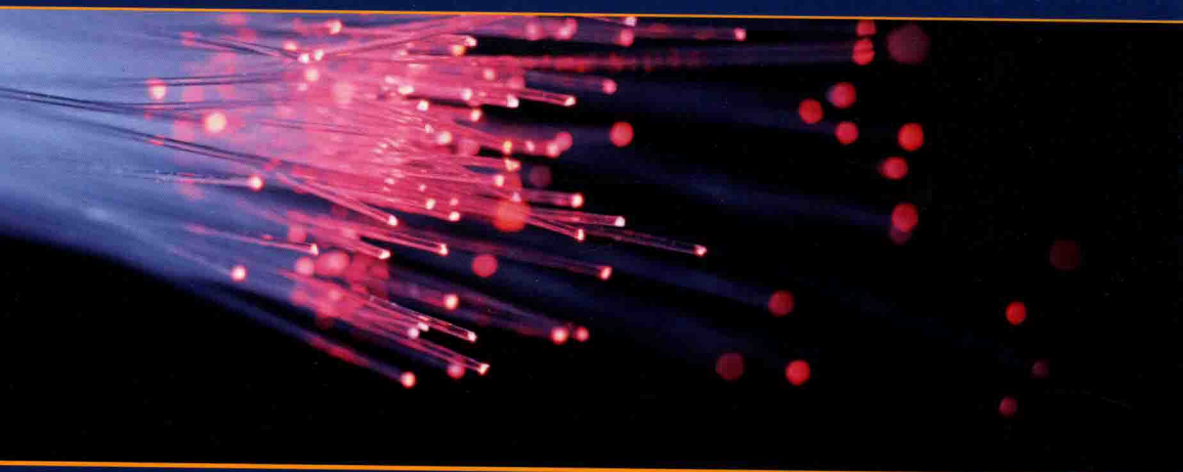


**I**nformation &  
Communication  
信息与通信创新学术专著

**M**ultiple Failure Survivability in  
Optical Networks

# 多重故障光网络 生存性技术

▶ 张杰 赵永利 马辰 陈博文 / 著



中国工信出版集团



人民邮电出版社  
POSTS & TELECOM PRESS

**I**nformation  
Communication  
信息与通信创新学术专著

**M**ultiple Failure Survivability in  
Optical Networks

# 多重故障光网络 生存性技术

► 张杰 赵永利 马辰 陈博文 / 著

人民邮电出版社  
北京

## 图书在版编目(CIP)数据

多重故障光网络生存性技术 / 张杰等著. — 北京 :  
人民邮电出版社, 2017.3  
(信息与通信创新学术专著)  
ISBN 978-7-115-41239-3

I. ①多… II. ①张… III. ①无源光纤网—研究  
IV. ①TN929.11

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第301493号

## 内 容 提 要

本书是一本关于光网络生存性方面的学术专著,重点研究了多故障相关的生存性内容,内容涉及多链路故障定位技术、P-Cycle 保护技术、立体化保护技术、光层降级的多故障保护技术、跨层虚拟化生存性映射技术以及多故障的网络修复技术等,目的在于帮助读者能够更好地学习和掌握光网络多故障生存性的原理与技术。全书共分为7章,第1章为光网络生存性概述,第2章介绍多链路故障的定位技术,第3章介绍光层 P-Cycle 保护技术,第4章介绍面向光层的链路故障保护技术,第5章为光层降级的多故障保护技术,第6章为跨层虚拟化生存性映射技术,第7章介绍灾后面向网络虚拟化的修复方案。

本书读者对象主要是从事光网络研究的工程技术人员以及高校相关专业的研究生和教师。

- 
- ◆ 著 张 杰 赵永利 马 辰 陈博文  
责任编辑 代晓丽  
责任印制 彭志环
  - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路11号  
邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn  
网址 <http://www.ptpress.com.cn>  
固安县铭成印刷有限公司印刷
  - ◆ 开本: 700×1000 1/16  
印张: 14 2017年3月第1版  
字数: 274千字 2017年3月河北第1次印刷
- 

定价: 78.00 元

读者服务热线: (010)81055488 印装质量热线: (010)81055316  
反盗版热线: (010)81055315

# 前 言

随着互联网与物联网技术的飞速发展，光网络作为信息的主要载体，其规模不断扩大、业务种类不断增多，光网络将面临着规模化、动态化、优质化的需求。与此同时，光网络结构日趋复杂，使得光网络出现并发多故障的概率大大增加。目前应对多重故障能力的生存性技术成为光网络研究的重点。

