



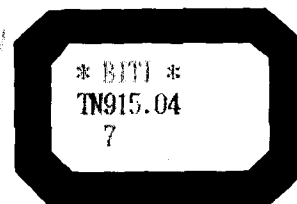
电 信 新 技 术 实 用 丛 书

IPv6 原理与实践

伍海桑 陈茂科 陈名华 胡欣蔚 严 程 编著
李 星 审校



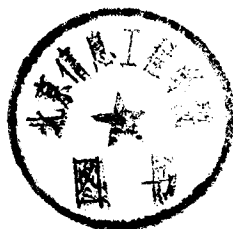
人民邮电出版社
www.pptph.com.cn



电信新技术实用丛书

IPv6 原理与实践

伍海桑 陈茂科 陈名华 编著
胡欣蔚 严 程
李 星 审校



人民邮电出版社



Z089265

内 容 提 要

本书系统阐述了下一代因特网——IPv6 的原理、技术与实践。首先简要介绍了因特网的发展历程和基本原理、新一代协议 IPv6 的标准化过程及其特性,然后着重阐述了 IPv6 的基本原理和若干关键问题,用较大篇幅介绍了从 IPv4 到 IPv6 的实践以及我国的 IPv6 研究试验工作,最后介绍了 IPv6 的其它新技术,包括 IPv6 数据报的处理技术、ICMPv6 以及 IPv6 的安全技术。

本书内容新颖,实用性强,许多内容是作者科研经验的总结。本书适合从事数据通信和网络工程的技术人员阅读,也可供高等院校相关专业的师生参考。

JS244/05
电信新技术实用丛书

IPv6 原理与实践

◆ 编 著 伍海桑 陈茂科 陈名华 胡欣蔚 严 程
审 校 李 星
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@pptph.com.cn
网址 <http://www.pptph.com.cn>
北京汉魂图文设计有限公司制作
北京顺义振华印刷厂印刷
新华书店总店北京发行所经销

◆ 开本:787×1092 1/16
印张:12

字数:293 千字

2000 年 7 月第 1 版

印数:1-5 000 册

2000 年 7 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-115-08557-9/TN·1609

定价:25.00 元

丛 书 前 言

信息技术是当今世界科技领域中最有活力、发展最快的高新技术，它时时刻刻都在影响着世界经济的发展和科学技术进步的速度，并不断改变着人类的生活方式和生活质量。近年来，作为信息技术的主要支柱之一的现代电信技术，其发展、应用和普及尤其令人瞩目，受到世界各国的广泛重视。

随着我国改革开放的不断深入，我国通信网的规模容量、技术层次和服务水平都有了质的飞跃。电信网的装备目前也已达到国际先进水平，大量的新业务不断地投入使用。在这种情况下，对从事电信工作的技术人员和管理人员的相应要求也在不断变化和提高。为了帮助广大电信工作者能够及时了解电信技术的发展，掌握新技术的应用方法，我社组织编写了这套《电信新技术实用丛书》，供大家学习使用。

这套丛书紧密结合电信部门的实际，重点介绍近些年来迅速出现并发展起来的新技术、新设备及新业务。丛书的特点是结合发展，全面介绍新技术、新概念，突出实用性。书中内容深浅适宜，条理清楚。丛书的主要读者对象是电信部门的技术人员、管理人员和业务人员，也可作为相关院校电信专业的教学参考书。

殷切希望广大读者和各有关方面提出宝贵意见和建议，以便这套丛书日臻完善。

人民邮电出版社

我们不预测未来，我们创造未来

(代序言)

1990 年即将开始的时候，美国时代周刊总结了 20 世纪 80 年代的技术发展，提到了众多的发明，比如个人计算机、激光唱盘、遥控器等等。当时我认为 90 年代最重要的技术发展将是 Internet，这一点“不幸”被我言中了。

1993 年以来，我参与了中国教育和科研计算机网（CERNET）的规划、设计、建设与运行，我为中国 Internet 近两年来的发展感到振奋，但又有一些悲哀。为什么 Internet 在美国诞生，为什么第二代 Internet 仍然在美国诞生，我们有机会让第 N 代 Internet 在中国诞生吗？

Internet 在美国诞生有其必然性，参与创造 Internet 历史的人士认为主要有五点：（1）不怕失败的创新精神；（2）对网络研究的长期不断的经济支持；（3）政府富于远见的政策导向；（4）共享互利的学术交流；（5）勇于创业的企业家。我同意这些分析，对于在我国高等院校工作的教师来说，我希望能够形成这样的环境，使我们的学生能够参与创造历史。

Internet 目前获得了巨大的成功和辉煌，但在 5 年以前，人们对 Internet 的前景却有各种不同的认识。我认为 Internet 的成功有其必然性，例如（1）无连接的包交换机制；（2）端对端的原则；（3）尽力而为的原则等。这些原则和机制对于下一代 Internet 的研究具有重要的意义。

