

现代通信网络技术丛书

电信级 以太网

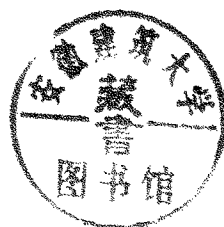
徐荣 龚倩 邓春胜 田沛 编著

 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

现代通信网络技术丛书

电信级以太网

徐 荣 龚 倩 邓春胜 田 沛 编著



人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (CIP) 数据

电信级以太网 / 徐荣等编著. —北京: 人民邮电出版社,
2009.1

(现代通信网络技术丛书)

ISBN 978-7-115-19028-4

I. 电… II. 徐… III. 以太网网络 IV. TP393.11

中国版本图书馆CIP数据核字 (2008) 第161464号

内 容 提 要

本书根据通信业务 IP 化、网络融合与转型的趋势推动分组传送网的产生和发展这一背景, 介绍了电信级以太网以及通过增强以太网的电信级业务提供能力来实现分组传送和业务提供方面的有关技术。

本书共分 7 章。第 1 章简要介绍了以太网的发展历史和基础知识。第 2 章分析了电信级以太网的产生背景, 介绍了电信级以太网的定义、体系结构、技术特征和技术分类。第 3 章详细论述了能够增强以太网的服务质量 (QoS)、运营维护管理 (OAM) 能力、可扩展性和可靠性的各种电信级增强技术。第 4 章介绍了增强以太网网络性能和业务提供质量的分组同步技术, 总结了分组网的同步实现方案。第 5 章详细论述了可提供电信级以太网业务的几种以太网改良方案, 包括 ERP、PBB/PBT、PVT、VPLS、PWE3 over MPLS 等。第 6 章介绍了基于弹性分组环 (RPR) 实现的电信级以太网方案。第 7 章全面总结了电信级以太网的应用定位和建设策略, 分析了为什么选择电信级以太网和怎样使用电信级以太网的问题, 并简要介绍了几个厂家的设备和解决方案。

本书内容详尽、条理性强, 在叙述时力求深入浅出, 适合从事宽带接入网、宽带城域网和企业互联网的技术研发、设备生产、工程建设以及运营维护人员阅读, 也可作为高等院校通信工程专业师生的实用参考书。

现代通信网络技术丛书

电信级以太网

-
- ◆ 编 著 徐 荣 龚 倩 邓春胜 田 沛
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@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京昌平百善印刷厂印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 18.25
字数: 443 千字 2009 年 1 月第 1 版
印数: 1—3 000 册 2009 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 978-7-115-19028-4/TN

定价: 48.00 元

读者服务热线: (010)67120142 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154

序

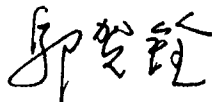
同步数字体系（SDH）从提出到现在已经 20 年了，作为主流传输技术在电信网中发挥了重要作用。但 SDH 是以语音为代表的电路型业务为对象而设计的传送技术体制，在 IP 作为主导业务的今天，SDH 在效率与灵活性等方面的不适应已经显现，同时，以太网从局域网进入到城域网也面临服务质量（QoS）保证的挑战。目前，波分复用（WDM）技术的发展为在光层面组网提供了可能，从而促进了传送技术的演进。随着下一代网（NGN）研究的深入，电信界也开始了对下一代传送网的研究。

分组技术的优点是带宽的颗粒性好，能够灵活利用网络资源；传送网的长项是其所具有的强大的可运营、可维护管理和高可靠性等电信级特性；分组传送技术融合二者所长，成为传送网的发展方向。传送网目前正在从时分复用（TDM）向分组化转型，以实现 IP 与光传送网的完美结合，提供更高效率、更加灵活的大容量信息传送与承载平台。

《电信级以太网》定位在通过增强以太网的电信级业务提供能力来实现分组传送和高品质的多业务承载，重点论述了为克服以太网在 QoS、可扩展性、可靠性、同步和安全性等方面的缺陷而进行的改进，说明了基于电信级以太网的分组传送技术和应用方案。

《分组传送网》是《电信级以太网》的姊妹篇，系统地论述了当前通信网络在传送和承载领域的热点和前沿问题，全面回顾了传送技术的发展，翔实地阐述了分组传送的由来以及传送网从电路型传送向分组化传送的演进历程，着重说明了基于多标签交换（MPLS）技术发展出来的 T-MPLS 分组传送技术原理、体系、特点与应用，分析了光传送网的组网技术，介绍了传送技术在城域网、干线网和 3G 承载网上的应用。

分组传送技术（包括电信级以太网）是当前传送网研究的热点，也是国际电信联盟电信标准化部门（ITU-T）的标准化重点。但分组传送网的研究有待深入，标准化尚处于起步阶段，很多技术还有待完善，正因为如此，也为传送技术打开了很大的创新空间。《分组传送网》和《电信级以太网》紧跟传送技术发展前沿，及时反映了传送技术的新进展，读者可以用这两本书作为学习和研究分组传送网的入门读物，在学习掌握这些技术的基础上跟上传送网技术的发展步伐，并在分组传送技术和电信级以太网技术方向上做进一步的创新，在传送网研究、设计、建设、维护和管理中完善相关的技术并开发更多的应用。相信《分组传送网》和《电信级以太网》这两本书的出版，能对广大通信工程技术人员、电信网络运维人员和通信及有关专业的师生有所裨益。



前 言

融合已经成为电信网发展的必然趋势，移动网络和固定网络的融合，将大大促进以 IP 为基础的网络转型；语音、视频、多媒体等业务的融合，将直接促进包括骨干网络、城域网、接入网在内的全网的发展。