在 Mbit/s 粒度的光网络中，多采用点到点保护，而在 Gbit/s 粒度的光网络中，则演变成了保护环。随着网络向全光网演进，在以 WDM Mesh 网为代表的 Tbit/s 级光网络中，为了应对多粒度的需求，采用了智能控制平面辅助下的多种保护恢复方式。然而，在以 Pbit/s 超大容量光网络中，组网结构异常复杂，使得网络的组网和交换模式发生了革新。同时，考虑到超大容量光网络的组网复杂性和脆弱性，在多故障场景下的光网络生存性成为亟待解决的理论和和技术问题。

光网络中多故障是指在多层多域光网络中同一时刻发生的多个故障或者是在时间上相继发生，并且相互之间存在关联的多个故障。应对光网络多故障，传统的线保护和面保护已无法提供行之有效的保护能力。本书在国家“973”计划“Pbit/s 级可控管光网络基础研究”项目的支持下创新地提出了体保护的思想，并对其原理及实现技术进行了阐述。

本书凝聚了笔者所在单位多年来的科研经验和实践总结，得到了国家“973”计划“Pbit/s 级可控管光网络基础研究”、国家“863”计划“新型超大容量全光交换网络架构及关键技术研究”等科研项目的支持，同时也包含了陈博文、李新、张佳玮、张伟、杨辉、郁小松、马辰、于一鸣、尹兴彬博士和刘金艳、杜晓鸣、喻玥、罗广骏、潘莹、金紫莲、远见、师亚超、朱晓旭和谭渊龙等硕士在他们攻读学位期间的部分研究成果，在此一并表示感谢。

由于作者水平有限，本书中难免有错误或者不周之处，敬请广大读者批评指正。

作 者

2016 年 12 月

# 目 录

第 1 章 光网络生存性概述 .....	1
1.1 光网络的现状与发展趋势 .....	1
1.1.1 规模化 .....	1
1.1.2 动态化 .....	2
1.1.3 优质化 .....	2
1.2 光网络多故障的生存性需求 .....	3
1.2.1 自然环境的恶化需求 .....	3
1.2.2 网络大容量的发展需求 .....	4
1.2.3 生存性技术的发展需求 .....	5
1.3 光网络多故障概述 .....	6
1.3.1 光网络多故障的概念 .....	6
1.3.2 光网络多故障面临的问题 .....	7
1.3.3 光网络多故障的关键技术 .....	9
第 2 章 多链路故障的定位技术 .....	11
2.1 多故障定位技术简介 .....	11
2.1.1 故障告警与故障定位 .....	11
2.1.2 故障定位的实现机制 .....	12
2.1.3 多链路故障的定位方案 .....	14
2.2 基于模糊隶属度的故障定位技术 .....	17
2.2.1 模糊故障集的定义及其构建方法 .....	17
2.2.2 基于 PCE 的多故障定位机制 .....	21
2.2.3 基于 AntNet 的光网络多故障容错方法 .....	23
2.3 基于可信度模型的故障定位技术 .....	29

2.3.1	基于不确定性推理的故障定位技术	29
2.3.2	基于可信度模型的故障定位算法	37
2.4	基于主动监测器的故障定位技术	45
2.4.1	故障定融合算法与架构	45
2.4.2	融合算法评价指标	49
2.4.3	仿真结果分析	50
2.5	本章小结	52
	参考文献	52
<b>第 3 章</b>	<b>光层 P-Cycle 保护技术</b>	<b>54</b>
3.1	P-Cycle 概述	54
3.1.1	P-Cycle 的概念	54
3.1.2	P-Cycle 的分类	55
3.1.3	P-Cycle 的特性	56
3.2	P-Cycle 的应用方法	58
3.2.1	P-Cycle 单链路故障保护算法	59
3.2.2	P-Cycle 双链路故障保护算法	60
3.2.3	P-Cycle 节点故障保护算法	69
3.2.4	P-Cycle 非对称业务配置方法	77
3.3	P-Cycle 效率评价	81
3.3.1	拓扑分值	82
3.3.2	先验效率	82
3.3.3	实际效率	84
3.3.4	效率比值	84
3.4	本章小结	85
	参考文献	85
<b>第 4 章</b>	<b>面向光层的多链路故障保护技术</b>	<b>88</b>
4.1	立体化理论背景	88
4.1.1	多故障保护的背景需求	88
4.1.2	多故障保护的理论基础	91

