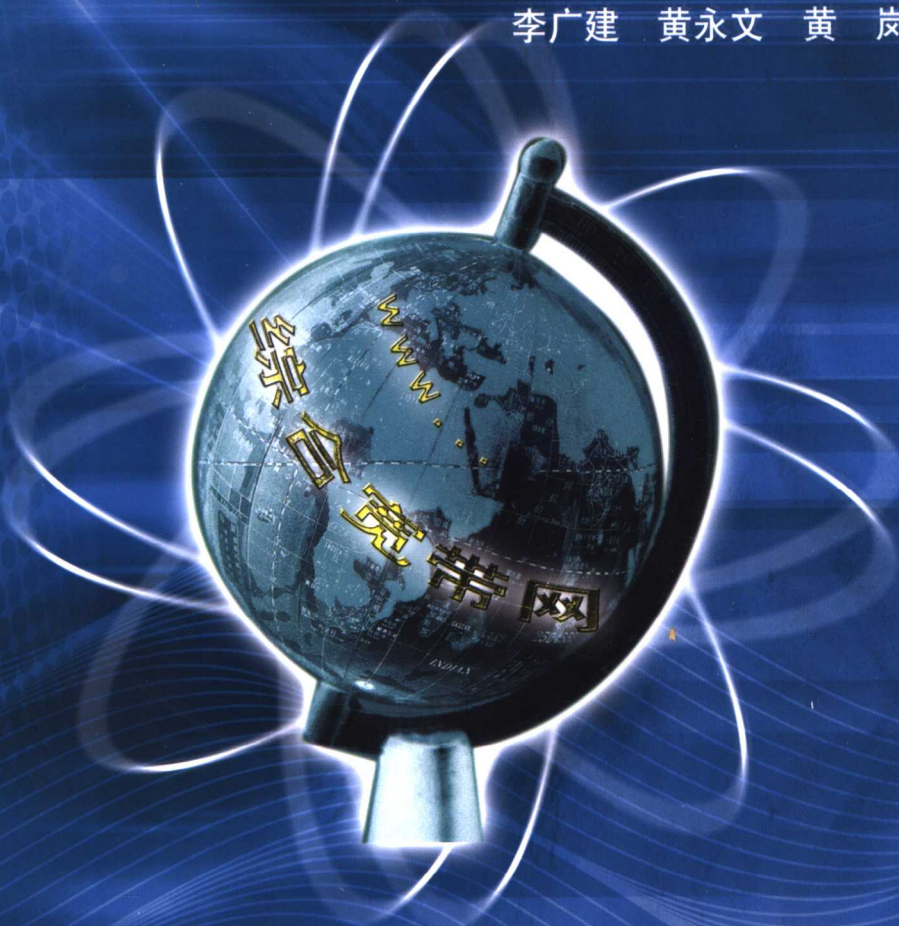


综合宽带网

**Integrated Broadband Networks:
TCP/IP, ATM, SDH/SONET, and WDM/Optics**

[韩] Byeong Gi Lee Woojune Kim 著

李广建 黄永文 黄 岚 译



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

综合宽带网

Integrated Broadband Networks:

TCP/IP, ATM, SDH/SONET, and WDM/Optics

[韩] Byeong Gi Lee Woojune Kim 著

李广建 黄永文 黄 岚 译

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书从通信网的角度探讨 IP 技术, 涵盖了 IP 技术与当前综合宽带通信网建设的最新内容。这是从事通信和网络领域的设计及管理工作的专业人员所必须了解的。

本书详细介绍了数据通信和计算机通信网的基本知识, 具体分析了 TCP/IP 体系结构、基本原理以及高层应用。书中重点讨论了 IP 技术的一些新进展, 内容包括 TCP/IP, ATM, SDH/SONET, WDM/Optics 等关键技术, 同时还讨论了 IP 宽带网建设与“三网合一”问题。

本书可供从事通信工程、网络工程管理的技术人员以及实际工作者了解宽带网络的发展, 也可供高等院校的相关专业师生参考。

2003 © Artech House, Inc.

685 Canton Street, Massachusetts 02062 USA

本书中文翻译版专有出版权由 Artech House Inc. 授予电子工业出版社, 未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2002-2747

图书在版编目(CIP)数据

综合宽带网/(韩)李云基(Byeong Gi Lee), 金伍柱(Woojune Kim)著; 李广建, 黄永文, 黄岚译.

—北京: 电子工业出版社, 2005.1

书名原文: Integrated Broadband Networks: TCP/IP, ATM, SDH/SONET, and WDM/Optics

ISBN 7-121-00591-3

I. 综… II. ①李… ②金… ③李… ④黄… ⑤黄… III. 宽带通信系统—综合业务通信网 IV. TN915.142

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 121074 号

责任编辑: 许 楷

印 刷: 北京天竺颖华印刷厂

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

经 销: 各地新华书店

开 本: 787×1092 1/16 印张: 22 字数: 563.2 千字

印 次: 2005 年 1 月第 1 次印刷

印 数: 4 000 册 定价: 35.00 元

凡购买电子工业出版社的图书, 如有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系。
联系电话: (010) 68279077。质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

序 言

近年来,所有通信网络中的数据业务均呈现出指数级的增长速度。因特网最早提供的服务是电子邮件和简单文件传输服务,经过扩展,目前已包括基于万维网(WWW)的信息服务和新型多媒体流服务,新型多媒体流服务除了传送数据外还能传送视频和音频信息。服务的增加推动了网络带宽的增加,网络带宽的增加又促进了实现以往根本不可能有的新型应用,进一步推动了网络服务的发展。

网络发展过程涉及到多种技术,但其中最基础的技术是 TCP/IP(传输控制协议/网际协议)、ATM(异步传输模式)以及 SDH/SONET(同步数字体系/同步光纤网)和 WDM(波分复用)等新型光纤技术,可以利用这些技术构建新型的宽带网络。TCP/IP 是促使因特网产生的关键技术,TCP/IP 在不同类型的物理链路和设备中应用的灵活性是其被广泛使用的驱动力。ATM 是由电话网发展起来的另一种关键技术,这种技术能够可靠、灵活地支持恒定比特速率(CBR)及可变比特速率(VBR)的服务。作为基础传输技术,光纤技术 SDH/SONET 和 WDM 对当前和未来的网络都很重要,它们能根据带宽的需要加以扩展并且有更强的生命力。特别是考虑到新型 WDM 器件和系统的发展,光纤技术业已成为网络带宽增加的基本推动力。

