的计算机系统通过通信设备和路由功能完善的网络软件实现资源共享和数据通信的系统”。1985 年美国国家科学基金会 (National Science Foundation) 利用 ARPAnet 协议建立了用于科学研究和教育的骨干网络 NSFnet, 1990 年 NSFnet 取代 ARPAnet 成为美国国家骨干网, 并且走出了大学和研究机构进入社会, 从此网上的电子邮件、文件下载和信息传输受到人们的欢迎和广泛使用。20 世纪 90 年代后期以来, Internet 以惊人速度发展, 已经走进了人们的日常生活。

3. 移动通信的发展历程

近年来, 移动通信得到了长足的发展, 为广大用户提供了极大的便利。移动通信可以说从无线电通信发明之日就产生了。1897 年, M·G·马可尼所完成的无线通信试验就是在固定站与一艘拖船之间进行的, 距离为 18 海里。现代移动通信技术的发展始于 20 世纪 20 年代, 大致经历了 5 个发展阶段。

第一阶段从 20 世纪 20 年代至 60 年代, 为早期发展阶段。在这期间, 首先在短波几个频段上开发出专用移动通信系统, 其代表是美国底特律市警察使用的车载无线电系统, 特点是专用系统开发, 工作频率较低。1946 年, 根据美国联邦通信委员会 (FCC) 的计划, 贝尔公司在圣路易斯城建立了世界上第一个公用汽车电话网, 称为“城市系统”。当时使用 3 个频道, 间隔为 120 kHz, 通信方式为单工。随后, 原西德 (1950 年)、法国 (1956 年)、英国 (1959 年) 等国相继研制了公用移动电话系统。美国贝尔实验室完成了人工交换系统的接续问题, 特点是从专用移动网向公用移动网过渡, 接续方式为人工, 网的容量较小。

第二阶段从 20 世纪 60 年代中期至 70 年代中期。在此期间, 美国推出了改进型移动电话系统 (IMTS), 使用 150 MHz 和 450 MHz 频段, 采用大区制、中小容量, 实现了无线频道自动选择并能够自动接续到公用电话网。原西德也推出了具有相同技术水平的 B 网。可以说, 这一阶段是移动通信系统改进与完善的阶段, 其特点是采用大区制、中小容量, 使用 450 MHz 频段, 实现了自动选频与自动接续。

第三阶段从 20 世纪 70 年代中期至 80 年代中期, 这是移动通信蓬勃发展时期。1978 年底, 美国贝尔试验室研制成功先进移动电话系统 (AMPS), 建成了蜂窝状移动通信网, 大大提高了系统容量。贝尔试验室在 70 年代提出了蜂窝网的概念。蜂窝网, 即所谓小区制, 由于实现了频率再用, 大大提高了系统容量。可以说, 蜂窝概念真正解决了公用移动通信系统要求容量大与频率资源有限的矛盾。其他工业化国家也相继开发出蜂窝式公用移动通信网, 日本于 1979 年推出 800 MHz 汽车电话系统 (HAMTS); 原西德于 1984 年完成 C 网, 频段为 450 MHz; 英国在 1985 年开发出全地址通信系统 (TACS), 频段为 900 MHz; 法国开发出 450 系统; 加拿大推出 450 MHz 移动电话系统 MTS; 瑞典等北欧 4 国于 1980 年开发出 NMT—450 移动通信网, 并投入使用, 频段为 450 MHz。这一阶段的特点是蜂窝状移动通信网成为实用系统, 并在世界各地迅速发展。

第四阶段从 20 世纪 80 年代中期开始, 这是数字移动通信系统发展和成熟时期。以先进移动电话系统 (AMPS) 和全地址通信系统 (TACS) 为代表的第一代模拟蜂窝网虽然取得了很大成功, 但也暴露了一些问题。例如, 频谱利用率低, 移动设备复杂, 费用较贵, 业务种类受限制以及通话易被窃听等, 最主要的问题是其容量已不能满足日益增长的移动用户需

求。解决这些问题的方法是开发新一代数字蜂窝移动通信系统。数字无线传输的频谱利用率高,可大大提高系统容量。另外,数字网能提供语音、数据多种业务服务,并与 ISDN 等兼容。第二代移动通信系统最早推出的是欧洲研制的 GSM 系统(全球移动通信系统),后来美国高通公司又推出了著名的 CDMA(码分多址)移动通信系统。

第五阶段从 20 世纪 90 年代中期开始,第二代移动通信系统在世界发展十分迅速,但是它数据功能很低,不能支持多媒体业务。此外,世界上不同的第二代移动通信系统彼此间不能兼容,使用的频率也不一样,全球漫游比较困难。因此,人们希望有功能更强大的第三代移动通信系统(3G)来解决这些问题。吸取了第二代移动通信系统全球标准不统一的教训,ITU(国际电信联盟)从 1997 年左右开始向全球征集第三代移动通信技术标准的备选提案。目前经 ITU 确认的三大 3G 主流标准分别为:由 GSM 延伸而至的 WCDMA;由 CDMA 演变发展的 CDMA2000;我国大唐电信提出的全新标准 TD-SCDMA。目前正在讨论 B3G 和 4G 的发展方向。

