计算机网络原理

类目：计算机类
书名：计算机网络原理
主编：刘 琼 王海涛 彭 浩
出版社：电子科技大学出版社
开本：大 16 开
书号：978-7-5770-1352-7
使用层次：通用
出版时间：2025 年 5 月
定价：49.80 元
印刷方式：单色
是否有资源：有

计算机网络原理

策划编辑：吴艳玲　万晓桐
责任编辑：龚　煜
封面设计：旗语书装

ISBN 978-7-5770-1352-7
定价：49.80元

计算机类创新融合教材
“互联网+”教育改革新理念教材

计算机网络原理

主编◎刘　琼　王海涛　彭　浩

电子科技大学出版社

计算机类创新融合教材
“互联网+”教育改革新理念教材

计算机网络原理

主编◎刘　琼　王海涛　彭　浩

电子科技大学出版社
University of Electronic Science and Technology of China Press

计算机类创新教材
教育改革新理念教材

计算机网络原理

主　审 ◎ 张红霞

主　编 ◎ 刘　琼　王海涛　彭　浩

副主编 ◎ 张　鑫　孟建良　王　珏

王　扬　陶玉森　马永忠

陈小静　游中华　张　梅

周　洁　张德茂　方　旭

陈　臻　罗　波　王　伟

电子科技大学出版社
University of Electronic Science and Technology of China Press
·成都·

图书在版编目（CIP）数据

计算机网络原理 / 刘琼，王海涛，彭浩主编.
成都：成都电子科大出版社，2025. 5. --ISBN 978-7-5770-1352-7

Ⅰ. TP393

中国国家版本馆 CIP 数据核字第 2024019KU5 号

计算机网络原理
JISUANJI WANGLUO YUANLI
刘　琼　王海涛　彭　浩　主编

策划编辑　吴艳玲　万晓桐
责任编辑　刘　凡
责任校对　万晓桐
责任印制　梁　硕

出版发行　电子科技大学出版社
　　成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦九楼　邮编 610051
主　　页　www.uestcp.com.cn
服务电话　028-83203399
邮购电话　028-83201495

印　　刷　涿州汇美亿浓印刷有限公司
成品尺寸　210 mm × 285 mm
印　　张　14
字　　数　379 千字
版　　次　2025 年 5 月第 1 版
印　　次　2025 年 5 月第 1 次印刷
书　　号　ISBN 978-7-5770-1352-7
定　　价　49.80 元

PREFACE

前 言

随着计算机网络技术的发展，特别是互联网在全球范围内的普及，计算机网络突破了以往人们在信息交流中所受到的时间和空间限制，成为人们获取信息、交换信息的重要途径和不可缺少的工具，并对社会发展、经济结构及人们日常的生活方式产生了深刻影响。当谈到计算机网络时，人们自然会想到“网络强国”“互联网 +”“信息安全”等名词。随着电子信息产业的快速发展，我国正从网络大国向网络强国全面迈进。

本书按照《高等学校课程思政建设指导纲要》的要求，结合高等学校电子信息类专业人才培养目标，以岗位技能需求为起点，以技能竞赛为导向，融合“1+X”证书制度，拓展学生就业创业本领，缓解结构性就业矛盾，做到“政、岗、课、赛、证”五位一体融合，使学生系统地学习计算机网络的基础知识、运行机制、实现原理，对计算机网络形成一个整体的认识与理解。

本书以支撑互联网、移动互联网与物联网发展的共性技术为主线，系统地讲述了计算机网络概述、物理层、数据链路层、网络层、传输层、应用层、网络安全、常见网络故障的排除。本书在讨论网络基本工作原理的同时，注重学生对网络应用系统设计与网络应用软件编程方法的学习，贴近技术发展的前沿，对当前网络技术发展的热点问题进行了讨论。

本书既可作为高等学校电子信息类专业的教材，也可作为计算机网络学习的自学教材。

在编写本书过程中，编者参阅了大量的文献资料，借鉴了许多著作的精华，在此，向各位专家一并表示感谢，本书如有版权问题请联系我们。由于编者水平有限，书中难免存在疏漏之处，敬请广大师生和教育界同行批评指正。

CONTENTS

目 录

第 1 章　计算机网络概述

学习目标

知识目标

1. 理解互联网的基本概念和发展历程。
2. 掌握计算机网络的定义、分类及性能指标。
3. 理解计算机网络的体系结构，包括早期和现代网络结构的比较。
4. 了解计算机网络发展的新技术，如智能代理、智能光网络技术和 5G 技术。

能力目标

1. 能够描述互联网的结构、运行机制及其在现代社会中的重要性。
2. 能够区分和比较不同类型的计算机网络。
3. 能够讨论和评估新技术在计算机网络发展中的应用和影响。

素质目标

1. 培养对信息技术发展趋势的敏感性和洞察力。
2. 提升逻辑思维和系统分析的能力。
3. 增强团队合作与沟通能力，能够有效地在团队中讨论和解决网络相关问题。
4. 培养自主学习和持续学习的能力，以跟随技术发展的步伐。

本章概述

本章将介绍计算机网络的基本概念和发展历程，从互联网的起源讲起，涵盖了网络的定义、分类及性能评估指标。同时，还将深入探讨计算机网络的体系结构，其包括 TCP/IP 分层模型和常见网络设备的功能与作用。此外，还将介绍新兴技术，如智能代理、智能光网络技术和 5G 技术在计算机网络中的应用和发展趋势。

1.1 互联网概述

在过去的几个世纪里，每个世纪都有一种占主导地位的技术。18 世纪，随着工业革命到来的是机械时代；19 世纪则属于蒸汽机时代；而到了 20 世纪，信息的搜集、处理和分发技术成为关键的技术。随着计算机技术和通信技术的结合，21 世纪的一个重要特征就是数字化、网络化和信息化，它是一个以网络为核心的信息时代。要实现信息化就必须依靠完善的网络，因此，网络基础设施现在已经成为信息社会的命脉和发展知识经济的重要基础。网络对社会生活的很多方面以及对国民经济的发展都已经产生了不可估量的影响。网络在人们的日常生活、学习和工作中所起的作用越来越重要。为此有必要了解一下，什么是计算机网络？计算机网络到底有哪些应用？如何组建网络？

今天的互联网无疑是有史以来由人类创造且精心设计的最大系统，该系统具有数以亿计相连的计算机、通信链路和交换机，有数十亿使用便携计算机、平板电脑和智能手机进行连接的用户，还有无数与互联网连接的“物品”，包括游戏机、监视系统、手表、眼镜、温度调节装置、体重计和汽车等。随着互联网的发展及应用，面对如此巨大并且具有如此众多不同组件和用户的互联网，怎么理解？计算机的工作原理是什么？计算机的结构如何？

无处不在的网络为我们与同一地区或全球各地的人们进行通信或共享信息和资源提供了便利。

1.1.1 当今网络

对于大多数人来说，使用网络已成为日常生活中不可或缺的一部分。网络改变了人与人之间传统的交流方式。

（1）日常生活中的网络。当今世界的网络让人与人之间的联系变得空前便利。当人们想到某个创意时，可以实现即时沟通，使创意变为现实；新闻事件和新的发现在几秒钟内就能举世皆知；人们可以在电商平台或商家网上平台进行购物，可以实现跨境交易，可以在网上办理旅行、住宿，甚至可以在网上获取目的地的天气；人们可以通过网络和大洋彼岸的朋友交流和玩游戏，网约车、出租车、自驾车司机手持一个手机就可以走遍全国不用问路，个人、企业之间通过网上银行足不出户就可以完成资金的流动；支付宝、微信等网络支付工具的出现改变了现金支付的方式。

（2）网络改变人们的学习方式。人们接受优质教育不再受到距离的限制。在线远程学习消除了地理位置的障碍，增加了人们的学习机会。网络提供了各种形式的学习方式，包括互动练习、评估和反馈。

（3）网络改变了人们的通信方式。随着互联网的全球化，许多新的通信方式也应运而生，人们可以更加便利地实现全球通信。如腾讯的 QQ、微信，阿里巴巴的钉钉，微软的 MSN、ICQ 等即时通

信软件。

（4）网络改变了我们的工作方式。自 2020 年以来，各行政大厅、企事业单位开展网上办公，网上员工招聘、培训，召开远程视频会议，教育部门也开展了“停学不停课”网上教学活动，这些都与我们传统的工作方式有所不同。网络直播产生了网红经济，催生了新的职业。

（5）网络改变了人们的娱乐方式。互联网可以支持传统的娱乐形式，例如在线收听歌曲、欣赏电影、阅读书籍以及下载资料以便将来脱机访问；互联网也可以在线观看体育赛事和音乐会的直播、录像以及点播。网络促进了各种新娱乐形式（如在线游戏）的出现，玩家们参与游戏设计者们设计的各种网上游戏的角逐。人们可以和世界各地认识的或不认识的朋友在网上并肩作战，就像我们在同一游戏室一样。网络给了我们与以往完全不同的体验。

1.1.2　身边的网络

网络规模可以是小到两台计算机组成的简易网络，也可以是大到连接数百万台甚至更多的设备的超级网络。

（1）将少量的几台计算机互联并将它们连接到互联网的小型家庭网络。可以在多台本地计算机之间共享资源，如打印机、文档、图片和音乐等。

（2）可让一个家庭办公室或远程办公室的计算机连接到企业网络或访问集中的共享资源的小型办公室或家庭办公室（SOHO）网络。

（3）可能有许多站点，包含成百上千相互连接的计算机的大、中型网络（例如大型企业和学校使用的网络）。在大型企业和大型组织中，网络的应用更加广泛。

（4）互联网是连接全球亿万台计算机的网络，是现存最大的网络，是由众多网络所组成的网络。

1.1.3　计算机网络概念

对于计算机网络（简称“网络”）没有严格的定义，其内涵也在不断变化中。所谓网络，就是将分布在不同地理位置上的具有独立工作能力的计算机、终端及其附属设备用通信设备和通信线路连接起来而形成的计算机集合，通过配置网络软件，计算机之间可以借助于通信线路传递信息、共享软件、硬件和数据等资源。也就是说，网络是由若干节点（node）和连接这些节点的链路（link）组成。如图 1–1 所示为一个具有四个节点和三条链路的网络。我们看到一台服务器、一台计算机（微机）、一台笔记本通过三条链路连接到一个交换机上，构成了一个简单的网络。

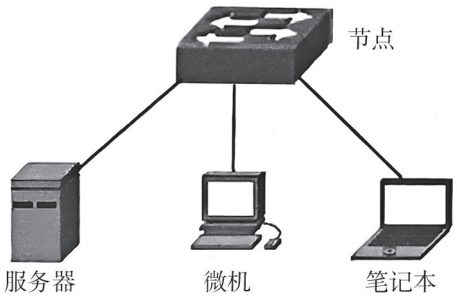


图 1–1　计算机网络示意图

从以上网络的定义可以看出以下三点。

（1）一个网络可以包含多个“节点”，节点可以是计算机、集线器、交换机或路由器等，在后面单元我们会介绍集线器、交换机和路由器等设备。

（2）网络是通过通信设备和通信线路把有关的计算机有机地连接起来的。所谓“有机地”连接是指连接时彼此必须遵循所规定的约定和规则。

（3）建立网络的主要目的是实现通信、信息的交流、计算机分布资源的共享或者是协同工作。其中，最基本的目的是资源共享，包括硬件资源、软件资源和数据资源的共享。

1.1.4 互连网与互联网

网络和网络之间还可以通过路由器等设备互连起来，这样就构成了一个覆盖范围更大的网络，这样的网络称为互连网（internet），如图 1–2 所示。因此，互连网是网络的网络（network of networks）。

网络我们可以用一朵云来表示，这时候既可以把网络上的计算机包含在云中（如图 1–2 所示），也可以把计算机画在云的外边（如图 1–3 所示），通常，为了便于大家理解讨论计算机之间的通信等问题，一般采用把计算机画在云外。把与网络相连的计算机称为主机（host），这样，在图 1–3 中，用云表示的互联网（Internet）里面就剩下许多路由器和连接这些路由器的链路了。

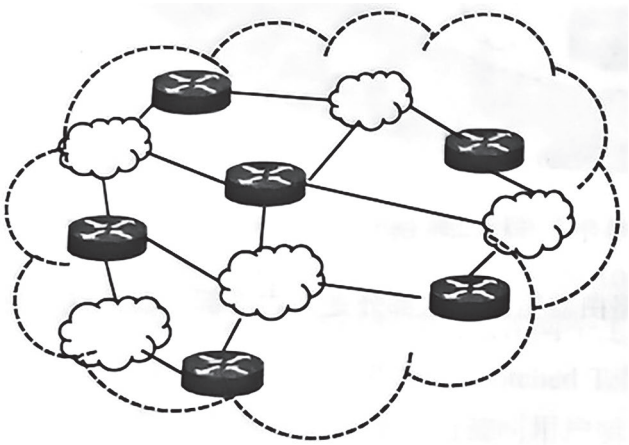


图 1–2　互连网（网络的网络）

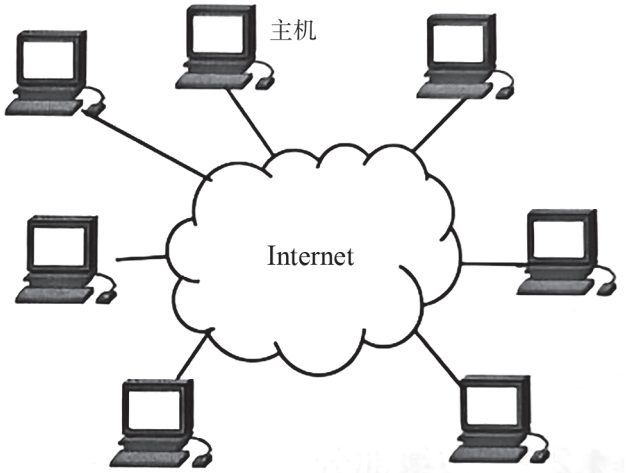


图 1–3　Internet 与连接的主机

不久前，这些主机多数是传统的桌面 PC、笔记本、Linux 工作站以及所谓的服务器（用于存储和传输 Web 页面和电子邮件报文、视频等各种信息）。然而，现在越来越多的非传统 PC 如平板电脑，智能手机、电视、游戏机、家用电器、交通信号灯、监视系统、手表、眼镜、温度调节装置、汽车控制系统等设备也连接到了互联网中。