通常情况下的通信网络是对上述几种基本技术的结合使用。事实上,基于 ATM 的 IP 网(IP over ATM)、基于 SDH/SONET 的 IP 网(IP over SDH/SONET)以及基于 WDM 的 IP 网(IP over WDM)均为当前的热门话题。网络运营商使用多种技术来获得技术优势。例如,光波分复用网络能提供很大的带宽,IP 能提供便于应用程序开发的已经定义的用户应用程序接口(API)。SDH/SONET 能提供置换保护以及网络可靠性,ATM 则能提供服务质量(QoS)保障和灵活性。

理解好 TCP/IP、ATM、SDH/SONET 和 WDM/Optics(WDM/光纤)及其相互关系/相互综合,并不是一件简单的事情。需要有一本书能提供理解这些技术的基本差别和系统化框架,并比较这些技术的优点与不足。本书旨在以综合的方式探讨主流技术的发展变化,从而满足上述需求。

因此,本书按“技术—功能”的脉络介绍关键的网络技术。每一章涉及一种技术,从不同的功能角度对其进行分析,考察各种技术如何解决网络技术所必须解决的基本问题。本书论述的主要内容包括:协议的分层和基本体系结构,如何处理路由选择、交换以及复用等问题,可以使用的网络控制方法,以及通信管理技术。此外,本书还在可能的情况下论述了如何为各种特定技术提供 QoS。但对光网络技术,著者只探讨诸如分插复用、交叉连接以及网络可靠性之类的传输问题。著者相信,基于功能对网络技术进行研究,有助于读者综合理解宽带网。另外,读者应该认识到,网络工程既简单又复杂,说它简单是因为所提出的问题对所有的网络技术来说基本上都是相同的,说它复杂是因为对这些问题的回答会因所使用技术或用户要求的不同而有所不同。

本书首先按“技术—功能”的脉络以综合和系统的方式论述宽带网的关键体系结构和技術,将各种组成技术综合起来,实现基于光网络的 IP 通信。著者希望本书能成为快速发展的宽带网络领域中有一价值的指导书,帮助研究人员和实际工作者了解宽带网络的发展。

目 录

第 1 章 导言	(1)
1.1 技术推动力	(1)
1.2 历史与现状	(2)
1.2.1 因特网和 TCP/IP	(2)
1.2.2 ATM 技术	(3)
1.2.3 SDH/SONET	(4)
1.2.4 WDM/Optics	(6)
1.2.5 当前进展	(7)
1.3 本书的组织	(8)
第 2 章 网络框架	(10)
2.1 分层	(11)
2.1.1 分层的优点	(11)
2.1.2 分层的实例	(12)
2.1.3 分层的问题	(16)
2.2 路由选择	(16)
2.2.1 路由选择的方法	(16)
2.2.2 路由选择中的问题	(17)
2.2.3 路由选择的实例	(18)
2.3 复用和交换	(18)
2.3.1 复用功能和交换功能	(18)
2.3.2 复用和交换的实例	(19)
2.4 网络控制	(20)
2.4.1 网络管理功能	(20)
2.4.2 信令	(21)
2.4.3 网络管理的实例	(21)
2.5 通信管理	(23)
2.5.1 通信模型和通信合同	(23)
2.5.2 通信控制机制	(24)
2.5.3 拥塞控制	(24)
2.5.4 容量规划和通信工程	(25)
2.6 QoS	(25)
第 3 章 TCP/IP	(27)
3.1 概念、分层和体系结构	(27)
3.1.1 特征和设计原理	(27)
3.1.2 TCP/IP 的结构	(28)
3.1.3 网络层协议	(30)
3.1.4 传输层协议	(33)

3.2	路由选择	(36)
3.2.1	IP 报文分组的路由选择	(36)
3.2.2	TCP/IP 网络中使用的路由选择协议	(42)
3.3	交换和复用	(45)
3.3.1	LAN	(45)
3.3.2	LAN 的互连和第二层交换	(47)
3.3.3	第三层路由器和 LAN 分段	(48)
3.3.4	第四至七层交换	(51)
3.3.5	IP 交换、标记交换和 MPLS	(52)
3.4	网络控制	(57)
3.4.1	RSVR 的结构特征和基本操作	(57)
3.4.2	RSVP 消息和性能保证	(59)
3.4.3	RSVP 的特征	(61)
3.5	通信管理	(62)
3.5.1	TCP 拥塞控制机制	(63)
3.5.2	主动队列管理	(65)
3.5.3	调度器	(67)
3.6	QoS	(69)
3.6.1	IntServ	(70)
3.6.2	DiffServ	(71)
第 4 章	ATM	(76)
4.1	概念、体系结构和分层结构	(76)
4.1.1	ATM 的特征	(76)
4.1.2	ATM 体系结构	(77)
4.1.3	ATM 分层结构	(80)
4.2	路由选择	(91)
4.2.1	寻址	(92)
4.2.2	PNNI 路由选择	(93)
4.3	复用和交换	(97)
4.3.1	ATM 交换功能	(97)
4.3.2	ATM 交换机结构	(98)
4.3.3	点对多点交换	(104)
4.4	网络控制和管理	(105)
4.4.1	ATM 网络的信令	(105)
4.4.2	ATM 操作和管理	(109)
4.5	通信管理	(113)
4.5.1	基本概念	(113)
4.5.2	通信管理组件	(114)
4.6	QoS	(121)
4.6.1	通信合同与 QoS	(121)

