

第二部分 千兆以太网技术

第9章 千兆以太网体系结构及概述

千兆位操作代表了以太网技术中的一种演进，而不是一次革命。自原始 10Mb/s单一粗同轴电缆介质以来，对以太网的改进几乎是不断的，从 10BASE-T，到快速以太网，再到当前的千兆以太网。后续章节将提供千兆以太网范围内所有特性和选项的详细描述。本章我们将站在一个高层次上对千兆以太网做一次粗略的考察。我们将描述千兆以太网的关键组成部分，并指出(也许是更重要的)它与现有的以太网系统间的差别。对于熟悉以太网一般原理的并想快速了解千兆位操作特点的读者来说，应当阅读本章。

9.1 千兆以太网体系结构

图9-1显示了一个假想千兆以太网的高级体系结构[⊖]。此图与“标准”OSI分层模型有所不同——它给出的是这个典型系统的实际内部模块，而没有使用OSI模型的抽象层次(偏爱体系结

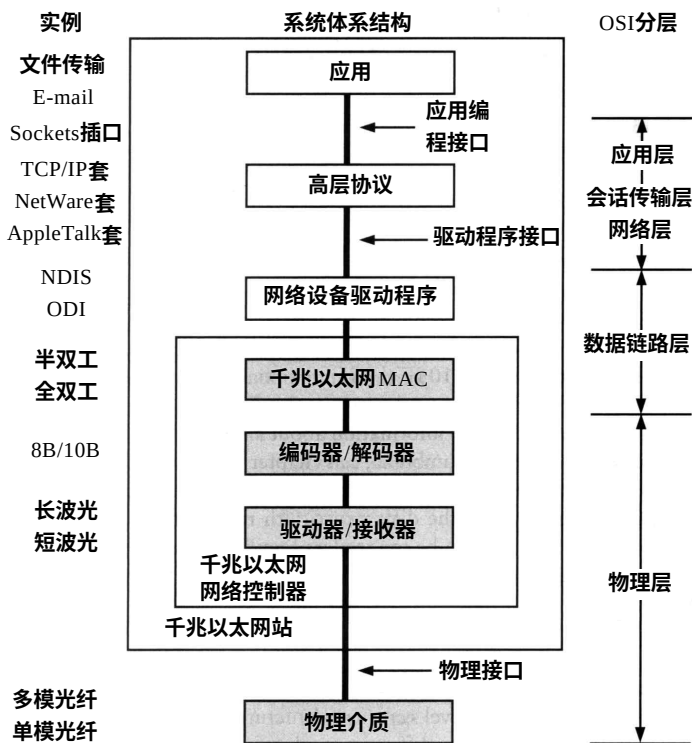


图9-1 高级系统体系结构

⊖ 此图提供了一个典型NIC的模型，但不表示所有NIC都必须遵照这个模型，它只用于解释目的。

构精确描述的人可参见第13章,那里给出了千兆以太网的IEEE标准模型,并提供了比此图更为丰富的层次)。图的右边显示了OSI模型的对应层次,阴影块表明的是与千兆以太网有关的系统模块。此图粗略地划定了千兆以太网的专用功能,每个阴影电子模块实际上可用单一的IC实现。

千兆以太网仅仅是数据链路层和物理层的技术。它并不要求对更高层的协议和应用做任何改变(虽然更高层的协议和应用可利用它获得更高的可用带宽)。现有应用可无差别地运行在一个以太网上,不管使用的速率是10Mb/s、100Mb/s还是1000Mb/s(虽然千兆以太网可提供更高速的运行能力)。根据标准驱动接口规范(例如网络驱动接口标准NDIS)编写的设备驱动程序把更高层的协议和应用与特定的底层LAN分隔开来。

图中显示的以太网NIC包括:

- MAC实体,一般称为(并实现为)以太网控制器。
- 编码器/解码器(Ecoder/Decoder, ENDEC)用于完成数据和与物理传送的格式转换^①。
- 一组驱动程序和接收器,取决于所用的物理介质。它们可能是电子线路(用于铜介质)或激光/光检测器(用于光纤介质)。
- 用于通信的物理介质。