4.2 针对多链路故障的 P-Poly 算法	93
4.2.1 P-Poly 的基本概念	93
4.2.2 P-Poly 的构造方法	93
4.2.3 P-Poly 的保护方法	97
4.2.4 P-Poly 的效率分析	98
4.3 预置柱算法	101
4.3.1 预置柱的基本概念	101
4.3.2 预置柱的构造方法	103
4.3.3 预置柱的保护方法	104
4.4 预置球算法	105
4.4.1 预置球的基本概念	105
4.4.2 预置球的构造方法	106
4.4.3 预置球的保护方法	107
4.5 仿真结果分析	108
4.5.1 构造效率分析	108
4.5.2 保护效率分析	111
4.6 本章小结	113
参考文献	114
<b>第 5 章 光层降级的多故障保护技术</b>	<b>116</b>
5.1 降级生存性的基本原理	116
5.2 基于调制格式的降级保护	118
5.2.1 基于内容连通性的降级保护原理	118
5.2.2 MILP 模型	120
5.2.3 启发式算法	122
5.2.4 数据分析	125
5.3 降级重路由保护的实现方法	132
5.3.1 降级重路由保护实现架构概述	132
5.3.2 启发式算法	134
5.3.3 实验架构及结果分析	137
5.4 本章小结	139

参考文献	139
<b>第 6 章 跨层虚拟化生存性映射技术</b>	<b>142</b>
6.1 光层虚拟化的需求	142
6.2 光层虚拟化的实现机理	143
6.2.1 OXC 和 ROADM 的虚拟化	144
6.2.2 子波长交换的虚拟化	145
6.2.3 网络资源抽象	147
6.3 考虑生存性的光网络虚拟化映射技术	149
6.3.1 多层虚拟网络映射算法	150
6.3.2 面向能效优化的虚拟光网络生存性技术	152
6.3.3 面向成本优化的虚拟光网络生存性技术	159
6.4 光网络虚拟化实现架构	173
6.4.1 开放虚拟基础设施	173
6.4.2 对网络功能虚拟化的首次现场演示	174
6.5 本章小结	175
参考文献	176
<b>第 7 章 灾后面向网络虚拟化的修复方案</b>	<b>180</b>
7.1 旅行修理工问题概述	180
7.1.1 研究背景	180
7.1.2 问题定义	181
7.2 单旅行修理工解决方案	181
7.2.1 问题描述	181
7.2.2 评价指标	184
7.2.3 线性规划	185
7.2.4 启发式算法	188
7.3 多旅行修理工解决方案	192
7.3.1 问题描述	192
7.3.2 启发式算法	197
7.4 仿真结果分析	201
7.4.1 单旅行修理工问题	201



7.4.2 多旅行修理工问题.....	206
7.5 本章小结.....	209
参考文献.....	210
名词索引.....	212

# 第 1 章

## 光网络生存性概述

### 1.1 光网络的现状与发展趋势

随着互联网与物联网技术的飞速发展，光网络作为信息的主要载体，其规模不断扩大，业务种类不断增多，光网络将面临着规模化、动态化、优质化的需求。

#### 1.1.1 规模化

信息技术是当今世界创新速度最快、通用性最广、渗透性最强的高新技术之一，并已渗透到各个学科和领域，有力地带动着物质科学、生命科学以及新能源、新材料、航空航天等工程技术的进展，促进了各学科广泛交叉、深度融合。2013 年全球宽带用户数超过 6.786 亿，我国宽带用户数 1.92 亿；截至 2013 年 7 月，光纤宽带用户达 3 159.5 万户，光纤接入覆盖超过 1 亿户。2013 年全球光纤用量约 2.36 亿芯公里，累计用量已超过 18 亿芯公里；2013 年我国光纤用量约 1.6 亿芯公里，已敷设光缆长度达 1 481 万公里（目前已达 1 596 万公里），已敷设光纤超过 6 亿芯公里。同时，随着通信需求的泛在化，网络通信已经从人到人（P2P）的通信发展到人与机器之间以及机器与机器（M2M）之间的通信。人们将生活在无所不在的网络中，物联网技术将成为互联网大发展的有力助推器，而作为承载网的未来光网络必将面临着规模化的需求。

未来光网络规模化体现在广覆盖（Ubiquitous）、超高速（Tbit/s）、大容量（Pbit/s）、多粒度（1~100 Gbit/s）等方面。随着“光进铜退”的发展，光纤将逐步取代其他的有线传输手段，并延伸到每一个角落，大到跨大陆、跨海域的光缆，小到片上光互联，而随之带来的是光纤链路长度和光传送节点数量的非线性增长，最终形成规模异常庞大的网络群体，呈现广覆盖的态势。一方面随着用户带宽需求的爆炸式增长，光网络的链路和节点面临着巨大考验，据预计，未来 10~15