经济性和技术进步推动了以太网在全球信息通信网络中的部署。建设成本和运维成本方面的优势吸引着业务提供商关注的目光。电信级以太网更高的带宽和可靠的业务能够提供丰富多彩的应用，满足了终端用户的需求。以太网接口已经成为事实上的“通用业务插座”，各类高速以太网接口因经济规模带来的成本优势而加速投入使用。

现有的以太网若想全面支持大带宽、高质量要求的新服务并真正满足今天的城域网络要求，还需要做很多改进，因为以太网最初不是为运营商网络而设计的。经过多年的发展，一些新型面向电信级业务提供而进行增强的以太网技术正逐渐具备公用电信网所要求的必备功能和性能，初步具有分组传送能力。随着电信运营网络从电路交换向分组交换的演进，电信级城域以太网技术的重要性逐渐显现。特别是在电信级城域以太网既保存了 IP 特性，又能够较好地对运营商的 TDM 业务进行承载的前提下，电信级城域以太网在电信网络中的应用热度已经凸显。

当前，城域网的技术解决方案很多，分类方法也很多。而随着以太网为代表的基于二层技术的城域数据网的不断扩大，电信级以太网将成为运营商旨在解决电信网络的新建和改造问题，并提供电信级以太网业务服务的不可或缺的建设方案之一。

电信级以太网技术非常适合于运营商使用，能够以其更高的效率和灵活性，部署高质量的、高可靠性的数据网络，为下一代网络（NGN）和第三代移动通信（3G）等新业务提供完善的承载平台，并能够结合原有网络，不断为运营商开展创造收入的新业务，同时大大减少投资和运营开支。

本书是《分组传送网》一书的姊妹篇，主要介绍电信级以太网这一分组传送技术的有关内容。《电信级以太网》从以太网角度，《分组传送网》从传送网角度，分别介绍了通信网从电路型多业务传送平台向分组传送（含交换）网的演进过程。

电信级以太网是由以太网技术逐步发展而来的，其核心思想是通过以太网进行扩展和改造以便提供电信级的分组传送和业务供给功能。电信级以太网的目标是可以支持电信级和可维护性的以太网业务的承载，同时可兼容 TDM 业务。电信级以太网主要代表技术有：以太环协议（ERP）、运营商骨干网桥/传送（PBB/PBT）、运营商 VLAN 传送（PVT）、虚拟专用局域网业务（VPLS）和弹性分组环（RPR）等。如果再与《分组传送网》一书中介绍的以太网业务传送 EoS/EoT（Ethernet over PDH/SDH/WDM/OTN/ROADM）、基于 SDH 的多业务

传送平台 (MSTP)、传送 MPLS (TMPLS)、IP over WDM/ OTN/ROADM 等分组传送技术结合起来, 就构成了分组传送网不同技术流派和不同发展演进阶段的从接入边缘到核心骨干的全面系统的体系架构。

本书从电信级以太网产生的背景、电信级以太网的体系架构、以太网电信级增强技术、电信级以太网实现方案和市场应用等方面, 详细系统地进行了阐述和讲解。

全书共分 7 章。

第 1 章简要介绍了以太网的发展历史和基础知识, 为以后各章的叙述打下坚实的基础。以太网 (Ethernet) 技术简单易用、价格低廉且带宽可不断提高, 无论是作为一种业务还是作为一种网络结构在企业网、城域网、广域网范围内都已经得到大规模应用。

第 2 章从总体上分析了运营传统以太网面临的压力, 由此引出了电信级以太网的产生背景, 然后详细介绍了电信级以太网的定义、体系结构和技术特征, 最后对业界提出的技术扩展进行了分类解读, 分类介绍了各种电信级以太网的技术选择。

第 3 章详细论述了能够增强以太网的 QoS、OAM、可扩展性和可靠性的各种协议扩展和电信级增强技术, 正是这些增强技术的使用才使得以太网逐渐具有了“电信级”所需要的性能。

第 4 章在详细分析了分组网的同步需求的基础上, 系统介绍了分组网的同步实现方案。在通信网络由电路交换型向分组交换型演进过程中, 必然存在着由分组网提供部分 TDM 业务, 以及分组网与 PSTN 等电路网互连互通的问题, 这时因此考虑分组网的同步与定时就显得很有必要。加之 TD-SCDMA 标准采用 TDD 工作模式, 对同步提出了很高的要求。

第 5 章详细论述了可提供电信级以太网业务的几种以太网改良方案, 包括以太环网 ERP、运营商骨干桥接/传送 (PBB/PBT)、运营商 VLAN 传送 (PVT)、虚拟专用局域网业务 (VPWS) 和 PWE3 over MPLS 等。

第 6 章主要介绍了 RPR 的标准化、关键技术和通过 RPR 实现的电信级以太网方案及基于 RPR 的 NGN 解决方案。在对传统以太网进行功能增强的道路上除了第 5 章所介绍的仅仅从软件和协议上进行少量的修改和扩展的以太网改良方案以外, 还有一种已经从以太网脱胎换骨并结合 SDH 环网优势于一身的弹性分组环 (RPR) 分组传送技术。

第 7 章全面总结了电信级以太网的应用定位和建设策略, 分析了为什么选择 CE 和怎样使用 CE 的问题, 并简要介绍了几个厂家的 CE 设备和解决方案。

本书在内容上力求将网络发展和演进趋势与技术实现手段和电信级业务提供相结合, 将演进、转型、融合的发展主旋律真正体现于电信级以太网之中。本书编写时以最新的国际标准和研究资料为基础, 并结合了作者多年以来对宽带接入网、宽带城域网、宽带 IP 网、光传送网、同步网、无线传输网络等领域的研究成果和参与国家相关重大项目的经验, 目的是系统全面地向读者介绍电信级以太网技术。

