

学校编码: 10384

分类号 TP391.4 密级 _____

学 号: B200428004

UDC _____

厦 门 大 学

博 士 学 位 论 文

光通信网络若干基础问题的研究
Study on Some Fundamental Problems of
Optical Communication Networks

孙 力

指导教师姓名: 周昌乐 教授

专业名称: 基础数学

论文提交日期: 2008 年 5 月

论文答辩时间: 2008 年 6 月

学位授予日期: 2008 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2008 年 5 月

申请厦门大学博士学位论文

光通信网络若干基础问题的研究



作者：孙力

指导老师：周昌乐

专业：基础数学

信息科学与技术学院

数学科学学院

2008年5月

厦门大学学位论文原创性声明

兹提交的学位论文，是本人在导师指导下独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文产生的权利和责任。

声明人（签名）：

2008 年 月 日

厦门大学博硕士

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人完全了解厦门大学有关保留、使用学位论文的规定。厦门大学有权保留并向国家主管部门或其指定机构送交论文的纸质版和电子版，有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆被查阅，有权将学位论文的内容编入有关数据库进行检索，有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

本学位论文属于

1. 保密（ ），在 年解密后适用本授权书。
2. 不保密（ ）

（请在以上相应括号内打“√”）

作者签名：

日期： 2008 年 月 日

导师签名：

日期： 2008 年 月 日

摘要

波长资源是WDM网络中的稀有资源,虽然在实验环境中可用波长将近有300个左右,但在实用环境中可用波长不到64个,因此WDM网络要解决的基本问题就是如何合理、有效地使用波长,也即路由和波长分配问题。网络负荷是网络在完成业务需求集合的前提下,网络通信所需波长数目的下界,这个参数用于衡量可用波长资源的消耗情况,也是路由选择需要考虑的重要因素之一。因此网络负荷一直是光网络的研究重点。波长分配是在给定路由的情况下将波长合理地分配到通信节点间的信道上,在相关文献中通常采用图的点或边着色方法解决这一问题。可靠性一直是各类通信网络的一个重要性能指标,容错是提高可靠性的基本手段,它也是光网络研究与设计中的基本问题之一。

本论文的研究要点是光通信网络在Multi-hop或Single-hop两种基本通信模式下,特定拓扑网络结构的网络负荷、路由和波长分配、容错路由等问题。使用的数学方法基本上是组合、图论的方法。

本文对以上几个问题的主要研究成果归纳如下:

(1) 在Single-hop系统实现ALL-to-ALL通信业务时,本文提出以directed double-loop网络为网络拓扑结构,以网络负荷为标准进行优化设计。对一组由节点间最短路及这条最短路的补图中的最短路构成的容错路由 $R_1(D)$ 确定了一类从负荷角度来看最优的有向双环网络 $D(n; 1, h), 1 < h \leq \lfloor n/2 \rfloor$ 的无限族,得到的结论是,若 n 与 h 之间满足关系 $n = h^2 - 1, h = 2, 3, 4, \dots$; 则该容错路由的网络负荷 $\pi(R_1(D)) = h^3 - 4h + 3$, 此时对该容错路由而言,它的链路具有平衡的负荷,且其网络负荷 $\pi(R_1(D))$ 比相同节点的其它有向双环网络小,同时因为它是1容错的,该网络也有较好的可靠性。关于负荷问题的另一个结果是指出了在Single-hop系统实现ALL-to-ALL通信业务时, Kautz网 $K(d, k)$ 最短路路由的网络负荷上界 $l(K(d, k)) = 1 + 2d + 3d^2 + \dots + kd^{k-1}$, 并给出了达到符合上界的条件,进而指出在满足条件 $d \geq 2 + \sqrt{k-1}$ 的情况下,网络负荷达到该上界。该结果表明Kautz网最短路路由的弧负荷差异较大,应采用其它的路由方案以达到更小的网络负荷。

(2) 提出了在Multi-hops系统中以Cartesian积为物理拓扑网络(简称Cartesian网络)的波长分配的一种方法。该方法利用Cartesian网络与其构造单元之间的关