1.1.4 对通信网的要求

由以上的简要讨论可看出,当前已存在的通信网远远不是理想的。不论在构成上还是在使用上,均不完全合理。那么理想的通信网应是怎样的呢?这就必须先提出对网的主要要求,用这些要求去评价一个新建或已有的网是否合理,或应如何改进,将是网的研究工作者的指针。

对于一个通信网的最基本要求是网内任意两个用户可以互通信息,也就是转移的任意性。其实这是网的定义所规定的,假如有某些用户不能与其他某些用户通信,这些用户就不能称为属于这个网。这里所说的任意交换,还包括快速接通的含义。在近代通信中,时间应说是一个很重要的因素。如果某对用户之间的接通需要很长时间的的话,在某种情况下这种接通可能是无效的,或至少使效果大为减小。在拓扑结构允许接通的前提下,影响接通速率的因素大致有两类:一种是交换次数太多或在某些环节中出现阻塞,如电路均被占用而需等一段时间再试接,这涉及网资源不足或结构不合理的问题;另一种是通路中某些环节发生物理性故障,以致丧失其应有功能而又不能及时修复,引起长时间接不通。一般所要求的快速性是指前者,后者一般作为可靠性要求,当然两者也不能严格分辨。要使网完全不阻塞而能即时接通,往往是不经济的,有时也是不可能的。对于紧急用户,只能借助于直通电路。当所有网内用户都是紧急时,那就只能用全联结网。有时也可用优先制来适应紧急用户,这又使一般用户的接通速率降低。对于接通的快速性,可规定一个时限,平均能在某一时限内接通,就可认为已满足快速性的要求。

对通信网的第二个要求就是前面提到的可靠性,一个不可靠的或常中断的网是不能用的,这一点毋须解释。反之,绝对可靠的网也是没有的,所谓可靠也就是在概率的意义上,平均故障时间或平均运行率达到要求。实际上,一方面增加可靠性意味着需要有备用信道和设备,必然增加投资或维护力量;另一方面,为了节省费用而因陋就简,会造成中断通信而引起各种各样的损失。如何取得妥协和平衡是一个非常复杂的问题,这与业务的性质也有密切的关系。如在军用通信网中,中断通信的损失往往无法估计地大,所以这类通信网的可靠性要求几乎凌驾于经济性之上。民用通信则在可靠性要求上低一些,但随着交换信息的价值愈来愈被人们所重视,所以对可靠性要求也就愈来愈高了。此外,由于呼损而需等待也常被作为可靠性来处理,尤其是某些线路故障以致通路不足而引起的呼损更是如此。在某些情况

下,通信的安全性,即不被未授权者窃取通信内容,或被人破密而获取,也可作为可靠性要求的一个内容。但一般而论,这种要求是另行处理,不在设计或计算网的可靠性范围之内。

对通信网的第三个主要要求是对信息的透明性。所谓透明,就是所有信息都可以在网内不加任何限制传递,正像透明物体中能通过任何波长的可见光线一样。换句话说,网对用户不应有太多的要求。例如在数据通信中,常需比特同步以保证信息正确地被提取,当信息中的代码是全“0”或全“1”时,同步提取电路就会失效,这就需要在网接口内附加一些设施,以保证同步正常进行而不向用户提出限制性要求。倘若必须对用户提一些要求,就说这网对数据信息是不透明的。透明性要求实际上是说,良好的网不要对用户有所限制,以使信息畅通。在这个意义上说,理想的网应使用户的任何形式的信息都可在网内传递。例如用一个用户端机,最好能同时用来传送语音、图像、数据等,这就是综合业务数字网的意义。当用户与网接通后,可传送各种各样的信息,恰如顾客进入超级市场可以选购各种各样物品。一般地说,透明性要求应认为是在目前的技术态势下,对用户提出尽可能少的限制,以发挥更大的效用,因为对用户的限制,也就是对网的发展的限制。

对通信网的第四个要求是质量的一致性。质量指标对于一个通信系统是很重要的,质量不符合要求,有时会使通信失去意义。例如当系统中失真过大时,无法从收到的信号中提取所需的信息,那就是无效的通信;即使还能提取一些信息,或勉强能辨别,也可能造成不良后果,至少使收信者不愉快。当电话或电视信号中噪声太大,即使还不是听不清或看不清,至少也是不舒服的。所以任何通信系统都必须规定某些质量指标。在通信网中,除了各子系统均应满足质量指标外,还须规定全程指标和它们的一致性。严格地说,网内任何两个用户通信时,不论这两个用户距离的远近,应有相同或相近的质量,这样才能说这个网是正常的。当然质量的一致性并不是说质量完全相同,这是不可能也是不必要的,只需规定最低的质量指标,要求所有网内通信的质量都高于这个指标,这在综合各种信道以形成通信网时是必须解决的。例如在噪声和失真的分配上,主干线上应是低的。实际上,网内各种用户对质量要求也可能是不同的。例如农村用户开始时要求不高,为了节省投资而构成一个简易网,但当这种简易网要进入大网时,就会产生各种问题,例如串扰可能引起后者的质量下降到标准以下,那一般是不允许的。