年干线节点容量将达到 Pbit/s 量级，链路速率达到 Tbit/s 量级；另一方面，未来业务的多样性和时变性要求光网络具有更加灵活的带宽接入能力，这就意味着未来光网络需要提供多种粒度的业务接口。

这 4 个方面的特征造就了未来光网络的规模化需求，而规模化导致未来光网络管理和维护非常复杂，必须通过分层分域的方式加以解决。

### 1.1.2 动态化

长期以来，骨干网分为两层：骨干路由器 IP 承载网（IP 层）和骨干光网络（光层），两层一直分别独立地发展。两者的联系集中体现在光层为 IP 层提供静态配置的物理链路资源，其他的联系却很少。IP 层看不到光层的网络拓扑和保护能力，光层也无法了解 IP 层的动态业务需求。随着业务的迅速增长，IP 层的路由器面临着巨大的扩容与处理压力。

这一现象的存在与光层在智能方面的发展滞后于 IP 层密切相关。我们现在看到，目前智能光网络的发展十分迅速。业界在大容量的 SDH 骨干光网络上支持 GMPLS 智能调度后，新一代的 OTN/DWDM 系统又实现了跨越多层、对不同颗粒（波长/子波长）的动态与智能化调度。一些运营商已明确提出了对基于 OTN/DWDM 的 GMPLS/ASON 智能控制平面的需求；多个厂家也宣称已能支持基于 OTN/DWDM 的 GMPLS/ASON 智能控制平面。这一切都为在 IP 层和光层之间实现基于智能控制平面的统一调度奠定了基础。

目前大型骨干 IP 承载网的组网模式一般是边缘路由器（Provider Edge, PE）双归属到核心节点的 P（Provider）路由器上，P 路由器完成 PE 之间的业务转发和疏导。通过对骨干网络流量的分析，发现在经过 P 路由器的业务流量中，大约有 50% 以上属于“过境”的转发流量。这些过境流量大大加重了 P 路由器的负担。而且，这些过境流量对本地来说是不增值的。使用昂贵的路由器线卡处理这类流量，造成了网络成本和功耗的快速增长。实际上，这些过境流量完全可以通过光传送管道进行旁路，以降低 P 路由器的处理压力。这一切都必须实现 IP 层和光层的协作互动来解决。目前，这种 IP 层与光层之间的融合与统一调度已经成为一种趋势。

由此可见，在 IP 业务多样性和突发性的驱动下，未来的光网络必然面临着动态化需求，迫切需要增强光网络的智能性。

### 1.1.3 优质化

在光网络趋于规模化和动态化的同时，光网络本身也面临着优质化需求。光网络本身的资源总是有限的。在现有的网络资源情况下，如何最优化网络资源的使用，不但关系到是否能够为用户提供高质量的服务，还关系到网络的发

展稳定。

另一方面，能耗问题已经成为全球各个领域科研人员最为关注的热点问题之一，也是目前超大规模电路由器遇到的瓶颈问题之一。以 CISCO CRS-1 为例，从表面上看，CRS-1 拥有高达 92 Tbit/s 的系统容量，可是仔细分析就会发现 92 Tbit/s 的系统容量只是理论上的容量或者峰值，而不是实际容量。实际中因为耗能问题不可能达到 92 Tbit/s 的容量。在能量效率方面，Juniper 公司走得更远，他们已经在节能领域进行了深入的研究，并把他们的研究成果应用到 Juniper T1600 核心路由器（系统容量 1.6 Tbit/s）的设计中，使 T1600 的比特能耗达到了创纪录的 6.2 nJ/bit。而光学技术被认为是解决未来电耗能的主要技术手段。因此，未来的光网络也面临着绿色低能耗的需求。

在资源和能耗限制因素的驱动下，网络的优质化需求日益凸显，迫切需要增强光网络的智能性来对两个方面的性能进行优化。

总之，未来光网络面临着规模化、动态化、优质化需求，而这些需求必然导致未来光网络的结构和功能趋于复杂化，其中生存性技术将成为重要挑战。

## 1.2 光网络多故障的生存性需求

随着网络规模的扩大和容量的提升，光纤频谱利用率大大提高，光网络容量大规模增加，单根光纤故障就能够造成大量业务的中断。而随着光互联技术在数据中心内部和数据中心之间的广泛应用，光网络呈现结构复杂化和地理分散化等特点，使得光网络出现并发多故障的可能性大大提高。当今世界，人类的生存环境不断恶化，自然灾害频发，具有应对多重故障能力的生存性技术是目前光网络研究的重点。