由此，大家可以初步建立这样的基本概念，即通过网络把许多计算机连接在一起，而通过互联网则把许多网络连接在了一起，因此，互联网就是世界上最大的计算机网络。

互联网（Internet）是世界上最大的互连网络（用户数以亿计，互连的网络数以百万计），是一个世界范围的计算机网络，即它是一个互联了遍及全世界数十亿计算机设备的网络。

据统计，在 2015 年有 134 亿台设备与互联网相连，而到了 2023 年则达到了 430 亿台设备。2016 年，全球互联网用户数为 34.2 亿人，相当于全球人口的 46%；而到了 2023 年，全球互联网用户数为 53 亿人，占全球总人口的 66%。

Internet（互联网）是一个专用名词，它指当前全球最大的、开放的、由众多网络相互连接而成的特定计算机网络，它采用 TCP/IP 协议族作为通信的规则，其前身是美国的 ARPAnet（Advanced Research Projects Agency network，高级研究计划局网络）。

1.2 计算机网络定义及分类

1.2.1 计算机网络的定义及形成

在计算机网络发展的不同阶段中，人们对计算机网络提出了不同的定义，它反映了当时网络技术发展的水平，以及人们对网络的认识程度。这些定义可以分为广义的观点、资源共享的观点和用户透明性的观点三类。从目前计算机网络的特点来看，资源共享观点能比较准确地描述计算机网络的基本特征。相比之下，广义的观点定义的是计算机通信网络，而用户透明性的观点定义的是分布式计算机系统。

1. 计算机网络定义的基本内容

用资源共享的观点将计算机网络定义为：“以能够相互共享资源的方式互联起来的自治计算机系统的集合。”

用资源共享观点定义的计算机网络符合计算机网络的基本特征，这主要表现在以下三个方面。

（1）计算机网络建立的主要目的是实现计算机资源的共享。计算机资源主要指计算机硬件、软件与数据。网络用户不但可以使用本地计算机资源，而且可以通过网络访问联网的远程计算机资源，还可以调用网络中的几台计算机共同完成某项任务。

（2）互联的计算机是分布在不同地理位置的多台独立的“自治计算机”。互联的计算机之间可以没有明确的主从关系，每台计算机既可以联网工作，也可以脱网独立工作。联网计算机可以为本地用户提供服务，也可以为远程网络用户提供服务。

（3）联网计算机之间的通信必须遵循共同的网络协议。计算机网络是由多个互联的节点组成的，节点之间要做到有条不紊地交换数据，每个节点都必须遵守一些事先约定好的通信规则。这就与人们之间的对话一样，要么大家都说中文，要么大家都说英文。如果一个说中文，一个说英文，那么就需要找一个翻译。如果一个人只能说日文，另一个人又不懂日文，而又没有翻译，那么这两个人就无法进行交流。

我们判断计算机是否互联成计算机网络，主要是看它们是不是独立的“自治计算机”。

如果两台计算机之间有明确的主从关系，其中一台计算机能控制另一台计算机，则其中一台计

算机就不是“自治计算机”。根据资源共享观点的定义，由一个主节点与多个从节点组成的计算机系统不是计算机网络，因此，带有多个远程终端或远程打印机的计算机系统并不是一个计算机网络。

2. 计算机网络与分布式计算机系统的区别

分布式计算机系统（distributed computer system）通常简称为“分布式系统”，它与计算机网络是两个常被混淆的概念。用用户透明性的观点定义计算机网络：存在一个能为用户自动管理资源的网络操作系统，由它来调用完成用户任务所需要的资源，而整个网络像一个大的计算机系统一样对用户是透明的。严格地说，用户透明性观点的定义描述的是一种分布式计算机系统。

分布式系统一般具有以下特征。

（1）系统拥有多种通用的物理和逻辑资源，可以动态地给它们分配任务。

（2）系统中分散的物理和逻辑资源通过计算机网络实现信息交换。

（3）系统中存在一个以全局方式管理系统资源的分布式操作系统。

（4）系统中的计算机之间既合作又自治。

（5）系统内部结构对用户是完全透明的。

从以上阐述可以看出，计算机网络与分布式系统的共同点主要表现在一般的分布式系统建立在计算机网络之上，因此，分布式系统与计算机网络在物理结构上基本相同。两者的区别主要表现在分布式操作系统与网络操作系统的设计思想不同，因此它们的结构、工作方式与功能也不同。

网络操作系统要求网络用户在使用网络资源时，必须了解网络资源的分布情况。网络用户要了解网络中各种计算机的功能与配置、应用软件的分布、网络文件目录结构等。

如果用户要读取网络中的某个共享文件，必须知道这个文件存放在哪台服务器中，以及它存放在服务器的哪个目录中。例如，如果老师将学生的考试成绩文件“wu\test”存放在文件服务器 fileserver 的目录 account 中，学生要查询文件就必须知道文件在网络中的路径“fileserver\account:wu\test”。

分布式操作系统以全局方式管理系统资源，它能自动为用户任务调度网络资源。对于分布式系统来说，多个互联的计算机系统对用户是“透明”的。当用户输入命令去运行一个程序时，分布式操作系统能根据用户的要求，在系统中选择最合适的处理器，将用户需要的文件自动传送到该处理器，并在完成操作后将结果传输给用户。也就是说，分布式系统的用户并不会意识到有多个处理器存在，整个系统就像一个虚拟的单一处理器。任务在处理器之间的分配与文件的调用、传输、存储都自动进行。

因此，分布式系统与计算机网络的主要区别不在物理结构上，而在高层软件上。分布式系统是一个建立在计算机网络上的软件系统，这种软件可以保证系统的一致性与透明性。用户不必关心网络环境中资源的分布情况及联网计算机的差异，用户的作业管理与文件管理过程对用户是透明的。计算机网络为分布式系统的研究提供了技术基础，而分布式系统是计算机网络发展的高级阶段。

3. 计算机网络的结构

（1）早期的计算机网络结构。早期的计算机网络主要是广域网，通过通信线路将分布在不同地理位置的大型机或中、小型机相互连接起来。计算机网络要完成数据处理与数据通信两大基本功能。早期的计算机网络可以分成两个部分：负责数据处理的主机与终端，以及负责数据通信处理的通信

控制处理机（communication control processor，CCP）与通信线路。从计算机网络组成的角度来看，早期的计算机网络从逻辑功能上分为资源子网和通信子网两个部分。图 1–4 给出了早期计算机网络的结构。

（2）现代的计算机网络结构。随着微型计算机和局域网的广泛应用，使用大型机与中型机的终端系统的用户减少，因此，现代的网络结构已经发生变化。随着微型计算机的广泛应用，大量的微型计算机通过局域网连入广域网，局域网与广域网、广域网与广域网通过路由器互联。在 Internet 中，用户计算机通过校园网、企业网或 ISP 连入地区主干网，地区主干网通过国家主干网连入国家间的高速主干网，这样就形成由路由器互联的大型、具有层次结构的互联网络。图 1–5 给出了现代计算机网络的结构示意图。

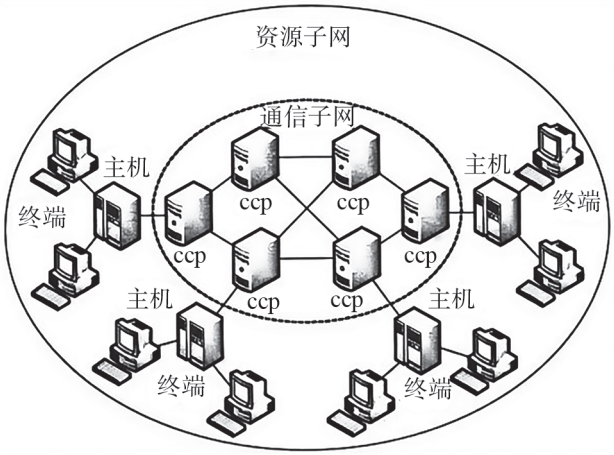


图 1–4　早期计算机网络的结构

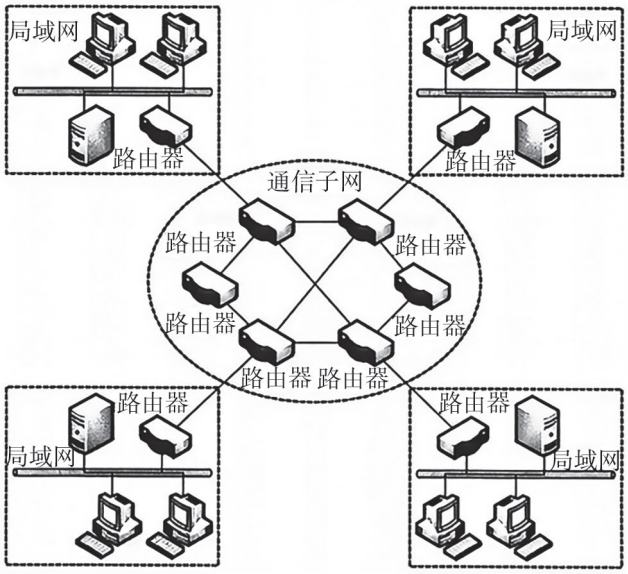


图 1–5　现代计算机网络的结构示意图

4. 计算机网络的形成

任何一种新技术的出现都必须具备两个条件：强烈的社会需求与前期技术的成熟。计算机网络技术的形成与发展也证实了这条规律。1946 年，世界上第一台电子数字计算机 ENIAC 在美国诞生时，计算机技术与通信技术并没有直接的联系。20 世纪 50 年代初，由于美国军方的需要，美国半自动地面防空系统进行了计算机与通信技术相结合的尝试，将远程雷达与其他测量设施得到的信息通过长 2.41×10^6 km 的通信线路与一台 IBM 计算机连接，进行了集中的防空信息处理与控制。

为了达到这个目的，首先要完成数据通信技术的基础研究。在这项研究的基础上，可以将地理位置分散的多个终端通过通信线路连接到一台中心计算机上。用户可以在自己办公室的终端输入程序，通过通信线路传送到中心计算机，分时访问和使用其资源并进行信息处理，处理结果再通过通信线路返回用户终端显示或打印。人们把这种以单个计算机为中心的联机系统称为面向终端的远程联机系统，它是一种典型的计算机通信网络。20 世纪 60 年代初，美国航空公司建成由一台主机与分布在全美的 2 000 多个终端组成的航空订票系统 SABRE–1，这也是一种典型的计算机通信网络。

随着计算机应用的发展，出现了多台计算机互联的需求。这种需求主要来自军事、科研、企业

与政府部门，他们希望将分布在不同地点的计算机通过通信线路互联成计算机网络。网络用户可以使用本地计算机的软件、硬件与数据资源，也可以使用联网的其他计算机的软件、硬件与数据资源，以达到计算机资源共享的目的。

这个阶段研究的典型代表是美国国防部高级研究计划局的 ARPAnet（通常称为 ARPA 网）。1969 年，ARPA 提出将多个大学、公司和研究所的计算机互联的课题。1969 年，ARPAnet 只有 4 个节点；1973 年，ARPAnet 发展到 40 个节点；1983 年，其已达到 100 多个节点。ARPAnet 通过有线、无线与卫星通信线路，使网络覆盖从美国本土到夏威夷，甚至欧洲的广阔地域。

ARPAnet 是计算机网络技术发展的一个重要里程碑，它对计算机网络技术的主要贡献表现在以下几个方面：

（1）完成了对计算机网络的定义、分类与子课题研究内容的描述；

（2）提出了资源子网、通信子网的两级网络结构的概念；

（3）研究了报文分组交换的数据交换方法；

（4）采用了层次结构的网络体系结构模型与协议体系；

（5）促进了 TCP/IP 协议的发展；

（6）为 Internet 的形成与发展奠定了基础。

ARPAnet 的研究成果对世界计算机网络发展的意义是深远的。在它的基础上，20 世纪七八十年代计算机网络迅速发展，这一阶段出现了大量的计算机网络，仅美国国防部就资助建立了多个计算机网络。同时，还出现了一些研究实验性的计算机网络。例如，美国加利福尼亚大学劳伦斯原子能研究所的 OCTOPUS、法国信息与自动化研究所的 CYCLADES、国际气象监测网（WWWN）、欧洲情报网（EIN）等。

计算机网络可以按资源子网与通信子网来分别组建。在 20 世纪 70 年代中期，世界上开始出现由邮电部门或通信公司组建和管理的公用分组交换网，即公用数据网（PDN）。早期的公用数据网采用模拟通信的电话交换网，新型的公用数据网则采用数字传输技术与分组交换方法。典型的公用分组交换网有美国的 TELENET、加拿大的 DATAPAC、法国的 TRANSPAC、英国的 PSS、日本的 DDX 等。公用分组交换网为计算机网络发展提供了良好的外部通信条件，它可以为更多的用户提供数据通信服务。

以上讨论的是利用远程通信线路组建的广域网。随着计算机的广泛应用，局部地区计算机联网的需求日益强烈。在 20 世纪 70 年代初期，一些大学和研究所为实现多台计算机共同完成科学计算与资源共享的目的，开始了计算机局域网的研究。1972 年，美国加州大学建立了 Newhall 环网；1976 年，美国 Xerox 公司建立了总线拓扑的 Ethernet 网；1974 年，英国剑桥大学建立了 Cambridge Ring 环网。这些研究成果对 20 世纪 80 年代的局域网技术的发展起了重要作用。

1.2.2 计算机网络的分类

1. 按覆盖范围划分

虽然网络类型的划分有不同的标准，但是按地理范围划分是一种大家都认可的通用网络划分标

准。按这种标准可以把各种网络类型划分为局域网、城域网、广域网和互联网四种。

下面简要介绍这几种计算机网络。

（1）局域网（local area network，LAN）。局域网是最常见、应用得最广的一种网络。现在局域网随着整个计算机网络技术的发展和提高得到充分的应用和普及，几乎每个单位都有自己的局域网，甚至有的家庭中都有自己的小型局域网。很明显，所谓局域网，就是在局部地区范围内的网络，它所覆盖的地区范围较小。