在建设通信网时,总是逐渐扩大的,因而对网还可提出灵活性作为第5个要求。倘若一个网一旦建成后,不容许新用户或新业务进网,也不能与其他网互连互通,这样限制了网的发展,当然是很不理想的,因此从是否易于发展来评价一个网的优劣,也是可理解的。灵活性还应包含网的过载能力,这是说当业务量超过网的设计容量时,应尚有一定的适应能力。根据现有网的运行情况,网内业务的总通过量与用户的总需求(或称总呼叫量)有这样的关系:当呼叫量远小于网的设计容量时,总通过量随呼叫量的增加而按线性规律上升,也就是绝大部分需求均可满足,由于网内资源限制而被拒绝而损失的部分通常只占很小的比例(例如1%);但当需求量进一步增加时,通过量的上升就减缓,亦即被拒绝的部分逐渐增大,这是容许的。当网内业务繁忙时,忙音常会出现,这种过载现象只要不经常,不致引起用户的反感。当需求量再增加时,总通过量达到饱和点,以后就反而随总需求量的增加而下降,这就是阻塞现象,也就是由于网内设备过载太多而造成混乱。这饱和点常称为阻塞点,是网的过载能力的限度。除了采取一些恰当的控制和管理方式来加大阻塞点的总需求最值外,一个优良的网应有足够的灵活性以适应这类过载状态,尽量避免或推后阻塞点。

对通信网的最后一个要求,实际上也是决定性的要求是经济上的合理性。若造价十分高或维护费用太大,再好的网也是不易实现的,所以可说这个要求是决定性的。而要满足这要求也是最复杂的,因为这已不单纯是一个技术问题。在某一时期,某些网结构和网业务可能是不现实的,但是随着技术经济的变化,各种费用也因之而变化,经济上的不合理转化为合理,就成为很好的网。不但如此,这合理性还与用户的需求有关。一个网的投资,常是要分阶段进行,以使能达到最大的经济效益。每一个阶段建多少容量与需求的预测有密切的关系。建多了会使设备闲置造成损失,建少了不能满足要求而被非议,而且也丧失产生效益的机会,这些在经济上都是不合理的。由此可见,规划一个在经济上合理的网会牵涉到许多方面,不但有技术条件,也有社会条件和人为的因素。评价一个网在经济上的合理性,也是十分困难的。即便如此,还是应注意到经济上的合理性是十分重要的。

以上简述了对于一个优良网的6个主要要求,这就是:(1)接通的任意性和快速性,(2)运行的可靠性,(3)信息的透明性,(4)质量的一致性,(5)较好的灵活性,(6)经济的合理性。当然,人们还可对网提出许多其他要求,但上述的要求应该说是主要的。完全满足这些要求是不容易的,而且怎样才叫满足也不易确切定义,也可能随时间的推移而变更。提出这些要求只是为了作为一些标志,可用来比较各种网的优劣,预言网的发展方向,以及为网的规划和设计者指出目标。

1.2 通信网的组成要素

在探讨通信网理论之前,有必要先阐明现有通信网的组成要素。通信网是通信系统的系统,因而通信系统的部件必然也是通信网的部件,这就是终端机和传输线路。终端机包含发端机和收端机,两者是互逆的,即前者把消息转换成信道能传输的信号,而后者是把信号恢复成信宿能接受的消息。通信系统的简单叠加只能形成不经济的全联结网,现有网中交换或交换设备常是不可缺少的。这样一来,通信网的组成部件可以说主要有3种:一为终端机,二为传输线路,三是交换设备。但是只有这些设备,往往还不能形成一个完善的通信网。假如把上述这些部件称为构成一个通信网的“硬件”,还必须有一套“软件”,这就是各种规定,包括信令、协议和各种标准。没有这些“软件”,要达到1.1节提出的对网的各种要求是不能设想的。从某种意义上说,这些规定是构成网的核心,决定网的性能,它们使用户之间、用户和网资源之间和各个交换点之间有共同的“语言”,以使网能合理地运行和正确地控制,达到任意两个用户之间能快速接通和相互交换信息。质量的一致性、运转的可靠性以及信息的透明性等要求也能够满足。

研究通信网理论是为了能实现更完善的网。因此,了解当前部件和规定的情况是研究通信网理论的前提和基础。本节将讨论这些硬件和软件的现状,以使以后所讨论的理论问题有坚实的背景。

1.2.1 终端设备

终端设备的主要功能是把待传送的信息和在信道上传送的信号之间相互转换。这就需要