4.6.2	一致性与符合性	(124)
4.6.3	其他各种问题	(124)
第 5 章	SDH/SONET	(125)
5.1	概念与体系结构	(126)
5.1.1	分层的概念与帧结构	(126)
5.1.2	PDH、SDH 和 SONET	(128)
5.1.3	分层网络	(132)
5.2	复用	(134)
5.2.1	STM- <i>n</i> 帧结构的组织	(134)
5.2.2	中间信号元	(138)
5.2.3	同步复用过程	(141)
5.3	同步	(148)
5.3.1	通过指针调整进行同步	(148)
5.3.2	指针抖动	(152)
5.3.3	网络同步和定时	(152)
5.4	分插和交叉连接	(153)
5.4.1	线路终端	(153)
5.4.2	ADM (分插复用器)	(153)
5.4.3	DCS (数字交叉连接系统)	(154)
5.5	网络管理	(157)
5.5.1	OAM	(157)
5.5.2	OAM 信号的应用	(158)
5.5.3	同步管理网络	(160)
5.6	网络生存性	(160)
5.6.1	保护和恢复	(161)
5.6.2	点对点的链路保护	(162)
5.6.3	SHR (自愈环网络)	(163)
5.6.4	网状网络的恢复	(167)
5.6.5	基于 SDH/SONET 的 ATM 的生存性	(168)
第 6 章	WDM/Optics	(170)
6.1	概念和分层	(170)
6.1.1	光网络的发展历程	(170)
6.1.2	波分复用 (WDM)	(172)
6.1.3	光层	(172)
6.2	实现技术	(174)
6.2.1	光纤	(174)
6.2.2	激光器和探测器	(178)
6.2.3	光放大器	(181)
6.2.4	耦合器和隔离器	(184)
6.2.5	开关和光转换器	(185)

6.2.6	波长复用器和滤波器	(190)
6.3	网络体系结构	(193)
6.3.1	广播选择网络	(194)
6.3.2	WRN	(197)
6.3.3	线性光波网络	(200)
6.3.4	网络拓扑设计	(202)
6.4	分插和交叉连接	(204)
6.4.1	OLT	(204)
6.4.2	OADM	(205)
6.4.3	OXC 光交叉连接器	(206)
6.5	网络管理	(208)
6.5.1	操作管理维护 OAM	(208)
6.5.2	网络生存性	(209)
6.5.3	环状网络保护	(211)
6.5.4	网状网络恢复	(214)
6.6	OTN 光传送网	(215)
6.6.1	概念和体系结构	(215)
6.6.2	复用过程	(217)
6.6.3	成帧和封装	(218)
6.6.4	OAM 和操作维护管理	(220)
第 7 章	IP 与 ATM 的综合	(222)
7.1	概念与结构	(222)
7.1.1	经典 IPoA	(224)
7.1.2	NHRP	(227)
7.1.3	LANE	(230)
7.1.4	MPOA	(237)
7.1.5	I-PNNI	(243)
7.1.6	基于 ATM 的 MPLS	(243)
7.1.7	基于 CLSF 的数据服务	(246)
7.2	路由选择	(249)
7.2.1	覆盖模型与路由选择	(249)
7.2.2	集成模型与路由选择	(253)
7.3	复用与交换	(254)
7.3.1	封装与复用	(254)
7.3.2	ATM 信元税问题	(255)
7.4	网络控制	(256)
7.4.1	用 VC 传输 TCP/IP 通信流的几个基本问题	(257)
7.4.2	经典 IPoA 和 NHRP 的信令支持	(259)
7.5	通信控制	(261)
7.5.1	ATM 信元丢失对 TCP/IP 性能的影响	(261)

7.5.2	对 TCP/IP 通信流使用 ABR	(263)
7.6	QoS	(266)
7.6.1	覆盖模型与 QoS 支持	(267)
7.6.2	集成模型与 QoS	(271)
第 8 章	IP 网络与光网络的综合	(273)
8.1	概念	(273)
8.1.1	OXC 和 LSR	(274)
8.1.2	分层结构和封装模型	(275)
8.1.3	数据平面和控制平面	(276)
8.1.4	控制平面的信令模型和路由选择模型	(277)
8.1.5	光域业务互连、光联网论坛和 IETF	(278)
8.2	体系结构和路由选择模型	(279)
8.2.1	服务模型	(280)
8.2.2	互连和路由选择模型	(281)
8.2.3	端对端的保护问题	(283)
8.2.4	控制平面的其他问题	(283)
8.2.5	发展过程和其他问题	(286)
8.3	分层和封装	(287)
8.3.1	IPoA	(289)
8.3.2	IPoS	(292)
8.3.3	IPoW	(294)
8.3.4	IPoW 的新成帧方法	(296)
8.4	路由选择	(303)
8.4.1	光网络中的路由选择	(303)
8.4.2	现有路由选择协议的扩展	(307)
8.5	交换和复用	(308)
8.5.1	OTPN	(309)
8.5.2	OBS	(310)
8.6	信令和控制	(312)
8.6.1	G-MPLS 与 IETF 的信令协议和控制协议	(312)
8.6.2	OIF 的 UNI 信令协议	(316)
8.6.3	ODSI 的信令和控制协议	(318)
8.6.4	用 G-MPLS 作为 SDH/SONET 的控制平面	(320)
8.7	通信管理与 QoS	(321)
8.7.1	通信工程	(322)
8.7.2	差分光通信服务模型	(323)
缩略语		(327)

第1章 导 言

当今世界正处于信息革命的时代。在这场信息革命中,起推动作用的是两项已有的发明,一项是 19 世纪电话的发明,另一项是 20 世纪诞生的计算机。上述两项发明在 20 世纪最后 10 年融合起来,引发了人类历史上的第三次革命,也就是所谓的信息革命。

在当今的日常生活中,信息革命以多种方式展现出来。最显著的一个就是 WWW,即通常所说的 Web——已经广泛地进入了人们的日常生活之中。Web 最初是由欧洲原子能研究组织 (CERN) 开发的,目的是使物理学家们能更容易地共享信息。图形用户界面、Mosaic 以及后来的 Netscape 浏览器的出现,使得 Web 成为了普通人日常生活的一部分。目前,我们正进入这样一个时代:Web 无处不在,人们可以随时随地接入 Web。从用户友好的角度看,因特网网吧的广为流行就是一个例子,诸如新的无线应用协议 (WAP) 电话与 NTT DoCoMo 公司的 I-Mode 电话之类的 Web 接入则是一个更为先进的例子。此外,起到 Web 服务器作用的智能家电也正朝这个方向发展。事实上,各种家电将来都将能够接入 Web。所有这些又促使了电子商务的出现。应该注意,近来“.com”革命的基础在本质上具有这样的观念,即未来的商务活动将与因特网密切相关。

