

第 1 章

计算机网络概述

本章要点

- (1) 掌握网络的定义和功能。
- (2) 了解网络发展历史。
- (3) 理解网络的分类。
- (4) 理解网络的分层模型。
- (5) 掌握 Nyquist, Shannon 公式的计算。
- (6) 掌握常见的网络拓扑结构。
- (7) 了解移动网络的发展历史。

计算机网络是一种将相互独立的计算机连接起来，以实现资源共享的系统。该系统使用通信技术将数据从一台计算机传输到另一台计算机，其主要目的是实现软件资源和硬件资源共享^[1]。在计算机网络出现之前，人们使用磁带和软盘等物理媒介来传输数据，传输速度取决于人的物理移动速度，速度非常慢。随着计算机网络技术的出现，数据可以直接通过通信信道传输，传输速度得到极大提升。如今，家用网络传输速度已经达到每秒 1Gb 的速度。

计算机是联网的主要设备，它们之间可以通过有线连接（如双绞线、同轴电缆和光纤）或无线连接（如 WiFi、蓝牙和红外技术）进行通信。通过网络把计算机互联，我们可以共享软件资源，如音频文件和视频文件，还可以共享硬件资源，如 CPU、GPU 和打印机等。

早期的计算机是一个非常庞大的设备，需要一个很大的空间来放置，而且操作复杂，该计算机制造成本、管理和维护的成本都很高。因此，计算机数量较少，相互交换数据的需求比较少。当需要在计算机之间传输数据时，由操作员把数据复制到软盘上，人工携带软盘到达目的地，将软盘插入目标计算机内进行复制，完成数据的转移过程。在这种人工的传输方式中，数据传输速度的快慢依赖操作人员移动的速度，传输效率低。后来随着计算机制造技术发展，计算机体积减小、成本降低、数量增加，计算机之间进行数据交换的需求也越来越多，依靠人工转移数据的速度已经不能满足计算的需求。为了满足大规模数据共享需求，人们开始探索和研究数据自动传输技术，该技术不断发展和

积累，逐渐形成了今天的计算机网络。今天的计算机网络实际是由许多技术有机组合而成的，因此，计算机网络技术也可以看作一系列相关技术的集合，这些技术分别负责不同的功能，组合在一起共同完成数据传输过程。

通信过程中为了确保接收方能够正确接收和理解对方数据，双方需要遵守一系列的规则和约定，这些规则和约定的集合称为计算机网络协议^[2]。例如，二进制数据“1”使用什么样的电压表示。如果收发双方使用电压不一致，接收方使用 +5V 的电压表示“1”，使用 -5V 表示“0”，而另发送方使用 -5V 表示“1”，使用 +5V 表示“0”。那么当发送方发送数据“101”时，接收方就会认为对方发送的数据是“010”，数据传输就出现错误，不能完成正常的信息传送。因此，需要对信号的表示和解析方法进行规范。统一发送方和接收方的方法，使用同样的电压表示数据。通信过程中除了电压需要统一之外，数据发送的时长、数据字符的比特长度、字符表示方法等也都需要统一。

1.1 网络的发展历史

1957 年，苏联发射了第一颗人造地球卫星 Sputnik，这颗人造卫星成功地进入预定轨道展示了苏联具有远程投射的能力。如果在卫星推进器前面安装一个炮弹，苏联就可以对远程军事目标进行打击。当时美、苏正处在冷战时期，该卫星的发射对美国造成了极大的军事威胁。为了对抗苏联的军事威胁，美国国防部组建了高级研究项目局（Advanced Research Projects Agency, ARPA）也开始研究远程导弹。为提高不同部门间数据共享能力，提高导弹研发速度，1969 年，ARPA 内部建立了一个小型网络 ARPANET，通过该网络可以快速地把数据从一个部门传输到另外一个部门，实现数据快速共享。随着技术的不断进步和完善，该网络逐渐从 ARPA 的少数部门扩展到多数部门，从军用领域扩展到民用领域，并最终演变成了今天的 Internet。