局域网在计算机数量配置上没有太多的限制，少的可以只有两台，多的可达几百台。一般来说，在企业局域网中，工作站的数量在几十到几百台次。一般来说，在网络所涉及的地理距离上可以是几米至十千米。局域网一般位于一个建筑物或一个单位内，不存在寻径问题，不包括网络层的应用。

局域网的特点是：连接范围窄、用户数少、配置容易、连接速率高。目前，局域网最快的速率要算 10 Gbps 以太网。IEEE 802 标准委员会定义了多种主要的 LAN 网：以太网（Ethernet）、令牌环网（Token Ring）、光纤分布式接口网络（FDDI）、异步传输模式网（ATM），以及最新的无线局域网（WLAN）。这些都将在后面详细介绍。

（2）城域网（metropolitan area network，MAN）。一般来说，城域网是在一个城市，但不在同一地理小区范围内的计算机互联。这种网络的连接距离可以为 10 100 千米，它采用的是 IEEE 802.6 标准。MAN 与 LAN 相比扩展的距离更长，连接的计算机数量更多，在地理范围上可以说是 LAN 网络的延伸。在一个大型城市或都市，一个 MAN 网络通常连接着多个 LAN 网。如连接政府机构的 LAN、医院的 LAN、电信的 LAN、公司企业的 LAN 等。由于光纤连接的引入，使 MAN 中高速的 LAN 互连成为可能。

城域网多采用 ATM 技术做骨干网。ATM 是一个用于数据、语音、视频及多媒体应用程序的高速网络传输方法。ATM 包括一个接口和一个协议，该协议能够在一个常规的传输信道上，在比特率不变及变化的通信量之间进行切换。ATM 也包括硬件、软件，以及与 ATM 协议标准一致的介质。ATM 提供一个可伸缩的主干基础设施，以便能够适应不同规模、速度及寻址技术的网络。ATM 的最大缺点就是成本太高，所以一般在政府城域网中应用，如邮政、银行、医院等。

（3）广域网（wide area network，WAN）广域网也称为“远程网”，其所覆盖的范围比城域网（MAN）更广，它一般在不同城市之间的 LAN 或者 MAN 网络进行互联，地理范围可从几百千米到几千千米。因为距离较远，信息衰减比较严重，所以这种网络一般要租用专线，通过 IMP（接口信息处理）协议和线路连接起来，构成网状结构，解决寻径问题。这种广域网因为所连接的用户多，总出口带宽有限，所以用户的终端连接速率一般较低，通常为 9.6 kbps ～ 45 Mbps，如邮电部的 ChinaNET、ChinaPAC 和 ChinaDDN 网等。

（4）互联网（Internet）。互联网因其英文单词“Internet”的谐音，又称为“因特网”。在互联网应用如此广泛的今天，它已是人们每天都要与其打交道的一种网络，无论从地理范围，还是从网络规模来讲它都是最大的一种网络，即常说的“Web”“WWW”“万维网”等。从地理范围来说，它可以是全球计算机的互联，这种网络的最大的特点就是不定性，整个网络的计算机数量每时每刻随着人们网络的接入在不断地变化。当用户在互联网上时，用户的计算机可以算作互联网的一部分，但一旦当用户断开互联网的连接时，用户的计算机就不属于互联网了。它的优点非常明显，就是信

息量大、传播广，无论用户身处何地，只要联入互联网就可以对任何可以联网的用户发出信函和广告。因为互联网的复杂性，所以其实现的技术也非常复杂，这一点读者可以通过后面要讲的几种互联网接入设备详细地了解到。

2. 按传输介质分类

按照传输介质可以将计算机网络分为有线网和无线网。有线网是指使用铜缆或光纤，构成有线网络。有线网络在某些场合要受到布线的限制：布线、改线工程量大，线路容易损坏，网中的各节点不可移动。特别是当要把距离较远的节点联结起来时，敷设专用通信线路布线施工难度、费用、耗时非常大。这些问题都对正在迅速扩大的联网需求形成了严重的瓶颈阻塞，限制了用户联网。无线网指的是采用无线传输媒介的计算机网络，结合了最新的计算机网络技术和无线通信技术。无线局域网是有线局域网的延伸。使用无线技术来发送和接收数据，减少了用户的连线需求。

与有线局域网相比较，无线局域网具有开发运营成本低，时间短，投资回报快，易扩展，受自然环境、地形及灾害影响小，组网灵活快捷等优点。可实现“任何人在任何时间、任何地点以任何方式与任何人通信”，弥补了传统有线局域网的不足。随着 IEEE 802.11 标准的制定和推行，无线局域网的产品将更加丰富，不同产品的兼容性将得到加强。现在，无线网络的传输率已超过了 10 Mbps，并且还在不断变快。目前，无线局域网除能传输语音信息外，还能顺利地进行图形、图像及数字影像等多种媒体的传输。

有线网络通过网线将各个网络设备连接到一起，不管是路由器、交换机还是计算机，网络通信都需要网线和网卡。而无线网络则大大不同，目前广泛应用的 IEEE 802.11 标准无线网络是通过 2.4 GHz 无线信号进行通信的，由于采用无线信号通信，在网络接入方面就更加灵活了，只要有信号就可以通过无线网卡达到网络接入的目的。同时，网络管理者也不用再担心交换机或路由器端口数量不足而无法完成扩容工作。总的来说，中、小企业无线网络相比传统有线网络，其特点主要体现在以下两个方面。

（1）无线网络组网更加灵活。无线网络使用无线信号通信，网络接入更加灵活，只要有信号的地方就可以随时随地将网络设备接入企业内网。因此，在企业内网应用需要移动办公或即时演示时无线网络优势更加明显。

（2）无线网络规模升级更加方便。无线网络终端设备接入数量限制更少，相比有线网络一个接口对应一个设备，无线路由器容许多个无线终端设备同时接入无线网络，因此在企业网络规模升级时，无线网络优势更加明显。

3. 按拓扑结构划分

网络拓扑结构是指用传输媒体互联各种设备的物理布局。计算机网络的拓扑结构是把网络中的计算机和通信设备抽象为一个点，把传输介质抽象为一条线，由点和线组成的几何图形就是计算机网络的拓扑结构。计算机网络的最主要的拓扑结构有总线型拓扑、星形拓扑、环形拓扑及它们的混合型。

（1）总线型拓扑结构。总线型拓扑结构是将网络中的所有设备通过相应的硬件接口直接连接到公共总线上，节点之间按广播方式通信，一个节点发出的信息，总线上的其他节点均可“收听”到。

总线拓扑结构的优点：结构简单、布线容易、可靠性较高，易于扩充，节点的故障不会殃及系统，是局域网常采用的拓扑结构。其缺点：所有的数据都需经过总线传送，总线成为整个网络的瓶颈；出现故障诊断较为困难。另外，信道共享，连接的节点不宜过多，总线自身的故障可以导致系统的崩溃。最著名的总线拓扑结构是以太网（Ethernet）。

（2）星形拓扑结构。星形拓扑结构是一种以中央节点为中心，把若干外围节点连接起来的辐射式互联结构。这种结构适用于局域网，特别是近年来局域网大都采用这种连接方式。这种连接方式以双绞线或同轴电缆作连接线路。该拓扑结构的优点：结构简单、容易实现、便于管理，通常以交换机作为中央节点，便于维护和管理。缺点：中心节点是全网络的可靠瓶颈，中心节点出现故障会导致网络的瘫痪。

（3）环形拓扑结构。环形拓扑结构是各节点通过通信线路组成闭合回路，环中数据只能单向传输，信息在每台设备上的延时时间是固定的。特别适合实时控制的局域网系统。该拓扑结构的优点：结构简单，适合使用光纤，传输距离远，传输延迟确定。其缺点：环网中的每个节点均成为网络可靠性的瓶颈，任意节点出现故障都会造成网络瘫痪，另外，故障诊断也较困难。最著名的环形拓扑结构网络是令牌环网（Token Ring）。

（4）树状拓扑结构。树状拓扑结构是一种层次结构，节点按层次连接，信息交换主要在上、下节点之间进行，相邻节点或同层节点之间一般不进行数据交换。该拓扑结构的优点：连接简单，维护方便，适用于汇集信息的应用要求。其缺点：资源共享能力较低，可靠性不高，任何一个工作站或链路的故障都会影响整个网络的运行。

（5）网状拓扑结构。网状拓扑结构又称作“无规则结构”，节点之间的连接是任意的，没有规律。该拓扑结构的优点：系统可靠性高，比较容易扩展，但是结构复杂，每一节点都与多点进行连接，因此必须采用路由算法和流量控制方法。目前，广域网基本上采用网状拓扑结构。

（6）混合型拓扑结构。混合型拓扑结构就是两种或两种以上的拓扑结构同时使用。其优点：可以使网络的基本拓扑结构取长补短。其缺点：网络配置难度大。

（7）蜂窝拓扑结构。蜂窝拓扑结构是无线局域网中常用的结构。它以无线传输介质（微波、卫星、红外线、无线发射台等）点到点和点到多传输为特征，是一种无线网，适用于城市网、校园网、企业网，更适合于移动通信。

在计算机网络中还有其他类型的拓扑结构，如总线型与星形混合、总线型与环形混合连接的网络。

1.3 计算机网络性能

影响计算机网络性能的因素有很多，如传输的距离、使用的线路、传输技术、带宽等，而其中最主要的两个指标是带宽和时延。

1.3.1 计算机网络的性能指标

1. 带宽

我们知道，一个特定的信号往往是由许多不同的频率成分组成的。一个信号的带宽（bandwidth）是指该信号的各种不同频率成分所占据的频率范围，单位是赫（或千赫、兆赫等）。例如，在传统的通信线路上传送的电话信号的标准带宽是 3.1 kHz（语音信号的主要成分的频率范围是从 300 Hz 到 3.4 kHz 的模拟信号）。

当通信线路用来传送数字信号时，数据率就应成为数字信道最重要的指标。数据率（或比特率）是指数字信道传送数字信号的速率，单位是比特每秒，记作 bit/s（bps）。在计算机网络中，带宽用来表示网络的通信线路所能传送数据的能力。所以，人们愿意将“带宽”作为数字信道所能传送的“最高数据率”的同义语。因此，网络或链路的带宽单位就是比特每秒，或千比特每秒 kbps（10^3 bps）、兆比特每秒 Mbps（10^6 bps）、吉比特每秒 Gbps（10^9 bps）、太比特每秒 Tbps（10^{12} bps）。例如，我们平时所说的 10 Mbps 带宽，即指某数字信道的最高数据率为 10 Mbps。

另外，我们要注意的一点是，在通信领域和计算机领域，对数量级的词头“千”“兆”“吉”等的英文缩写的意义不同。在计算机领域，$K=2^{10}$，$M=2^{20}$，$G=2^{30}$，$T=2^{40}$。例如，kbps 一般用于线路速率的表示，表示每秒传送千比特；而 KB/s 表示千字节每秒，一般用于下载速率的表示。

2. 时延

时延（delay）是指数据（一个报文或分组）从一个网络（或链路）的一端传送到另一端所需要的时间。一般由发送时延、传播时延、处理时延三部分组成。

（1）发送时延。发送时延（transmissiondelay）是主机或路由器发送数据时使数据块从节点进入传送媒体，也就是从数据块的第一个比特开始发送算起，到最后一个比特发送完毕所需要的时间。发送时延又称“传输时延”，它的计算公式为

$$\text{发送时延}=\frac{\text{数据块长度（bit）}}{\text{信道带宽（bit/s）}}$$

信道带宽就是数据在信道上的发送速率，常称为数据在信道上的传输速率。

由此可见，对于一定的网络，发送时延不是固定不变的，而是与发送的数据块的大小成正比，与发送速率成反比。

（2）传播时延。传播时延是电磁波在信道中传播一定的距离需要花费的时间。

传播时延的计算机公式为

$$\text{传播时延}=\frac{\text{信道长度（m）}}{\text{电磁波在信道上的传播速度（m/s）}}$$

电磁波在不同的传输介质中的传播速率不同：在自由空间的传播速率是光速，即 3.0×10^5 km/s；在铜线电缆中的传播速率约为 2.3×10^5 km/s；在光纤中的传播速率约为 2.0×10^5 km/s。例如，1 000 km 长的光纤线路产生的传播时延大约为 5 ms。

从以上讨论可以看出，信号传输速率和电磁波在信道上的传播速率是两个完全不同的概念，因此，不能将发送时延和传播时延混淆。发送时延发生在机器内部的发送器（如网卡）中，传播时延则发

生在机器外部的传输信道媒体上。下面用一个简单的比喻来说明：假定有 10 辆车的车队从公路收费站入口出发到相距 100 km 的目的地。若每一辆车过收费站要花费 6 s，而车速是 100 km/h，那么整个车队从收费站到目的地总共花费的时间为 10 辆车经过收发站的时间 60 s（相当于网络中的发送时延），行车时间需要 60 min（相当于网络中的传播时延），因此总共花费的时间是 61 min。

（3）处理时延。处理时延是数据在交换节点为存储转发而进行一些必要的处理所花费的时间。在节点缓存队列中分组排队所经历的时延是处理时延中的重要组成部分。

这样，数据经历的总时延就是以上三种时延之和，即总时延 = 发送时延 + 传播时延 + 处理时延，图 1–6 描述了三种时延所产生的地方。

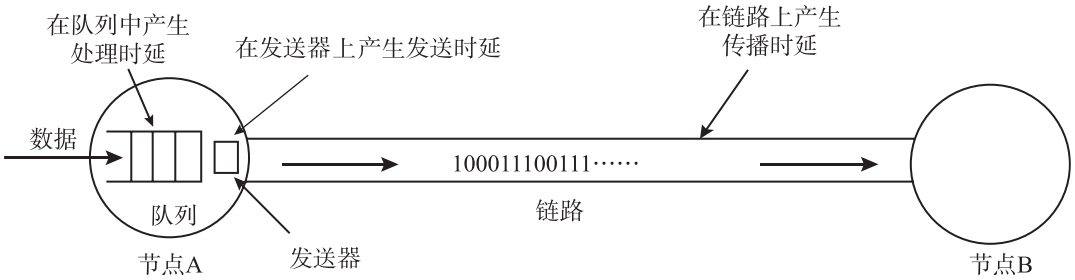


图 1–6　从节点 A 向节点 B 发送数据时三种时延产生的地方

一般来说，小时延的网络要优于大时延的网络。在某些情况下，一个低速率、小时延的网络很可能要优于一个高速率但大时延的网络。

另外，在总时延中，一般发送时延与传播时延是我们主要考虑的，但是究竟哪个时延占主导地位，必须具体分析。对于报文长度较大的情况，发送时延是主要矛盾；对于报文长度较小的情况，传播时延是主要矛盾。

