

多波长光网络

Thomas E. Stern

Krishna Bala 著

徐荣 龚倩 译



人民邮电出版社
www.pptph.com.cn

多波长光网络

Thomas E. Stern Krishna Bala 著

徐荣 龚倩 译

人民邮电出版社

内 容 提 要

本书对采用多波长光路来组网的光网络的基本原理、组成结构、关键技术、性能要求、组网技术等进行了全面系统的介绍。从网络分层结构出发分别论述了多波长光网络所涉及的网络分析、网络设计、网络控制和网络故障管理等技术的基本理论、基本结构和应用方法。用具体的网络实例由浅入深介绍了静态网络、波长选路网、线性光波网和逻辑选路网的结构、控制和设计的要素和策略。

本书与以往的光纤通信书籍有着本质的不同,以前的光纤通信书籍偏重于器件和系统,而本书侧重点是“网络”,是一本真正系统研究光网络的专著。

书中各章节的组织结构各有特色,适合不同的读者群参考。既可以作为电信专业的教材使用,也适合广大科技工作者、工程技术人员、教师、研究生和大学高年级学生阅读和参考。

多波长光网络

◆ 著 Thomas E. Stern Krishna Bala

译 徐 荣 龚 倩

责任编辑 陈万寿

◆ 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@pptph.com.cn

网址 <http://www.pptph.com.cn>

北京汉魂图文设计有限公司制作

北京顺义振华印刷厂印刷

新华书店总店北京发行所经销

◆ 开本:787×1092 1/16

印张:41.75

字数:1 043 千字

2001 年 4 月第 1 版

印数:1—4 000 册

2001 年 4 月北京第 1 次印刷

著作权合同登记 图字:01—2000—2480 号

ISBN 7-115-09100-5/TN·1692

定价:73.00 元

版 权 声 明

本书为 ADDISON – WESLEY 公司(Addison Wesley Longman, Inc. 的一部分)独家授权的中文译本。本书的专有出版权属人民邮电出版社。未经原版出版者和本书出版者的书面许可,任何单位和个人不得擅自复印、复制、摘录本书的部分或全部内容,以任何形式(包括资料和出版物)进行传播。

版权所有,侵权必究。

© 1999 Addison Wesley Longman, Inc.

本书原版版权属 Addison Wesley Longman, Inc.

本书原版书名 Multiwavelength Optical Networks A Layered Approach

作者 Thomas E. Stern Krishna Bala

作者简介

Thomas E. Stern 供职于哥伦比亚大学电子工程系, 历任电子工程系主任、电信研究中心技术主管和 CTR 光波网络研究中心主任等职务。Stern 教授是 IEEE 学会特别教授 (IEEE Fellow), 拥有多项发明专利, 并发表了上百篇关于网络和相关学科的研究论文。

Krishna Bala 是 Tellium 公司光网络系统方面的负责人, 也是交叉连接产品开发部经理。此前, 他是贝尔通信研究中心 (Bellcore) 的高级研究员, 主要负责多波长光网络结构的分析与研究。他在光技术和网络方面拥有多项专利, 并且在相关领域发表了大量的研究论文。在加入 Bellcore 之前, 他在哥伦比亚大学获得了博士学位, 研究方向是光网络中的路由技术。

专家的话

世纪更替,由于新技术革命的推动,经济全球化和社会信息化趋势日益明显。在以 IP 为代表的业务量井喷式增长和新型业务不断涌现所导致的巨大带宽需求的刺激下,全球通信网络主导业务正在由以话音业务为中心向以数据业务为中心过渡。与此同时,网络体系架构也正在向高速大容量和高质量服务方向飞速发展,其发展势头正猛烈冲击电信运营商原有的技术发展思路和运营策略。当电子设备逐步达到其物理极限时,波分复用(WDM)技术以其独有的技术优势和多波长特性,正在向人们展示通过波长通道进行联网的巨大潜力和光辉前景。