系, 在构造单元原有路由及波长分配的基础上推导出Cartesian网络波长指标(或一致的波长指标)上界, 其次根据这个结果推导出了任意网络的 n 次Cartesian积的 k -hop路由的波长指标的上界, 还证明了Hamming图 K_p^n 所表示网络的 k -hop路由波长指标的一个紧的上界是 $p^{\lceil \frac{n}{k} \rceil - 1}$ ($w(K_p^n, k) \leq p^{\lceil \frac{n}{k} \rceil - 1}$)。论述过程中给出的路由方法及波长分配方法具有较好的可操作性。在实践和研究中有一定参考价值。

(3) 在Single-hop系统实现ALL-to-ALL通信业务时, 提出一种容错路由, 使以Johnson图 $J(n, k)$ 为物理拓扑的网络中任意两节点之间存在 k 条内部不相交的路, 它们由最短路与次短路组成。

本文的证明及结论对解决类似的问题提供了可供参考的思路, 为这些新型拓扑网络的下一步研究和实用化提供了理论依据。对Cartesian网而言, 为实际应用提供了理论依据和操作性较好的方法。

关键词: Multi-hop, all-to-all, 容错路由的网络负荷, 波长指标, Cartesian product

Abstract

Wavelengths are limited resource in WDM networks. State-of-the-art technology allows close to 300 wavelengths in the laboratory. However, less than 64 wavelengths can be used in real systems. Thus how to make wavelength assignment is crucial for taking full advantage of the potential of WDM networks. The load of a network is a lower bound of the wavelength needed under the condition of fulfilling the communication request, this parameter measures the situation of wavelengths assignment, and it is also one of the most important factors in routing strategy. So it is one of the most significant and extensively studied problems in communication networks. Wavelength assignment is another fundamental problem which aims at how to assign the wavelength to the connections between the nodes pair efficiently, this problem is usually resolved by coloring of edges or vertices of graph. Reliability is an important index of a network's performance, fault-tolerant is basic measure to enhance the reliability, thus it is also a fundamental problems studied in WDM networks.

Multi-hop and Single-hop are the basic communication mode of optical networks; the problems mentioned above are studied in this dissertation under these two conditions. The method used to resolve problems are mainly graph theory and combinatorics.

The main achievements in this dissertation are listed as follow.

(1) In single-hop system and all-to-all communication mode, We proposed a type of directed double-loop networks with fault tolerant routing $R_1(D)$ which is composed of shortest path and the path equal or just longer than the shortest path, according to the given routing $R_1(D)$ the load of each arc is equal and minimal among the same size of directed double-loop networks. We proved that the $\pi(R_1(D))$ of $D(n; 1, h), 1 < h \leq \lfloor n/2 \rfloor$ is balanced and $\pi(R_1(D)) = h^3 - 4h + 3$, if $n = h^2 - 1; h = 2, 3, 4, \dots$, furthermore this kinds of double-loop network have better reliability because it is 1 fault-tolerant. Under the all-to-all communication mode and shortest path routing, we got another result which shows that the load of an edge in a Kautz network $K(d, k)$ is upper bounded by $1 + 2d + 3d^2 + \dots + kd^{k-1}$. The sufficient-necessary condition for the load of an edge to reach this bound is also

given. This result implies that if $d \geq 2 + \sqrt{k-1}$, then the load of the Kautz network $l(K(d, k)) = 1 + 2d + 3d^2 + \dots + kd^{k-1}$. This means in order to get lower network load we need to find other routing strategy other than the shortest path routing.

(2) Proposed a solution to wavelength problem of Cartesian network with multi-hops. An upper bound of the (uniform) wavelength index is established. This result leads to a consequence for the n -th power of arbitrary network with k -hops. As an application, we point out that a tight upper bound for Hamming graph with k -hops is $p^{\lceil \frac{n}{k} \rceil - 1}$. The solution is valuable to further research and application because of its practicability.

(3) A fault tolerant routing strategy for all optical Johnson networks $J(n, k)$ is proposed, according to this routing strategy the source nodes and destination nodes pair of Johnson network are connected by k paths, these paths are either equal to shortest path or the path just 1 step longer than the shortest path.

The results and the method resolving problems in this dissertation will expand the study of similar problems and lay a ground for further research on these problems. In particular, the method of routing and wavelength assignment in Cartesian network can be applied in real optical networks.