3. 吞吐量

单位时间内通过某个网络（或接口）的数据量称为吞吐量。吞吐量的大小说明了单位时间内网络的通信量，其值受网络带宽的限制。例如，具有 8 个站的交换式以太网，其带宽为 10 Mbps，则该网络的吞吐量为 80 Mbps。有时，吞吐量也可以用每秒传送的字节数或帧数来表示。

1.3.2　计算机网络的非性能指标

除了性能指标外，还有如下一些非性能特征也对计算机网络的性能有很大的影响。

（1）费用。网络价格（包括设计和实现的费用）是构建网络必须考虑的问题之一。

因为网络的性能与其价格密切相关。一般来说，网络的速率越高，其价格也越高。在实际的工程中，总是选择性价比高的。

（2）质量。网络的质量取决于网络中所有构件的质量，以及这些构件是怎样组成网络的。网络的质量影响很多方面，如网络的可靠性、网络管理的简易性，以及网络的一些其他性能。但网络的性能与网络的质量并不是一回事。例如，有些性能还可以的网络，运行一段时间后就出现了故障，变得无法继续工作，说明其质量不好。高质量的网络往往价格也较高。

（3）标准化。网络硬件和软件的设计既可以按照通用的国际标准，也可以遵循特定的专用网络标准。最好采用国际标准设计，这样可以得到更好的互操作性，不仅更易于升级换代和维修，也更

容易得到技术上的支持。

（4）可靠性。可靠性与网络质量和性能都有密切的关系。速率高的网络可靠性不一定会很差。但是速率高的网络要想可靠地运行，则往往会更困难，同时所需的费用也会更高。

（5）可扩展性和可升级性。在构造网络时就应当考虑网络今后可能需要扩大规模和提高性能、软件版本等。网络的性能越高，其扩展费用往往也越高，难度也会相应增加。

（6）易于管理和维护。网络如果没有良好的管理和维护，就很难达到和保持所设计的性能。

1.4 计算机网络体系结构

计算机网络的组成在物理结构上可分为网络硬件和网络软件两部分，具体如下。

1. 网络硬件

常见的网络硬件有计算机、网络适配器（俗称“网卡”）、网络节点处理器（如交换机）、传输介质（如双绞线、同轴电缆、光纤等）、网络互联设备（如集线器、中继器、路由器、网关等）。

2. 网络软件

常见的网络软件有操作系统（如 Windows 2012 Server 和 Linux）、网络协议、通信软件和管理软件、应用软件（如浏览器和数据库系统）。

1.4.1 早期计算机网络的组成与结构

早期的计算机网络结构实质上是广域网的结构。从逻辑功能上看，广域网可分为资源子网与通信子网。

1. 资源子网

资源子网主要包括主机和终端，负责全网的数据处理，向网络用户提供各种网络资源与网络服务。人们日常所说的计算机其实和主机是一样的，只不过在互联网中，主机是指连接在互联网中某一个物理网络上的、可以运行应用程序的计算机系统。主机可以小到个人计算机，也可以大到如服务器这样的设备。终端则是与主机（计算机系统）相连的一种输入输出设备。只有大型或中小型用户终端接入本地计算机系统，才能实现对异地联网的计算机系统的硬件、软件或数据资源的访问和共享。

2. 通信子网

通信子网由通信控制处理器、链路与其他通信设备组成，执行数据传输、数据转发等任务。通信控制处理器在网络拓扑中被称为节点，链路为通信控制处理器之间，以及通信控制处理器与主机之间提供通信信道。

通信子网与资源子网缺一不可，没有通信子网，网络将不能工作；没有资源子网，通信子网提供的数据传输服务将失去意义。只有两者结合，才能共同组成一个完整的、实现资源共享的二层网络，这种网络才是社会所需要的数据通信网。通信子网与资源子网的示意如图 1–7 所示。

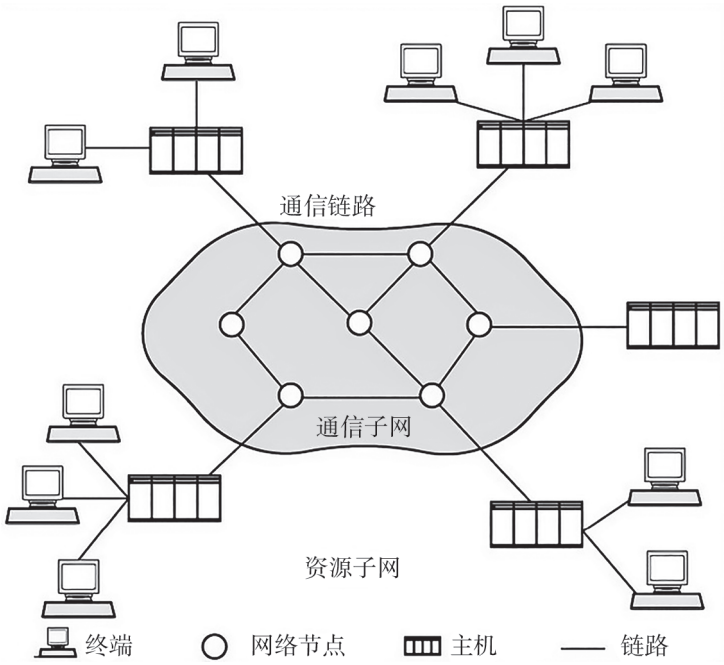


图 1–7　通信子网与资源子网的示意

1.4.2　互联网的组成与结构

人们组建网络的目的是实现地理位置不同的计算机之间的相互通信和资源共享，广域网的出现就是为了将分布在世界各地的计算机互联起来。随着互联网的广泛应用，许多大型企业和机构也部署了互联网。

互联网由分布在世界各地的广域网、城域网、局域网通过路由器互联而成，能够实现更多资源的共享和更大范围的信息传输。与此同时，互联网会变得越来越复杂。用户接入和使用的各种网络服务由互联网服务提供方（internet service provider，ISP）提供。ISP 铺设了大量链路，部署了大量通信设备，并向互联网管理机构申请了大量 IP 地址，为用户提供网络接入服务。

近年来，国家级主干网、各地区的城域网、校园网和企业网的设计与建设思路使得互联网的逻辑结构是一个层次型结构。图 1–8 展示了一个三层网络结构，其中，最上层为国家级主干网（又称“核心层”），中间层为地区级主干网（又称“汇聚层”），最底层为校园网或企业网（又称“接入层”）。用户通过接入层接入网络；地区级主干网和国家级主干网上连接着大量的服务器群，拥有很多的资源，为接入的用户提供各种互联网服务。

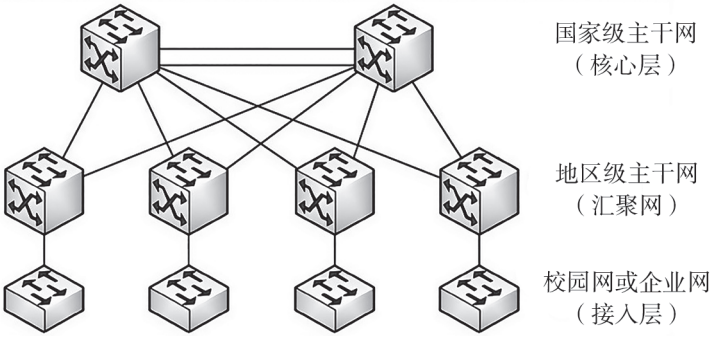


图 1–8　三层网络结构

1.5 初识计算机网络

现代社会，计算机网络被广泛应用于各个方面，并成为人们工作和生活中不可或缺的一部分。从企业、学校到家庭等场所都在应用计算机网络，从固定终端设备到可移动、便携的移动终端设备，再到家用电器、汽车、飞行器等都需要计算机网络。

计算机网络以实现资源共享和数据通信为目的。计算机网络是利用通信设备和传输介质，把地理位置分散的、具有独立功能的多个计算机系统相互连接起来，通过网络协议和网络软件来运行的计算机系统的集合。

1.5.1 TCP/IP 分层模型

在网络中，各种网络设备之间需要通过事先达成的一种详细的“约定”来实现通信，这种“约定”就是通常说的协议。不同厂家生产的网络设备、CPU 及具有不同操作系统的网络设备之间，只有遵循相同的协议才能够实现通信。不同的协议制定了不同的网络通信行为的规范，只有相互通信的设备使用相同的协议，并遵循协议规范才能实现通信。

TCP/IP 是计算机网络中广泛使用的协议。如图 1–9 所示为 TCP/IP 分层模型。图中不仅给出了 TCP/IP 分层模型与 OSI 模型分层之间的对应关系，也列举了 TCP/IP 各层的常用协议及实现各层协议的主体。

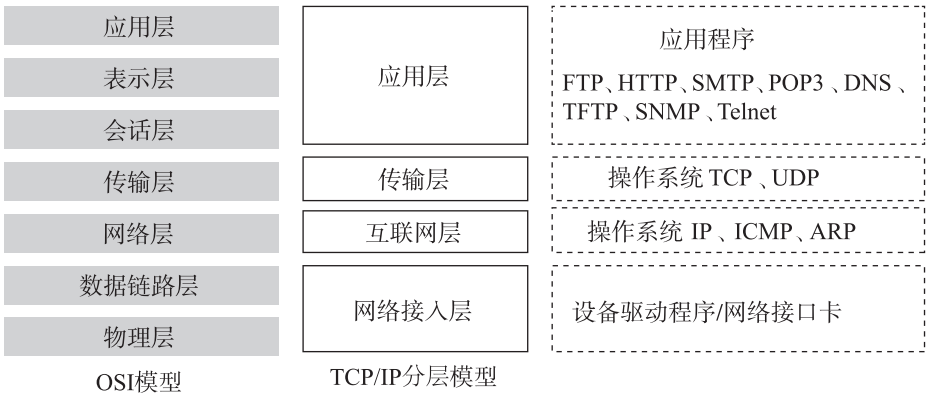


图 1–9 TCP/IP 分层模型

TCP/IP 的第一层是网络接入层（network access layer），对应于 OSI 模型的物理层和数据链路层。网络接入层提供连接网络中物理设备的接口，形成传输介质所需的数据帧格式，基于物理地址进行寻址，提供物理设备间传输数据的差错控制。网络接入层通常遵循 IEEE 的标准，如 IEEE 802.3 是 Ethernet 标准，IEEE 802.11 是 Wireless LAN 的标准。物理层遵循的标准有 EIA/TIA–232、V.35、V.21 等。

TCP/IP 的第二层是互联网层（internet layer），也称为“网络层”。互联网层提供与硬件无关的

基于逻辑地址的寻址，选择到达目标主机的最佳路径，使数据能够在不同物理结构的子网中通过。在计算机网络中实现互联网层功能的协议是 IP。

TCP/IP 的第三层是传输层（transport layer）。传输层的主要功能是保证应用程序之间的逻辑通信，如建立连接，处理流量控制和差错控制。传输层的常用协议是 TCP 和 UDP。这两种协议可以分别为应用层提供面向连接的服务和无连接的服务，即能提供可靠和不可靠的数据传输。在网络终端设备上通常同时运行着多个程序，为了识别不同的应用程序采用了端口号。

TCP/IP 的第四层是应用层（application layer），对应于 OSI 参考模型中的会话层、表示层和应用层。应用层为操作系统或网络应用程序提供访问网络服务的接口。表示层提供数据格式的转换服务。会话层建立端到端的连接并提供访问验证和会话管理。常见的应用层协议有 HTTP、FTP、DNS、Telnet 等。

1.5.2　计算机网络的构成

随着我国国民经济的迅速发展，高速公路已经成为交通网络的“主干”道路，城市与城市之间的道路主要由高速公路连接。如果从甲城市到乙城市的某个地方，则需要先通过甲城市的城市街道到达城市间的高速公路入口，经高速公路到乙城市的高速公路出口，再进入乙城市的城市道路，从而到达终点。计算机网络的结构和交通网络结构相似，计算机网络是分层的结构，其中与高速公路类似的部分，称为“骨干”或者“核心”。计算机网络分为核心层、分布层和接入层三层，如图 1–10 所示。企业网络、校园网络等都采用这种网络结构。

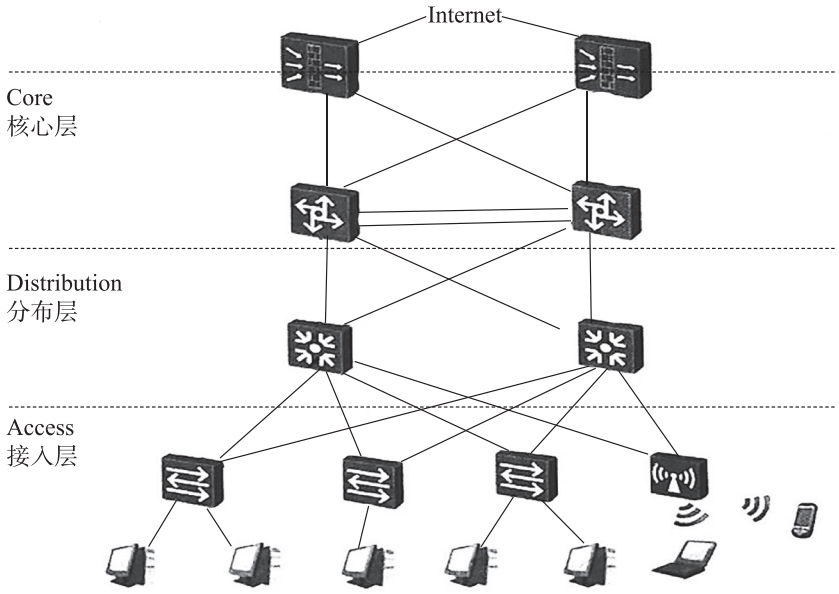


图 1–10　分层网络结构

接入层中连接着计算机网络的各种终端设备，这些设备具备低成本、高密度、即插即用的特点。接入层所使用的网络设备通常是二层或者三层交换机，称为接入层交换机。

分布层也称为“汇聚层”，提供路由、策略控制及 QOS 策略的管理。大量具有相同行为的用户发出的数据通过接入层交换进入分布层，分布层设备转发数据给核心层设备，并对核心层进行保护与协助，完成这项任务的交换机称为分布层交换机。分布层交换机需要配置高性能、高可用性和高冗