9.2 千兆以太网技术概述

下面几节讨论这些元素及其在千兆以太网下的变化。本章是一个概述,后续几章提供所涉及技术的详细信息,并注明对应的章节索引。

9.2.1 更高层软件和接口

千兆以太网像所有以太网一样,提供了无确认、无连接的(数据报)传递服务。帧可按单播地址(单播的地址)或组播地址传送。一个帧可包含46~1500字节的数据。

如果系统设计得合理,使用千兆以太网的更高层协议和应用不应做任何改变。对网络用户来说,这是一件幸运的事;对网络产品制造商来说,这是设计上的一种基本要求。如果一项技术为了发挥其能力必须依赖于开发新协议和应用的话,那么它不会走得很远。

对于千兆以太网端站而言,接口可使用标准设备驱动接口(例如NDIS)与现有协议栈无缝地结合。当然,拥有千兆以太网并不一定能使应用运行得更快,除非主机能够处理以更高速率提供的数据。给家用轿车装上赛车轮胎不会使它跑得更快,还需要更强力的引擎和传动系统以及其他部件,才能真正提高性能。端站只有具备了高性能处理能力、缓冲存储等条件才能从千兆以太网连接中获得显著的效益。然而,端站在使用这种更高速接口时并不需要对协议、应用或操作系统进行重新编译。参见第15章对性能问题的进一步讨论。

与此类似,使用1000Mb/s或10Mb/s或100Mb/s以太网的网络互连设备(网桥或路由器),其逻辑操作没有什么区别。当然,为以太网设计的设备需要考虑性能和隐含的存储需要,才能使用户能真正从速度上获利。

9.2.2 MAC操作

千兆以太网MAC是10/100Mb/s以太网MAC的一个超集。即,它包含了以太网当前已有的

^① 在千兆以太网中, ENDEC模块一般包含一个称为串行器/解串行器(Serializer/Deserializer, SERDES)的设备,因为它可将高速(1000MHz或更高)时钟域限制到更小的专用设备中。详情可参见第12章。

全部功能，并为千兆位操作增加了一些功能和专门特性。

千兆以太网MAC可工作在全双工或半双工模式下(参见第6章)。全双工操作与其他速率相比没有变化。半双工操作在千兆位速率下有些问题值得研究。使用CSMA/CD作为访问控制机制意味着在传送帧的最小长度和网络最大往返传播延时之间存在着密切的关系。最小传送时间必须比LAN的最大传播时间要长，以使站在帧传送过程中能得到冲突消息。由于传送一帧需要的时间与数据率成反比，按量级增加速度(从快速以太网的100Mb/s)将以10为系数按比例减小帧传送时间。因此，当速率增大时，必须减小网络规模、增大最小帧的长度或对MAC算法进行修改。

如果不对其他方面做调整，为支持半双工千兆以太网操作，就必须将网络规模减小到10~20m量级，这对大部分实际应用来讲明显是不够的。所以采取的方法一般是针对最小帧传送时间和MAC算法本身。

半双工千兆以太网引入了载波扩展(Carrier extension)的概念。载波扩展用于增加帧发送的有效长度而在设备驱动和更高层软件看来并未增加帧本身的最小帧长。由于载波扩展在传送短帧时性能不佳，所以又引入了帧突发(frame bursting)的概念。帧突发可让站用一个单信道仲裁期传送多个短帧。对半双工千兆以太网来说，载波扩展是必要的功能(没有它，CSMA/CD算法就无法工作)，而帧突发是可选的(这仅仅是一个性能问题，不影响正确性)。载波扩展和帧突发将在第10章中详细解释。

在全双工模式下，载波扩展和帧突发都是不必要的。由于不需要检测冲突，也就没有必要扩展传送时间来保证当冲突发生时发送者仍然在发送。另外，全双工以太网是“天然”突发的，没有必要为此提供专门的机制。由于大多数(也许是全部)千兆以太网将工作于全双工模式下，载波扩展和帧突发的复杂问题主要是学术研究的内容，对大多数网络 and 用户并无影响。

千兆以太网系统，与其低速对手一样，也可使用流量控制。实际上人们希望在大部分系统(端站和网络互连设备)中都能有这个机制，因为当遇到瞬时缓冲拥塞时，它可防止不必要的帧丢失。由于帧以千兆位速度到达，缓冲溢出的可能性会更大，因此流量控制是一种受欢迎的工具。在10Mb/s以太网填满16KB缓冲存储的时间里，千兆以太网能填满1.6MB！