早期加入 ARPANET 的教育机构只有 4 个，第一个是加利福尼亚大学洛杉矶分校，连接的是 SDS Sigma 7 计算机。第二个是斯坦福研究所（现为 SRI 国际）的扩增研究中心，连接的是 SDS 940 NLS 计算机。第三个是加利福尼亚大学圣巴巴拉分校（UCSB）与 Culler-Fried Interactive 数学中心的 IBM 360/75 计算机。第四个是犹他州大学法学院，连接的是 DEC PDP-10 计算机^[5-6]。这四个节点的计算机主机不同，选择它们的一个原因就是为了解决不同类型主机联网的兼容问题。随着网络技术的成熟，加入 ARPANET 的机构越来越多，到 1975 年，ARPANET 接入了 100 多台主机，通过了不同设备的互连测试，网络由 ARPA 移交美国国防部国防通信局正式运行。

1983 年，ARPA 和美国国防部通信局成功研制出了用于异构网络的 TCP/IP^①，美国加利福尼亚伯克莱分校把该协议集成到 BSD UNIX 中，使得该协议开始流行起来，从而诞生了真正的 Internet。同年，ARPANET 被拆分为两部分：ARPANET 和纯军事用的 MILNET。随着美国国家科学基金会（National Science Foundation, NSF）的建立，NSF 在全美国建立了按地区划分的计算机广域网，并将这些地区网络和超级计算机

^① TCP/IP: Transmission Control Protocol/Internet Protocol, 传输控制协议/网际协议。

中心互联起来，形成了 NSFNET。1990 年 6 月，NSFNET 彻底取代了 ARPANET 而成为 Internet 的主干网。

计算机网络大事件如下。

1969 年，美国国防部创建 ARPANET。

1983 年，TCP/IP 称为 ARPANET 的标准协议。

1985 年，NSFNET 创建。

1990 年，ARPANET 宣布关闭。

1991 年，NSFNET 开始对外收费接入。

1992 年，成立 Internet 协会。

1995 年，NSFNET 宣布关闭。

1998 年，谷歌公司推出搜索引擎。

2003 年，谷歌公司推出视频分享平台 YouTube。

2021 年，5G 网络正式商用。

1.2 网络标准化组织

计算机网络是一个复杂的系统，涉及设备的种类和型号繁多且存在差异。如果没有统一的标准，不同厂家生产的设备几乎不可能进行数据通信。例如，网络通信双方的电压如果不一致，发送方使用 +15V 电压发送数据，而接收方能够承受的最高电压是 +5V，在这种情况下不仅不能正常地传输数据，而且过高的电压还会损坏接收设备。因此，通信双方需要统一传输信号的电压。在网络中不仅电压需要统一，其他很多的处理都需要统一，如信号传输形式、数据校验方式、流量控制方式等都需要进行统一。制定相关的网络标准不仅可以解决不同设备互联问题，而且也有利于厂家进行标准化生产^[1]。

网络标准化组织是一个联盟机构，由多个国际组织组成，包括 ITU^①、ISO^②、IEEE^③、IRTF^④和 IETF^⑤等。其中，ITU 的三个主要分支机构分别负责电话通信标准、无线电通信标准和新技术研发。ISO 是一个非政府组织，发布的标准涵盖的范围非常广泛，包括螺母、电线杆、渔网、衣服外套等，其中也包括了网络中的一些标准，如网线、网卡接口等。IEEE 是电子工程和通信领域最专业的国际组织，局域网的很多标准都是该组织提出的。IRTF 负责研发新的网络技术。IETF 负责解决工程应用过程中的技术问题。IRTF 和 IETF 提出的技术报告都公布在 Request For Comments (RFC) 网站。