在本书编写过程中, 得到了国内运营商、设备制造商、科研院所、业界专家学者的悉心指导和大力帮助, 很多业界朋友分享了他们大量最新的研究成果, 与他们的广泛交流和探讨给了作者很多写作灵感, 在此表示最深切的谢意。

由于作者水平有限, 书中难免有错误和不当之处, 恳请同行和读者批评指正。

作 者

目 录

第 1 章 以太网基础知识	1	1.7.1 光以太网技术与标准	21
1.1 以太网及其发展	1	1.7.2 光以太网分层参考模型	25
1.2 以太网体系结构	3	1.7.3 光以太网数据链路层技术	26
1.3 以太网帧格式	5	1.7.4 光以太网物理层技术	29
1.4 以太网的媒体访问控制 (MAC)	6	1.7.5 光以太网的技术特点	31
1.4.1 共享式以太网的 MAC	6	1.7.6 光以太网的应用	34
1.4.2 交换式以太网的 MAC	9	第 2 章 电信级以太网概论	40
1.4.3 全双工的交换式以太网	11	2.1 以太网的业务运营压力	40
1.5 快速以太网	12	2.2 电信级以太网的提出	46
1.5.1 线缆物理规范	14	2.2.1 传统以太网的弊端	46
1.5.2 介质无关接口 (MII) 和 AUI	14	2.2.2 电信级以太网的定义和体系结构	49
1.5.3 协调子层 (RS)	15	2.2.3 电信级以太网与分组传送网	52
1.5.4 物理层编码	15	2.3 电信级以太网的技术特征	54
1.5.5 新增全双工模式	15	2.3.1 标准化的业务	54
1.5.6 自动协商 (Auto Negotiate)	16	2.3.2 灵活性和扩展性	59
1.5.7 不同的中继器规范	16	2.3.3 可靠性和安全性	59
1.5.8 物理层帧格式的微小变化	17	2.3.4 电信级服务质量	61
1.5.9 网络拓扑距离的变化	17	2.3.5 电信级网络管理	62
1.6 虚拟局域网 (VLAN)	17	2.4 电信级以太网的标准化情况	63
1.6.1 VLAN 的工作原理	18	2.5 电信级以太网的技术选择	67
1.6.2 VLAN 的划分类型	19	2.5.1 电信级以太网的技术分类	68
1.6.3 VLAN 通信方式	20	2.5.2 可选的电信级以太网方案	70
1.6.4 VLAN 交换机的互连方法	21	第 3 章 以太网的电信级增强技术	75
1.7 光以太网	21	3.1 电信级以太网面临的挑战	75

3.2	以太网的 QoS 增强技术	76	4.2.3	分组网承载无线接入网的同步需求	128
3.2.1	传统以太网在 QoS 方面存在的缺陷	77	4.3	分组网的定时参考模型	130
3.2.2	实现 QoS 的标准和协议	77	4.3.1	参考模型和网络限值	130
3.2.3	电信级以太网的 QoS 控制	79	4.3.2	分组网定时的参数表征法	131
3.3	以太网的 OAM 增强技术	81	4.3.3	参考定时信号通过分组网络的分配	133
3.3.1	电信级以太网的 OAM 体系结构	81	4.4	分组网上业务时钟的恢复机理	133
3.3.2	增强以太网 OAM 的标准化工作	85	4.5	分组网络的同步增强技术	135
3.3.3	电信级以太网的 OAM 功能	89	4.5.1	分组网同步的标准化	136
3.4	提高以太网可扩展性的技术	92	4.5.2	TOP	137
3.4.1	以太网的可扩展性标准	92	4.5.3	CES	138
3.4.2	Q in Q 扩展技术	93	4.5.4	物理层同步	139
3.4.3	MAC in MAC 扩展技术	94	4.5.5	PTP (Precision Time Protocol)	140
3.5	提高以太网可靠性的技术	97	4.6	分组网的同步实现方案	145
3.5.1	以太网业务保护需求	97	4.6.1	环回定时法	145
3.5.2	以太网连接的保护技术分类	99	4.6.2	网络同步法	146
3.5.3	生成树保护协议 STP	101	4.6.3	差分同步法	147
3.5.4	链路聚合 LACP 保护	101	4.6.4	自适应同步法	147
3.5.5	以太网 APS 保护倒换——ITU-T G.8031	104	4.6.5	专用分组同步消息	148
3.5.6	以太环网保护技术——ITU-T G.8032	110	第 5 章	电信级以太网组网方案	149
第 4 章	分组网的同步增强技术	114	5.1	以太环网技术	149
4.1	同步基础知识	114	5.1.1	以太环网协议 (ERP)	150
4.1.1	时钟同步	114	5.1.2	快速环保护协议 RRPP	151
4.1.2	时间同步	119	5.2	PBT 技术	152
4.2	分组网的同步需求	125	5.2.1	工作原理	152
4.2.1	分组网上层业务应用的同步需求	125	5.2.2	PBT 的技术特点	154
4.2.2	分组网承载传统 TDM 业务的定时需求	127	5.2.3	运营商链路状态桥接 (PLSB) 技术	156
			5.2.4	PBT 标准化现状	161
			5.3	PVT (Provider VLAN Transport)	162
			5.3.1	PVT 体系结构	162
			5.3.2	PVT 的电信级特性	167