9.2.3 信号编码

在高速网络中，几乎总需要将待发送数据编码成自同步的数据流。接收方为了能够正确地解释数据，必须知道信号生成时钟的精确频率和相位。把时钟信号与数据各自独立地发送，一般是不切实际的。即使这么做了，时钟和数据间的时序偏差问题会严重地影响收到信息的可用性。更糟的是，这需要两个通信信道：一个用于数据，另一个用于时钟。所以，一般使用某种形式的数字编码将时钟和数据信息组合成单一信号，在接收方(解码器)再将这种单一信号分离。

原始10Mb/s以太网所有类型的介质都使用曼彻斯特编码。曼彻斯特编码有两个适合以太网使用的重要特征：

- 1) 它对DC是完全平衡的。即是说，不论发送的数据是什么，逻辑“高”状态与逻辑“低”状态使用的时间是一样的。这可使通过转换器的信号变形达到最小。
- 2) 它的解码相对容易，其生成甚至更容易。

缺点方面，曼彻斯特是低效率带宽编码方法。每比特需要2波特(即，当采用曼彻斯特编码时，10Mb/s以太网信号生成20M波特)，当原始以太网使用同轴电缆时，其可用的信号容量

远超过 10Mb/s 数据率，这种编码方式还不是什么严重缺陷。超量带宽被曼彻斯特编码浪费地使用了，但廉价的编码器/解码器比较简单，有利于降低整个系统的成本。

对快速以太网来说，曼彻斯特编码是无法实用的。UTP 线上的带宽很珍贵，而诸如 200M 波特信令的同轴电缆特性简直是难以实现的。因此需要一种更“富裕” (richer) 的编码方法，它能在相同的带宽内编码更多的数据。快速以太网的三个版本使用了不同的编码方法，因为它们所用的线缆类型和数目各不相同，如表 9-1 所示。

表9-1 快速以太网编码

	线缆类型	线对/光纤数目	编码系统	编码效率
100BASE-X	多模光纤,STP,5类UTP	2	4B/5B	1.25波特/位
100BASE-T4	3/4/5类UTP	4	8B/6T	0.75波特/位
100BASE-T2	3/4/5类UTP	2	PAM 5×5	0.50波特/位

编码系统经常用一种简写记法表示。例如“4B/5B”，这种方案表示将 4 比特位编码成 5 波特(等价地说：4 数据位编成 5 代码位)[Ⓐ]。当一种编码能够把更多的数据位编码为更少的波顿时，其带宽利用率就更高，并被称为“富裕”编码。另一方面，实现富裕编码往往需要更复杂的编码器和解码器，因而成本也更高。

在千兆位速率上运行以太网少不了要考虑编码问题。即使使用光纤、短铜线电缆介质时，综合考虑数据率和经济性因素，富裕编码也是必需的。千兆以太网使用的编码系统最初是为光纤信道开发的 [ANSI94]，称为 8B/10B，它是 IBM 公司的专利技术 [FRAN84][Ⓑ]。正如字面上的含义那样，它将 1 字节 (8B) 数据编码为 10 波特或代码位。表 9-1 中的千兆以太网表项现在看起来像表 9-2 中的一样。

Seifert组网法则#27

你可通过一根铁丝以每秒千兆位并且以可接受的差错率发送和接收数据。唯一的问题是你愿意为编码器和解码器付出多大的代价。

这种编码系统的俗名是 1000BASE-X (与快速以太网中用于 4B/5B 编码的俗名 100BASE-X 类似)。1000Mb/s 数据率转换为实际物理介质 (1.25 波特/比特) 上的 1250M 波特的信号率。光纤和特殊的屏蔽双绞线电缆可支持 1000BASE-X 信令，本章稍后部分将予以讨论。

表9-2 千兆以太网编码

	线缆类型	线对/光纤数目	编码系统	编码效率
1000BASE-X	单模和多模光纤, STP	2	8B/10B	1.25波特/位

在写作本书的时候，工作在 UTP 上的千兆以太网 (1000BASE-T) 的编码系统尚未被标准化。很显然，它将是一个比用于光纤的编码更为“富裕”的编码，因为 UTP 可用的带宽更低。这种更低的带宽意味着编码器将更为复杂。