### 1.2.1 自然环境的恶化需求

我国幅员辽阔，地域面积广，地形、地貌和气候条件极为复杂，自然灾害的种类多，发生频率高，造成的灾情较为严重。通信网络作为提供军事、民用和商业等信息传送通道的基础设施，覆盖面积广，极容易受到自然灾害的影响和人为破坏，通信网络生存性建设将对整个国家安全和经济的发展起着至关重要的作用。例如，2006 年 12 月 26 日南海海域地震，造成中美海缆、亚太 1 号和亚太 2 号海缆、FLAG 海缆、亚欧海缆、FNAL 海缆等多条海底通信光缆发生中断，中断点在中国台湾以南 15 公里的海域，造成附近国家和地区的国际和地区性通信受到严重影响。中国大陆至中国台湾、美国、欧洲等方向通信线路受此影响大量中断，中国港澳台互联网访问质量受到严重影响，中国港澳台话音和专线业务也受到一定

影响。据中国台湾“中广新闻网”报道，国际海缆的修复需要专用海缆工作船前往，海底电缆修复至少需要 2~3 个星期，短时间内，中国台湾地区对国际间的通信都受到明显影响，损失巨大。2008 年 5 月 12 日四川汶川大地震时，中国联通在甘肃省甘南地区的 4 个县通信中断，部分省内传输光缆中断，西安至成都 2 条长途光缆，其中 1 条中断；中国电信的三期波分九环线在汶川、北川境内光缆中断，导致马尔康、康定部分电路中断；兰州—西安—拉萨的骨干光缆中断，导致到乌鲁木齐、广州、拉萨等部分长途电路中断；中国网通在四川省绵阳—梓潼、汶川—都江堰二干传输系统中断，四川省内 2 条 2.5 G 和 1 条 155 M 互联网电路中断，120 多公里光电缆受损。2013 年 4 月 20 日 8 时，四川省雅安市芦山县发生 7.0 级地震。中国移动称，雅安地区受地震影响有 139 个基站中断，其中宝兴断站有 84 个。中国联通称，宝兴、芦山基站基本中断，雅安掉站有 93 个，芦山、宝兴两县中断基站有 45 个，通往阿坝、雅安的 3 条光缆环中断。人为因素对光缆网络的破坏更是频频发生，一些施工单位和个人对保护通信线路安全的法律法规置若罔闻，野蛮施工，大肆损坏通信线路和设施，造成骨干网每年都出现数以百计的光缆中断。2006 年 5 月在广东省佛山市南海区桂丹路一处正在施工的工地上，一台搅拌桩机不慎将地下的 6 条通信光缆线挖断，包括省长途干线 48 芯光缆、佛山本地 3 条 108 芯光缆、南海区 24 芯和 36 芯区域网，造成佛山至省长途干线、佛山市、南海区区域网络通信业务中断 7 小时，此次事故造成的损失超 150 万元。2010 年 12 月某施工单位在明明已经被告知路边有国防通信光缆的情况下，依然开挖机施工，结果挖断 3 条正在使用的光缆，造成通信中断长达 7 小时 11 分钟，间接损失 600 多万元。由于通信设备分布点多、线长、面广，防护难度大，受经济利益驱使，一些不法分子铤而走险，大肆盗窃破坏通信设施，所造成的损失更是无法估量。

通信光缆网是国家经济建设的大动脉，根据自然灾害和人为因素对光缆设施的破坏特点，增加光缆网防灾抗灾的技术措施，特别是提高已部署光缆网的抗灾能力，关系到国家安全、经济建设、人民生活和社会稳定的大局。

### 1.2.2 网络大容量的发展需求

基于传统的波分复用技术以及密集波分复用技术的带宽利用方式，可以通过提高单个波长的传输容量来提高整个光网络承载的业务量，单波长传输容量正在从 10 G、40 G、100 G 一直到 400 G 甚至 1 T 的过程进行演进。当前阶段随着高清电视、3DTV、物联网、云计算等宽带应用不断涌现，所需带宽持续增长，骨干网面临巨大的传输压力，100 G DWDM 大容量传输是缓解运营商传输压力的有效手段。2011 年底起国内三大运营商纷纷展开 100 G 测试，技术和产业链成熟度得到了充分验证，2012 年已是 100 G 正式在我国得到大规模商用的元年。为了进一步提高光纤的频谱利用率和网络传输容量，基于正交频分复用技术的灵活栅格弹