5.3.3	PVT 应用场景	168	6.10.3	在 RPR 环路上提供异步 TDM 业务	216
5.3.4	PVT 的标准化状态	169	6.11	RPR 技术特征	218
5.4	EoMPLS (Ethernet over MPLS)	170	6.11.1	分组 ADM 式交换机制	218
5.4.1	MPLS 技术	171	6.11.2	自动拓扑识别	219
5.4.2	MPLS VPN 技术	174	6.11.3	高带宽提供和高效复用	219
5.4.3	以太网伪线仿真技术	178	6.11.4	多等级 CoS 定义	220
5.5	VPLS	182	6.11.5	源路由环保护倒换技术	221
5.5.1	VPLS 体系结构	182	6.11.6	物理层的媒质独立性	222
5.5.2	VPLS 技术特点	185	6.11.7	带宽管理和拥塞控制机制	224
5.5.3	VPLS 标准和应用潜力分析	186	6.11.8	对广播和多播业务的支持	225
第 6 章	弹性分组环 (RPR) 传送技术	188	6.11.9	简单化的服务配置	225
6.1	RPR 的发展背景	188	6.11.10	RPR 的 MPLS 增强技术	226
6.2	RPR 的标准化进程	189	6.11.11	RPR 与其他传送技术的比较	227
6.3	RPR 的协议栈和数据帧结构	191	6.12	RPR 的应用	230
6.3.1	RPR 的协议栈	192	6.12.1	基于 RPR 的城域网优化方案	230
6.3.2	RPR 的帧格式	192	6.12.2	基于 RPR 的 NGN 解决方案	234
6.4	RPR 的 MAC 层技术	194	6.12.3	使用专线支持 TDM 业务	239
6.4.1	MAC 服务接口	195	第 7 章	电信级以太网的应用	241
6.4.2	服务级别	196	7.1	新业务对现有以太网的挑战	241
6.4.3	MAC 控制子层	197	7.2	为什么选择电信级以太网	242
6.5	RPR 的双环结构	198	7.2.1	扩展使用三层 IP 网的困难	242
6.6	空间重用技术	201	7.2.2	电信级以太网与 MSTP 的对比	244
6.6.1	原理	201	7.2.3	构建真正的运营商级以太网	245
6.6.2	空间重用公平算法	203			
6.7	拓扑发现协议	206			
6.8	RPR 的保护机制	209			
6.8.1	RPR 保护的 特性	209			
6.8.2	RPR 保护 机制	210			
6.8.3	RPR 保护 消息格式	211			
6.9	RPR 操作 管理和维护	212			
6.10	RPR 的同步 措施	214			
6.10.1	RPR 传送 定时信息的机制	214			
6.10.2	RPR 对时 钟精度的要求	215			

7.3 电信级以太网的业务提供	246	关注点	254
7.3.1 家用业务	246	7.5.3 以 CE 实现无线接入网的 承载	256
7.3.2 商用业务	248	7.6 电信级以太网建设思路	258
7.4 电信级以太网的测试与 认证	249	7.6.1 新建电信级以太网	258
7.4.1 电信级以太网的性能 测试	249	7.6.2 改造增强以太网的 电信级功能	260
7.4.2 电信级以太网的认证 测试	251	7.6.3 电信级以太网的应用 展望	261
7.5 电信级以太网的市场定位	253	7.7 部分厂家的电信级以太网 解决方案	262
7.5.1 电信级以太网助推城 域/接入网改造	253	缩略语	269
7.5.2 城域/接入网改造的		参考文献	280

第 1 章 以太网基础知识

以太网 (Ethernet) 技术简单易用、价格低廉,且带宽可不断提高,无论是作为一种业务还是作为一种网络结构在企业网、城域网、广域网范围内都已经得到大规模应用。以太网的优势是以太网端口价格相对低廉、应用普遍、技术易于理解;以太网作为一种发展了 30 多年的技术能有效支持 IP 业务、通过自带协议实现路径学习、配置维护简单、支持多播、能很好地满足未来 IP 化的数据业务的接入与承载需要。

本章简要介绍以太网的起源、发展历程和各阶段的主要技术形态,以便为本书后续章节在叙述以太网为了增强电信级业务提供能力而形成的分组传送技术时所涉及的以太网业务和网络应用方案打下基础。

1.1 以太网及其发展

什么是以太网?传统上,以太网是指以有冲突检测的载波监测多址 (CSMA/CD) 协议作为控制算法的一类局域网 (LAN)。由于包括 CSMA/CD 协议在内的以太网的各种标准均制定在 IEEE 802.3 之中,因此,也有人说“以太网就是 IEEE 802.3 局域网”。

在过去几十年间,以太网是最流行、最常用的一种 LAN 技术。通常认为以太网最初的原型是夏威夷大学的 ALOHA 网络。实际上,ALOHA 系统同时也是所有共享式媒质网络的先祖。

图 1-1 描述了以太网的发展历史。1973 年,美国 Xerox 公司 Palo Alto 研究中心推出第一个具有 3Mbit/s 的局域网络。1980 年,DEC、Intel 和 Xerox 3 家公司 (DIX) 共同提出了第一个以太网规范,并提交给一个新成立的 IEEE 小组,后来被定义为 IEEE 802 工程。起初,802 工程被分为 3 个小组,高级接口 (HLI, High Level Interface) 小组致力于高层互连协议和管理 (并发展为 802.1); 逻辑链路控制 (LLC, Logic Link Control) 小组致力于端到端链路连接及上面的高层与下面的媒体访问依赖层之间的接口 (并发展为 802.2); 而数据链路和媒体访问控制 (DLMAC, Data Link and Medium Access Control) 小组则负责媒体访问协议本身。1982 年, DLMAC 小组分成 3 个委员会: 802.3 委员会对应于 CSMA/CD (以太网); 802.4 委员会对应于令牌总线; 而 802.5 委员会对应于令牌环。1985 年 IEEE 公布了第一个正式的以太网标准——IEEE 802.3 标准,并根据物理媒质是粗或细同轴电缆,把当时的以太网分为粗以太网和细以太网两种。当时的以太网都采用总线拓扑结构,速率为 10Mbit/s。后来,随着以太网市场扩大,802.3 标准中逐步加入了一系列中继器规范。