光纤作为一种很好的传输介质所具有的优良特性已被大家所共知,但是有一点必须注意,那就是只有当光纤通过适当的、合理的、科学的体系结构互联以后才能组成真正理想的网络体系结构,以提供高速、宽带、高质量的业务服务。利用多波长光路直接进行联网的光网络技术具有对信息传输码率、调制方式、传送协议等透明的优点,同时鉴于光纤所具有的巨大带宽潜力,因此只有多波长光网络才能满足当前和未来通信业务量迅速增长的需求,它必将成为组建下一代高可靠性、超大容量、超高速信息网络的核心技术并在世界范围的电信基础结构中扮演极其重要的角色。但光技术的发展是如此之快以至于未来信息基础架构将采用的光网络的具体结构组成至今依然还不清晰明了,另外在现有的关于光网络的技术文献和参考资料中,在论述光网络相关技术时都采用了一些十分抽象的、概括的,而且不太统一、不太标准的技术术语、语言描述乃至表示符号,因而使很多研究人员、工程技术人员、大专院校师生颇感迷惑。

徐荣等人翻译的《多波长光网络》一书,对采用多波长光路来组网的光网络基本原理、组成结构、关键技术、性能要求、组网技术等进行了全面系统的介绍和阐述。从网络分层结构出发分别论述了多波长光网络所涉及的网络分析、网络设计、网络控制和网络故障管理等技术的基本理论、基本结构和应用方法。然后由浅入深用具体的网络实例详细介绍和研究了静态网络、波长选路网、线性光波网和逻辑选路网的结构、控制和设计的要素和策略。其目的正是要展示给广大读者一种通用的研究、设计和分析光波网络的基本思路,因此无论将来网络如何来演化,这个基本思路和分析原理在具体的研究实践中都具有普遍的指导意义。译者既具有多年从事光网络研究的工作经历,又有参与多项国家重大高技术研究项目的实践经验,因而对该项技术把握比较准确、论述比较流畅。另外,本书与以往的光纤通信书籍有着本质的不同。以前的光纤通信书籍偏重于器件和系统,而本书侧重点是“光联网”技术,不仅技术性很强,而且具有很高的易读性,是一本不可多得系统讲述光网络相关技术的好书。

通过阅读《多波长光网络》,各类读者都可以很容易地从浅显易懂的光网络概念入手,迅速步入光网络世界,领略风光无限的光通信新技术,在光辉灿烂的光网络领域自由飞翔。

中国科学院资深院士

叶培大

2001年2月于北京

译者前言

通信在社会中的地位总是与信息的重要程度成正比的。20 世纪 70 年代,美国未来学家托夫勒在《第三次浪潮》中首次描绘了信息社会的美好前景,揭开了信息时代的序幕。在人类信步迈入新世纪的同时,以信息经济和知识经济为核心的“新经济”成为世界经济发展的最主要的增长点,因此,具有极丰富带宽资源和优越性能的多波长光通信网络因其在国家信息架构中的基石地位而倍受关注。

由于新技术革命的推动,经济全球化和社会信息化趋势日益明显。在全球信息化浪潮的冲击下,人类对通信的容量、业务的种类和通信的质量的要求更是有增无减。个人计算机和因特网(Internet)的普及、数据业务与电子邮件通信的飞速发展,使得社会对通信及信息的需求呈几何级数增长,并给今天的通信网络提出了革命性的要求和设想。人们设想在不久的将来可拥有一个更为理想的通信环境,即在任何时间、任何地点,可以使用非常便宜且安全的通信方式进行相互联系与交流,这个目标支持并推动着现代通信网络技术的不断演进和持续发展。此外,诸如可视图文、远程教育、远程医疗、电视购物、电视会议、高清晰度电视(HDTV)、交互式有线电视等数字或模拟图像通信新业务的出现,提出了进一步实现网络高速化和宽带化的迫切要求。高速宽带网络逐渐展示出它在信息技术中的核心地位。