8B/10B 编码系统的细节将在第 12 章中描述。

9.2.4 物理介质和信令

目前，千兆以太网使用 1000BASE-X (8B/10B) 编码可支持光纤 (多模和单模) 和特殊的 2 对线

Ⓐ 8B/6T 方案将 8 数据位编码为 6 个 3 三级代码信号，故称为“6T”。PAM 5x5 将 4 数据位编码为一个 2 维 25 个代码点 (5x5) 的星型空间上。

Ⓑ 根据 IEEE 规则，IBM 同意在同等对待的基础上并在合理的专利许可价格条件下，允许将其专利技术作为 IEEE 标准的一部分使用。

STP电缆(也称为短铜跳线, short copper jumper)。1000BASE-X的物理层规范与编码系统一样,也采纳了光纤信道的基本工作原理。将来,千兆以太网将支持使用4对线的5类UTP(1000BASE-T)。

令人愉快的事情是有这么多的标准可供选择。
安得鲁·坦尼鲍姆

1. 光纤1000BASE-X支持三种光纤:

50μm多模光纤

62.5μm多模光纤

10μm单模光纤

以及两种用于激光驱动器的光波长:

短波(约850nm, 称为1000BASE-SX)

长波(约1300nm, 称为1000BASE-LX)

每个连接需要2根光纤,分别用于发送和接收。表 9-3显示了不同波长和光纤类型支持的光纤长度。

表中显示的长度是根据物理信号特征(光衰减、散失等)得出的限制。当MAC以全双工模式工作时,这些就是使用时的长度限制。如果使用的是半双工模式(即共享LAN),由于MAC支持的往返传播延时,还可能有进一步的限制。这将在第12章讨论。

如表9-3所示,长波激光,如62.5μm多模和10μm单模光纤,最大距离可达5km,因此园区主干应用可选用这种介质。短波激光可满足建筑物内应用的实际需要。当然,长波激光对距离的扩展能力是以高成本为代价的。

表9-3 1000BASE-X光纤最大长度

	50μm多模	62.5μm多模	10μm单模
1000BASE-SX	550m ^①	275m ^②	不支持
1000BASE-LX	550m	550m	5000m

① 使用500MHz-km或更好的@850nm的带宽率模式的光纤。当使用400MHz-km带宽率的光纤时,最大距离减小为500m。

② 使用200MHz-km或更好的@850nm的带宽率模式的光纤。当使用160MHz-km带宽率的光纤时,最大距离减小为220m。

以上三种光纤在建筑物布线标准EIA/TIA 568中都有规定,并受该标准支持。所有千兆以太网光纤介质的标准连接器都是双工SC(第12章将提供进一步的讨论和图示),这和100BASE-FX(光纤上的快速以太网)规定的连接器是相同的。

2. 短铜跳线

对于很短距离的连接,可选择另外一种方法。千兆以太网与其近亲光纤信道一样,支持一种用于短距离互连的2对线、150Ω的屏蔽双绞线。这种电缆与常用于令牌环系统中的屏蔽双绞线类似,但不相同[⊖]。这种短铜跳线(short copper jumper)也使用1000BASE-X信令,因而被称为1000BASE-CX(C指铜线)。

1000BASE-CX主要用于配线间或一个单独的房间内设备柜的互连(例如设备柜或服务机器

⊖ 主要的差别是对两线线间的时序偏差有更严的规定。

群之间)。它所支持的最大距离是 25m。

短铜跳线电缆有两种可选的连接器：

- 优选的连接器是光纤信道高速串行数据连接器 (HSSDC)[ANSI94, FC-PH-3(第3版)]。
- 另一个可使用的是 DB-9(9针D型)连接器, 它们一般用于令牌环和 100BASE-TX(STP)系统中。

这些连接器在第 12 章中有更详细的讨论。HSSDC 比 DB-9 更小, 具有明显更好的电气特性 (这对千兆以太网来说是很重要的), 是 1000BASE-CX 系统使用的连接器。