以上所讨论的发展历史全部是以数据通信为基础的,数据通信牢固地根植于计算机当中。数据是一种单一媒体的信息表现形式,语音是不同于数据的另一种更传统、更普遍的单一媒体表现形式。视频是对声音进行补充的又一种单一媒体表现形式。随着计算机与通信技术的结合,人们为将数据、语音和视频结合到一起做出了巨大的努力,并由此产生了多媒体通信。具体地说,作为声音和数据相结合的结果,基于 IP 的语音传输 (VoIP) 技术最终在 20 世纪 90 年代末开始流行。VoIP 技术虽然表现为单一媒体通信,但实际上是通过在数据传输线路上传输语音流,而将实时的语音流与数据传输线路结合到一起的。VoIP 最初得以流行的原因是可以廉价地打长途电话,但是导致了一种富有特色的、比以往功能更加强大且更加灵活的电话技术的产生。

Web 和多媒体通信提高了基础通信网络的带宽要求,同时也促使与带宽增加有关的其他网络技术向前发展。这些技术涉及到通信的基本范畴,包括网络结构、路由选择、网络管理和信号处理等。

1.1 技术推动力

上述革命的背后都有哪些基本技术推动力呢?通常认为有 3 个主要的推动力,它们是 IP 技术、ATM 技术和光网络技术。

第一个推动力是非常普及的 WWW/因特网及其基础技术,即 TCP/IP (传输控制协议/因特网协议) 网络协议族。事实上,在 WWW 技术普及以前,因特网就已经有了飞速的发展。在因特网的早期,电子邮件是 TCP/IP 协议族中“最招人喜爱的应用”。电子邮件是在因特网发展的早期发明的,现已成为受到所有用户欢迎的首要应用之一。但是,因特网发展过程中真正引起轰动的是 WWW。随着 WWW 的全球化发展,基础协议族 TCP/IP 业已有了广泛的应

用,从台式机到网络设备,再到移动电话,都有基础协议族 TCP/IP 的应用。这就使得 TCP/IP 最终成为所有网络中使用的惟一通信协议。

第二个推动力是异步传输模式 (ATM) 技术的发展及其广泛应用。ATM 最初是由电话服务提供商和设备供应商开发和应用的,目的是将可变比特速率 (VBR) 和恒定比特速率 (CBR) 的所有服务集成起来。目前,ATM 已经成为一项成熟、稳定、具有很多先进特征的技术。例如,网络运营商就在很大程度上得益于 ATM 的通信工程性能。不过,最经常被提到的优势还是 ATM 对服务质量 (QoS) 的内部支持,这一点很明显,也是传统 TCP/IP 协议族所欠缺的。¹虽然 ATM 还未普遍占据主要的数据业务市场,但已被许多电话公司和其他通信提供商广泛接受和采用,成为将传统的语音服务与新的数据服务集成起来的一种可靠的基础。

第三个推动力是光网络技术的革命,这场光网络技术革命是由 SDH/SONET (同步数字体系/同步光纤网) 和 WDM/Optics (波分复用/光纤) 引发的。这场信息革命是建立在比特基础上的,光为比特的传输提供了介质。以铜质导线为基础的传统传输技术在带宽和传输距离方面都有局限性。到目前为止,已知的能够传输更大量数据比特的惟一可行方案就是采用光网络技术。目前光网络技术的基础是激光和光纤,主要应用于点对点的连接。这种技术基本上被看做一种传输技术而非网络技术。最早基于光网络技术的解决方案是 SDH/SONET。SDH/SONET 最初是为了整合现有的传输信号,用来包容北美和欧洲的数字语音分级信号。复合的数字信号被转换为宽带光信号,每秒可达数吉比特。光网络 WDM 技术的出现又加强了 SDH/SONET 宽带整合能力。尽管 WDM 系统是作为 SDH/SONET 光链路的延伸而产生的,但它目前已发展成为下一代全光网络。

1.2 历史与现状

要对当前和今后的技术发展趋势有全面的认识,很重要的一个方面就是要了解当今的技术现状。1.2.1 节至 1.2.5 节简要回顾了 TCP/IP、ATM、SDH/SONET 和 WDM/Optics 这 4 种主要网络技术的历史和现状。

1.2.1 因特网和 TCP/IP

1961 年,RAND 公司的 Paul Baran 对设计能经得起核攻击的通信网络问题进行了研究。从那时起就提出了存储转发报文分组交换的构想。报文分组交换技术主要有 3 个优点:第一,报文分组交换技术能够有效地利用已有的传输设备;第二,这种技术提供了使用重传机制方面的可靠性;第三,在网状结构的网络中,即使一条链路或者一个结点因受攻击而毁坏,报文分组交换技术仍然能够保证通信的畅通。

Baran 的构想被搁置了好多年,直到后来美国国防部高级研究计划署 (DARPA) 决定利用这个构想来组建一个由不同厂商的高级计算机以及遍布全国的研究人员构成的网络。当时将报文分组交换技术选定为连接多个计算机并使分散的科学家们能共享计算机资源的最佳方法。这个网络于 1966 年提出,于 1969 年在几所大学和几个大公司之间建成。这些单位提出了因特网的基本想法和应用,包括远程登录 (Telnet)、文件传输协议 (FTP)、流量控制、分散路由等。这个网络最初连接了美国的 4 所大学,被称为高级研究计划署网络 (ARPANET)。