通信业务量的爆炸式增长和对未来的理想通信形式的渴望,迫使人们不断提高网络的传输速度和交换容量。光纤通信的诞生成为通信史上的一次重要革命,它极大地增加了传输带宽。近年来由于波分复用(WDM)技术能用相对简单的技术充分挖掘光纤的可用带宽,且成本比较低廉,因此得到了迅猛的发展。目前已可实现同时传输上百个信道,单信道的传输速率可达 40Gbit/s,总的传输容量已经达到 7Tbit/s($176 \times 40\text{Gbit/s}$)或 6.4Tbit/s($80 \times 80\text{Gbit/s}$)的水平。在实验室,光纤通信传输容量正以每半年翻一番的速度增长。随着可用波长数的不断增加,人们发现波分复用技术不仅可以充分利用光纤中的带宽,而且其多波长特性还具有无可比拟的光通道直接联网的优势,因此为进一步组成以光子交换为交换体的多波长光网络提供了基础。

通过使用多波长光路来联网的光网络技术利用波分复用和波长路由技术,将一个个波长作为通道,全光地进行路由选择。通过可重构的选路节点建立端到端的“虚波长”通路,实现源和目的之间端到端的光连接,这将使通路之间的调配和转接变得简单和方便。在多波长光网络中,由于采用光分插复用(OADM)、光交叉互连(OXC)和光路由器/光交换机等设备,极大地增强了节点处理的容量和速度,它具有对信息传输码率、调制方式、传送协议等透明的优点,有效地克服了节点的“电子瓶颈”限制。因此,只有 WDM 多波长光网络才能满足当前和未来通信业务量迅速增长的需求。也正基于这些原因,近年来在国际上形成了对高速宽带光网络的研究热潮,其中尤以美国、欧洲最为突出。美国在国家先进研究项目计划署,即 DARPA 资助下,组成一系列协作集团,建设国家规模的全光网。欧洲正在实施 ACTS 计划。根据这一计划要建设连接欧洲各主要城市、直径 3000 公里的光纤通信网。与此同时,包括 ITU-T ANSI T1X1.5 协会、光互联网论坛 OIF(Optical Internetworking Forum)和 IETF(Internet Engineering Task Force)在内的标准化组织也都积极致力于对可重构型多波长光网络的研究。

高速、大容量信息网络是国家信息基础设施的核心,而多波长光网络由于波长可复用空间很大,对多种业务透明性很好,响应速度很快,能够满足宽带多业务的综合需求,同时光网络具

有抗电磁干扰和雷电影响的能力,因而具有高度的信息安全性。Lucent 光网络部总裁杰罗特·巴特斯(Gerald J. Butters)充满激情地说“光通信技术对 21 世纪来说,就像电对 20 世纪那样重要”。因此多波长光网络必将成为 21 世纪“光速经济”的基础和构造国家信息骨干网络的核心而发挥无比重要的作用。

面对光通信网络无比的优越性和日新月异的发展状况,以及为了摆脱阅读那些术语各不相同、表达不太标准、缺乏系统性的文献资料时所遇到的困难,广大科学研究人员、工程技术人员和高等院校师生迫切需要一本能够系统论述多波长光网络技术的参考书籍。为此我们翻译了 Thomas E. Stern 和 Krishna Bala 所著的《多波长光网络》一书。我们的宗旨是让读者能够对多波长光网络的基本概念、结构原理和组网设备在技术层面上有所了解。该书是世界上最早的关于使用多波长光路来联网的光网络专著之一,有着广泛的影响。作者 Thomas E. Stern 教授是哥伦比亚大学电子工程系主任和电信研究中心技术主管。作者 Krishna Bala 是 Tellium 公司光网络系统方面的负责人和交叉连接产品开发部经理。他们长期从事高速宽带光网络的研究,都是该领域的专家。