3. 非屏蔽双绞线

在写作本书的时候, 尚没有工作于 UTP 上的千兆以太网标准或可用产品, 但此项技术的开发工作正在进行中。

1000BASE-T 是工作在 UTP 上的千兆以太网。正在开发的系统将支持使用 4 对线、距离长达 100m 的操作。这与 EIA/TIA 568 布线标准规范兼容, 并且在条件具备时可允许将现有使用 5 类布线的 10Mb/s 和 100Mb/s 系统升级为千兆位。

1000BASE-T 将不会使用 1000BASE-X 的 8B/10B 编码系统。为了在 UTP 电缆上压缩千兆位数据率, 它需要一个更为“富裕”的编码方案。

9.2.5 拓扑

千兆以太网支持共享式和交换式 LAN 配置。因为现代流行使用星型布局、以 hub 为中心的布线系统, 千兆以太网对时序又有着极严格的限制, 因此与低速以太网相比, 共享式 LAN 的拓扑类型大大减少了。交换式千兆以太网仍然具有多种可用的拓扑结构。

1. 共享式千兆以太网 LAN

最初的 10Mb/s 以太网可支持多种共享式 LAN 的物理拓扑, 包括：

- 多点接入 (multidrop) 同轴电缆 (长度与介质有关)。
- 多层星型布线拓扑结构 (双绞线和光纤均可使用)。
- 点到点连接。
- 以及, 上述拓扑的组合。

事实上, 最初的 10Mb/s 以太网可使用的拓扑结构千变万化以至于常用整本书 (以及 LAN 标准的整个章节) 来确定有效配置问题。

快速以太网为实现 100Mb/s 操作对合法拓扑进行了严格限制。只有三种拓扑可用于共享式快速以太网 LAN：

- 1) 只有两个站的点到点链路。
- 2) 使用铜线或光纤连接的单中继器, 使用任何组合的编码方法。
- 3) 使用双绞线或光纤连接互连的两个中继器, 使用单一编码方法。

这种限制 (相对于 10Mb/s 拓扑设计提供的设计自由性) 是由 100Mb/s 数据率上对传播延时的严格时序约束带来的。千兆以太网对可用拓扑的选择限制更严, 它只允许：

- 只有两个站的点到点连接, 以及
- 使用铜线或光纤连接的单个中继器, 使用单一的编码方法。

这些拓扑如图 9-2 所示。

这样一来, 共享式千兆以太网 LAN 的物理设计倒变得相当简单了。唯一的设计任务是保

证链路长度要在给定介质规定的最大长度限制内。由于数据率带来的时序限制, 在一个单冲突域内中继器不可互连[⊖]。根据定义, 连接到一个共享式 LAN 的站使用半双工 MAC。

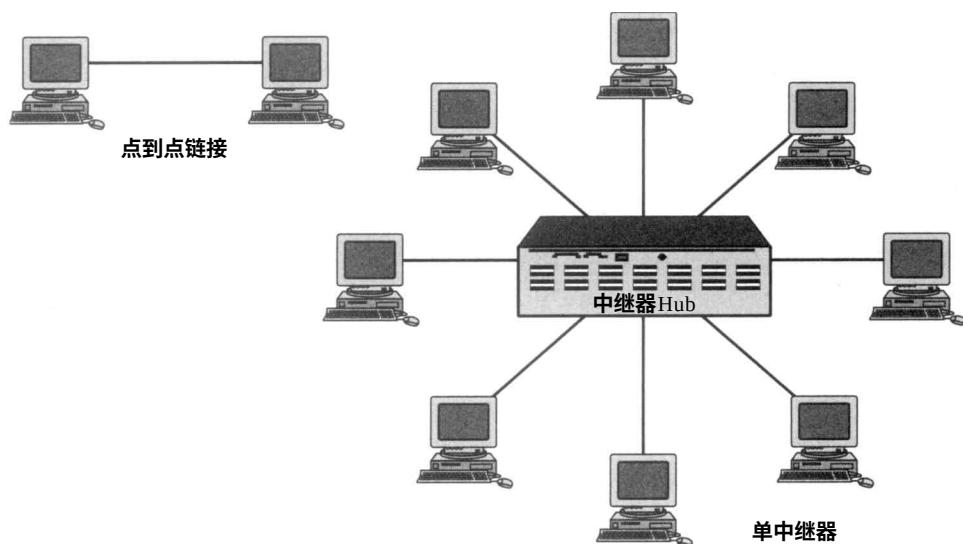


图9-2 千兆以太网共享式LAN拓扑结构

2. 交换式千兆以太网

当然, 使用网桥(交换机)隔离冲突域可产生更丰富的拓扑构型。千兆以太网并没有减少交换式 LAN 的拓扑类型。设计交换式千兆以太网时的唯一限制是物理介质所支持的最大长度, 以及你在银行存款的数目。使用全双工操作可构造最大规模的网络, 因为不存在 MAC 的距离限制。