① ITU: International Telecommunication Union, 国际电信联盟。

② ISO: International Organization for Standardization, 国际标准化组织。

③ IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 国际电气与电子工程师协会。

④ IRTF: Internet Research Task Force, 因特网研究组。

⑤ IETF: Internet Engineering Task Force, 因特网工程任务组，其主要任务是负责因特网相关技术规范的研发和制定。

1.3 中国网络的发展

1987年9月14日，北京计算机应用技术研究所的工作人员利用一台西门子7760大型计算机发送了第一封源自中国的电子邮件（如图1.1所示），这封电子邮件的内容以英、德两种文字书写，中文译为“跨越长城，通向世界”^[7]。当时，中国还不是国际计算机数据通信网（CSnet）的成员，邮件只能先通过德国的卡尔斯鲁厄大学中转之后再和国际互联网连接。这封邮件花费6天时间，最终穿越半个地球才到达德国。与今天的网速相比，这个速度几乎已经达到了无法忍受的程度。发送这封邮件的费用非常高，将近50元^[8]。当时中国普通工人一个月的工资差不多也就150元，当年网络的特点就是“网速慢，费用高”。

```

DATE:      MON, 14 SEP 87 21:07 CHINA TIME
FROM:      "MAIL ADMINISTRATION FOR CHINA" <MAIL@ZE1>
TO:        ZORN@GERMANY, ROTERT@GERMANY, WACKER@GERMANY, FINKEN@UNIKA1
CC:        LHL@PARMESAN.WISC.EDU, FARBER@UDEL.EDU,
           JENNINGS%IRLEAN.BITNET@GERMANY, CIC%RELAY.CS.NET@GERMANY, WANG@ZE1,
           RZLI@ZE1

SUBJECT:   FIRST ELECTRONIC MAIL FROM CHINA TO GERMANY

"UEBER DIE GROSSE MAUER ERREICHEN WIE ALLE ECKEN DER WELT"

"ACROSS THE GREAT WALL WE CAN REACH EVERY CORNER IN THE WORLD"

DIES IST DIE ERSTE ELECTRONIC MAIL, DIE VON CHINA AUS UEBER RECHNERKOPPLUNG
IN DIE INTERNATIONALEN WISSENSCHAFTSNETZE GESCHICKT WIRD.

THIS IS THE FIRST ELECTRONIC MAIL SUPPOSED TO BE SENT FROM CHINA INTO THE
INTERNATIONAL SCIENTIFIC NETWORKS VIA COMPUTER INTERCONNECTION BETWEEN
BEIJING AND KARLSRUHE, WEST GERMANY (USING CSNET/PMDP BS2000 VERSION).

UNIVERSITY OF KARLSRUHE          INSTITUTE FOR COMPUTER APPLICATION OF
-INFORMATIK RECHNERABTEILUNG-    STATE COMMISSION OF MACHINE INDUSTRY
      (IRA)                       (ICA)

PROF. WERNER ZORN                PROF. WANG YUN FENG
MICHAEL FINKEN                   DR. LI CHENG CHIUNG
STEFAN PAULISCH                 QIU LEI NAN
MICHAEL ROTERT                   RUAN REN CHENG
GERHARD WACKER                   WEI BAO XIAN
HANS LACKNER                     ZHU JIANG
                                  ZHAO LI HUA

```

图 1.1 中国第一封电子邮件

关于中国第一封电子邮件还有另外一种说法。中国科学院高能物理研究所的吴为民在北京710所的一台IBM的PC上通过卫星链接发送了中国的第一封电子邮件，是中国互联网第一人^[9]。也有人说中国第一封电子邮件是王运丰教授发送的。目前在互联网上找到的最早的电子邮件原文如图1.1所示，可以看到王运丰教授的名字，因此这个说法可信度相对更高。

多数的教科书认为1987年是中国人第一次使用网络，从那时起，中国就慢慢地进入了互联网时代。1989年10月，中关村地区教育与科研示范网络（National Computing

and Networking Facility of China, NCFC) 立项, 建立一个连接中科院、清华大学、北京大学三个单位的地区网络。但是当时网速很慢, 发送电子邮件 (Electronic Mail, E-mail) 需要花费很长时间, 有时候还不如骑着自行车亲自跑一趟。那时, 中国虽然已经连接到了网络, 但是美国担心中国将互联网用于军事或政治目的, 不对中国开放互联网, 中国还无法加入直接互联网。为了申请加入互联网, 中国科学家在国际上进行大量的周旋和公关工作。中国科学院计算机网络信息中心研究员钱华林同志回忆说, 中国的科技工作者联系了一些资深的专家和管理网络的官员 (具体细节没有找到文献资料), 争取了一切可能的机会, 经过多次沟通和协调, 最终在 1993 年底得到美国国家科学基金会同意接入互联网。在此之前, 中国人连接互联网需要通过其他国家进行代理中转。