性光网络成为目前研究热点。据最新的弹性传输系统的研究报告，实验室里已经能够实时地产生与实时地对 10.8 Tbit/s 和 26 Tbit/s 的全光 OFDM 信号进行傅里叶变换，使用 336 个子载波的 26 Tbit/s 速率的全光 OFDM 信号可以传输 50 km。由此可见，单根光纤或单个节点出现故障，给网络造成的损失将会比以前更大，中断的业务更多。若一根光线中有 80 个波长，每个波长上可以承载 100 Gbit/s 的业务信息，其中，40 个波长作为工作信道，IP/MPLS 层信息流的平均粒度为 1 Gbit/s。假设网络中出现单根光纤链路故障，则在 IP/MPLS 层实施生存性机制时，须并发处理 4 000 个中断业务的故障恢复请求，大量路由消息和信令消息的交互将使 IP/MPLS 层控制平面处于拥塞和瘫痪状态，严重影响业务的恢复成功率和恢复时间，进而影响业务的服务质量。对比，若在光层实施生存性机制，仅需对 40 个中断的光路进行故障恢复，这将大大提高业务的恢复成功率，缩减故障影响时间。如果传输容量达到 Tbit/s 的单根光纤失效，将影响 1 200 万对以上的电话业务，而对于 Pbit/s 级光交换节点出现故障后，将影响 120 亿对以上的电话业务。在美国，光纤网络中每根光缆的可用度为 96.5%，而无线网络的可用度为 99.985%。若假设每条光纤链路出现故障的概率为 0.03，在一个包含 100 条链路的格状网络中，同一时刻平均有 3 条链路并发出现故障，在 IP/MPLS 层和光层将会有 3 倍于单根光纤故障时的中断业务，而随着网络规模的扩大，并发出现随机故障的链路将会更多。而且，在多重故障情况下，一旦出现故障的链路集合包含物理光网络拓扑中的一个边割集，物理网络会被完全分割为两个独立的部分，造成两部分之间通信的完全中断。

随着通信光缆网中信号速率的增长和网络容量的大规模提高，多故障情况下的光网络面临着巨大的恢复压力，迫切需要快速高效地对受损的业务进行保护恢复，针对大容量光网络的生存性机制将是未来光网络研究的重点内容。

### 1.2.3 生存性技术的发展需求

由于多故障出现的随机性和突发性以及故障造成的恶劣影响，网络管理者不得不部署快速的故障定位机制、高效的保护和恢复机制来对中断的业务进行恢复，在这种情况下，网络的生存性技术应运而生。所谓网络生存性，是指在发生故障后，网络管理者能够利用空闲资源快速地为受影响的业务重新选路，使业务继续进行传输，以减少因故障而造成的社会影响和经济上的损失，使网络维护达到一个可以接受的服务水平。目前，光网络生存性研究主要针对环网和格状网络中单链路或单节点故障的保护恢复机制，已经有大量针对单故障的定位算法和保护恢复机制。图 1-1 描述了光网络组网生存性技术发展趋势。生存性的研究与网络的组网复杂性和网络形态有密切的关系。在 Mbit/s 粒度的网络中，多采用点到点保护；而在 Gbit/s 粒度的网络中演变成了保护环。而随着网络向全光网演进，

在以 WDM Mesh 网为代表的 Tbit/s 级光交换中,应对多粒度的需求,具有智能控制平面辅助下的多种保护恢复方式开始主导。然而,在以 Pbit/s 的超大容量光网络中,组网异常复杂具有多层多域架构,更重要的是具有混合的可变带宽光交换与汇聚,这使得网络的组网和交换模式发生了革新,同时,如何考虑超大容量光网络的组网复杂性和脆弱性,在多故障场景下的智能生存性成为亟待解决的理论和技术问题。