该书与以往关于光纤通信的书籍只论述器件和传输系统技术的方法有着本质的不同,它以广泛使用的波分复用技术为基础,重点从网络角度对目前已经步入商用化阶段的广域波分复用光网络技术进行了深入细致的阐述和研究。本书可以说是第一本以“多波长光路联网”技术为基础的主要面向“网络技术”的光通信网络参考书籍,它从多波长网络的分层结构出发着重论述了多波长光联网网络所涉及的网络分析、网络设计、网络控制和网络故障管理等技术的基本理论、基本结构和应用方法。通过学习本书,读者将精通用于光网络的专用术语、概念、技术和设备,还可以了解各种 LAN/WAN 光网络的分析、设计和组网技术。

本书用具体的网络实例详细介绍了每一种光网络的结构、网络控制和网络设计的要素和策略。在这本书中各章节的组织结构各有特色,适合不同的读者群参考。既可以作为电信专业的教材使用,也适合广大科技工作者、工程技术人员、教师、研究生和大学高年级学生阅读和参考。

译者在此要特别感谢中国科学院资深院士,北京邮电大学终身名誉校长——叶培大教授,首先感谢叶先生指导我进入到风光无限的光网络世界。正是叶先生严谨的治学态度,渊博的知识、高尚的人格魅力时刻激励并引导着我不断取得进步。叶先生在百忙之中还审阅了翻译稿,并为本书做序,译者在此对叶先生表示由衷的敬意和感谢。

参与本书翻译的主要有徐荣和龚倩,并包含了方来付、王建全、林棉风和罗来荣等博士和硕士的辛勤劳动,全书由徐荣负责校正。方来付、王建全、林棉风、徐云斌和韦烜等为部分章节、附录、索引、关键词和封底的翻译、计算机录入以及文字校对做了大量的工作,在此表示衷心的感谢。

由于多波长光网络是一项全新的技术,加之时间仓促,译者水平有限,译文中难免有不当之处,敬请广大读者批评指正。

徐 荣 xu.rong@263.net
龚 倩 gqian2000@263.net
2000 年 9 月于北京

前 言

现今,电信工业正在经历着一场前所未有的巨大变革,这种变革主要表现为由因特网和其它数字网络业务的快速增长而推动的从以话音业务为中心向以数据业务为中心的转变。

在过去的电信网中,网络设计和商品化的主要出发点是针对话音业务,但是随着从以话音业务为中心向以数据业务为中心的不断演进,就需要从网络设计、网络控制以及网络管理的基本原理上对传统的电信网络结构进行修改和改进,从而形成新一代网络体系结构。新一代网络体系结构的核心技术是基于波分复用原理的多波长光网络技术。多波长光网络技术就是本书的重点研究内容。

与以往关于光纤通信的书籍主要论述光纤的传输技术不同,本书着重论述关于网络分析、网络设计、网络控制和网络故障管理等技术的原理和方法。这本书可以作为电信专业的教材使用,也适合广大科技工作者和工程技术人员参考。我们的宗旨是让读者能够对构建多波长光网络的设备在技术层面上有所了解,如果读者想要更深入地理解深层的光子基本理论和技术,我们建议参考几本著名的论著(例如可参考文献 Agrawal¹ 和 Saleh + 91²)。

本书以多波长光网络基本结构为重点,着重论述了四种不同的网络体系结构。按照网络结构由简单到复杂逐步介绍了:静态网络、波长选路网、线性光波网(波带选路网)和逻辑选路网。其中最后一种逻辑选路网络在逻辑上可分为电层和光层,是由电层在光层上的叠加而构成的多层网络结构。

在这本书中各章节的组织结构各有特色,适合不同的读者群参考。第一、二、三和九章定性地描述了多波长光网络的基本原理,这几章不涉及光网络相关技术的基本理论和联网方面更深层次的方法论问题。第一章简要介绍了全世界通信网络中光网络的基本情况;第二章描述了多波长光网络的体系结构和网络组成的基本要素及相关组成功能块;第三章概述了如何实现光-电互连;最后在第九章对光网络未来的发展趋势作了展望。因此这几章适用于作为电子工程和计算机专业的大中专学生、技术人员的短期(12~15课时)培训教材。