1990 年,IEEE 通过了使用 UTP (非屏蔽双绞线) 以太网标准 802.3i。该标准的出现使得以太网在桌面系统中迅速普及开来。1993 年,交换式以太网解决方案出台。1995 年,快速以太网 (100Base-T) 标准 802.3u 被 IEEE 正式采纳。1997 年,IEEE 正式推出以太网的全双工与流控机制标准 802.3x。快速以太网标准的发布标志着以太网速率的第一次飞跃。全双工以太网标准标志着交换式以太网技术的成功。交换式以太网采用全双工模式,消除

了由 CSMA/CD 带给以太网距离的限制，从共享式 LAN 到交换式 LAN 是以太网演进过程中革命性的进步。

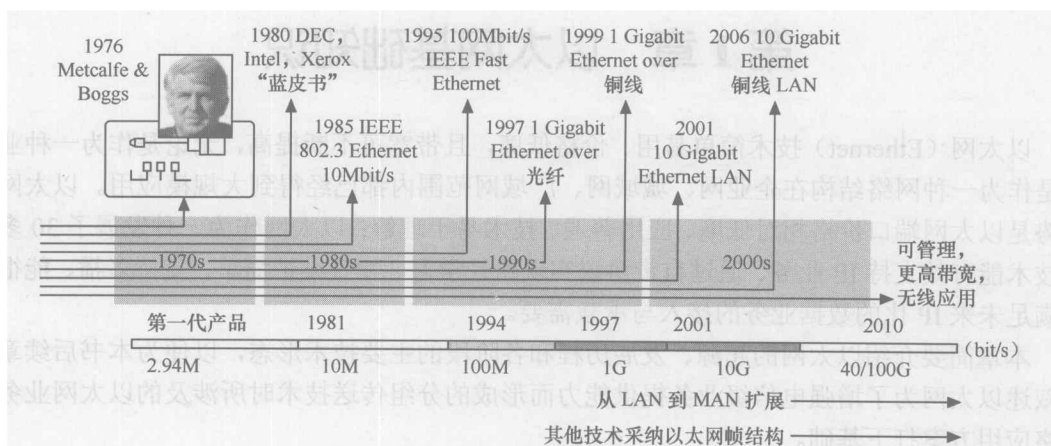


图 1-1 以太网发展历史

交换式 LAN、微处理器和光通信技术的进步带给我们实现吉比特每秒级以太网的技术可能性，网络应用与宽带业务的迅速发展成为吉比特每秒级以太网技术推向市场的驱动力。因此，在 20 世纪 90 年代后期，各方面因素促使设备开发公司和标准化组织加紧进行吉比特每秒级以太网的相关工作。1998 年，IEEE 完成并通过了以光纤为媒质并且兼容半双工和全双工两种模式的 1Gbit/s 以太网标准——IEEE 802.3z，实现了以太网速率和容量的再一次升级。以太网技术也自此从 LAN 开始向 MAN 延伸。1999 年，以 UTP-5 电缆为媒质的 1Gbit/s 以太网标准也问世了，即 IEEE 802.3ab 标准。

随后，IEEE 的高速率研究组（HSSG, Higher Speed Study Group）和 10 吉比特光以太网等组织召集各大设备商和研究机构进行更高速率以太网的研究和标准化工作，并终于在 2002 年 3 月发布了 10Gbit/s 以太网标准——IEEE 802.3ae，自此以太网速率可以跨越从 10Mbit/s 到 10Gbit/s 的多级粒度范围，标志着以太网技术又一次大的飞跃。

如今，100Gbit/s 的标准也正在制订过程中，预计将在 2010 年出台。以太网速度的发展也相应地从 10Mbit/s、100Mbit/s、1 000Mbit/s 到 10Gbit/s，乃至 100Gbit/s。另外，随着 2005 年后运营商机以太网的各项标准 802.1ad、802.1ah、802.1ag 等的逐步推出，以太网技术对业务分类（CoS）、服务质量（QoS）、操作、管理和维护（OAM）、可扩展性、网络安全性和生存性等方面的支持大为改观。因此，包括光以太网在内的新一代高速率电信级以太网不再以 CSMA/CD 为标志，而是以 MAC 层控制算法、帧格式、物理接口特性、全双工交换等，以及对传统以太网的兼容性为标志的新一代可运营、可管理的组网技术。

表 1-1 总结了以太网的发展历程、标准化进展及不同阶段的重要历史事件。

表 1-1 以太网发展历史的重要事件和时段列表

时 间	历史阶段	成 果
1968~1972 年	以太网技术起源	ALOHA 系统
1973~1980 年	以太网技术问世	X-Wire 网络、DIX80 标准
1980 年	10Mbit/s 以太网发展与成熟	IEEE 802.3 标准族

续表

时 间	历 史 阶 段	成 果
1990~1994 年	交换式全双工以太网问世并发展	IEEE 802.3x
1992~1995 年	100Mbit/s 以太网出现并迅速发展 以太网技术的第一次飞跃	IEEE 802.3u
1995~1999 年	1Gbit/s 以太网出现；以太网技术向 MAN、WAN 延伸； 以太网技术的第二次飞跃	IEEE 802.3z、IEEE 802.3ab
1998~2000 年	10/100/1 000Mbit/s 以太网链路汇聚标准发布	IEEE 802.3ad
1999~2002 年	10Gbit/s 以太网问世；通信网络系统观念上得到冲击和改 观；以太网技术的第三次飞跃	IEEE 802.3ae
2000~2004 年	弹性分组环 (RPR) 技术	IEEE 802.17
2005 年~目前	下一代的运营级以太网技术： 桥接/VLAN EFMOAM 运营商桥接 (PB, Q-in-Q) 连接性故障管理 (CFM) 运营商骨干网桥接 (PBB, MAC-in-MAC) 拥塞管理 以太网帧扩展 PBB-TE 技术 以太网使用各种电信级增强技术；以太网技术的第四次 飞跃	802.1D/Q 802.3ah 802.1ad 802.1ag 802.1ah 802.1ar 802.3as 802.1Qay