9.2.6 介质无关接口

以太网的每个数据率上都有多种介质类型。为支持同轴电缆、双绞线和光纤, 每种以太网系统在控制器设备(如网络接口控制器或 NIC[⊖])和物理层连接设备(如收发器)之间都加入了(至少在逻辑上)一个标准接口。这可使控制器制造商能独立地制造他们的设备, 同时保持了灵活性, 可让终端用户选择其喜欢的介质。这个接口点正是介质无关接口, 三种普通以太网数据率中的每一个都定义了一个这种接口, 正如第 7 章中讨论的那样。

千兆以太网引入了一个新的千兆位介质无关接口(GMII), 它是快速以太网 MII 的逻辑扩展。两种设计的主要差别在于接口宽度(字节宽与半字节宽)以及时钟频率(125MHz 与 25MHz)。

快速以太网在设计上允许使用外置的物理实现(即连接外部收发器的电缆和连接器), 而 GMII 不允许这么做, 主要是由于在高速时钟和很高的信号变化条件下很难维持信号的完整性。因此, GMII 在设备中充当产品内部 IC 之间的内部接口。

⊖ 制造上会采用一些专用方法实现中继器的互连(即堆叠式中继器), 它可使多个设备像单个中继器那样工作。这在 10Mb/s 和 100Mb/s 中继器中是很普遍的做法, 而由于千兆位操作的时序限制, 这种方法将很难实现。

⊖ NIC 同时代表网络接口控制器和网络接口卡。

表9-4总结了各种介质无关的接口，GMII的细节将在第12章中讨论。

表9-4 介质无关接口

	10Mb/s连接单 元接口(AUI)	10/100Mb/s介质 无关接口(MII)	1000Mb/s千兆介 质无关接口(GMII)
使用的电缆	4对线，分别屏蔽	20对线，整体屏蔽	无
最大长度	50m	0.5m	N/A
连接器	15针，D型(IEC 807-2)	40针，高密度D型 (IEC 1076-3-101)	无
数据信号	串行，曼彻斯特编码	4比特宽，NRZ	8比特宽，NRZ
支持的数据率	10Mb/s	10/100Mb/s	1000Mb/s
时钟率	N/A ^①	2.5/25 MHz	125 MHz

① 不需要单独的时钟，它被编码到曼彻斯特数据流中。

9.2.7 自动协商

在第8章中已讨论过，快速以太网实现了一种链路自动配置机制，称为自动协商。这是必需的，因为已经广泛部署的快速以太网有多种类型，它们之间可能互不兼容但使用相同的连接器(RJ-45)。千兆以太网沿续了这种策略，并最大程度地保证了这种设备的自动配置能力。除了铜介质外，这种策略已被扩展到部分光纤链路的配置。

在千兆以太网中提供了两种独立的自动协商形式：一种用于 1000BASE-X系统，另一种用于1000BASE-T。使用1000BASE-X信令的千兆以太网可自动地将自己配置为：

- 半双工操作，以及
- 流量控制，同时包括对称和非对称操作以及非对称方向。

然而，1000BASE-X自动协商严格地限于千兆位操作，它不能在链路伙伴间协商数据率。确保链路两端的设备都可进行千兆位操作仍然是网络安装者的责任。同时，安装者还必须保证链路两端都使用相同类型的驱动器 /接收器(例如，长波与短波激光器)，因为不同的驱动器 /收发器系统相互之间都是不兼容的。由于许多配置仍需手工完成，1000BASE-X的自动协商不像其UTP对手那么有用，它只解决了双工操作和流量控制的配置问题。另一方面，如果两端连接到兼容的1000BASE-X设备，你就可确信这些设备能使用普通1000BASE-X信令方法通信。如果是这样，自动协商信令可使用与普通数据交换所用的相同的 8B/10B编码以及行驱动器 /收发器，而不是用于UTP电缆上的专用链路脉冲信令。