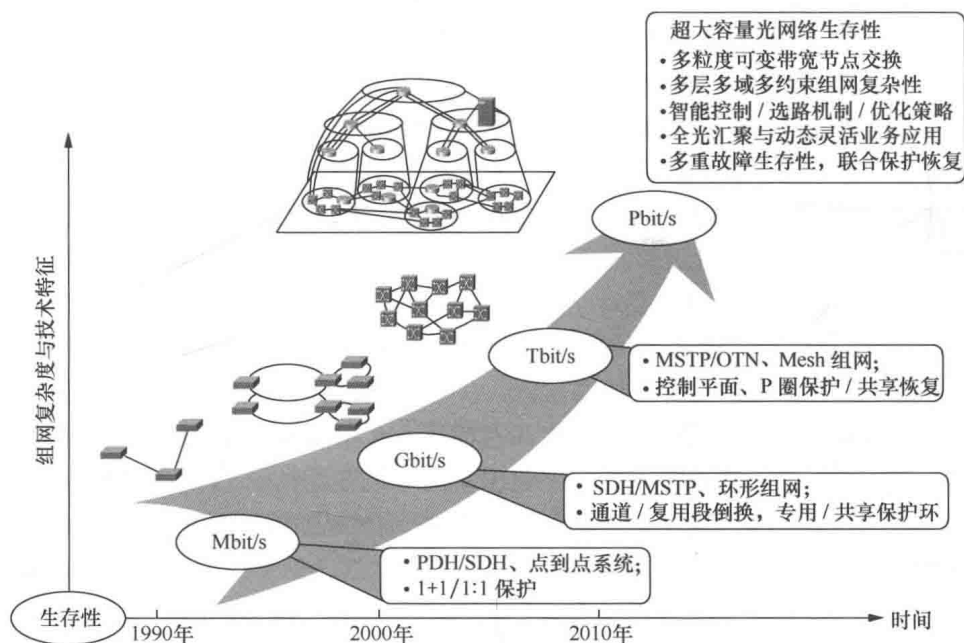


图 1-1 光网络生存性技术发展趋势

## 1.3 光网络多故障概述

### 1.3.1 光网络多故障的概念

伴随着大规模光网络的层次化和区域化,光网络的生存性问题也日趋复杂化。由于光网络每根光纤中波长通道的传输速率高达 Tbit/s 量级,光纤链路故障将导致大量业务中断。传统的针对 WDM 网络中光纤链路失效均考虑以单链路失效为主,但随着 WDM 光网络的规模化和复杂化,多故障发生的概率越来越大,尤其是在大规模多层多域光网络环境下,多故障时常发生,相对于网络的单故障,多故障造成的危害和损失更大,实现的保护恢复措施也更复杂。在多故障的环境下,

传统网络保护恢复机制将面临着极大的挑战。

光网络中多故障是指在多层多域光网络中同一时刻发生的多个故障或者是在时间上相继发生且相互之间存在关联的多个故障。光网络组网的规模化、复杂化、层域化和信息不同步必然增加网络多重故障发生的概率，如图 1-2 所示。主要表现为以下两个方面。① 异构跨域多故障：对于异构多域光网络，每个域面临着各自独立的现实条件和业务环境，每一个域内或域间链路发生故障的概率相对独立，可能同时发生故障；同时，每个域都维护着本域中的拓扑和流量工程信息，而不同域之间的信息不可见，从而容易引发多个资源预留过程冲突，造成多故障。② 层间映射多故障：在底层（物理层）发生单故障可能引起逻辑拓扑中多条链路发生故障，随即网络逻辑拓扑连接断开，引发上层（IP 层）多故障；在传统网络中，层与层之间信息缺乏交互协调，没有多层联合优化设计，当某一层发生故障时，信息不同步会造成不同层之间故障冲突，甚至一个简单的单层故障将引发层与层之间的多故障；当然还包括单域并发多故障这种最为普遍的表现形式。