中国网络发展主要经历了以下大事件。

1994 年 4 月, NCFC 工程通过美国 Sprint 公司连入互联网的 64K 国际专线开通, 实现了与互联网的全功能连接, 从此中国成为真正拥有全功能互联网的国家。

1995 年 3 月, 中国科学院完成上海、合肥、武汉和南京四个分院的远程连接, 使用 IP/X.25 技术, 迈出了将 Internet 向全国扩展的第一步。

1995 年 7 月, 中国教育和科研计算机网 (CERNET) 开通了第一条接连美国的 128K 国际专线, 这条专线连接了北京、上海、广州、南京、沈阳、西安、武汉和成都 8 个城市的 CERNET 主干网 DDN^①。其信道速度为 64Kb/s, 实现了与 NCFC 的互联。

1997 年 2 月, 瀛海威 (前身为北京科技有限责任公司) 全国大网开通, 连接了北京、上海、广州、福州、深圳、西安、沈阳和哈尔滨 8 个城市, 成为中国最早最大的民营 ISP^②。

1997 年 5 月, 国务院信息化工作领导小组办公室发布《中国互联网络域名注册暂行管理办法》, 授权中国科学院组建和管理中国互联网络信息中心 (China Internet Network Information Center, CNNIC), 授权中国教育和科研计算机网网络中心与 CNNIC 签约管理二级域名.edu.cn。

1999 年 1 月, 中国电信和国家经贸委经济信息中心牵头、联合四十多家部委 (办、局) 信息主管部门在京共同举办“政府上网工程启动大会”, 倡议发起了“政府上网工程”, 政府上网工程主站点 www.gov.cn 开通试运行。

2000 年 1 月, CNNIC 推出中文域名。

2001 年 1 月, 互联网“校校通”工程开始实施。

2002 年 5 月, 中国移动率先在全国范围内推出 GPRS^③业务。同年 11 月, 中国移动通信与美国 AT&T wireless 公司联合宣布, 两公司 GPRS 国际漫游业务开通。

2003 年 8 月, 一种名为“冲击波”(WORM_MSBlasT.A) 的计算机蠕虫病毒从境外传入国内, 短短几天内影响到全国绝大部分地区的用户。该病毒刷新了病毒历史纪录, 成为病毒史上影响最广泛的病毒之一。

① DDN: Digital Data Network, 数字数据网。

② ISP: Internet Service Provider, 因特网服务提供商, 如中国移动、中国电信、中国联通等。

③ GPRS: General Packet Radio Service, 通用数据包无线服务。

2004年12月,我国国家顶级域名.CN服务器的IPv6地址成功登录到全球域名根服务器,CN域名服务器接入IPv6网络,支持IPv6网络用户的CN域名解析,我国国家域名系统进入下一代互联网。

2005年8月,雅虎宣布以10亿美元和雅虎中国的全部资产换取阿里巴巴40%的股份及35%的投票权,雅虎在中国的全部业务交给阿里巴巴经营管理,开创了国际互联网巨头的中国业务交由中国本地公司主导经营的先例。

2005年,以博客(Blog)为代表的Web 2.0概念推动了中国互联网的发展,催生出了一系列社会化的新事物,比如Blog、Wiki、RSS、SNS交友网络等,Web 2.0概念的出现标志着互联网新媒体发展进入新阶段。

2006年1月,中华人民共和国中央人民政府门户网站(www.gov.cn)正式开通。该网站是国务院和国务院各部门,以及各省、自治区、直辖市人民政府在国际互联网上发布政务信息和提供在线服务的综合平台。

2007年5月,千龙网、新浪网、搜狐网、网易网、TOM网、中华网等11家网站举办“网上大讲堂”活动,以网络视频授课、文字实录及与网民互动交流等方式,传播科学文化知识。

2007年,腾讯、百度、阿里巴巴市值先后超过100亿美元。中国互联网企业跻身全球最大互联网企业之列。

2008年6月,我国网民总人数达到2.53亿人,首次跃居世界第一。7月,CN域名注册量达到1218.8万个,成为全球第一大国家顶级域名。

2009年1月,工业和信息化部向中国移动通信集团、中国电信集团公司和中国联合网络通信有限公司发放第三代移动通信(3G)牌照,中国开始进入3G网络时代。2009年下半年,新浪网、搜狐网、网易网、人民网等门户网站开启微博功能,吸引了社会名人、娱乐明星、企业机构和众多网民加入,微博成为2009年热点互联网应用之一。