1000BASE-X自动协商使用了与UTP电缆上的自动协商相同的协议和报文格式。它只对用于物理介质上的电-光信令，以及报文自身的某些位的语义做了改变。与快速以太网一样，自动协商机制是可扩展的，可支持将来可能加入的任何附加特性。

现有快速以太网的UTP自动协商协议和信令不做任何改变地用在了UTP上的千兆以太网(1000BASE-T)上。协商数据的语义已被扩展，它包含了对千兆位数据率的协商，还包括了对所用物理信令方法需要的其他一些特性的协商。

9.2.8 10/100/1000Mb/s以太网技术移植总结

表9-5总结了10、100和1000Mb/s以太网的主要差异。

表9-5 以太网技术升级总结

特 点		10Mb/s	100Mb/s	1000Mb/s
高级软件接口			无确认、无连接服务 单播/组播/广播寻址 46~1500 字节数据载荷/帧	
拓 扑	半双工 (共享 LAN)	多点总线 点到点链路 单个和多个中继器 星型布线中继器集线器(多层)	点到点链路 星型布线集线器(单中继器) 星型布线集线器(双中继器)	点到点链路 星型布线集线器(单中继器)
	全双工 (交换式 LAN)		点到点链路 交换式集线器	
MAC 特点		最小帧	64 字节(加上引导/SFD, 46 字节数据载荷)	
		最大帧	1518 字节(加上引导/SFD, 1500 字节数据载荷)	
介 质	时隙	51.2μs(512 比特时间)	5.12μs(512 比特时间)	4.096μs(4096 比特时间)
	帧间隙	9.6μs(96 比特时间)	960ns(96 比特时间)	96ns(96 比特时间)
	载波扩展	无	无	有
	帧突发	无	无	有(可选)
	半双工	粗同轴电缆, 500m	3/4/5 类 UTP, 100m	5 类 UTP, 100m
	(100/1000Mb/s	细同轴电缆, 185m	(100BASE-T4,T2)	(1000BASE-TX)
	光纤长度由从中	宽带同轴电缆, 1.8km	5 类 UTP, 100m	62.5μm 多模光纤,
	中继器向外辐射的	3 类 UTP, 约 100m	(100BASE-TX)	111m(1000BASE-SX/LX)
	等距半径确定)	(10BASE-T)	62.5μm 多模光纤,	50μm 多模光纤,
		5 类 UTP, 约 150m	160m(100BASE-FX)	111m(1000BASE-SX/LX)
		(10BASE-T)		10μm 单模光纤,
		62.5μm 多模光纤,		111m(1000BASE-LX)
		500m(10BASE-FP)		150ΩSTP, 25m
		62.5μm 多模光纤,		(1000BASE-CX)
		1000m(FOIRL)		
		62.5μm 多模光纤,		
		2000m(10BASE-FL)		
	全双工	3 类 UTP, 约 100m	3/4/5 类 UTP, 100m	5 类 UTP, 100m
		(10BASE-T)	(100BASE-T2)	(1000BASE-TX)
		5 类 UTP, 约 150m	5 类 UTP, 100m	62.5μm 多模光纤, 275/
		(10BASE-T)	(100BASE-TX)	550m(1000BASE-SX/LX)
		62.5μm 多模光纤,	62.5μm 多模光纤,	50μm 多模光纤, 550m
		2000m(10BASE-FL)	2000m(100BASE-FX)	(1000BASE-SX/LX)
				10μm 单模光纤, 5km
				(1000BASE-LX)
				150ΩSTP, 25m
				(1000BASE-CX)
	信令编码	曼彻斯特(所有介质)	4B/5B(100BASE-X 8B/6T(100BASE-T4) PAM 5×5	8B/10B(1000BASE-X) {未定}(1000BASE-T)
			(100BASE-T2)	
	介质无关接口	AUI(15 针连接器, 50m)	MII(40 针连接器, 0.5m)	GMII(无连接器和电缆)
自动协商	比特宽接口	半字节宽接口	字节宽接口	
	在 10BASE-T(UTP)上自动协商	在 100BASE-TX/T4/T2(UTP)上自动协商	在 1000BASE-X 和 1000-BASE-T(UTP)上自动协商	