其余各章可供高年级大学生、研究生和在该领域工作的专家学者、工程技术人员使用。第四章覆盖了所有多波长光网络所涉及的相关技术及其基本原理;第五章论述了静态网络技术;而波长选路网、线性光波网和逻辑选路网等技术分别在第六、七和第八章进行了详细研究。

在第二章到第八章的各章节中提供了大量的实验,它们中的大部分还未完成,仍需要进一步地研究,而且有一些实验研究与一些科研项目密切相关,我们将继续跟踪该领域的最新发展动态。

本书还包含了6个附录,其中附录A、C、F三部分简要介绍了大部分读者不太熟悉的一些领域的基础知识;附录A是有关图论的基本知识;附录C对相关的马尔可夫链和马尔可夫过程作了简要叙述;附录F概括介绍了SONET标准。其余各附录包括一些算法,在解决第5和第6章中的一些问题时将要使用这些算法;附录B介绍了一种用于共享媒质的固定调度(fixed-scheduling)算法;附录D和E分别介绍的是有限截启发式算法和线性光波网络中最小干扰选路算法。

书中有些章节非常适合于那些主要从事设计现在的和未来的通信网络的工程师们阅读和参考。而其中一些更前卫的章节可供从事研究、开发的人员参考。

1 G. P. Agrawal 编著的《光纤通信系统》(第二版)。纽约:John Wiley & Sons 出版社,1997 年出版。

2 B. E. A. Saleh 和 M. C. Teich 编著的《光子学基本原理》。纽约:John Wiley & Sons 出版社,1991 年出版。

致 谢

想写这本书的思想起源可以追溯到 1990 年,当时在哥伦比亚大学的电信研究中心 CTR (the Center for Telecommunications Research),我们发起并组织了一个小组来专门研究光波网络。现在回想起来如果没有 CTR,如果没有这个研究小组的奠基者 Mischa Schwartz 的灵感,就不可能有这本书。Thomas Stern 在此衷心地向这位具有 20 多年真挚友谊的朋友和同事 Mischa 表示最真挚的感谢。感谢 Mischa,感谢他带领我进入到具有光明前途的网络世界,感谢他多年来在各方面的无私帮助和事业上的密切协作。可以说正是 Mischa 无穷的精力、对事业的热忱、渊博的知识激励并鼓舞着所有在哥伦比亚大学电信研究中心工作着的人们。

由于有了这个研究小组,当在孕育这本书,开始组织相关技术资料的时候我们就拥有了无比的技术优势。我们的周围和我们一起工作的是一群杰出的学生和同事。书中所包括的一些新思维,许多都是来自于光波网络研究组博士们的实际工作。我们特别想感谢 Neophytos Antoniadis 在波长域模拟仿真方面所作的工作, Eric Bouillet 在路由和波长分配方面所作的工作, George Ellinas 在故障的差错恢复方面所作的工作, Song Jiang 在多播网络(hypernet)方面所作的工作以及 Jacob Sharony 在光交换结构方面所作的工作。

我们在编写这本书时,也从与许多同事的交往与交流中受益匪浅,他们有哥伦比亚大学电信研究中心的 Tony Acampora、Emmanuel Desurvire、Milan Kovacevic、Rick Osgood 和 Mal Teich 以及贝尔实验室的 G. K. Cheung、Evan Goldstein、Ioannis Roudas 和 Rich Wagner。书中的大部分内容已经在哥伦比亚大学为研究生开设的多波长网络课上通过了逐级检查和程序调试。我们感谢选修这门课的同学和那些在各方面通过各种方式提供了无私帮助并作出贡献的人们。特别值得一提的是还有: Aklilu Hailemariam、Irene Katzela、Gang Liu、Tomohiro Otani、K. Petropoulos、Amy Wang 和 W. S. Yoon。