余性的设备。分布层至少配置两台交换机，接入层和分布层交换机之间的链路采取冗余的连接方式。

核心层设备是网络内的核心，所有的数据都通过核心层设备在骨干网络中进行高速交换，之后再从分布层到接入层，完成整体的数据交换。因此，核心层设备必须具有高冗余能力、高可靠性、高转发速率的特点。核心层设备也需要做到冗余配置。而对于网络控制策略则尽量放在接入层或分布层，以便降低网络控制对核心设备能力的影响。

1.5.3 常见网络设备

在构建计算机网络环境时，会涉及各种各样的电缆和网络设备。本节忽略电缆，只介绍搭建计算机网络时用到的主要硬件设备及其作用。网络设备可能工作在某个协议层上，也可能工作在多个协议层上，如图 1–11 所示。

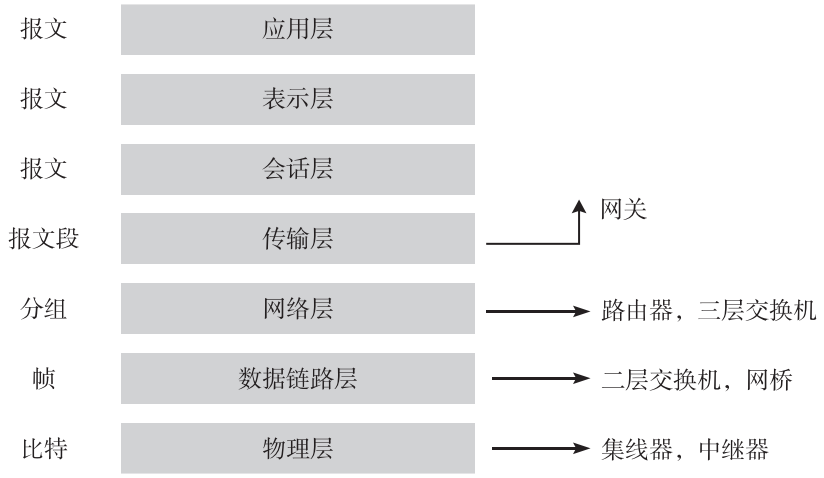
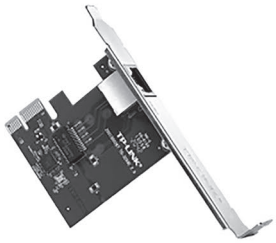


图 1–11　工作在不同协议层上的设备

1. 网络接口卡（NIC）

网络接口卡又称为“网络适配器”，简称“网卡”。网卡能处理物理层和数据链路层的协议，可以使各种硬件终端连接到网络。网卡有多种分类方法，比如可分为内置网卡和外置网卡，或者有线网卡和无线网卡等，如图 1–12 所示。

（a）无线网卡



（b）网卡

（c）USB网卡

图 1–12　网络接口卡

2. 集线器（hub）和中继器（repeater）

集线器和中继器是物理层设备，如图 1–13 所示。两者的相似之处在于均可以延长数据传输距离，但放大距离有限。不同之处在于中继器能进行信号的重新发送或转发，数据的传输距离比集线器更远。

（a）集线器

（b）中继器

（c）无线中继器

图 1–13　集线器和中继器

3. 二层交换机（layer2 switch）/ 网桥（bridge）

二层交换机通常简称为“交换机”，交换机和网桥具有相同的工作机制。网桥仅支持两个端口，相比之下，交换机的端口密度更高，交换机是多端口的网桥。另外，在数据转发速率上，交换机比网桥快。交换机和网桥可以处理物理层及数据链路层的协议，这两个设备可以在数据链路层上扩展网络，并根据物理地址（即 MAC 地址）进行数据帧的转发。因此，交换机和网桥也被称为“二层设备”。随着硬件技术的提升，交换机的安全性和效率更高，因此交换机应用得更加广泛。如图 1–14 所示是不同厂商生产的二层交换机。

（a）思科Catalyst 2950系列交换机

（b）华为S 2700系列交换机

图 1–14　二层交换机

4. 路由器（router）/ 三层交换机（layer3 switch）

路由器和三层交换机是通过网络层实现网络之间的连接，并对分组数据进行转发的设备。与二层设备不同的是，路由器和三层交换机是根据逻辑地址（IP 地址）进行数据包的转发。路由器可以用于连接不同介质的数据链路，同时，路由器具备一定的网络安全功能。如图 1–15 所示为不同厂商生产的路由器和三层交换机。

（a）华为S 3700系列交换机

（b）思科1800系列路由器

图 1–15　路由器及三层交换机

5. 网关（gateway）

通俗地讲，网关是从一个网络到另一个网络的“关口”。网关可以运行在较高的协议层次上，所以网关有多种类型。网关把使用不同通信协议的两个网络连接在一起，并负责协议转换，以使不同网络之间可以相互转发数据。如家庭用于接入电信网络用的 Modem 就是一种网关。因此，网关也

被称为“协议转换器”。如图 1–16 所示为思科和华为的多媒体网关。代理服务器和防火墙可以作为应用网关，并具有过滤和安全功能。网关的内容在本书中不做详细阐述。

（a）思科ASA5505防火墙

（b）瞻博SSG5防火墙

图 1–16　多媒体网关

在互联网早期，路由器被称为“网关”，即通常所说的默认网关（default gateway），这是因为路由器可以为局域网和其他网络提供链接，在不同网络之间实现数据包的转发。局域网中的各种终端设备需要知道路由器在本网络中的 IP 地址（即网关地址），并定义指向该路由，以实现与其他网络之间的互通。本书后续章节将会涉及路由器。

6. 防火墙（firewall）

防火墙是内部网络和外部网络之间的网络安全系统，根据预设的安全策略监控进出网络的数据流。防火墙有网络层防火墙、应用层防火墙、数据库防火墙等几种。防火墙可以通过在常规硬件上运行软件实现，也可以基于硬件实现。图 1–17 为防火墙设备，本书不对防火墙做详细介绍。

（a）思科媒体网关

（b）华为AR500系列敏捷网关

图 1–17　防火墙设备

1.6 计算机网络发展的新技术

1.6.1 智能代理

智能代理（intelligent agent）是定期地收集信息或执行服务的程序，它不需要人工干预，具有高度智能性和自主学习性，可以根据用户定义的准则，先主动地通过智能化代理服务器为用户搜集最感兴趣的信息，然后利用代理通信协议把加工过的信息按时推送给用户，并能推测出用户的意图，自主制订、调整和执行工作计划。

1. 智能代理概述

在 Internet 中，典型的智能代理程序可以根据所提供的参数，按一定周期，搜索整个 Internet 或

它的一部分，搜集使用者感兴趣的信息。智能代理有时称作 bot，即机器人的缩写。

有些代理还可以基于注册信息和用法分析在网站上将信息私人化，其他类型的代理包括定点监测等，然后等网站进行更新或者寻找到其他的事情以后告知用户，分析代理不仅搜集信息，还为用户整理和提供信息。代理把信息交给用户的方法通常称为 push 技术。美国斯坦福大学的海耶斯·罗斯认为，智能代理持续地执行三项功能：感知环境中的动态条件；执行动作影响环境；进行推理以解释感知信息，求解问题，产生推理和决定动作。他还认为，代理应在动作选择过程中进行推理和规划。通常广义的智能代理包括人类、物理世界中的移动机器人和信息世界中软件机器人。而狭义的智能代理则专指信息世界中的软件机器人，它是代表用户或其他程序，以主动服务的方式完成的一组操作的机动计算实体。主动服务包括主动适应性和主动代理。总之，智能代理是指收集信息或提供其他相关服务的程序，它不需要人的即时干预，即可定时完成所需功能。智能代理可以看作利用传感器感知环境，并使用效应器作用于环境的任何实体的一种软件。智能代理是一套辅助人和充当他们代表的软件，人们可以借助智能代理进行网上交易。智能代理可分为四种基本类型：信息代理、检测和监视代理、数据挖掘代理、用户代理或个人代理。

2. 智能代理的功能特点

智能代理技术是人工智能在网络信息技术领域的运用，具有显著的特性和强大的功能。其基本功能特点如下。

（1）智能性。这是智能代理技术的一个最基本的特点，具有解决问题所需的丰富知识、策略和相关数据，能够进行相关的推理和智能计算。智能代理还可以在用户没有给出十分明确的需求时推测出用户的意图、兴趣或爱好，并按最佳方式代其完成任务，对用户的需求能进行分析，自动拒绝一些不合理或可能给用户带来危害的要求。智能代理从经验中不断自我学习，能够根据环境调整自身的行为，从而提高处理问题的能力。智能代理还可以实现对信息进行筛选和过滤的功能。

（2）代理性。代理性也是智能代理技术的一个最基本的特点，能够使用代理通信协议进行信息交换，把信息检索结果主动推送给用户，并管理用户的个人资料及其私人目录下的知识库。

（3）学习性。学习性也称“自主性”。智能代理技术能够根据当前环境的变化，动态地调整自己去完成各项任务、计划，并主动地把信息过滤、整理后提供给用户服务。

（4）合作性。每个智能代理都有标准的接口，采用统一的通信语言进行信息的交流。多代理系统由代理组成，通过代理本身的搜索活动和相互之间的交互活动，构成系统的群体活动，相互之间分工合作共同完成复杂任务，从而实现系统整体的功能或目的。同时，每个代理也在这种交互的过程中实现了自己的功能或目的。

（5）持续性。各个智能代理都有不同的任务，在 Internet 上搜索访问，这种移动是多点并行的，具有可以跨地域、时空持续运行的功能特点。

3. 工作原理

智能代理可以看作是知识处理的实体，它由知识库、规则库、推理机、各代理之间的通信协议组成，能够完成知识发现代理、通信协作代理、规则库应用代理、监督代理、知识库管理代理、推送代理等功能，如图 1–18 所示。

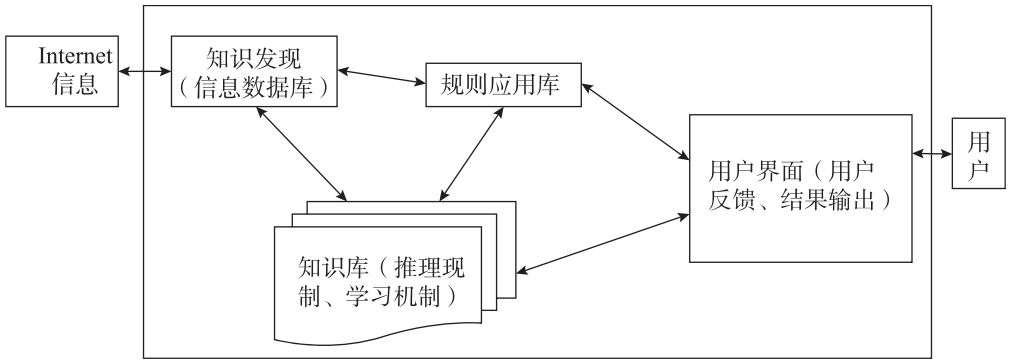


图 1-18　智能代理体系结构简图

我们可以看出其工作过程，各个智能代理都有自己的知识库，用户表达出自己的信息需求后，通过通信协作代理传给知识库，以用户信息库中用户特定的需求和近一段时间内的兴趣爱好为标准来筛选信息。监督代理就是当用户提出信息需求时，它就会检查知识库中用户以前是否有过相似的信息需求，若有就把知识库中用户以前的需求记录提取出来，通过推送代理发给用户；若知识库中没有用户的信息需求，经规则应用库代理理解生成一定的搜索规则，传送给知识发现代理进行相关信息搜索，搜索后的结果经信息过滤后存于信息数据库，再经过知识库的推理机制推断用户的潜在需求，作为用户需求历史记录下来，结果推送给用户。监督代理还根据一定规则实时动态地跟踪信息数据库中历史记录在 Internet 网络上的变化，一旦知识发现代理收集到相关内容和更新内容，监督代理就通知规则应用库生成新的检索规则或应用，并通知和提醒用户有新的信息内容，还可以 E-mail 形式把特定更新内容以推送方式提交给用户。检索完成后允许用户对结果进行满意度和相关度的评价并反馈给知识库，一方面了解用户的新的兴趣需求，另一方面完善用户所需信息相关度的匹配规则，为用户的未来信息检索提供可靠的保障。

4. 智能代理应用

智能代理技术最初应用于商业领域，随着通信技术和网络信息技术的迅速发展，其特性和功能也不断扩展，主要应用在智能搜索代理、数字图书馆、电子商务和远程教育的研究和开发等领域。

（1）智能搜索代理的研究和开发。伴随着计算机人工智能研究的不断发展，具有智能性、代理性、合作性、学习性等特征的智能代理技术从试验阶段走向实际的应用。目前，智能搜索代理已经成为网络信息检索的核心技术。智能搜索代理就是将智能代理技术应用于网络信息检索的特定领域，它是目前具有前瞻性、先进性的网络信息检索手段，目的是为用户提供迅速、准确、方便的网络信息检索服务。与传统的搜索引擎相比，智能搜索代理具有自己鲜明的特色。

（2）智能代理技术在数字图书馆的应用。数字图书馆也是近年来国内外图书情报学界研究和开发的新领域，数字图书馆是海量的“信息空间”，可以满足分布式面向对象的信息查询需要。它以网络信息资源建设为核心，采用人工智能、信息海量存取、多媒体制作与传输、自动标引、数字版权保护、电子商务等现代信息技术成果，形成超大规模、分布式体系，便于使用，没有时空限制，可以实现跨库无缝链接与智能检索。智能代理技术也在数字图书馆中发挥了非常重要的作用。