1.2 以太网体系结构

IEEE 802 标准已被 ANSI 采用为美国国家标准，被 NIST 采用为政府标准，并且被 ISO 作为国际标准，称之为 ISO 8802。这些标准在物理层和 MAC 子层上有所不同，但在数据链路层上是兼容的。这些标准分成几个部分。802.1 标准对这组标准做了介绍并且定义了接口原语；802.2 标准描述了数据链路层的上部，它使用了逻辑链路控制 (LLC, Logical Link Control) 协议。802.3 到 802.5 分别描述了 3 个局域网标准，分别是 CSMA/CD、令牌总线和令牌环标准，每一标准均包括物理层和 MAC 子层协议，本书仅介绍 IEEE 802.3 标准的以太网。

IEEE 802.3 所制定的以太网体系结构对应着 OSI 七层模型最低的两层，即物理层和数据链路层，如图 1-2 所示。

物理层是 OSI 的最低层，为设备之间的数据通信提供传输媒质及互连设备，为数据的传输提供可靠的环境。具体说，在 LAN 中，物理层设备有各种粗细同轴电缆、双绞线、多模/单模光纤、光/电的接收器/发送器、中继器、各类接头和插头等。

802.3 的电缆有四种电缆，下面分别进行介绍。

第一种是 10Base-5 电缆，它通常被称为“粗以太网 (Thick Ethernet)”电缆，802.3 标准建议为黄色，每隔 2.5m 一个标志，标明分接头插入处，连接处通常采用插入式分接头 (Vampire Tap)，将其触针小心地插入到同轴电缆的内芯。名称 10Base-5 表示的意思是：工作速率为 10Mbit/s，采用基带信号，最大支持段长为 500m。

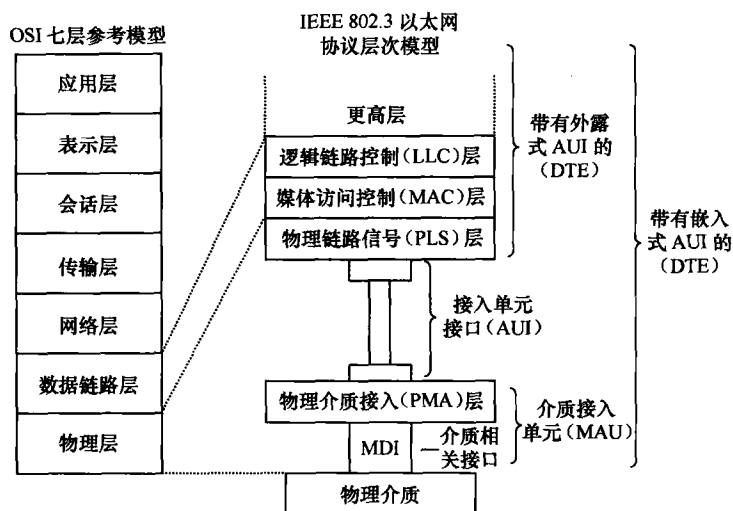


图 1-2 IEEE 802.3 以太网协议层次模型以及其与 OSI 参考模型的对应关系

第二种电缆是 10Base-2，或称为“细以太网 (Thin Ethernet)”电缆，与“粗以太网”相对，并且很容易弯曲。其接头处采用工业标准的 BNC 连接器组成 T 型插座，它使用灵活，可靠性高。“细以太网”电缆价格低廉，安装方便，但是使用范围只有 200m，并且每个电缆段内只能使用 30 台机器。

由于寻找电缆故障的麻烦，导致一种新的接线方式的产生，即所有站点均连接到一个中心集线器 (Hub) 上。通常，这些连线是电话公司的双绞线。这种方式被称为 10Base-T。这种结构使增添或移去站点变得十分简单，并且很容易检测到电缆故障。10Base-T 的缺点是，其电缆的最大有效长度为距集线器 100m，即使是高质量的双绞线 (5 类线)，最大长度可能也只有 150m。另外，大集线器的价格也较高。尽管如此，由于其易于维护，10Base-T 还是应用得越来越广泛。

802.3 中可用的第四种电缆连接方式是 10Base-F，它采用了光纤。这种方式由于其连接器和终止器的费用而十分昂贵，但是它却有极好的抗干扰性，常用于办公大楼或相距较远的集线器间的连接。

物理层的主要功能为数据端设备提供数据通路，传输数据，并完成物理层的一些管理工作。数据通路可以是一个物理媒体或多个物理媒体连接而成。数据传输是指提供足够的带宽并包括激活物理连接，传送数据，终止物理连接。物理层要形成适合数据传输需要的实体，保证数据在其上正确通过。