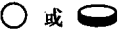
我们还要感谢 Matt Goodman、Ioannis Roudas、Mischa Schwartz 和 Bee Yoo 对手稿的仔细阅读和他们提出的许多有价值的建议。Rougas 博士也对第四章的练习题作出了贡献。还应该感激 John Midwinter 和 Allan Willner 对本书的评价和建议。

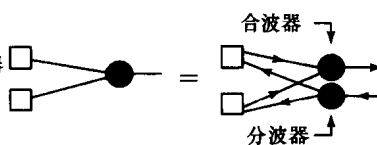
作者衷心地向国家科学基金会和 CTR 中的勤奋参与者表示感谢,感谢在这本书的开始调研阶段 CTR 作为一个工程研究中心所给予的赞助。

我们也希望向我们在 Addison Wesley Longman 公司的出版合作人 Marilyn Rash 表示感谢,感谢她的耐心和幽默感。

最后, Thomas Stern 向他的妻子 Monique 表示衷心的感谢,是她的支持使我度过了许多艰难困苦。同时 Krishna Bala 也对他的妻子 Simrat 和儿子 Tegh 感到非常愧疚。当他在写书的时候,长时间的以键盘为友而冷落了妻子和儿子, Krishna Bala 深深地为妻子和儿子的理解和支持感到骄傲。

本书所使用的图标

 或  或 	ATM 交换机
	具有收发器的ATM交换机或交叉连接设备
	下路或直通
	电集中器
	端系统
	局域网网关
	激光二极管
	逻辑交换节点
 或 	包含网络接入站的逻辑交换节点
	逻辑终端节点
 或 	包含网络接入站的逻辑终端节点
 或 	网络接入站
	光放大器 (例如掺铒光纤放大器 EDFA)
	光交叉连接
 或 	光网络节点
	光终端
	无源分波器或无源合波器
	通路选择器
	光探测器
	泵浦激光器
	业务选择器
 或 	SONET 数字交叉连接设备
	星型耦合器
	2 × 2 光开关
	可变衰减器
	WDM 分插复用器
 或 	WDM 交叉连接
	星型 WDM 路由
	WDM 终端



目 录

第一章 概述	1
1.1 为什么需要光网络	1
1.2 广域光网络:理想中的网络性能指标	2
1.3 透明多波长网络中光技术和电子技术的对比	5
1.4 多层网络结构中的光和电技术	6
1.5 局域网互连:光网络的一个诱人的应用类型	8
1.6 历史回顾	9
1.7 小结和本书使用指南	11
1.8 参考文献	14
第二章 网络可用资源	17
2.1 光网络分层结构	17
2.2 网络链路:光谱分割	20
2.3 光网络节点:路由、交换和波长转换	24
2.3.1 静态节点	25
2.3.2 动态节点	30
2.3.3 波长转换器	42
2.4 网络接入站	46
2.4.1 发射端操作	49
2.4.2 接收端	50
2.5 重叠处理器	53
2.5.1 再生	53
2.5.2 波长转换器	54
2.6 多种逻辑网络的重叠	55
2.6.1 SONET 网	56
2.6.2 ATM 网络	58
2.6.3 IP 网络	59
2.7 总结	60
2.8 练习题	61
2.9 参考文献	63
第三章 网络连接	65
3.1 网络连接的管理和控制	69
3.1.1 光连接	71