1.6.2　智能光网络技术及发展

1. 网络业务与光网络的发展

互联网对信息通信业务的巨大影响，已使人们意识到必须十分重视互联网的创新动力。互联网应用的普遍性，对网络运营者来说，正是其业务来源和发展潜力所在。然而，从网络建设与业务发展出发，它更应考虑的是互联网每时每刻都在消耗网络的带宽资源，并且潜伏着对其网络突然施以超常负荷的压力。

网络运营者所面临的现实是较为复杂的，从发展历史来看，信息通信业务和市场的发展总是远远超出预测的；从竞争来看，随着市场的开放，信息通信业的竞争越来越激烈。于是，既要求运营商具有满足市场需要的容量，又要特别注意投资的效率、运维成本、市场反应等，使之能以具有竞争力的价格、服务与质量，按需及时提供业务。显然，这两个方面的实现，都要求运营商构建一个有效的网络基础设施。

网络运营商在动态的 e 时代成功的关键是构筑如图 1–19 所示的一种网络。频带超宽的透明核心传送平台足以满足各种业务对带宽的要求，而且可以做到随网络业务的增长而逐步投资。从现有的条件来看，必须采用 WDM 或总成光技术才能胜任。具有多种服务接口的边缘设备能接纳各种业务而使运营商具有适应多种用户的服务能力。显然，这样的网络基础设施是最为经济有效的。据目前所知，足以形成这种边缘设备的技术手段主要是 IP 技术。

如图 1–19 所示的核心平台，就是一种光网络。那么，究竟应建设什么样的光网络呢？

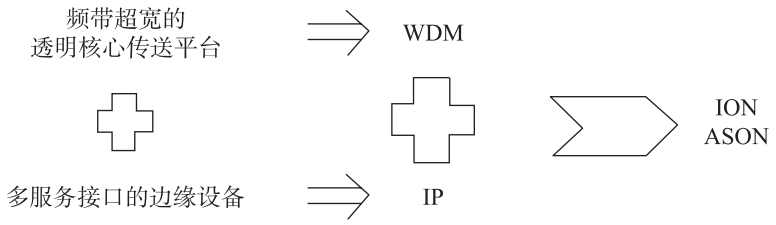


图 1–19　确保 e 时代成功的网络

我们先来考察一下现有的核心光网络结构，如图 1–20 所示，它是以 SDH 环形网为基础形成的。为了扩大传送容量，后又引入了点对点传输的波分复用系统。在多数情况下，IP 和 ATM 业务还要经过路由器或 ATM 交换机才能接入 SDH，再经 DWDM 设备传送出去。相对 2.5 Gbps 和 10 Gbps 的路由器接口来说，SDH 的分插容量已成为瓶颈。SDH 环的 50% 的预留保护容量的利用率，以及多个环之间漫长而复杂的电路配置都不能令人满意。此外，没有智能的 DWDM 设备不利于充分利用网络资源。显然，现有核心光网结构不符合“经济有效”的基本要求，需要发展提高才能为网络运营商提供在竞争中制胜的基础。

我们再从光传送网的发展来分析。光传送网有三个发展阶段，初期即指图 1–20 中的情况。它的 WDM 系统功能比较简单，只是起增加虚光纤的作用。

随着 OADM 和 OXC 的出现，一些网络运营者和设备制造者开始考虑如何利用 DWDM 系统来建设光网络并管理好它。这样做的好处是很明显的，因为极具宽带潜力的 DWDM 系统，联网以后可以比单个系统发挥更大的作用。而有效地管理好这些网络资源，其经济效益更是十分可观。于是，相

对以解决带宽为主要目标的起始阶段来说，这时光联网技术的发展已经进入它的第二阶段——着眼于光网络的建设和管理。国内多数传统的电信网络和业务运营商（TSP）现在正处于向第二阶段迈进的时刻。对于新兴的运营商（ESP）是否也分两步走？没有必要，否则 ESP 永远落后于 TSP。

为了经济有效地提供服务，争得更多的用户，一些先行的人士开始考虑对光传送网（OTN）进行自动化，或说给 OTN 赋予智能。现今的网络和服务运营商已不会简单地增加网络容量，他们更关心的是如何以网络基础设施来创收，使之既能加速服务又能降低对维护人员的技能要求。国内有运营商提出要建设一种“傻瓜网络”，其用意即在于此。随着光联网技术向网络的边缘发展，有的研究人员甚至不再仅仅把光联网看作一种“通信”技术，而是视其为计算、存储和多种应用的“使能”技术（enable technology）。这种视野的扩大不仅有利于扩大网络的业务，也会促使光联网技术上一个新台阶。为此，有专家将光传送网的自动化称为传送网概念的大突破，有的则将上述这些统称为光联网技术的第三次革命。总之，不管如何称呼，光联网技术已进入自动化、智能化的新阶段。

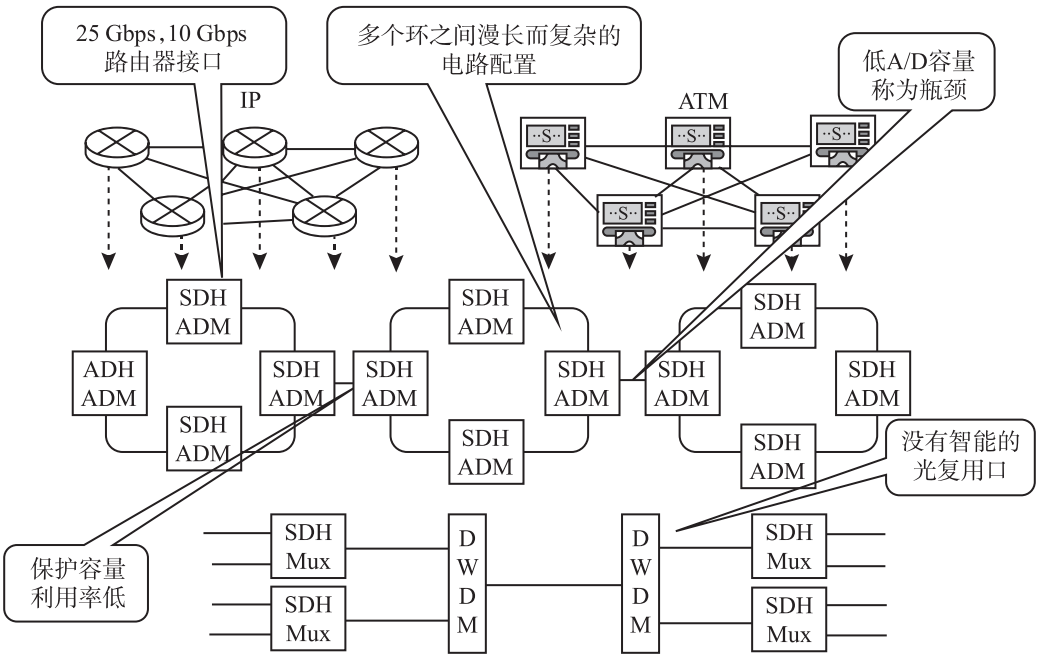


图 1–20　目前的核心光网络结构

2. 智能光网络概念的形成

面对数据业务的特点（突发、多变、长保持时间、高带宽、对距离不敏感等），网络运营商不仅要解决带宽问题，更需要具有灵活提供带宽的能力。同时，市场的开放和竞争的压力都要求有一种创新的光联网技术，使运营商能更快、更高效地提供高速服务。这样的网络至少应具有以下特点：可伸缩的结构，能有效地支配网络资源；可动态地提供带宽和服务；减少运维费用；便于引入新业务。

鉴于以语音为中心的 SDH/SONET 结构的局限性、以增加虚光纤为目的第一代 DWDM 系统缺乏智能、简单的 IP over DWDM 缺少 SDH/SONET 的保护恢复功能和服务质量，客观上需要一种更具伸缩性和灵活性的解决方法。同时，考虑到网内的波长将越来越多，光器件和光系统的复杂性不断增加，光通道互联将更加复杂而多变，因此，“点击”式的通路配置功能变得特别重要。这样，光层管理和控制的重要性显得非常突出。

光技术的新进展，例如，物理层的可调光器件、高速光电子元件以及具有智能的大容量光交换设备已经出现；服务层技术的新进展，例如，路由技术和感知服务的交换（service-aware switching）、服务质量，以及有关网络设计、管理、计费的软件工具等。以上这两个新进展客观上为开发新一代的光网络准备了条件。

据智能光网络（ION）概念的倡导者的定义，智能光网络是指一种具有灵活性、高可扩展性的，能直接在光层上按需提供服务的光网络基础设施。光联网论坛（OIF）对智能光网络的关键部分——用户网络接口（UNI）进行定义时称 ION 能够适应网络拓扑的改变（结构和网元设备的增减），通过公共的控制平面很容易、快速地服务，根据网络和相关服务的需要改变网络大小，提供各种服务等级和保护机制。

智能光联网是近年来光联网技术的一个最重要的发展。它使运营商可以直接从光域快速提供业务。智能光联网将 SDH/SONET 的故障管理、性能监视和恢复功能，DWDM 的容量，以 IP 为基础的联网规约，先进的配置软件和创新的系统，以及管理软件有机地结合在一起，形成了一个更具伸缩性、以数据为中心的基础平台，从而把光层从一种静态的传输媒体变成了一种智能的光网络结构，并可以直接从光域提供各种灵活的、高速的增值业务。

智能光网络及自动交换光网络（ASON）都是从 OTN 的智能化和自动化发展而来的。实际上，它们是同一种努力的两种名称。前者突出“智能”，后者强调“自动交换”。另外，名称的不同，多少也反映了一点历史进程。

图 1-19 中的 WDM 和 IP 技术，传统上分别属于通信和计算机领域。然而，近年来，传统的电信设备制造商，在继续大力发展他们所擅长的光技术和 WDM 设备外，还极力引入 IP 技术。同样，擅长 IP 和软件技术的计算机数据领域的设备制造商则大力向通信领域发展，将 IP 技术和智能与光技术相结合。智能光网络和自动交换光网络概念即在这些努力之中形成。在这些努力下，人们看到给光网络引入智能后可得到的好处，以及构成自动交换光网络的巨大潜力。

3. 智能光网络的技术要点

总的来说，智能光网络有两大技术要点：硬光技术和软光技术。硬光技术是指物理层的光技术及其硬件设备，软光技术是指为控制光通路的建立和提供服务所需的软件，即网络智能，这是发挥光层潜能使静态光网变为动态的智能光网络的关键。

（1）智能光网络的要素。最初，智能光网络的开发者为其定义了四个组成要素：传输平台、交换平台、联网智能和网管软件。

光纤传输设备是 ION 的基本传输载体，通常以线形或环形的组网结构提供波长或端到端的光路。光路是从原点到终点的一条光通路，它可由经过一个或多个节点的几个波长串接而成。光交叉连接设备（OXC）为智能光网络提供了交换平台。光交换设备的引入，可以使组网拓扑从环形、线形结构演进成高效的网状拓扑，从而为寻找最优化的光路由，或在网络故障时快速寻找保护路由提供了可能，也便于在全网共享备用资源。光交换平台是 ION 的智能光核心，其自身的伸缩性与网络软件的结合可提供全网的伸缩性，各种直接向用户提供的特色服务也要通过交换平台实施。

若将智能光网络分成传送、控制和管理三个平面，则上述传输平台和交换平台共同构成 ION 中

的传送平面。而联网智能和网管软件则分属控制平面和管理平面。这就是 ITU-TG.ASON V.O.5.0 版规定的 ASON 的主要组成结构（如图 1-21 所示）。

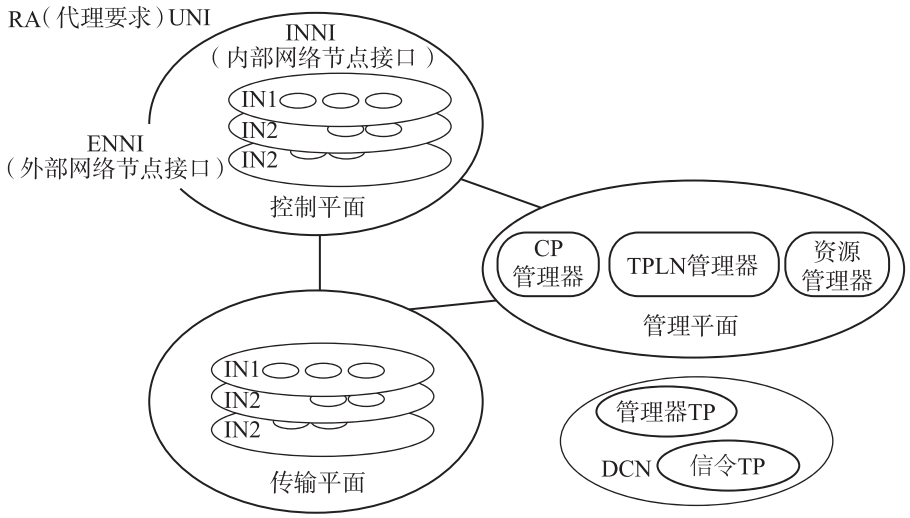


图 1-21　ASON 的组织结构

ION 的智能首先反映在联网的自动化，这主要是通过一套先进的网络设备互联协议实现的。通常这种互联系统是基于分布控制原理，将控制功能分布到每个网元之中，使全网各个节点都具有“智能”，于是各个网元之间能实时、动态地交换相关路由和节点的信息，每个网元能从动态路由协议中了解到整个网络的拓扑结构和相关链路的状态。如此，网元知道各自的可达性，以及通过什么途径可达以后，不仅可以自动地实现选路和交换，还可以简化网络管理系统，使得通过一个网管系统就可实现对全网的有效管理，实现端到端的配置、故障和性能等管理功能。