¹ 遗憾的是,尽管 ATM 支持 QoS 的能力已经成为了多种关键 QoS 思想的重要催化剂,但在实际的网络中没有被真正地应用。

ARPANET 起初仅仅是一个单独的网络，但它的思想不久就被应用到了其他的网络中，并且，为了支持不同网络之间的互连，还提出了网关的概念。这就是因特网即网中网结构的基础。在这个阶段，人们对网络结构做出了某些更为关键的决定。首先，应该以分布式的方式对网络进行管理；其次，网络规模应该能灵活变化；第三，在任何底层技术上几乎都应该能使用基本的 IP 报文分组协议。这些决定在今天仍然是因特网的基础，事实上，这些决定对因特网在过去 10 年中的长足发展起到了重要作用。

20 世纪 70 年代后期，还设计出并使用了基本的 TCP/IP 协议。1978 年，TCP/IP 作为“最佳”联网协议被美国政府官方所采纳。到了 80 年代，全美国已经有了大约 10 个基于 ARPANET 的网络。也就是在那个时候，美国国家科学基金会（NSF）同意资助建立一个基于 TCP/IP 协议的、可以连接全国众多大学和研究机构的国家骨干网。到了 1995 年，因特网已经发展到了这样的地步：联邦政府可以不再对这个网络进行资助了，于是，骨干网便很快交由私人公司运营。当然，从那时起，WWW 也出现了，因特网的使用得到了爆炸性的扩张。

在提出 TCP/IP 的同时，许多公司也在开发其他报文分组网络方案。其中有代表性的方案便是 IBM 公司开发的系统网络结构（SNA）和 DEC 公司的 DECnet。这两者作为基于大客户的专用网络技术是很成功的。但是，由于 WWW 使因特网在世界范围内广泛普及，许多用户都逐渐转向开发标准的 TCP/IP。尽管如此，由这两家公司所提出的许多重要联网概念和技术，例如，流量控制、拥塞避免以及链路状态路由选择协议等，在今天仍然发挥着根本性的作用。

在小型网络方面，于 20 世纪 70 年代和 80 年代提出了多种局域网（LAN）技术。其中现在已经广泛普及的有令牌环网、令牌总线以及光纤分布式数据接口（FDDI）局域网技术，最著名的一项技术是 70 年代美国施乐公司帕洛-阿尔托研究中心（Xerox PARC）的 Metcalfe 所提出的以太网（Ethernet）。与此同时，还出现了个人工作站、图形用户界面（GUI）以及鼠标。最初提出以太网的目的是简便且廉价地连接由 PARC 研制的个人工作站。以太网的基础是带冲突检测的载波侦听多路访问（CSMA/CD）技术，CSMA/CD 技术是 ALOHA 协议的一种高级版本。以太网速率可达 10 Mbps，因而有十分广泛的应用，而且，近年来以太网的速度可提高至 100 Mbps 甚至 1 Gbps。随着交换集线器（或第二层交换机）的开发应用，以太网技术已部分地克服了因本身共享介质所带来的规模扩展问题。

WWW 的概念来源于 20 世纪 50 年代由 Vannevar Bush 所构想的超文本机器。这种机器可以用句子中的关联把多个文档链接起来。WWW 最初由欧洲原子核研究组织的 Tim Berners-Lee 设计并构建，用来帮助物理学家们进行信息共享。WWW 技术包括 3 个重要的组成部分：统一资源定位符（URL），它是一种对因特网上的资源进行统一定位的方法；超文本标记语言（HTML），它是用来描述文档的通用标记语言标准（SGML）的一个子集；超文本文件传输协议（HTTP），它是一种在因特网上传送 HTML 文档的方法。WWW 迅速普及，尤其是在伊利诺大学的一些学生开发了 Mosaic 浏览器后更是如此，Marc Anderson 是这些学生中的一员，他后来创建了 Netscape 公司，Netscape 公司在因特网历史上第一次真正获得了成功。

1.2.2 ATM 技术

1968 年，贝尔实验室的 W.W.CHU 最早提出了异步时分复用（ATDM），目的是实现快速多路传输。W.W.CHU 的方案是使用加入时隙的报头。A.G.Fraser 意识到，如果报头也可以进行交换，这项技术还可以用来建立快速交换的网络。根据这个想法，Fraser 于 1972 年开发了 Spider，首次提出了虚拟电路和小型定长报文分组的概念。在 Spider 思想的基础上，

Fraser 经过多次改进又开发出了 Datakit。Fraser 认识到，如果网络端点是服务专用的并且带有固定的内部交换背板，就可以按一种格式在网络上传送声音和数据。从技术角度来看，Spider 和 Datakit 在很多方面都与 ATM 相同，包括使用虚拟电路、小型定长报文分组以及统计复用。

20 世纪 70 年代末期，全球电话公司的工程师们都预测到未来的通信用户不仅需要语音通信，而且还需要视频和数据通信。作为对这种预测的响应，国际电报电话咨询委员会（CCITT，1993 年重组为 ITU-T）开始研发可以将声音、图像和数据信号整合成一种格式的技术，并制定了包含综合业务数字网（ISDN）在内的标准。这种标准化工作的基本产品为 144 kbps 的基本接入速率以及 1984 年公布的 DS-1 接入速率（具体地说，北美的数字系统为 1.536 Mbps，欧洲的数字系统为 1.920 Mbps）。基本接入具有 2 个 64 kbps 信道和 1 个 16 kbps 信道，这就是所谓的“2B+D”信道，其中可以映射进声音、图像以及数据信号。20 世纪 80 年代，ISDN 标准曾一度是通信领域中最流行的关键词汇，但还没有来得及看到其实际的应用，就随着宽带 ISDN（B-ISDN）标准的出现而逐渐消亡了。90 年代末期，由于因特网的普及刺激了对高速本地数字链路的需求，ISDN 有短暂的复苏。不过，这种现象因数字用户线（DSL）技术和有线调制解调器的普及而没有维持多久。