物理媒质与物理层之间是媒体相关接口 (MDI)，以使数据链路层的工作不受媒体类型的影响。

数据链路是通信期间收发两端通过建立通信联络和拆除通信联络等过程而建立起来的数据收发关系。数据链路层的主要功能是负责链路的建立、拆除和分离，实现帧或分组的定界、同步与收发顺序控制，进而差错检测与恢复，并负责链路标识和流量控制等。在以太网中，数据链路层分成两个子层，一个是逻辑链路控制 (LLC) 子层，另一个是媒体访问控制 (MAC) 子层。从而使 LAN 体系结构能适应多种传输媒体，换言之，在 LLC 不变的条件下，只需改变 MAC (媒体访问控制) 便可适应不同的媒体和访问方法。网卡和网桥是最常见的以太网链路层产品。

数据链路层的上层是网络层，负责复用、路由、中继、网络管理、流量控制以及更高层

次的差错检测与恢复、排序等。网络层设备主要有网关和路由器。

从上面介绍的 OSI 参考模型各层功能看，在以太局域网中，网络层的寻址、排序、流量控制和差错控制等功能均可由数据链路层承担，因此允许在 OSI 的最低两层实现 OSI 中的 1~3 层的服务。也就是这一点使得选择三层技术（IP 路由器）还是选择二层技术（以太网交换机）来组建数据网络存在很大分歧。

1.3 以太网帧格式

以太网上发送的数据是按一定格式进行的，并将此数据格式称为帧。当需要发送数据时，MAC 层将把 LLC 层递交来的数据按某种格式再加上一定的控制信息，然后再经物理层发送出去。MAC 层递交给物理层的数据格式就被称之为 MAC 帧格式。

图 1-3 中给出了 IEEE 802.3 MAC 的帧格式示意图。802.3 的帧结构以 7 字节的先导字段开头，每字节的内容为 10101010。随后是内容为 10101011 的一字节，标志着帧本身的开始。接下来是目的地址和源地址，尽管标准允许 2 字节和 6 字节两种地址，但是 10Mbit/s 基带网标准规定只使用 6 字节地址（目的地址的最高位为 0 是普通地址，为 1 时是多播地址，全 1 时为广播地址）。然后是 2 字节长度字段（值为 0~1 500）和数据部分，如果帧的数据部分少于 46 字节，使用填充字段以达到要求的最短长度。最后一个字段是校验和，采用的算法是循环冗余校验。

前导 1010...1010	SFD 10101011	目的地址	源地址	长度	数据	FCS
56bit	8bit	6 字节	6 字节	2 字节	46~1 500 字节	4 字节

图 1-3 IEEE 802.3 MAC 帧格式

每个帧由 8 个字段组成，每一字段长度不等，并有一定含义和用途。以太网的帧格式中包含 6 个域。

(1) 前导域及帧起始定界符。在 IEEE 802.3 MAC 帧中，它由 56bit 交替出现的“1”、“0”序列组成；在 DIX 以太网帧中，该“1”、“0”序列的长度是 62bit。当节点接收到这样的序列时，它知道一个数据帧正在到来，设置前导序列的目的是使接收节点的物理层能够恢复出数据的位同步时钟。紧跟前导序列之后的是帧起始定界符（IEEE 802.3 MAC 帧），它由序列“10101011”构成；或称之为同步域（DIX 以太网帧），它由两个连续的“1”比特构成，两种格式下均表示该域之后是实际有用数据的开始。

(2) 目的地址（DA）域。DA 标识了目的（接收）节点的地址，由 6 字节组成。DA 可以是单播地址、多播地址或广播地址。

(3) 源地址（SA）域。SA 标识了目的（接收）节点的地址，同样由 6 字节组成。SA 只能是单播地址。

(4) 长度/类型域。该域由 2 字节组成，在 IEEE 802.3 帧中，起初它表示其后数据域的有效长度；在 DIX 以太网帧中，它用来指明消息协议类型。在 802.3x 标准制订之后，该域可同时支持长度域和类型域两种方式（见 2.2.1 节）。

(5) 数据域。数据域是上层递交来的要求发送的实际数据，该域的长度被限制在 46 字节到 1 500 字节之间。

(6) FCS 域。它是 4 字节长的校验域，该域由前面的目的地址域、源地址域、长度/类型域及数据域经过 CRC 算法计算得到。该 CRC 算法的生成多项式为：

$$G(x) = x^{31} + x^{26} + x^{23} + x^{22} + x^{16} + x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^5 + x^4 + x^2 + x + 1$$

接收节点将依收到的目的域、源地址域、长度域及数据域进行相同的计算，如计算结果与收到的 FCS 域不一致，则表明发生了传输错误。

在以上各域中，除目的地址域及数据域由上层递交外，其他域均由 MAC 层填写。在 IEEE 802.3 帧中，如果上层递交来的数据小于 46 字节，MAC 层将在数据域填充一些冗余字节以使信息域达到 46 字节长。

每个节点都有一个 6 字节长的节点地址，该地址被称为节点的物理地址或 MAC 地址。在局域网中每个节点的物理地址都是唯一的。当一节点欲给另一节点发送数据时，它将把目的节点的物理地址填入目的地址域，然后把数据帧发送到缆线上。该数据可到达网络上任何一个节点。当目的节点接收到数据帧的目的地址域后，把该地址与自己的物理地址进行比较，以决定是否接受该数据帧。

上述的地址字段包括信宿地址和信源地址两部分。IEEE 802.3 标准规定，信源地址字段中第一个比特恒为“0”，而对信宿地址字段有较多的规定。原因是一个帧有可能只发给某一台主机，也可能发送给一组主机，还有可能发送给所有主机。后两种情况分别称为多播和广播。信宿地址字段第一比特为“0”时，表示帧要发送给某一台主机，即所谓单播地址。该字段第一比特为“1”时，表示帧发送给一组主机，即所谓多播地址。全“1”的多播地址表示广播地址。

1.4 以太网的媒体访问控制 (MAC)