2009年12月,中国网民规模达到3.84亿人,互联网普及率达到28.9%。宽带网民规模达到3.46亿人。网络购物用户规模达1.08亿人,网络购物市场交易规模达到2500亿元。手机网民规模达2.33亿人,一年增加1.2亿人。IPv4地址数达2.32亿个,域名总数达1682万个,其中.CN域名数为1346万个,网站数达323万个,国际出口带宽达866 367 Mb/s。

2011年5月,中国人民银行下发首批27张第三方支付牌照(《支付业务许可证》)。2011年底,我国手机网民规模为3.56亿。工业和信息化部数据显示,截至2011年底,我国3G用户达到1.28亿户,全年净增8137万户,3G基站总数81.4万个。此外,三大电信运营商加速宽带无线化应用技术的建设,截至2011年底,全国部署的无线接入点(无线AP)设备已经超过300万台。3G和WiFi的普遍覆盖和应用,推动中国移动互联网进入快速发展阶段。

2012年12月,微信用户数量进一步快速增长,注册用户达2.7亿。

2015年6月,我国网民规模达6.68亿,半年共计新增网民1894万人。互联网普及率为48.8%,整体网民规模增速放缓^[10]。

图1.2显示中国的网民数量增加迅速，中国网络普及率的明显提升。从2011年到2019年，中国的网民数量和网络普及率都几乎翻了一倍。截至2021年12月，中国的网民数量已达103 196万人，网络普及率已达73%^[11]。

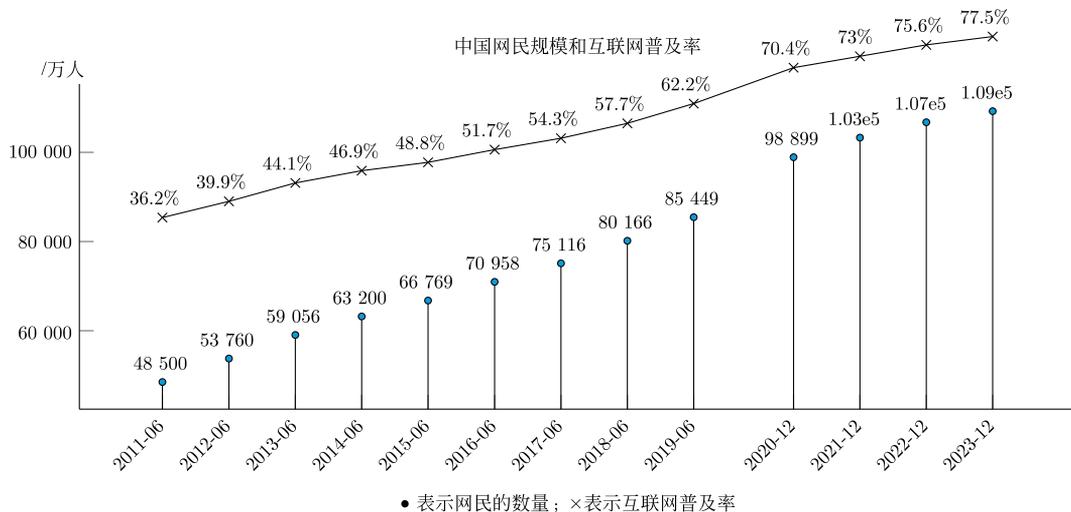


图 1.2 中国网民数量调查

1.4 计算机网络发展的三个阶段

在计算网络出现以前，人们使用磁带和软盘来转移数据。先把数据从计算机复制到软盘上，然后人工携带软盘到目的地，将软盘插入目标计算机，复制数据到目标机的硬盘，完成数据传输工作。这种工作方式，传输速度完全依赖于人的移动速度，速度慢。软盘容量小，仅有 1.44 MB，不便于转移大的数据文件（如图1.3(a)所示）。软盘寿命也很短，持续读写时间大约为 1.2h，软盘在读写过程中经常出现坏盘的现象，数据容易丢失，严重影响传输的质量。