3.1.2 逻辑连接	72
3.2 静态网络	73
3.2.1 点到点连接和多点连接	74
3.2.2 光层的分组/包交换:MAC 子层	80
3.2.3 广播-选择网络的补充资料	89
3.3 波长路由网络	89
3.3.1 路由和信道分配	91
3.3.2 路由和信道分配举例	94
3.4 线性光波网络:波带路由	98
3.4.1 路由、信道分配和功率的分配	100
3.4.2 在 LLN 中的多点子网	105
3.4.3 一个包含 7 个站点的网络实例	108
3.5 逻辑路由网络	114
3.5.1 点到点的逻辑拓扑	115
3.5.2 多点的逻辑拓扑:超级网络	118
3.5.3 虚拟连接:一个 ATM 网络的例子	124
3.6 总结	129
3.7 练习题	130
3.8 参考文献	130
第四章 相关技术	133
4.1 传输技术和交换技术的发展	133
4.2 光连接概述	135
4.3 光纤	135
4.3.1 波导传输理论	135
4.3.2 光纤技术:传输损伤	140
4.3.3 光孤子	149
4.4 放大器	150
4.4.1 EDFA(Erbium-Doped Fiber Amplifiers)	150
4.4.2 半导体光放大器 SOA	155
4.5 光发射机	156
4.5.1 激光器	156
4.5.2 调制	160
4.6 强度调制直接检测系统中的光接收机(IMDD 系统)	161
4.6.1 光检测器	162
4.6.2 前端放大器:信号噪声比(SNR)	163
4.6.3 数字信号检测:噪声、干涉和误比特率	164
4.6.4 模拟系统:载波-噪声比(Carrier-to-Noise Ratio)	169
4.7 相干光系统	169
4.8 串扰	170

4.9 光和光子器件技术	173
4.9.1 耦合器和光开关	173
4.9.2 互换性	176
4.9.3 不可互换的设备	177
4.9.4 波长选择/波带选择元件	178
4.9.5 波长选择器件技术	179
4.9.6 多波长交叉技术	182
4.9.7 波长扩大	184
4.10 波长转换器	185
4.11 空间开关结构	187
4.11.1 交叉开关	187
4.11.2 路由器/选择器	187
4.11.3 开关的串扰	189
4.12 端到端的传输通路可达性	190
4.12.1 物理层的仿真	191
4.12.2 波长上/下路复用器链的研究	192
4.12.3 WSXC 串扰的研究	193
4.12.4 由于串扰所导致的性能恶化的研究	198
4.13 练习题	200
4.14 参考文献	201
第五章 静态多点网络	207
5.1 共享媒质:星型广播网	207
5.2 各种复用和多址接入技术	210
5.2.1 时分-波分复用和时分-波分多址接入技术	210
5.2.2 副载波	217
5.2.3 码分多址接入 CDMA 技术	231
5.3 共享信道网络中的业务量约束	239
5.3.1 平衡的流量	241
5.3.2 不平衡的流量	242
5.4 专用连接的流量分配	242
5.4.1 对于流业务的固定长度帧的调度方案	242
5.4.2 面向分组流量的固定帧方案	251
5.5 按需分配的连接	256
5.5.1 WDMA 网络中的拥塞计算	256
5.5.2 组合时分-波分复用网络中的阻塞	261
5.6 光层的分组交换	265
5.6.1 无控制方案:随机接入	267
5.6.2 丢失的方案:tell-and-go	269
5.6.3 动态的 T-WDMA 协议	271

5.6.4 无丢失调度方案:预留(Reservation)	273
5.6.5 优化调度方案	274
5.6.6 动态与固定容量分配对比	275
5.7 一些光子分组交换的例子	276
5.8 总结	276
5.9 练习题	277
5.10 参考文献	279
第六章 波长路由光网络	281
6.1 概述	281
6.2 物理拓扑	282
6.3 波长路由网络:静态路由和波长信道分配	287
6.3.1 流界限:物理和逻辑拓扑的匹配	288
6.3.2 无阻塞站点	291
6.3.3 RCA 作为一个图着色问题	292
6.3.4 环	295
6.3.5 普通网格网的环网分解	300
6.3.6 多星型波长路由网络	303
6.3.7 RCA 最优化问题	304
6.3.8 静态 RCA 的启发算法	311
6.4 波长路由光网络:动态路由和信道分配	319
6.4.1 一些基本的路由和信道分配算法	320
6.4.2 研究情况:双向环网	324
6.4.3 在网状网中动态路由规则的性能	327
6.4.4 研究现状:互联环网	328
6.5 线性光网络:静态路由原则	331
6.5.1 光通路的寻路由	332
6.5.2 光连接: λ 信道分配	335
6.5.3 LLN 中非阻塞接入站的重要性	339
6.5.4 LLN 的本地接入	340
6.5.5 Petersen 网中路由和波带分配	341
6.5.6 信道分配	350
6.5.7 LLN 中的功率分配	359
6.5.8 分层的光互联网	362
6.5.9 多星型线性光网络	367
6.6 线性光波网络:动态路由规则	370
6.6.1 点到点的连接	371
6.6.2 可路由的组播连接	381
6.7 多波长光网络的经济折中考虑	389
6.7.1 WDM 点到点系统	390