始于 20 世纪 80 年代中期的 B-ISDN 标准化工作，最初的目的是为了将 ISDN 扩展成能适应诸如视频电话和远程会议之类的宽带服务，但是后来 SDH/SONET 的标准化对 B-ISDN 标准化（CCITT 也曾承担了 B-ISDN 的标准化工作）产生了相当大的影响。此外，ATDM 技术也对 B-ISDN 标准化有显著的影响，从而诞生了一种新的通信方式——ATM。例如，ATM 通信 155.52 Mbps 的传输速率源于 SDH/SONET 的 STM-1/OC-3 信号的传输速率，而利用定长报文分组和统计复用来传送综合信息则源于 ATDM 技术。另外，Bellcore 的 Sanghoon Lee 在 1988 年提出的动态时分复用（DTDM）技术对 ATM 标准的建立也作出了很大贡献。DTDM 的信元级宽带传输构架解决了 ATDM 技术的时隙同步问题。

尽管 ATM 标准化工作以及后续的产品开发都非常成功，但实际使用却因为光纤的使用和 ATM 设备安装方面的耽搁而延迟了很长时间。同时，许多计算机公司的工程师们因为多种原因都认识到 ATM 作为数据网联网技术是非常实用的。首先，从根本上讲，ATM 是一种分组报文交换技术，工程师们因以太网而对这种技术非常熟悉。与当时只能提供 10 Mbps 速度的以太网相比，ATM 可以提供了可扩展的高带宽。同时，ATM 带宽颗粒度不受限制，而传统的电路交换则固定为 64 kbps。再者，ATM 具有支持语音、图像和数据的固有能力，ATM 从一开始就是为进行这种支持而设计的。所以，计算机销售商和电信服务提供商们在 1991 年组织了 ATM 论坛，这是一个以制造业为主的联盟，目的是加速 ATM 产品的开发和 ATM 服务的普及。这个联盟不断发展壮大，成为多个 ATM 标准的主要推动力量，并且通过与其他正式标准化组织的紧密合作，ATM 论坛还制定了许多与 ATM 有关的规范。ATM 论坛所制定的多项规范中包括与信号处理、物理分层以及各种互连类型有关的标准。另外，因特网工程任务组（IETF）也制定了与几个 IP 协议族有关的 ATM 标准。

1.2.3 SDH/SONET

1982 年，Jan D. Spalink 和 AT&T 贝尔实验室的一个具有前瞻性的研发小组开始开发 Metrobus，这是一个采用内同步模式的光传输系统。Metrobus 的主要目的是开发出这样一种最佳通信系统，这种系统能充分利用光通信和通信网络、设备技术以及服务领域中的最新技

术。顾名思义, Metrobus 最初是为了容纳城市范围内的所有通信服务而开发的。在 Metrobus 系统的开发过程中, 引入了许多新的通信概念和技术。其中最具代表性的有: 点对多点的光网络、内同步操作、零级数字信号 (DS-0) 在外部信号帧中的可视性、一步复用、通过对容器数量进行控制来同步包含支路、以 150 Mbps 为内部信号标准、开销最大利用等。Metrobus 系统于 1987 年开发完成并首次投入官方的应用, 但其商业运作由于标准化方面的失误而没有跟上。

在那个时候所有光通信系统采用的都是点对点通信, 因此, 点对多点的光网络概念的首次引入, 被认为是一次革命。另外, 一步复用是那时的另一个革命性的概念, 一步复用技术在那时能将 1.544 Mbps 的 DS-1 信号直接复用为 150 Mbps 的内部标准信号, 而不必逐级复用为 DS-2 和 DS-3 信号。上述两个概念对有效地形成光网络的分插和交叉连接能力作出了贡献。

Metrobus 的另一个关键概念是将 150 Mbps (准确讲是 146.432 Mbps) 选定为通信网络的内部标准。这既适应北美和欧洲所有已有的层次型支路, 又使得用户能充分利用其他辅助技术。事实上, 150 Mbps 的信号速率能够包容从 1.544 Mbps 的 DS-1 到 139.264 Mbps 的 DS-4E 这个范围内的所有信号。从业务应用的角度看, 150 Mbps 的速率适合所有声音、数据和图像信号 (包括经过压缩的 HDTV 信号), 而且互补金属氧化物半导体 (CMOS) 技术能很容易地应用这个速率。从用户的角度看, 用这个速率来传输数据, 可以用光发射二极管 (LED) 和针孔二极管来代替激光二极管和雪崩光电二极管 (APD), 而且用分级指数多模光纤来代替单模光纤, 可以提高光纤的耦合效率。

内同步操作的引入是同步通信网络的开端。内部标准通信网被设计成为特定的城域服务, 因而可适当地用来与城域内准同步的邻居结点进行通信。时钟信号可以选自基准同步参考频率 (BSRF)、本地振荡频率和源于接收到的信号中的频率。

DS-0 信号在外部信号帧中的可视性可以说是采用 125 μ s 帧结构的直接结果。换句话说, 如果以 125 μ s 为单位来构建帧结构并将支路信号映射进相应的容器, 那么按 8 kbps 采样率得到的 DS-0 信号就是透明的, 或者, 可从高阶信号中直接访问该信号。因此, 可以从 150 Mbps 的内部标准信号中高效地抽取出 64 kbps 的 DS-0 信号。

1984 年底, Bellcore 的 Rodney Boehm 和 Yau Chau Ching 向北美 T1 委员会提出了一种称为 SONET 的同步光传输系统。起初, SONET 具有 50.688 Mbps 的比特速率, 目标是实现“中跨对接”。当时, 人们对这个目标能否实现持怀疑态度。所以, 早期 SONET 的标准化工作几乎没有什么进展。但是, 1985 年 9 月 Metrobus 的面世使得这项工作又得以大力开展, 并且在这个过程中, 对原来的 SONET 方案做了一些创新性的改进。其中最引人注目的贡献当属由贝尔北方研究中心的 J. Ellson 提出的分层系统结构和指针同步的概念。此后, 又在帧结构和信号比特速率方面对 SONET 方案进行了改进, 比特速率从 50.688 Mbps 改成了 49.92 Mbps, 与贝尔实验室后来提出的比特速率为 146.432 Mbps 的以 Metrobus 为基础的提案形成了竞争。