智能光网络的实现也使得网络管理的重点从传统的保护管理，提升为注重高效服务的管理。

（2）智能光网络的创新。智能光网络的创新首先在于它为静态的光传送网引入智能，使之变成动态的光网络。智能光网络将 IP 的灵活和效率、SDH/SONET 的保护能力、DWDM 的容量，通过创新的分布式网管系统有机地结合在一起，形成以软件为核心的能感知网络和用户服务要求，并能按需直接从光层提供服务的新一代光网络。

在光层上直接提供服务，对于运营商来说，其意义在于可将光纤中几乎无限的原始传输容量直接变成可增收的带宽，它拥有的不再仅仅是一个一般的光网络，而是一个极具竞争潜力的业务平台。

从设计上，智能光网络致力于克服 IP over DWDM 模式的限制，同时加入了新的特性和功能。新加特性包括完善的服务和管理功能，传送运营商级的 1 000 Mbps 和 10 Gbps 的以太网能力，以及以软件为中心的系统结构。

智能光网络的基石是智能光交换。智能光交换的出现使得光网络的核心开始从以环为基础的结构向以网状网为基础的智能结构发展。

在复杂的光通路和交换功能引入智能光网络，以及光纤网络从环形过渡到网状结构以后，提供端到端的特色波长服务的关键将是嵌在光网络中的智能。智能的光交换使服务提供商能够立即提供光通路，同时通过各种等级的保护恢复还可以增强服务的特色。智能光网络中采用的先进的基于 IP 的光路由和控制算法使得光路的配置、选路和恢复成为可能。具有智能决策和动态调节能力的智能

光交换设备可以使传统上复杂而耗时的操作自动化，并且能为构建一种具有高度弹性和伸缩性的网络基础设施打下基础。

在基于硬件的光联网技术的发展过程中，SDH/SONET 和 DWDM 技术代表了重要的历史性进展，在各种创新的硬光器件的推动下，它们在继续发展着，特别是 DWDM，仍在不断地开拓光网的传送能力。然而，DWDM 只代表了智能光网络的物理层，而且，只有硬件的进展还不足以创造出具有竞争力的、可增收的服务及其网络，也不能使服务提供商将他们的光网络从简单的“虚光纤倍增”发展成新一代的动态网络结构。

（3）软光技术（soft-optics）。软光技术在此指光网络的智能组网软件，这已成为光联网领域中与硬光技术同样重要的创新源。对于要将硬光技术创造出的内在好处转变成可享用的价值和可创收的新服务机会来说，智能的软件平台是基本条件。硬光技术起了创造和传送光的作用，软光技术则带来了为有效封装、联网和管理光所需的功能。软光技术可以利用由硬光技术提供的容量优势，为光联网带来了一系列的创新性能，并且帮助将光纤中的原始容量转换成增值和增收的新业务。具体来说，软光技术是一些智能软件算法，硬光器件产生的光即由这些算法封装和控制。所以，光层的自动化是由软光技术提供的。

随着网络变得越来越复杂，光网络的自动化会变得越来越重要，不仅对起始的投入运营，而且对服务的维护和恢复也是如此。就像将软件与静态的集成电路（IC）结合并使之成为功能强大的微处理器一样，软光技术也可以为光网络带来许多好处。除了前面提到的之外，还包括消除许多烦琐的传统上由人工执行的工作，将服务范围从只管本地扩大到端至端的全网。软光技术可以“看到”整个光网的拓扑，并将各个子网的性能和所用的恢复机制等情况拼成一张网络总图，使智能光联网设备具有提供优越的端到端的服务优势。

在光网络规模伸缩时或波长数增加时，由软光技术提供的智能光网络的软件平台会变得更加重要。管理业务流和连接及互联会成为一种复杂程度不断增加的任务。系统软件以及自动发现节点和网元的能力是智能光网络的另一关键特性。

（4）智能光网的管理。随着光网络的任务从处理网络事务发展成提供服务，光网络的管理也必须发展。在 SDH 网中，管理着重于基础设施要求，如可靠性、保护性和性能监视。

在智能光网中，管理的重心移到提供服务。相对于 SDH 网的分片管理造成对整个网的可用容量的估算既困难又耗时，ION 的管理给予服务提供商以“点击”功能——立即估算出整个网络的容量并快速提供端到端的服务。ION 将 TMN 所有网管功能延伸到光域，确保端到端的服务受到很好的监视和管理，并且计费所需的统计数据和信息都可以收集起来。

智能光网络中的网管软件和软光部分、光器件之间的关系如图 1–22 所示。

如图 1–22 所示，soft-optics 主要由光器件驱动、系统 softoptics、路由 soft-optics 和 NMS Soft-optics 四个功能部分组成。光器件驱动是软件 / 固件模块，用于控制相关的光器件并提取相关数据供系统 soft–optics 分析。后者负责收集和分析光路完整状态和性能监视数据。路由 soft–optics 负责向路由软件提供光通路的相关参数，包括通道类型、FEC、传输格式等，路由软件据此计算路由。NMS soft–optics 负责端到端的性能监视和报告、故障分析、光器件运行状态检测等。NMS 则根据这些信息管理

网络。

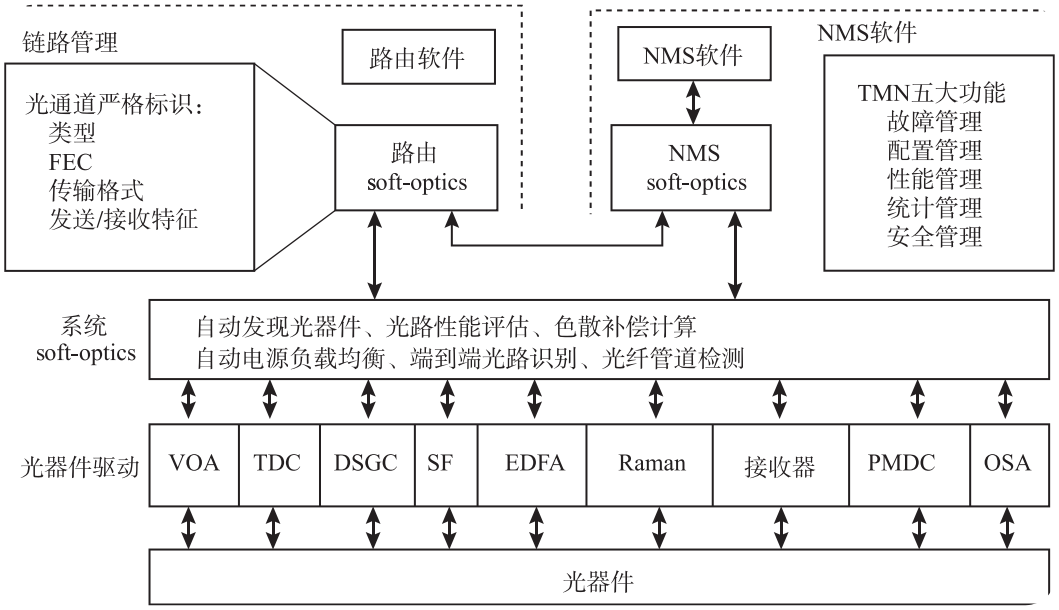


图 1-22　网管软件与软光部分、光器件之间的关系

（5）新型的波长服务。智能光网络的优势在于，它可从光域（波长）提供多种新型的高速业务，这些业务不仅有助于增加收入，而且其有直接从光域提供波长服务的能力，使得用户可以经济有效地通过网络基站设施，将交换机、路由器或 SDH 复用器的光接口进行扩展。

依靠 ION 固有的灵活性和以软件为中心的特性，服务提供商能开发多种以波长为基础的服务，这些服务都能根据现有的和将来以数据为中心的组网应用而扩展。服务范围从基本的波长服务到更为增强的增值服务，如新型的波长交换、按需提供带宽（BoD）、光虚拟专网（OVPN）、用户网络管理（CNM）、分级保护、吉比特以太网（GE）等。对于提供 STM-N 光管导那样的基本波长服务，其关键是“恰时”（just-in-time）地提供服务，而不像传统 SDH 结构那样需要数月。市场开放、竞争加剧需要靠有竞争力的区别 / 特色服务，而不是以价格战来取胜。智能光网络正是具有将基本的波长服务转变成各种特色服务的能力。

通过将以太网信号直接映射到联网的光通道，ION 使服务提供商可以经济有效地将网络的光层对传送数据业务优化。于是，广域网的接口将不再仅是 SDH 的一种。由于将 SDH 的保护恢复和 WDM 的容量潜力和管理综合在一起，ION 保证了与 SDH 一样的可靠性以及电信运营级 WAN 传送所需的特性和功能。这意味着运营商有能力以电信级的以太网波长服务来扩展他们的业务，或使之与众不同。

（6）智能光网络与 SDH 网的关系。ION 是从 SDH 等原有的网络技术发展而来的，它是一种创新的发展而不是革命。运营商在采用智能光联网设备开发新业务平台时，可以继续利用他们已有的网络基础设施。在新的网络体系中，传统的作为网络物理层的 SDH 将成为智能光联网设备的一种业务接口。在多数情况下，智能光网络产品会先引入现有的网络系统，来解决网络带宽或提供新业务。随着智能联网技术的不断引入，网络将成为具有极大带宽、智能的、可提供多种光路服务的平台。

（7）典型的智能光网络的实现。下面以一个典型的已实际运营的智能光网络产品为例，简要介

绍它的路由控制。如图 1-23 所示是智能光网络的倡导者——Sycamore 公司典型的智能光网络产品，SN 16000 为智能交换平台，SN 10000 和 SN 3000 为传输平台，Silvx Manager 和 Silvx Source 形成分布式的智能网管理系统 Silvx ONMS。Silvx Source 驻留在网元内，负责向网元发送指令、存储元数据、与 Silvx Manager 通信、与其他网元交换信息等（经由 TL1、HTML 或 SNMP 接口）。它使网元具有了智能，并适时掌握整个网络的拓扑结构和相关的链路状态。Silvx Manager 是基于元数据驱动的客户 / 服务器型网管系统，由一系列可分散于不同服务器上的功能软件模块构成。它与 Silvx Source 合作，可完成端到端的网络故障、性能和配置管理。

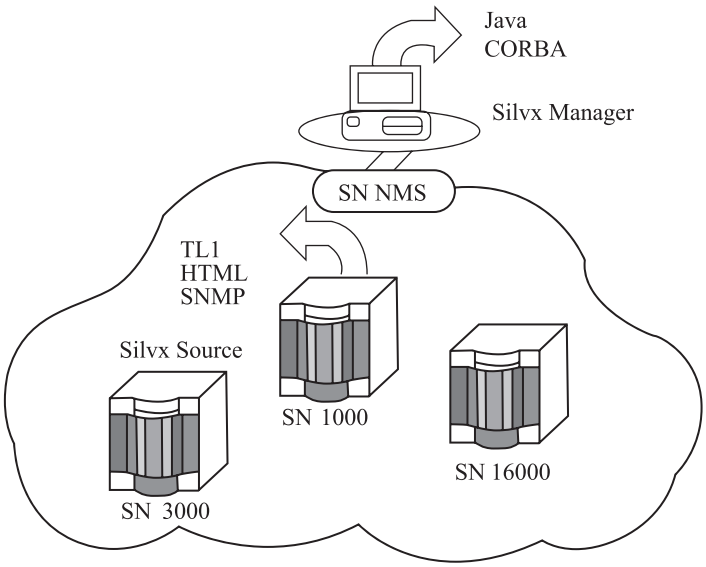


图 1-23　Sycamore 的典型智能光网络产品

Silvx ONMS 提供基于 Web 的鼠标点击的图形界面，支持多种保护机制。传统网关需要数天完成的配置，Silvx 仅需几分钟。Silvx 的 CNM（用户网络管理）功能使用户可以通过客户端的界面查看自己租用的线路情况。SN 产品支持 OSPF（开放最短路径优先）动态路由协议，网元具有智能，光路的建立采用标准的 MPLS CR-LDP 协议。

智能光网络的网元具有智能性是指网元之间能主动地交换链路和容量信息，从而掌握全网状态。网络状态时刻在变，网内节点可多达数千个，波长和中继线可达数万条。因此，网元之间交换信息时，信息数据库必须具有实时动态性、可扩展性和收敛性。SN 系列的传输和交换设备使用基于 IP 的、标准的 LSR（链路状态路由）协议和 MPLS 相结合来决定如何优化配置光路和选择传送网管信息的路径。SN 产品的每个网元具有路由表和标记交换表。

每个 SN 节点的路由表中存有各自的路由走向，为减少广播信息和加速路由表的收敛和同步，每个节点仅掌握与相邻节点之间的链路状态，定期向相邻节点发出握手信号以判断链路状态。为了减少广播信息和管理更多的网元，SN 产品支持多个 OSPF 域。同时，为了更适于光路，Sycamore 拓展了标准的 OSPF 协议（但仍与标准的 OSPF 兼容和互通）。

在智能光网络中每个网元的动态路由表掌握着网元的可达性和最佳路由，而用户的光路是通过标准的 MPLS 信令协议，即 CR-LDP（受限路由——标记分配路径）来建立的。据 MPLS（多协议标记交换），每个 IP 分组前有一个 20 bit 的标签，每个 LSR（标签交换路由器）都有标签交换表，标签和 LSR 的每个链路一一对应，标签交换表在 < 入标签、入口；出标签、出口 > 之间映射。在 MPLS 中，为了保证所需的 QoS，在标记交换路径建立的过程中，可通过 RSVP（资源保留）或 CR-LDP 信令完成。

在智能光网络中，如果将波长或物理光口和一个标记绑定，波长或物理光口就被抽象而可用逻辑来表示。如此从某光口进入网络，再从某光口出网络的用户业务线路，其在网内经过的光路就变

成一个具有标记的通道。物理线路逻辑化之后，就可方便地对他们进行各种动态的处理。

4. 智能光网络的发展现状和趋势

由于智能光网络和 ASON 是光传送网概念的重大突破，代表了光网络的发展方向，它一经提出就迅速受到业界的重视和响应。国际上一些重要的电信运营商和设备制造商在 2000 年年初相继成立了从事智能光网络的标准化工作的机构，如 2000 年 1 月，Sycamore 发起由 50 多个成员组成的光域业务互联组织（Optical Domain Service Interconnect，ODSI）。