20 世纪 80 年代中后期，由于通信量的急剧增加，促使技术的发展，使局域网的性能越来越高，最早的 1Mbit/s 的速率已广泛地被今天的 100Base-T 和 1000G-ANYLAN 替代，但是，早期的媒体访问方法都局限于使大量的站点共享对一个公共传输媒体的访问，即 CSMA/CD。随着以太网技术的发展，出现了结构化布线、LAN 交换机和全双工以太网等技术，较好地解决了初期总线形以太网可靠性差、容易拥塞、碰撞概率随网络容量显著增加等问题。

1.4.1 共享式以太网的 MAC

计算机网络分为两类：采用点到点连接的网络和采用广播信道的网络。在所有广播网络中，关键的问题是：当信道的使用产生竞争时，如何分配信道的使用权。用来决定广播信道中信道分配的协议属于数据链路层的子层，称作媒体访问控制 (MAC, Medium Access Control) 子层。由于几乎所有的局域网都以多路复用信道作为通信的基础，而广域网中除卫星网以外，都采用点到点连接，所以 MAC 子层在局域网中尤其重要。

媒体访问子层的中心论题是相互竞争的用户之间如何分配一个单独的广播信道。其分配方法有静态分配和动态分配两种。而所有传统的信道静态分配方法均不能有效地处理通信的突发性，所以我们必须采用信道动态分配机制。

在局域网中，站点可以检测到其他站点在干什么，从而相应地调整自己的动作。网络站点侦听载波是否存在 (即有无传输) 并发出相应动作的协议，被称为载波侦听协议 (Carrier Sense

Protocol)。下面介绍几种带冲突检测的载波侦听多路访问 CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection) 协议。CSMA/CD 协议是对 ALOHA 协议 (一种基于地面无线广播通信而创建、适用于无协调关系的多用户竞争单信道使用权的系统) 的改进, 它保证在侦听到信道忙时无新站开始发送; 站点检测到冲突就取消传送, 以太网就是它的一个版本。

- 持续 CSMA

当一个站点要传送数据时, 它首先侦听信道, 看是否有其他站点正在传送。如果信道正忙, 它就持续等待直到当它侦听到信道空闲时, 便将数据送出。若发生冲突, 站点就等待一个随机长的时间, 然后重新开始。此协议被称为持续 CSMA, 是因为站点一旦发现信道空闲, 其发送数据的概率为 1。IEEE 802.3 标准使用持续 CSMA/CD 局域网时, 其工作原理是: 当站点希望传送时, 它就等到线路空闲为止, 否则就立即传输。如果两个或多个站点同时在空闲的电缆上开始传输, 它们就会冲突。于是所有冲突站点终止传送, 等待一个随机的时间后, 再重复上述过程。

- 非持续 CSMA

在发送之前, 站点会侦听信道的状态, 如果没有其他站点在发送, 它就开始发送。但如果信道正在使用之中, 该站点将不再继续侦听信道, 而是等待一个随机的时间后, 再重复上述过程。

- p 持续 CSMA

一个站点在发送之前, 首先侦听信道, 如果信道空闲, 便以概率 p 传送, 而以概率 $q=1-p$ 把该次发送推迟到下一时隙。此过程一直重复, 直到发送成功或者另外一站开始发送为止。在后一种情况下, 该站的动作与发生冲突时一样 (即等待一随机时间后重新开始)。若站点一开始就侦听到信道忙, 它就等到下一时隙, 然后开始上述过程。

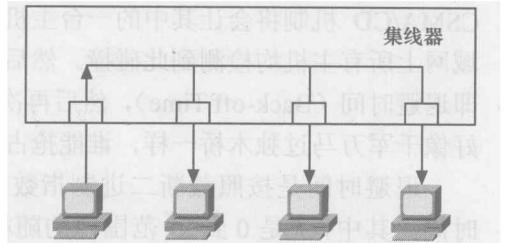


图 1-4 共享式以太网示意图

早期的以太网一般工作在共享方式下。共享式以太网就是使用集线器 (Hub) 或共用一条总线的以太网, 采用 CSMA/CD 机制来进行传输控制。如图 1-4 所示。

从上面的介绍我们可以知道 CSMA/CD 是适用于共享介质网络的随机竞争型媒体访问控制协议。当数据在网络缆线中传播时, 我们称网络缆线中有载波, 反之则称没有载波。由于是共享介质网络, 在同一时刻网络上只允许一个节点发送数据。如果两个以上节点同时发送数据, 则这些数据将在缆线上“冲突”, 从而导致接收不到数据。CSMA/CD 协议的目的就是尽可能保证网络缆线上只有一个节点发送数据, 使碰撞的概率尽可能小。

共享式以太网通过广播的方式来发送数据。因为集线器不能识别帧, 所以不知道应该把某个端口收到的帧转发到哪个端口, 它只好把帧广播到除源端口以外的所有端口, 于是网络上所有主机都可以收到这些帧。基于这种工作机理, 只要网络空闲, 任何一主机均可发送帧, 但此时所有其他主机都必须处于接收状态, 无法发送数据。那么, 在网络空闲时刻究竟哪台主机能发送帧而其他主机只能接收呢? 共享式以太网采用“竞争”的网络技术来解决这样的带宽分配问题, 详述如下。

共享式以太网的媒质被 LAN 中所有主机共享, 采用多址机制。多址的含义有二: 既表示多个节点可以同时访问媒体, 也表示一个节点发送的信息帧可以被多个节点所接收。在发送数据前, 主机会检测共享媒质上是否有载波, 即所谓的载波侦听。“载波”是指电缆或光纤等媒质上的信号, 通常由表明媒质正在使用的信号幅值来识别。如果侦听到载波, 即探测到的幅值超过一定量,