Keywords: Multi -hops, all-to-all, load of fault tolerant routing, the index of wavelength assignment, Cartesian product

目录

摘要.....	I
Abstract.....	III
第一章 绪 论	1
1.1 WDM 网络简介.....	1
1.2 WDM 网络运行机制.....	1
1.2.1 光网络交换方式	1
1.2.2 波长转换	4
1.3 WDM 网络的基本理论问题.....	8
1.4 研究方法及现状.....	9
第二章 Single-hop 网络的网络负荷	19
2.1 研究背景	19
2.1.1 网络负荷的相关概念	19
2.1.2 容错路由	20
2.2 容错路由条件下负荷平衡的有向双环网络.....	22
2.2.1 环形网络结构及研究现状	22
2.2.2 双环网 $D(n; 1, h)$ 的网络负荷	24
2.2.3 数值计算结果	29
2.2.4 更一般的数值计算结果	31
2.2.5 小结	32
2.3 Kautz 网络最短路路由的网络负荷.....	32
2.3.1 Kautz 网简介	32
2.3.2 Kautz 图结构	33
2.3.3 Kautz 网最短路路由的网络负荷	34
2.4 小结	39
第三章 Multi-hops WDM Cartesian 网络路由及波长分配	41
3.1 Cartesian 网络简介.....	41
3.2 Cartesian 网络波长指标.....	43
3.3 主要结论	46
3.4 公开的问题	52
3.5 小结	53
第四章 全光 Johnson 网络容错路由设计	54
4.1 光网络的容错路由	54
4.2 Johnson 网络结构	55
4.3 Johnson 网络容错路由分析	56
4.4 结论	58
4.5 小结	62
第五章 总结与展望	64
参考文献	66
攻读学位期间发表的学术论文	71
致谢.....	72

Table of Contents

Abstract(in Chinese)	I
Abstract(in English)	III
1 Preface	1
1.1 Introduction	1
1.2 The fundamental theory of WDM	1
1.2.1 Switch mode of Optical networks.....	1
1.2.2 Wavelength Conversion.....	4
1.3 The basic theoretical problems on WDM	8
1.4 The research method and development	9
2 The load of Single-hop optical network	19
2.1 Research background	19
2.1.1 Basic concepts of load of networks	19
2.1.2 Fault tolerant routing	20
2.2 The load of directed double-loop network under the condition of fault tolerant routing	22
2.2.1 The structure of ring network	22
2.2.2 The load of $D(n; 1, h)$	24
2.2.3 Result of the computation on the model $D(n; 1, h)$	29
2.2.4 Result of the computation on the generic model.....	31
2.2.5 conclusion	32
2.3 The load of Kautz networks with shortest path	32
2.3.1 Introduction	32
2.3.2 The structure of Kautz network	33
2.3.3 The load of Kautz network	34
2.4 Summary of chapter 2	39
3 Routing and wavelength assignment of Multi-hop WDM Cartesian network	41
3.1 Introduction	41
3.2 Wavelength assignment index of Cartesian network	43
3.3 Main result	46
3.4 An open problem	52
3.5 Summary of chapter 3	53
4 The fault tolerant routing of all optical Johnson network	54
4.1 Fault tolerant routing of All optical network	54
4.2 The structure of Johnson network	55
4.3 Analysis of fault tolerant routing of Johnson network	56
4.4 Conclusion	58
4.5 Summary of chapter 4	62
5 Conclusions and perspectives	64
Cited references	66
Author's publications	71
Acknowledgements	72

第一章 绪 论

1.1 WDM 网络简介

随着 WWW、视频会议、在线视频以及 P2P 等技术的应用，通信网的信息流量呈指数方式持续快速增长，人们对带宽的要求越来越高。传统的光纤通信网络已无法承受巨大的网络流量。为了在原有介质上扩充带宽，光纤网中的复用技术得到了广泛研究并投入到实际应用当中。在光纤技术的发展过程中有多种复用技术被提出，其中波分复用（Wavelength Division Multiplexing, WDM）技术是目前较为成熟并被普遍采用的一种复用方法。

从 20 世纪 80 年代末波分复用概念的提出到 90 年代中期，这短短几年的时间里，此项技术在北美市场上的应用已具备了一定的规模。1997 年波分复用技术在中国内地开始进入实用，而现在波分复用系统已经较为普遍地应用于我国电信传输网络中了。