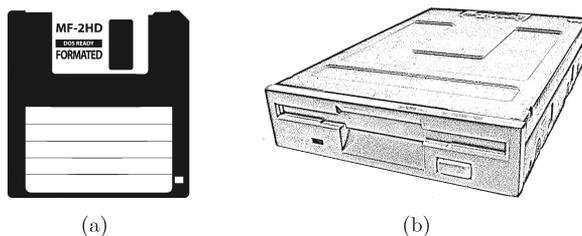


图 1.3 软盘和软盘驱动器

(a) 3 1/2 英寸^①软盘，容量 1.44MB；(b) 3 1/2 英寸软盘驱动器

计算机网络诞生后，数据通过线路直接传输，速度和可靠性比软盘传输提高了很多。随着网络的发展和科技进步，在网络发展过程中出现了一些重要的技术革新，它们

^① 英寸：1 英寸 = 2.54 厘米。

明显地提升了网络性能。根据组网设备和协议的不同，网络发展可以分为三个阶段，第一阶段是非智能终端互连网络，第二阶段是智能终端互连网络，第三阶段是标准化互连网络。

1.4.1 第一阶段 非智能终端互联

第一代计算机网络是现代计算机网络的孵化器，在该阶段的网络中，终端通过网络与中心主机连接，终端主要完成输入和输出工作，数据处理主要通过中心主机完成。由于数据存储在中心主机中，因此所有在终端查询的数据都和服务器相同，该系统中数据一致性比较高。1964年，美国飞机订票系统 SABBRE-1 是第一代网络代表，该系统通过电话线连接了分布在 65 个城市 2000 个终端连接到 IBM 7090 大型机上（如图1.4所示），可以在 3s 内完成任意航班的查询和订票工作，极大地提高了机票查询和订票的效率。



图 1.4 SABBRE-1 中使用的计算机终端

第一阶段的网络结构如图1.5所示，中心主机和多个终端连接，并为它们提供计算、存储和查询服务。在这种结构中，中心主机的负荷较重，一旦中心主机发生故障就会导致系统所有终端设备无法正常工作。终端只负责输入和输出工作，不能独立进行计算，因此称为非智能终端互联。同时由于主机和终端之间使用专线连接，一条专线只为一个终端服务，因此线路的利用率较低。

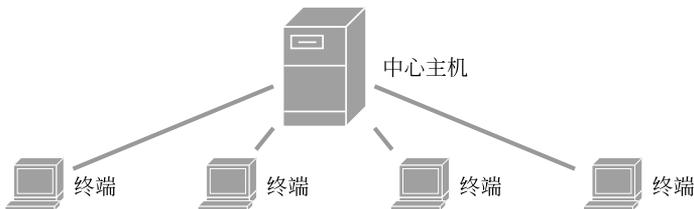


图 1.5 终端与主机直接互连网络

1.4.2 第二阶段 智能终端互联

第二个阶段为智能终端与智能终端互联阶段，主要提高了广域网通信线路复用的效率。该阶段提出的分组交换技术可以让多个终端共同使用同一个信道传输数据，提高了网络传输效率。分组交换技术规范了数据包的传输格式、数据校验方法和信号响应方法，为不同类型智能终端之间的相互通信提供了标准的接口，实现了不同型号设备之间的通信，也实现了不同速度终端之间的通信。

在网络发展的第二阶段，中心服务器的一部分计算工作转移到了用户终端，降低了中心服务器的计算负担，因此，网络能容纳更多的设备，网络规模变得更大。该时期开发了传输控制协议（Transmit Control Protocol, TCP），实现了不同速度、不同操作系统、不同设备之间的互联。TCP 是一个健壮的网络协议，直到今天仍然是网络数据传输的主要协议。

第二阶段和第一阶段网络架构的主要区别如图1.6所示，图1.6(a)所示为网络发展的第一阶段，终端通过线路与主机相连，每一个终端都有一条链路到达中心主机，终端之间不能直接通信，通信必须依靠中心主机中转。图1.6(b)所示为网络发展的第二阶段，非智能终端设备被更换为具有更强处理功能的主机，主机可以更多地分担中心主机的计算任务。主机和中心服务器之间使用分组技术通信，主干信道为多个主机同时提供服务，实现了信道的复用，极大地提高了主干线路的有效利用率。