Internet 目前也面临着巨大的挑战，主要有：（1）可扩展性；（2）网络安全性；（3）服务质量控制。其中，网络的可扩展性是最迫切需要解决的问题。网络规模的爆炸性增长已经成为网络的设计者和运营者不能回避的问题。

我曾经给学生出过一道简单的计算题，中国有 12 亿人口，如果每一个人需要一个 IP 地址，需要多少个 A 类地址。答案是超过 72 个 A 类地址。目前的 Internet（版本 4）已经沒有这么多地址可供分配。因此，对于中国人来说，如果准备大力发展 Internet，必须寻找新的答案，发展下一代 Internet。

这既是挑战又是机遇。现在，非常有趣的是，美国对于目前的 Internet（版本 4）已经忙不过来——对于他们来说，每天有新的商业机会，要全力让其企业到纳斯达克（NASDAQ）上市。世界上对于下一代 Internet 需求最迫切的就是中国。

网络科学是一门实验科学，只有在到达一定规模的情况下才能暴露新的问题，纸上谈兵是毫无意义的。所幸的是，中国的 Internet 的高速发展已经为我们创造一个具有相当规模的下一代 Internet 试验床提供了机遇和必要的基础。

由于各种原因，中国没有能够参与目前 Internet（版本 4）的创造性工作。对于下一代 Internet（版本 6），我们一定要参与。Internet 业内有一句名言“我们不预测未来，我们创造未来”。但是没有实践不可能创造出更好的未来，我很庆幸在中国教育和科研计算机网（CERNET）上，我们有一批年青有为的学生和老师不计名利，不计报酬，努力参与。因为他们明白目前的 Internet（版本 6）还有许多有待改进的地方，他们所进行的工作是在参与创造下一代 Internet 的历史。本书就是清华大学电子工程系和网络中心的学生和老师参加

创造这一历史的记录。

本书是参加下一代 Internet（版本 6）国际试验床——6BONE 活动的同仁，根据自己参与建设中国教育和科研计算机网 Internet（版本 6）试验床的亲身体会写出来的。虽然还有些不够成熟，但却实实在在，具有很高的参考价值。在阅读本书的过程中，我们建议读者一定要作试验，中国教育和科研计算机网（CERNET）IPv6 试验床的网页上可以查到最新的消息（<http://www.ipv6.net.edu.cn>）。同时我们也乐于为大家提供到 6BONE 的隧道连接。

本书受到国家杰出青年基金（基金号 69625103）和国家 863 高科技发展计划（项目号 863-317-01-08-99）的资助。我们希望通过这本书，能够让全中国更多的师生和各界人士参与到下一代 Internet（版本 6）的实践中。众人拾柴火焰高，让我们共同努力，使第 N 代 Internet 在中国诞生。

李 星

2000 年 2 月于清华园

目 录

第一篇 IPv4 的辉煌	1
第一章 Internet 的历史和发展	3
第一节 Internet 的历史沿革	4
第二节 TCP/IP 体系结构	14
第三节 参考文献	19
第二篇 新的变革——IPv6	21
第二章 IPv4 面临的挑战	23
第一节 传统 IP (IPv4) 的不足	23
第二节 解决地址耗尽的尝试	28
第三节 参考文献	34
第三章 下一代互联网协议的诞生	35
第一节 引言	35
第二节 改变 TCP/IP 和 Internet 的动机	35
第三节 IPv6 的诞生经过	36
第四节 结论	39
第五节 参考文献	39
第三篇 IPv6 的基本原理和特性	41
第四章 IPv6 概述	43
第一节 基本术语	43
第二节 IPv6 的设计目标	43
第三节 IPv6 数据报的一般格式	45
第四节 参考文献	45
第五章 IPv6 的关键问题 (1) —— 报头	47
第一节 IPv6 的基本报头	47
第二节 报头的扩展	50
第三节 参考文献	66
第六章 IPv6 的关键问题 (2) —— 地址	67
第一节 IPv6 的地址空间	67
第二节 IPv6 的地址结构	68
第三节 IPv6 的地址类型	69
第四节 参考文献	83