WDM 技术是指在一根光纤上同时传送多个不同波长的光载波，其基本原理是在发送端将不同波长的光信号组合起来（复用）并耦合到光缆线路中的同一根光纤中进行传输，在接收端又将组合波长的光信号分开（解复用）并恢复出原信号，送入相应的接收终端。这样一来，原先一根光纤上只能传送一个光载波的单一信道就变成了可传送不同波长光载波的多个信道，从而使光纤的传输能力倍增，降低了信息传输成本。WDM 最初用于增加通信网络容量，以满足互联网用户不断增长的要求，为了进一步增加容量，就要减少传输链路中转发节点的光→电→光转换步骤，这就推动了全光网络的研发。

在光网络中信息流向依靠的是波长通道而不是电子编码报头，因此 WDM 成了光通信网技术的核心。另外也可以利用不同波长沿不同方向传输来实现单根光纤的双向传输。在实验室中，已成功地实现了在 120km 长的光纤上传送 2.6Tbit/s（即复用 132 波，每波 20Gbit/s）信号的试验。

1.2 WDM 网络的运行机制

1.2.1 光网络交换方式

从光网络支持的业务类型上可分为光路交换网络和分组交换光网络。

光路交换的 WDM 网络。在光路交换的光网络中，通过波长路由器在接入

节点间建立光通路，业务量经由光通路传送。目前，日本、美国及欧洲的一些发达国家已建立了采用光路交换技术的 WDM 试验网，如 London Fiber Network，欧洲的 RACE MWTN(多波长传送网) 等。光路交换的 WDM 网有两种主要形式：星型网络和波长选路的光网络。

以承载广播业务为主的星型网络是在网络的发送侧的每一端口提供一个单独的光频率，在网络的中心采用光的星型耦合器将所有的传输信号合并，再将这些广播式的信号混合后送入所有接收侧的端口中。通常在接收端采用可调谐的接收设备以动态接入所需波长。星型网的优点在于它能够对不同调制格式的信号“透明”，信号的格式由不同节点间的发送设备和接收设备来决定，而光信号选路只经广播方式简单完成。因此，不同速率和不同格式的信号可同时在同一网络中共存。这种网络的主要缺点是费用高、网络节点数目受限于可用波长。一般情况下星型网络主要用于本地和城域计算机网互联，而不适合在大型干线网络上采用。

波长选路的光网络是指每一个光通道分配一个单一的波长，由于在实际中可用波长数有限，一种波长只能用在不同光纤的路由中，波长争用问题只能利用通路以及相应的传送资源的合理分配来解决。目前，波长选路的交叉连接还不能进行网络的完全重组，只能在输出和输入复用器间建立连接，使输出复用器的入口保持同一波长，这对于常出现的业务转换并不十分灵活。为了提高网络的灵活性，波长选路的光网络将在选路设备中使用波长转换器来进行网络动态重组，它可以最大限度地再利用有限的可获通道数。然而，光的波长转换器还没有完全研制成功，因此目前的波长转换还采用光—电转换和再生装置。在实际中，很多光路交换的 WDM 网络的设计，将广播式的星型网络和波长选路的光网络结合使用，以通过波长再利用来增加网络的可扩展度。广播式的星型网络通常用于本地网中，波长选路的网络比较适合用于广域网中。

分组交换的 WDM 光网络。分组业务具有很大的突发性，如果用光路交换的方式处理将会造成资源的浪费。在这种情况下，采用光分组交换将是最为理想的选择，它将大大提高链路的利用率。在分组交换网络里，每个分组都必须包含自己的选路信息，通常是放在信头中。交换机根据信头信息发送信号，而其它的信息如净载荷则不需交换机处理。光交换机通常是分布存储式的交换机。光的分组交换一般有两种方法。一种是比特序列分组交换 (BSPS)；另一种是并行比特