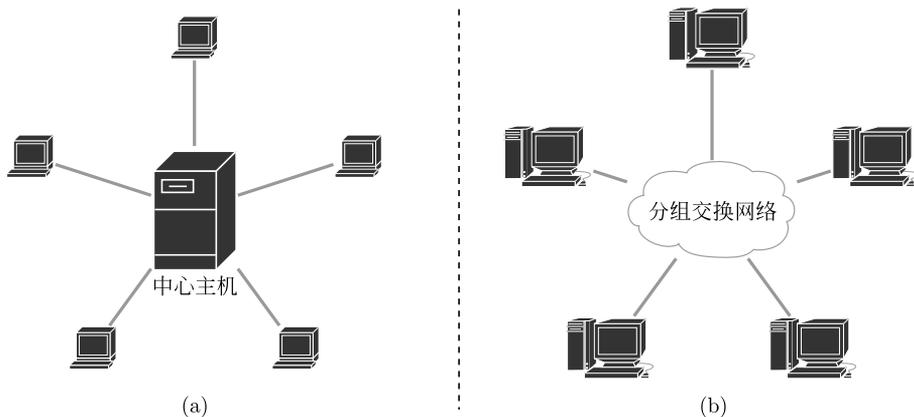


图 1.6 第一阶段网络与第二阶段网络架构的区别

(a) 第一代网络；(b) 第二代网络

1.4.3 第三阶段 标准化互联

标准化指网络中各种协议的标准化，是网络发展到第三个阶段的重要产物。计算机发展的开始阶段缺少统一的网络接口标准，不同厂家生产的硬件，接口、形状、大小及

使用的电压都不一样。在一个大型的公司里面，如果 A 部门使用 DEC 公司的设备组建了一个网络，B 部门使用 Apple 公司的设备组建了另外一个网络，那么，这两个部门之间是无法通过网络来共享信息的。

网络协议最初也同样存在标准不统一的问题，例如：有些操作系统发送二进制数据时，先发送高数据位；有些先发送低数据位。例如，对于数据 1100，有的机器按照先高位后低位的顺序（从左到右）发送，发送的顺序是 1, 1, 0, 0；有些机器按照先低位后高位的顺序（从右到左）发送，发送的顺序是 0, 0, 1, 1。发送的顺序不一样，解析得到的结果就不一样。数字发送顺序相反，发送方发送 1100，接收方就会错误地解读为 0011，传输的数据就出现了错误。

为了统一网络数据传输过程中的各种软硬件接口，IBM 公司提出了 SNA 标准；Digital 公司提出了 DNA 标准，这些标准在公司内部比较统一，但是公司之间互联仍然存在障碍。为了解决不同厂家的设备互联问题，行业龙头联合起来成立了 ISO，并制定了开放系统互连（Open System Interconnection, OSI）标准。

OSI 标准规范了网络传输中涉及的所有硬件，包括网络设备的形状、尺寸及信号的代表方法，如网线的材料、电阻、尺寸等。同时 OSI 标准也对相关软件协议做了规范。网络设备和网线的标准公布以后，更多的公司开始参与标准化生产，使得这些设备的制作技术在短时间内得到大幅度地提高，生产成本也大大降低，客观上加快了网络普及的速度。图1.7所示是 ISO 规定的一些网络接头，其中 BNC 接头是早期电话网络交换系统中使用较多的一种接头，RJ45 是计算机网络中最常使用的一种接头，也是目前局域网中使用最广泛的一种接头。OSI 标准诞生以后，不同型号的计算机可以通过标准化的信号传输介质进行相互通信。



图 1.7 常见网线接头
(a) BNC 接头; (b) RJ45 水晶头

ISO 提出的“开放式系统互连参考模型”（Open System Interconnection Reference Model）是网络进入标准化的标志。至此，计算机网络进入了为企业提供信息共享服务的信息服务时代。该时期，美国国家科学基金会的 NSFNET（1985 年成立）为网络标准化制定工作提供了很多支持。网络标准化主要解决了不同硬件设备之间的兼容性和互操作性问题，实现了不同软件系统之间数据传输和解析。