6.7.2 WDM 环	391
6.7.3 WDM 交叉连接网络	392
6.8 练习题	394
6.9 参考文献	397
第七章 逻辑选路网	403
7.1 点到点逻辑拓扑:多跳网络	406
7.1.1 洗牌网	408
7.1.2 密集型逻辑拓扑家族	409
7.2 多跳网络的设计	411
7.2.1 逻辑层设计	411
7.2.2 物理层的设计	413
7.3 多点逻辑网络:超网	417
7.3.1 多点子网的容量	420
7.3.2 密集型超网家族	421
7.3.3 Kautz 超网	423
7.3.4 超网—多跳	436
7.3.5 组播虚连接	438
7.4 超网设计	439
7.4.1 逻辑层设计	439
7.4.2 物理层设计	440
7.5 总结	446
7.6 练习题	447
7.7 参考文献	448
第八章 网络的存活性——保护和恢复	451
8.1 保护倒换的目的	452
8.2 当前应用于逻辑层的故障恢复技术	453
8.2.1 点对点系统	453
8.2.2 SONET 自愈环	456
8.2.3 SONET 自愈环的互通技术	459
8.2.4 网状网拓扑的网络结构	463
8.3 在点到点结构中和环形网络结构中的光层恢复和保护技术	468
8.3.1 点到点系统的光层保护方案	468
8.3.2 自愈光环结构	471
8.4 网状网拓扑结构中的共享光层保护技术	475
8.4.1 为什么需要共享光保护技术	475
8.4.2 链路的故障恢复	476
8.4.3 节点故障的恢复	483
8.5 在网状网拓扑结构中的光通道保护技术	487

8.6 练习题	488
8.7 参考文献	489
第九章 多波长光网络的发展	495
9.1 向 WDM 网络发展的商业驱动因素	495
9.2 点到点 WDM 系统	496
9.3 WDM 光交叉连接网状网	498
9.4 有波长分插复用器的 WDM 环网	499
9.5 国际上的一些多波长光网络实验平台介绍	499
9.5.1 光网络技术协会(ONTC)的试验网络平台	500
9.5.2 全光网络(AON)联盟的试验平台	502
9.5.3 欧洲的多波长光网络实验系统:多波长传输网	504
9.5.4 多波长光网络	505
9.5.5 国家透明光网络协会网	507
9.5.6 各种实验测试平台对电信业发展的重要性	507
9.6 参考文献	508
附录 A 图论	511
A.1 图	511
A.1.1 双圈覆盖	512
A.1.2 欧拉图	513
A.1.3 平面图	513
A.1.4 图的匹配	514
A.1.5 图的着色	514
A.1.6 有向图	515
A.1.7 Moore 边界	515
A.1.8 最大流-最小割	515
A.2 超图	516
A.2.1 无向超图	516
A.2.2 有向超图	517
附录 B 固定调度算法	519
B.1 列/行扩展算法	520
B.2 置换矩阵分解	521
B.3 列/行压缩算法	522
附录 C 马尔可夫链和排队论	525
C.1 随机过程	525
C.2 马尔可夫过程	526
C.3 队列	527