分组交换（BPPS）。BPPS 由电分组交换直接演化而来。二进制的比特序列分组交换是最简单的分组交换方式。对于一个给定波长波道的分组交换，信头采用二进制比特顺序编码，通常使用开关信号。如果将这些二进制的比特序列分组交换信道进行波分复用，可以增加传输带宽，因为多个分组信号可以同时在不同的波道上传送。不过，这些通道信号必须在进入交换机之前解复用以便进行选路，然后在交换机输出端再复用。BPPS 可以采用两种编码技术来实现，一是副载波复用，另一是多波长的 BPPS。在这两种情况中，并行比特分组交换的编码技术采用同一光纤中的不同波道来传送信头和负载信息，可保证负载和信头并行传送，因此可增加网络的吞吐量。多波长的分组交换比较适合于光网络。首先，它可采用简单的无源光滤波器从分组信号中提取信头；其次，在交换机内对信头进行处理，使得分组路由对负载是透明的。第三，由于每波长使用单独的光源，信头和负载光源是分开的，因此没有功率损失。目前，由于一些技术限制，光分组交换一时还难于实现。根据现有的技术条件，光分组交换所需的光存储器、信头识别和处理装置还不可能在光域内完成。可调谐光源的反应时间为毫秒级，还不能满足分组交换的需求。

光路交换系统所涉及的技术有时分交换技术、波分交换技术、码分交换技术和复合型交换技术等。光分组交换系统所涉及的技术主要包括：光分组交换技术，光突发交换技术，光标记分组交换技术等。光路交换技术已经实用化。光分组交换技术目前主要是在实验室内进行研究与功能实现，确保用户与用户之间的信号传输与交换全部采用光波技术。其中，光分组交换技术和光突发交换技术是光交换中的最有开发价值的热点技术，也是全光网络的核心技术。

光网络主要由光节点、光链路和光网络管理单元构成如图 1.1 所示。

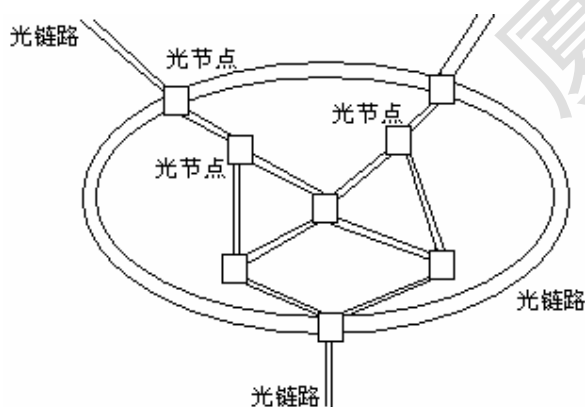


图 1.1 光网络构成

光节点由光接入节点和光交换节点构成,其主要工作是按其所选择的路由建立输入端和输出端之间的全光连接,将输入端的光信息在所建立的全光通道上无阻塞地送达指定的任意输出端。光链路是光传输介质,每条链路可支持一定数量的波长信号。

光网络单元是指网络的物理拓扑结构。光网络中的物理拓扑是指光网络的物理节点和光纤链路互连的物理结构,反映节点和链路的不同构成方式。常用拓扑结构有线型、星型、树型、环型和网状结构,如图 1.2 所示。光通道可以建立在物理拓扑图上,由物理路由和承载波长构成。逻辑拓扑是指在节点对间建立的所有光通道的集合,是将两个相邻通信节点间的光链路中每个波长作为一条虚链路,一根光纤就变成了多条链路,整个网络转换成一个由可用波长(虚链路)组成的网络拓扑图。