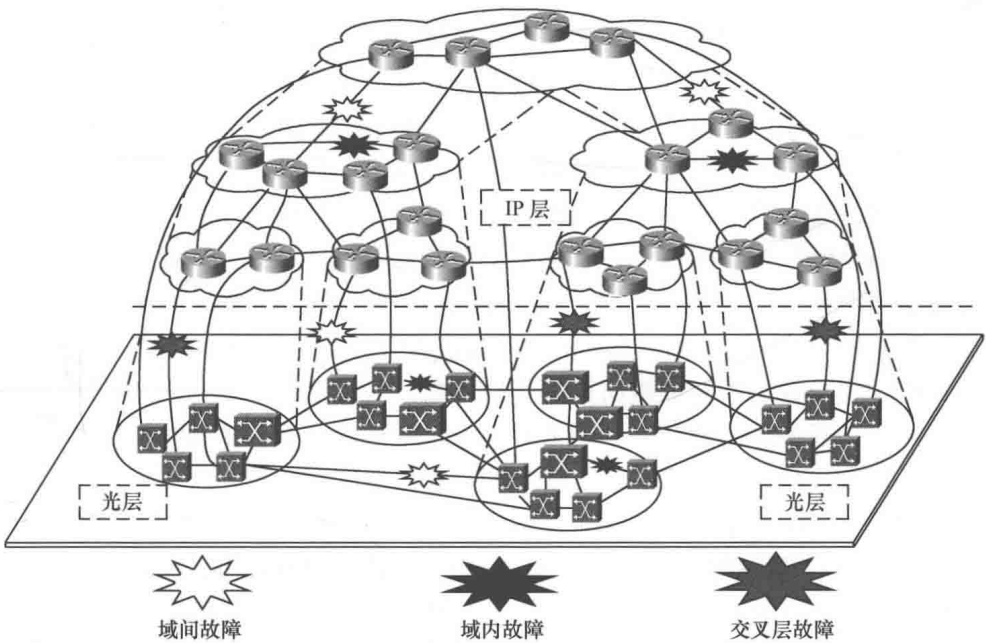


图 1-2 多层多域光网络中的多故障示意

### 1.3.2 光网络多故障面临的问题

生存性是光网络中的关键问题之一，而多故障下光网络的生存性问题是当前面临的极大挑战，具体表现为多层域、多故障、多约束 3M 问题。



问题 1: 多层域网络结构的本质问题在于网络拓扑的私密性与信息在不同层域之间有效流通的矛盾, 如何对层域光网络资源进行抽象与建模是关键所在。

为了便于研究网络的多故障问题, 从光网络横纵划分入手, 简化网络的组网结构, 实现由平面化组网到立体化组网的演进。多层多域光网络中立体化网络资源建模是立体化组网的首要问题, 通过在不同维度之间建立虚拟的逻辑链路, 以增强网络的立体连通性。因为任意一个多面体都可以用同构的平面图表示出来, 所以对应平面物理的 Mesh 网络可以通过某种特定的方法构造成立体化的多面体结构。通过寻找光网络物理拓扑存在的哈密尔顿圈, 根据光网络物理拓扑和可能出现的并发故障链路的数目构建规则的层域化光网络立体化结构。如果光网络物理拓扑不存在哈密尔顿圈, 则根据光网络物理拓扑和网络资源分配的特点, 建立逻辑资源组网的立体化结构, 利用贪婪算法寻找次优的多面体保护结构, 建立层域化光网络的立体化模型, 实现良好的立体化模型与立体化的资源优化策略。可见, 层域光网络的立体化建模是亟待解决的首要科学问题。

问题 2: 光网络多故障的本质在于网络连通性问题, 如何提出新的保护理论, 构造多连通度的拓扑结构成为关键。

针对层域化光网络多故障处理技术, 通过立体化网络分析理论与网络资源性能评估机制, 从理论层面深入解决网络资源的使用上限与下限, 解决资源制约与立体化保护的关系; 针对传统的保护恢复技术的不足, 引入网络的立体化 P-Cube 保护理论, 探索高效的网络资源使用率与快速可靠的保护理论, 实现快速的多故障保护, 降低多故障给网络带来的风险。以网络立体化的基本理论为切入点, 通过深入分析立体化保护资源与冗余度理论之间的关系, 围绕立体化网络的保护理论, 探索新型面向立体化的保护结构和新的保护恢复技术, 建立立体化网络资源与保护理论相结合的统一优化模型, 提出连续故障间的相关性函数, 丰富及完善立体化保护理论也是需要突破的关键科学问题。

问题 3: 多面体构造所面临的多约束条件的核心问题在于如何分配最少的网络资源达到最佳的网络保护性能, 进而达到资源最优化利用。

通过引入多面体的保护结构实现网络的立体化, 把立体化、规则化的思想运用到层域光网络的保护恢复性技术中。从立体化逻辑组网角度入手, 综合运用立体化网络连通性强的优点与网络具有的平行计算能力, 运用 ILP 模型和启发式算法等不同的策略联合优化网络的性能, 实现多故障保护恢复技术与多面体保护结构, 优化网络的资源使用效率。其包含两个子问题。

一方面, 为了满足光网络的 100% 保护性能, 针对传统 P-Cycle 保护结构的不足, 根据光网络的物理拓扑和可能并发出现的故障链路数目, 基于光网络链路上工作资源分布特点, 构建规则化的多面体保护结构。结合光网络多故障产生机制与多面体保护结构的特点, 研究优化的立体化保护结构。通过立体化保护结构与