T1 委员会对 SONET 与 Metrobus 这两个候选信号传输标准进行了激烈的争论, 最后 SONET 于 1986 年战胜 Metrobus 而成为标准。当时, CCITT 正致力于制定宽带光通道标准, T1 委员会则提议将源于 SONET 的 149.76 Mbps ($=3 \times 49.92$ Mbps) 信号作为北美标准。此后, SONET 的标准化在北美进展顺利, 甚至 1987 年初就进行了细节的标准化。但后来在速率为 51.84 Mbps (155.52 Mbps 的 1/3) 的 SONET 标准完成之前, CCITT 于 1988 年对 B-ISDN 接

口标准进行了全面的调整,进行了大量的修改。

SDH 可以用于不依赖用户-网络接口(UNI)的网络结点接口(NNI),1986年6月,CCITT 开始制定 SDH 标准。这是迈向 SDH 全面标准化的第一步,为此,T1 委员会和 CCITT 保持了紧密的合作。为了制定 STM-1 信号标准(STM-1 信号标准也是 B-ISDN NNI 标准化的重要核心),北美洲采用了 149.976 Mbps 比特速率和 $13 \text{ B} \times 180$ 的帧结构,而欧洲邮政电信管理委员会(CEPT)则提出了 $9 \text{ B} \times 270$ 帧结构和 155.520 Mbps 速率。经过多次激烈的讨论,最终在 1988 年将 $9 \text{ B} \times 270$ 帧结构选定为 STM-1 标准。这个标准是所有 SDH、SONET 和 ATM 的基础。这一决定又回到了 SONET 标准化工作上,在这项工作中,将 STS-1 信号的速率改为 51.84 Mbps。

Metrobus 对 SONET 的贡献以及 SONET 对 SDH 标准化的贡献,怎么强调都不过分。在 SDH 的众多技术优势中,点对多点光联网、内同步操作、利用 $125 \mu\text{s}$ 时间单位使 DS-0 信号可视、一步复用、通过控制容器数量包容复合速率的信号、建立 150 Mbps 的内部信号标准、灵活运用开销以增强网络的适应能力和可靠性等一系列思想均来自于 Metrobus。另外,分层系统结构、系统化的开销组织、通过指针实现同步、建立全球网络等都是 SONET 标准化工作的副产品。以此为基础,SDH 融合了北美和欧洲的数字体系,完成了漫长的标准化历程,最终成为一个全球性通信网络标准。

1.2.4 WDM/Optics

1950 年,激光刚一出现,研究人员首先考虑的是将激光应用于自由空间的高速光传输的可能性,这项计划后来被证明是不成功的。后来,随着低损耗光纤和半导体激光二极管的发明,人们发现可以在有线介质中更好地进行光传输。20 世纪 70 年代初期,这种可能性变成了现实,这时光纤的衰减已降到 20 dB/km 以下。80 年代初期,在美国的东海岸使用了第一个商用光通信系统,众多的制造商加剧了在光传输系统市场中的竞争。

20 世纪 90 年代,光通信的主要推进力是在更远距离上传输更高比特速率的开发技术。在这种情况下,光纤取代了铜传输介质,但对交换和传输的处理仍保持在电子领域。光传输没有标准,所有光传输系统都是专用的点对点的系统。这类简单的非标准系统一直持续到 90 年代出现了基于 SDH/SONET 的标准系统。同时,随着点对多点的光通信系统的研制,80 年代中期开发的 Metrobus 光通信系统经历了转折,为面向网络的同步光通信系统开辟了一个新领域,并导致了 SDH/SONET 系统的出现。

20 世纪 80 年代的 CCITT 标准化工作,产生了两个相当兼容的 SONET 和 SDH 光通信系统。这两个标准的光通信系统是根据点对多点的网络思想建成的,但其传输和交换过程仍然是在电子领域中进行的。在整个 90 年代,已经建成了这种基于 SDH/SONET 的第一代光网络,从此,这种系统构成了欧洲、亚洲和北美的电信基础设施的核心。第一代光网络有别于原始的光网络,这种第一代光网络是面向网络的,能有效而可靠地实现分插和交叉连接功能。

随着对宽带需求的增加,人们从两个方向寻求解决方案。第一个方向是增加传输比特速率,第二个方向是增加将用户信号复用到其中的光波长的数量。在第一种解决方案中,用电子时分复用(TDM)技术将多个低速数据流复用成高速数据流。在第二种解决方案即 WDM 中,将多种波长的光载波复用到一起,其中每个波长均承载着独立的比特流。由于 WDM 与 TDM 互不相关,故将这两种复用技术结合起来,使传输容量最大,是再平常不过了。

WDM 是一种将多个不同波长的光信号组合成一个光信号的技术, 频分复用 (FDM) 是同时复用载波频率不同的多种数据流的技术。从本质上说, WDM 与 FDM 是相同的, 只是用波长这一术语来代替频率一词。由于不同波长的光信号一般会彼此干扰, 所以, 如果波长离得太近, 就应该将用于 WDM 的波长完全分隔开。因此, 在早期的 WDM 技术中, 将波长的数量限制在 10 个左右, 目前则可通过将波长更紧密地结合起来而使用密集波分复用 (DWDM) 技术, DWDM 可以有更多数量的波长, 通常为 40 个波长或更多。

随着 WDM 光网络的发展, 可以用光分插复用 (OADM) 和光交叉连接 (OXC) 系统的形式增加波长路由选择功能。在这种第二代光网络中, 可以用光时分复用 (OTDM) 或 WDM 来增加传输容量, 并且可以用波长转换器系统来实现有效的分插和交叉连接功能。随着带宽变得越来越宽, 可以在光域中进行相关交换和路由选择处理。由于不需要进行重复的光-电和电-光转换, 因而采用光交换和路由选择装置要优于电子装置。在这种第三代光网络中, 光交换还可以进一步扩展成光分组交换或光猝发交换。所谓的全光网络就属于这种第三代光交换。

在 SDH/SONET 系统发展的同时, 光网络在 20 世纪 80 年代中期还在局域网领域中获得了成功。与 SDH/SONET 的情况不同, 这一进程试图将光通信模式从点对点的链路扩展至网状网络。第一种网络基本上是基于广播选择的网络, 典型的例子是 LambdaNet, 这种网络用可调激光和无源光耦合器来实现逻辑上的网状网络。后来, 又根据多跳和波长路由选择理论开发出了第二种网络。