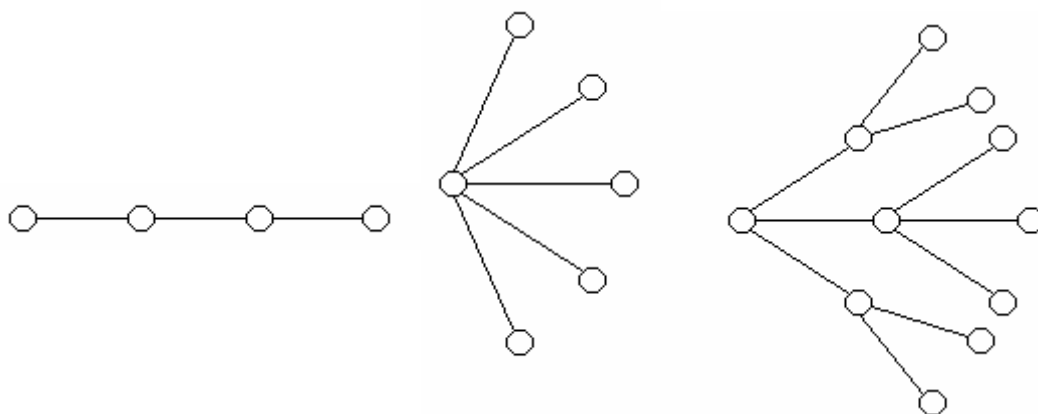


图 1.2(a) 线型拓扑

图 1.2(b)星型拓扑

图 1.2(c)树型拓扑

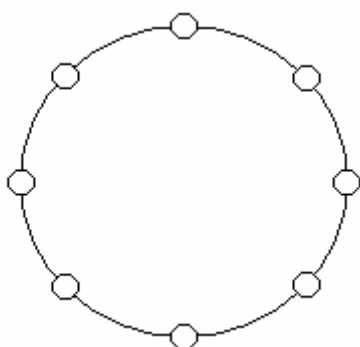


图 1.2(d)环型拓扑

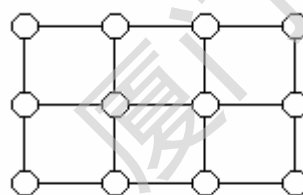


图 1.2(e) mesh 拓扑

1.2.2 波长转换

根据光网络中交换节点能否对信源和信宿之间的信道进行波长转换可将光

网络分为波长可转换的网络和波长不可转换的网络[12]。

尽管 WDM 网络有助于带宽的扩展，但是系统的波长数目仍难以满足日益增长的通信需求。在 WDM 光纤网络中，一对一的连接是由光路支持的。一条光路中的波长分配必须满足波长连续性的约束条件。这就使得当两个或多个使用相同波长的信号向同一介质连接的不同节点连接时造成波长竞争，即空闲的路由上没有一条端到端的空闲波长。这种情况会造成 WDM 网络阻塞率的大大提高。

在网络的一些节点上放置波长转换器，可适度放松波长连续性的限制。在网络中的一个节点放置波长转换器，则经过该节点的光通道就可通过波长转换器来改变所使用的波长，而不必遵守波长连续性的限制，这样可避免有共享链路的光通道发生阻塞。波长转换能够缓解交叉连接中的波长竞争，使波长能够再分配和再利用，从而可有效地提高网络的灵活性和可扩展性，降低网络的阻塞率，同时也有利于网络的运行、管理和控制。所以波长转换器的使用能很大程度地提高波长路由光网络的性能。无波长转换器的通信模式和有波长转换器的通信模式分别如图 1.3 所示：

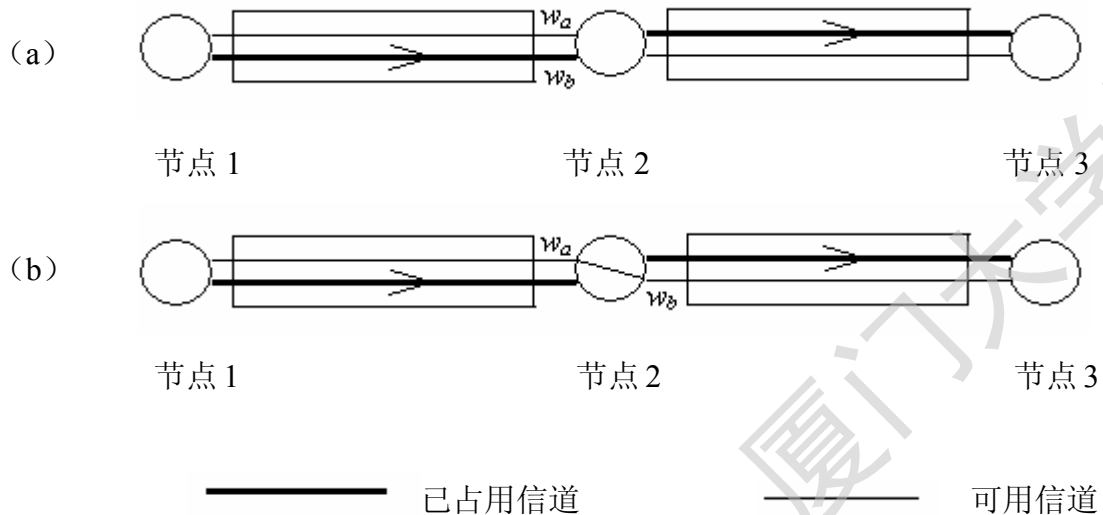


图 1.3 (a) 无波长转换器的网络发生阻塞 (b) 有波长转换器的网络建立连接

一个 WDM 网络的可能的光波可转换交换体系结构如图 1.4、图 1.5、图 1.6[61] 所示，其交换节点内部包括光波复用设备、解复用设备、交换设备以及波长转换器，它提供了基本的交叉连接功能。