至今已有 360 多个成员的光联网论坛（Optical Internetworking Forum，OIF），在 2000 年 2 月成立。在 2000 年 3 月相关组织专门讨论了与 ION 相关的 IP over Optical 以及总结了将 MPLS 扩展至光层的努力。ITU-T 几乎在同时正式确立了开展自动交换光网络 G.ASON 建议的研究。基于其在电信和光联网标准化方面的经验和已做的工作，ITU-T 已将此方面的标准化扩大，确定了开发包括新定义的 G.ASTN（自动交换传送网）在内的共计四大类（框架 / 结构、指配和管理、生存性、传送）的 20 个建议。所以，对于智能光网络，无论是其组网产品或相关的标准化都正在快速发展。

（1）智能光网络产品。鉴于智能光网络的市场潜力，国际上许多通信设备制造商相继投入力量开发此类产品。先行的厂家已有全套的智能光网络产品，像 Sycamore 的 SN 系列产品已先后在 Storm、Vodafone、360 networks 和 BellSouth 等多个国际上著名的大运营商的网中投入使用。作为光桥科技公司的合作伙伴及投资者，Sycamore 的智能光网络产品已经由光桥科技引入中国市场。一些传统的大电信设备制造商也纷纷宣传智能光网络的概念，新兴的光网络设备制造商则更是全力以赴，这从 SuperComm 2001 上首次进行的光网络用户网络接口（UNI）演示的参加者及参演的内容可以明显地看出。

UNI 是 ION/ASON 中重要的组成部分之一，这是用户通过控制平面向传送平面发命令或请求服务的入口。有了标准的 UNI，运营商就可以经由采用多厂家、多种技术的网络提供先进的光层服务。这次共有 25 家设备制造商参与互操作演示，从这次多厂家 UNI 的成功演示可看出产品的成熟，也可看出工业界对其的重视和兴奋。分析家评论：这是一个正在兴起的工业，有助于光网络服务的到来，运营商可以在光网内点击提供服务，动态提供光带宽使运营商可以更快、更高效地提供新业务。

（2）光联网的标准化。ITU-T、OIF、IETF 和 ODSI 都在积极开展与 ION/ASON 相关的标准化工作。由于对这种自动化的具有智能的光网络叫法不一，此处统称为光联网（Optical Internetworking）标准化。出于对同一事物的视角不同，上述几个组织各有侧重地在开展工作，至今已形成两大模式：以 ITU-T 为代表的客户 / 服务器模式和以 IETF 为代表的对等（peer）模式（一个管理域）。前者又叫“用户 – 网络开放接口”模式，后者又叫“层叠（overlay）”模式。在对等模式中，所有节点都在一个平面，互相平等。各个标准化组织的研究侧重方向如图 1-24 所示。

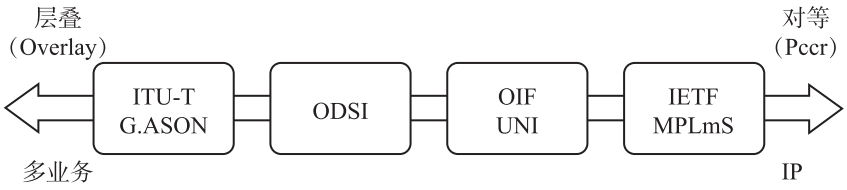


图 1-24　各种标准化组织的研究侧重方向

层叠模式将用户协议与网络协议分开，用户把网络看作“黑盒子”，只提服务要求而不管网络的内部情况。这就是现有的 PSTN、ISDN 模式。ODSI、OIF 现在制定的 UNI 属于其中的一部分。IETF 称它的 MPLmS（多协议波长交换）或 GMPLS（通用多协议标记交换）对层叠型和对等型都支持。

除了网络组成分层不同外，这几个标准化组织在具体的选路和信令方面都是以一些已经比较成熟的协议为基础进行标准化的，如 OSPF、IS-IS 选路协议，采用 MPLS 格式的 CR-LDP 和 RSVP 信令协议。

为了加速标准化的进展，ODSI 表示它不单独制定标准，而是致力于将研究成果提供给 OIF 等其他标准化组织。OIF UNI 1.0 的演示成功即多方协作结果。

1.6.3　5G 技术

5G 技术是指第五代移动电话行动通信标准，也称“第五代移动通信技术”，是 4G 技术的延伸。

1. 5G 技术的研发历程

早在 2009 年，华为公司就已经展开了相关技术的早期研究，并在之后的几年里向外界展示了 5G 原型机基站。2013 年 11 月 6 日，华为宣布将在 2018 年前投资 6 亿美元对 5G 的技术进行研发与创新，并预言到 2020 年用户会享受到 20 Gbps 的商用 5G 移动网络。

2013 年 5 月 13 日，韩国三星电子有限公司宣布已成功开发第 5 代移动通信的核心技术，这一技术预计将于 2020 年开始推向商业化。该技术可在 28 GHz 的超高频段以 1 Gps 以上的速度传送数据，且最长传送距离可达 2 km。

2014 年 5 月 8 日，日本电信营运商 NTT DoCoMo 正式宣布将与爱立信、诺基亚、三星等六个公司共同合作，开始测试凌驾现有 4G 网络 1 000 倍网络承载能力的高速 5G 网络，传输速度可望提升至 10 Gbps。

2015 年 3 月 1 日，英国《每日邮报》报道，英国已成功研制 5G 网络，并进行 100 m 内的传送数据测试，每秒数据传输高达 125 GB，是 4G 网络的 6.5 万倍，理论上 1 秒钟可下载 30 部电影，并称于 2018 年投入公众测试，2020 年正式投入商用。

2015 年 3 月 3 日，欧盟数字经济和社会委员古泽・奥廷格正式公布了欧盟的 5G 公私合作愿景，力求确保欧洲在下一代移动技术全球标准中的话语权。欧盟的 5G 网络将在 2020—2025 年投入运营。

2015 年 9 月 7 日，美国移动运营商 Verizon 公司宣布，从 2016 年开始试用 5G 网络，2017 年在美国部分城市全面商用。

我国 5G 技术研发试验在 2016—2018 年进行，分为 5G 关键技术试验、5G 技术方案验证和 5G 系统验证三个阶段实施。

2. 5G 技术的关键技术

5G 技术的标志性能力指标为 Gbps 用户体验速率，其实现技术包括大规模天线阵列、超密集组网、新型多址、全频谱接入和新型网络架构等关键技术。

（1）大规模天线阵列。它是提升系统频谱效率的最重要技术手段之一，对满足 5G 系统容量和

速率需求起重要的支撑作用。

（2）超密集组网。通过增加基站部署密度，可实现百倍量级的容量提升，是满足 5G 千倍容量增长需求的最主要手段之一。

（3）新型多址技术。通过发送信号的叠加传输来提升系统的接入能力，可有效支撑 5G 网络千亿设备的连接需求。

（4）全频谱接入技术。通过有效利用各类频谱资源，可有效缓解 5G 网络对频谱资源的巨大需求。

（5）新型网络架构。基于 SDN、NFV 和云计算等先进技术的新型网络架构，可实现以用户为中心的更灵活、智能、高效和开放的 5G 新型网络。

3. 5G 技术的优点

与 4G 技术相比，5G 技术不仅将进一步提升用户的网络体验，还将满足未来物联网的应用需求。

（1）从用户体验看，5G 具有更高的速率、更宽的带宽，5G 网速将比 4G 提高 10 倍以上，能够满足消费者对虚拟现实、超高清视频等更高网络体验的需求。

（2）从行业应用看，5G 具有更高的可靠性，更低的时延，能够满足智能制造、自动驾驶等行业应用的特定需求，拓宽融合产业的发展空间，支撑经济社会创新发展。

（3）从发展态势看，5G 目前技术演进的第一阶段已完成，处于技术标准的第二阶段。5G 技术不仅提升了现有网络的性能和可靠性，更为 6G 奠定了基础。

4. 5G 电脑

（1）5G 网络层面实现的前提。无线网卡支持 Wi-Fi 6 协议，可以让网速变得更快，这个是最基本的需要。另外，随着无线网的 5G 网络加速，有线网络需要从路由器和调制解调器方面进行提升，只有这样才能达到基本的要求。目前，5G 手机是从手机卡、Wi-Fi 支持和 5G 核心芯片的支持来实现更快的网络，而电脑要实现也需要从最根本的网络层面解决。

（2）硬件支持的条件。这些年来电脑的运行内存不断增加，硬盘方面从之前的机械硬盘升级到 SDD 的固态硬盘，固态硬盘的容量从之前的 64 GB 增加到现在 6 TB 的运行内存，这些使得计算机在处理速度上占据了很多优势。从处理器方面，已经从之前的单核升级到了八核甚至更高，那么在 5G 时代还需要继续升级吗？答案肯定是需要的，只有这样才能满足用户不断提高的使用需求。

5. 5G 网络技术的应用领域

根据我国工信部发布的《信息通信行业发展规划（2016—2020 年）》，2020 年我国启动 5G 商用服务。根据工信部等部门提出的 5G 推进工作部署以及三大运营商的 5G 商用计划，我国已于 2017 年展开 5G 网络第二阶段测试，2018 年进行大规模试验组网，并在此基础上于 2019 年启动 5G 网络建设，2020 年正式推出商用服务。

2G 将人类带进移动通信时代，3G 使智能手机终端迅速普及，4G 使移动互联网大发展，那么 5G 将为 VR/AR、AI、物联网、智慧城市、智能网联汽车等尖端技术应用带来充足的基础技术支撑。

（1）通信服务业。从 2G 时代的十几千字节，到 3G 时代的两三百千字节（KB），再到 4G 时代的七八兆字节（MB）、5G 时代的“G 速”，5G 网络技术的高速传输和高安全可靠性，使其必首先

应用于通信服务行业，用户使用快捷的 5G 网络能够更快地浏览和下载网络数据，实现网络交互，使用更加全面智能的应用程序等。当然，5G 网络技术在通信服务方面还具有潜在的提升系统性能、增强用户体验、减轻基站压力、提高频谱利用率的前景。

（2）国家电力传输。根据 5G 微信公众平台报道，国家电网分布式光伏云网在河北省涞水县南郭下村光伏电站正式实现 5G 通信链路的全面打通。5G 网络技术给光伏云网带来了数据传输速率与质量上的大幅提升，也标志着 5G 网络技术在电力传输上的正式应用。

（3）万物联网领域。现代智能家居需要使用较高的网络传输速度，并且对网络的安全性能提出了更高的要求，4G 网络在一定程度上能够满足需求，但随着智能家居领域的发展和智慧城市、未来城市等的建设，搭配上 5G 网络，就可以在公司里遥控家中冰箱的温度，可以遥控洗衣机自动洗衣服、甩干。如果家里有摄像头，还可以使用 5G 网络打开监控设备，随时观看到家里的情况，延迟率或许只有两三秒钟。

（4）教育领域。在网络高速发展的年代，教育教学场景也发生着深刻变革，越来越多的学校在信息化教学建设上选择虚拟现实技术，该技术已经逐步成熟，戴上头盔就能“穿越”到虚拟教学环境中，在虚拟环境中完成复杂的教育教学已经成为现实，再配上 5G 时代的超级网速，交互式的虚拟现实，5G 网络开启的 AR、VR 虚拟现实技术将彻底改革教育教学方式。

（5）智能网联汽车。智能网联汽车（intelligent connected vehicles，ICVS），是指智能车与互联网络的有机联合。这项技术搭载了先进的车载传感器、GPRS 系统控制器和执行器等装置，通过遥感卫星系统，融合现代通信网络技术，实现车与人、车、路、后台等智能信息交换共享，实现安全、舒适、节能、高效行驶，并最终实现汽车智能自动化。而这项技术的关键应用要求网络传输速率高和安全性方面极为可靠，5G 网络技术将成为首选，助力智能网联汽车的发展。

（6）其他领域应用。未来不管是商用、民用还是军事领域，都可以享受 5G 迅速发展带来的福利，5G 将进一步应用到工业、医疗、安全等领域，能够极大地促进众多领域的创新发展和生产效率的提高。在未来，5G 将实现人连人、人连物、物连物，由此衍生出智能家居、智慧城市、智能制造、智能汽车、智能机器人、智能配送等。在 5G 网络技术未来发展的过程中，中国可以和世界其他国家，一起发展，更好地实现网络和信息的同步，促进全球经济一体化建设。未来 5G 会在教育、经济、军事、医疗、建筑等各个领域带来前所未有的创新发展，整个世界都将变得更加智能、拥有更加完善的移动网络。可以预见，5G 网络技术的应用，足以支撑起许多新科技的商业化运用，5G 时代即将到来，终将改变人们的生活方式。

章节实训

实训任务　参观学校网络中心或网络实训室

【实训目标】

1. 了解并熟悉局域网的组成情况及运行状况。
2. 初步认识二层交换机、三层交换机、路由器和防火墙等常见网络设备。

【实训内容】

在老师或网络管理人员的带领下，实地参观和考察学校网络中心或网络实训室，了解并熟悉公司网络的组成情况、使用状态、建设和维护成本，以及网络管理员的主要工作职责等。

通过实地考察和技术人员的介绍，了解学校网络中心或网络实训室的网络结构及设备运行状况，认识主要设备及其功能。

将实地参观和考察过程中了解到的上述内容记载下来，供后续学习使用。

本章小结

本章内容主要围绕计算机网络的基础概念、分类、性能评估和体系结构展开讨论。通过学习本章，读者可以全面理解和掌握互联网的形成和发展历程，以及计算机网络的核心概念和关键技术。同时，也能够领会计算机网络在现代社会中的重要性，以及新技术在网络发展中的应用前景和挑战。

思考与练习

一、填空题

1. 按照覆盖的地理范围，计算机网络可以分为_____、_____和_____。
2. 典型的计算机网络从逻辑功能上可以分成两个子网：_____和_____。
3. 计算机网络的发展大体可以分为四个阶段：_____、以通信子网为中心的网络、_____和以_____的新一代网络。
4. 路由表中的路由通常可分为_____、_____和_____三类。

二、简答题

1. 简述一下计算机网络的发展历程。
2. 计算机网络会给社会带来哪些问题？
3. 计算机网络由哪些部分构成？