即便是性能有限, 但今天仍然可以使用 OADM 和 OXC, 而且, 全光交换机、逻辑设备和存储设备也仍然处于实质性的发展过程中。结果是, 先进的光传输产品有广泛的应用, 同时先进的光联网产品在不久的将来预计也能得到应用。

1.2.5 当前进展

过去, 通信网络的发展趋势是网络传输的数字化。最近, 这种趋势已经转向了对数据服务加强支持, 表现在开发出了面向语音的电信网络来适应数据通信量的增长并提高数据网的带宽和覆盖率。网络业已进入了电话和数据网彼此相综合, 从而包容多种类型的宽带多媒体因特网服务这样一个阶段。

可以用 3 个关键词来描述最近的发展趋势, 分别是带宽、QoS 和无线。首先, 带宽需求的主要推动因素是因特网在商用和娱乐业方面的增长。目前, 许多商家都将因特网当做通信的基础, 产生了大量的电子邮件流、文档流以及其他形式的商业信息。但是, 随着 WWW 和因特网在普通用户中的普及, 我们已经看到了许多新的应用, 这些应用在音频、图片和视频方面非常丰富。这就使得诸如流式视频和流式音频之类的宽带多媒体服务被广泛采用。与通常的电子邮件或其他数据服务相比, 这些新型宽带服务基本上需要更大量的带宽。随着对带宽需求的增加, 人们广泛使用了诸如 SDH/SONET 和 WDM 之类的光传输技术。

除日益增加的带宽以外, 上述多种新型多媒体应用还需要 QoS 或延迟和/或带宽方面的保障。这是因为, 如果没有这样的保障, 这些应用就无法适当地或令人满意地发挥作用。典型的实例是 VoIP 和视频会议服务, 合理的延迟和带宽保障是使这些服务发挥作用的前提。具体地说, 在以时间为关键因素的应用中, 用户可能会愿意为获得优先服务付费。典型的例子是股票市场的短线交易人的数据处理。尽管这种应用可以没有保障, 用户在多数情况下还是愿

意为获得服务质量保障而支付额外的费用，因为，即使是耽搁一两秒的时间也绝对是危险的。对因特网服务提供商（ISP）和网络运营商来说，这种以时间为关键因素的应用会带来获得回报的新方式，这种新方式在现有的包费制中是不可能的。

最后，另一个重要趋势是无线革命。这种技术在本书中没有直接论及，它可以使通信不受时间和地点的限制，增加了通信服务的新领域。最近 10 年，移动通信在技术和用户数量方面都发展得非常快，甚至超过了因特网。无处不在的连接、移动性和个性化，所有这一切都使得蜂窝电话及同类产品获得了成功。最近，与传统的语音服务相比，数据服务已变得越来越重要。特别是，与因特网的无线连接有助于开展诸如实时股票报价、特殊位置的网络浏览和语音/电子邮件之类的服务。

笔者在无线革命方面的主要兴趣是无线革命是怎样影响网络基础设施的。目前无线设施的基础是租用线路和昂贵的通用网络（因为运营商需要有各地的基站）。要将网络优化到特别的程度，才能在不可预知的无线环境下传送语音。无线网络基本上是以电路为基础的，因而它无法有效地传送数据。但是很明显，通信量的增加主要是在数据领域。所以，必须对无线网络进行更面向报文分组数据的重构，并将 IP 技术引入到无线网的基础核心之中。这样，通过将控制机制从专用控制网转换成更开放的基于 IP 的控制模式，无线网络就能够更容易地进行 IP 通信并获得好的成本效益。此外，在网络边缘对数据需求的增加还导致对核心网带宽需求的增加。因此，无线革命还推动了 IP 技术和带宽要求的发展。

1.3 本书的组织

本书由三部分构成。第一部分涉及网络功能的框架，第二部分涉及宽带通信的技术组成，第三部分涉及宽带通信技术的综合。

第一部分的第 2 章，讨论了网络功能的框架，对基本的网络技术做了分析和比较。这一章包括 6 种基本网络功能——分层，复用和交换，路由选择，网络控制，通信管理，以及 QoS。分层是指如何将网络功能划分成多个组成层次，复用和交换说明了共享和交换网络资源的方法，网络控制讨论网络运营商或用户如何控制网络的运行，通信管理是指如何确保资源不被过度使用，QoS 则讨论了如何使得服务提供商向客户提供某种层次的服务。

在第二部分中，第 3 章至第 6 章根据第 2 章中建立的框架介绍并分析了 4 种基本网络技术——TCP/IP 协议族、ATM 技术、SDH/SONET 传输技术以及 WDM/Optics 技术。这 4 种技术作为前面所说的信息革命的驱动力，目前都致力于提供宽带服务。每种技术都为联网过程中存在的基本问题提供了不同的解决方案。每种具体技术都提出了自己的属于第 2 章“框架”中所讨论的 6 种原理的不同方面的专门解决方案。由于各种技术是彼此独立发展的，并且都从自身角度来研究各种问题，所以这些解决方案之间存在着交叉。但是，SDH/SONET 与 WDM/Optics 之间的交叉要少于 TCP/IP 和 ATM 之间的交叉。因为，与面向网络的技术相比，SDH/SONET 更加面向传输，并且与物理/光层更加无关。具体地说，在对 SDH/SONET 的讨论中，笔者增加了同步方面的主题；在对 WDM/Optics 的讨论中则增加了光组件技术，目的是为了照顾到各种技术的独特特征。同时，笔者没有讨论通信管理和 QoS 问题。

第三部分包括第 7 章和第 8 章，这一部分讨论了如何用不同的方式将 TCP/IP、ATM、SDH/SONET 和 WDM/Optics 这 4 种技术综合起来，并且讨论了每种综合形式的独特特征。在多数情况下，网络是混合的，是 TCP/IP、ATM、SDH/SONET 和 WDM/Optics 技术的混合体。