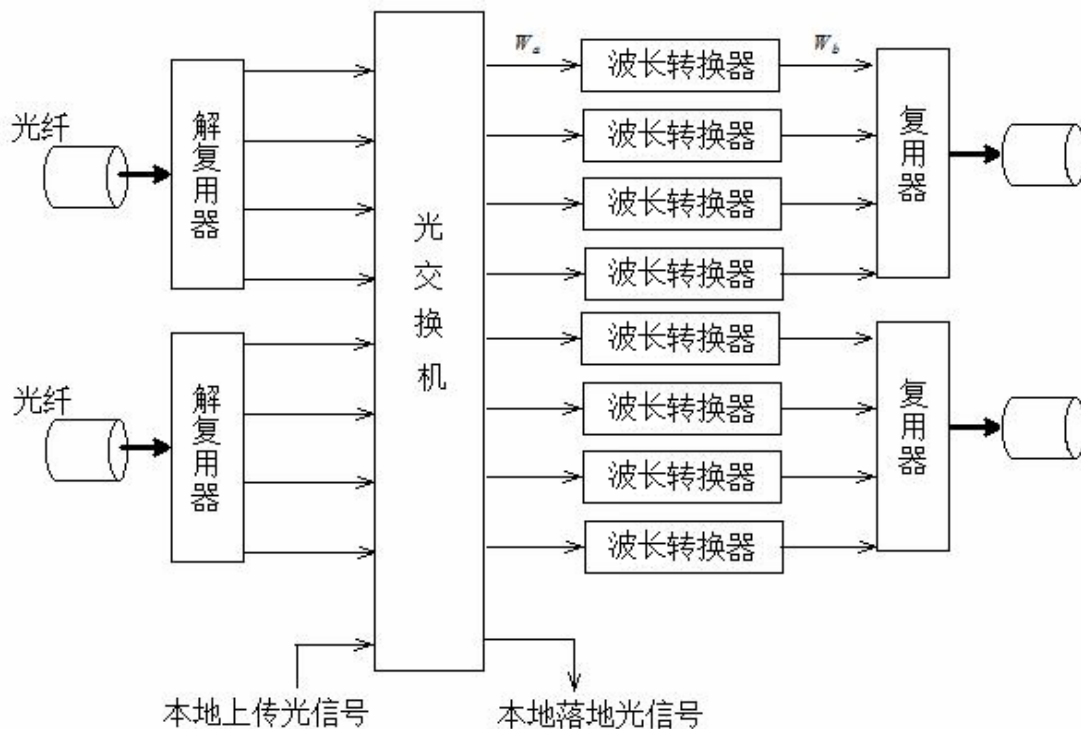


图 1.4 波长可转换的交换体系结构

其工作过程是，由解复用器接收到达本节点的经过复用的混合光信号并将其分解为不同波长的信号，然后这些信号经过无阻塞交换设备连接至与相应输出端口相接的输出链路。从图中可以看出每个光波信号都经过一个波长转换器，一些光输出信号需要波长转换器进行波长转换，最后这些信号再一次被复用混合后送出该节点。同时该节点在光交换设备上上传本地发出的信号并且传回本地要接收的信号。

在上述交换体系中，每个输出波长使用专用的波长转换器，若某输出信号不需要进行波长转换，则该波长转换器处于闲置状态，导致资源浪费。要提高设备利用率就要使它能被多个输出信号共享。文献[61]提出了两种共享波长转换器的交换体系结构，其中图 1.5 所示的系统称为节点共享交换体系结构，其中所有的波长转换器放置在一个转换器组中，所有信道可连接到转换器组。被分解的光信号首先进入光交换设备，需要进行波长转换的信号被连到转换器组，经过转换后再经过第二个交换设备输出到相应的复用设备；不需要进行波长转换的信号被连到复用设备上。最后所有需转发到其它节点的信号经复用后输出到相应链路。

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

廈門大學博碩