第四篇 从 IPv4 到 IPv6 的实践	85
第七章 两种协议的过渡	87
第一节 过渡时期的基本问题	87
第二节 过渡方案概要	88
第三节 参考文献	90
第八章 连接大海中的小岛 —— 隧道	91
第一节 隧道技术概论	91
第二节 IPv6 隧道的定义	91
第三节 IPv6 隧道的工作	92
第四节 嵌套封装	95
第五节 隧道 IPv6 报头	97
第六节 IPv6 隧道状态变量 (Tunnel State Variables)	99
第七节 有关 IPv6 隧道分组大小的问题	100
第八节 参考文献	101
第九章 IPv6 的实践 —— 试验床	102
第一节 试验床——走向 IPv6 的必由之路	102
第二节 6BONE	104
第三节 6REN	115
第四节 6TAP	116
第五节 参考文献	117
第五篇 中国的 IPv6 试验工作	119
第十章 IPv6 主机和路由器的安装与配置	121
第一节 硬件要求	121
第二节 软件配置	121
第三节 地址配置	127
第四节 路由配置	129
第五节 参考文献	130
第十一章 建立 IPv6 网络	131
第一节 概述	131
第二节 IPv6 互联网络的链路连接方式	132
第三节 规划 IPv6 地址空间	137
第四节 建立 IPv6 网络路由	145
第五节 参考文献	153
第十二章 CERNET IPv6 试验床	154
第一节 试验床概况	154
第二节 试验床的地址分配方案	155
第三节 主干网路由规范	156
第四节 主干网成员——NLA1	157

第五节	试验床域名授权的规范	159
第六节	试验床注册命名 IPv6 网络的规范	160
第七节	加入 IPv6 试验床	161
第八节	试验床的工具	163
第九节	CERNET IPv6 试验床的将来	164
第十节	参考文献	164
第六篇	深入了解 IPv6	165
第十三章	IPv6 数据报的处理	167
第一节	IPv6 的分段和重组	167
第二节	端到端分片的分析	168
第三节	参考文献	169
第十四章	IMCPv6	170
第一节	引言	170
第二节	ICMPv6 总体介绍	170
第三节	ICMPv6 差错报文	173
第四节	ICMPv6 信息报文	175
第五节	安全考虑	176
第六节	参考文献	176
第十五章	IPv6 的安全功能	178
第一节	安全问题综述	178
第二节	IPsec 的工作	179
第三节	今后的方向	180
第四节	参考文献	180

第一篇

IPv4 的辉煌

第一章 Internet 的历史和发展

当作者提笔写下第一章的时候, Internet 刚刚度过它 30 岁的生日, 又恰逢新千年的到来。作为数十年来在电子学、电信、广播、计算技术、软件设计等众多领域中创新与进步的最终成果, Internet 已正在成为我们这个世界众多变化的推动力。纵观即将过去的这个世纪, 在每个领域中人类都已取得了巨大的飞跃, 然而更深刻的变化还在未来, 那就是在这些技术彼此相互融合, 所有行业都进入一个连接得更加紧密的社会的时候。虽然 Internet 刚刚度过“而立之年”, 但有一点已经很明显, 那就是我们的社会与经济的各个方面都将最终通过 Internet 而得以彻底的改变。

自从 1981 年 IBM 个人计算机进入市场以后, Internet 的普及是计算机世界最重要的事情。在“99 世界电信论坛会议”的开幕式上, 加拿大北电网络公司(Nortel Network) 总裁 John Roth 先生作为本次会议的副主席作了开幕演讲。在演讲中, Roth 先生说他发现了一个新的“摩尔定律”, 即 Internet 的频宽每 9 个月就将增加一倍, 而成本同时降低一半。这比摩尔定律中所描述的芯片容量增加一倍需 18 个月的时间还要短。John Roth 将该发现命名为“光纤定律”, 以此形容网络技术的发展速度之快。Roth 同时指出, 人类文明起源于“沟通”, 电信技术将全球连接了起来, 促成了现代文明, 而未来文明将由 Internet 主导潮流。他举例说, 电话自发明以来, 花了 75 年的时间才累积了 5000 万的用户, 收音机用了 35 年, 电视与移动电话则各用了 13 年与 12 年。但是, Internet 却只花了 4 年的时间。

Internet 的成功原因可以概括为四个方面。

- 首先是技术方面的因素, 分组交换理论的提出以及 TCP/IP 协议的开发成功是推动 Internet 普及和发展的关键所在。

- 其次是它的运作和管理方式, Internet 被公认是一个“没有领导, 没有法律, 没有政治, 没有军队”的社会, 从 Internet 建立之初就不存在一个正式的官方机构负责对它的管理、运行、维护、资源服务的提供以及标准的制定, 这里存在一个自由的学术交流环境。

- 第三个是社会的原因, Internet 是一个开放的系统和社会, 为使用者提供了一个开放的环境, 每个用户都可以通过建立自己的网站为这个开放的社会提供资源, 任何有兴趣的人都有机会参与到它的技术革新中来, 使自己的研究成果成为 Internet 的标准或应用。

- 第四是商业的原因, Internet 是科研成果转化为生产力的最成功的典范。

1995 年 10 月 24 日, 通过广泛征询 Internet 和知识产权方面专家的意见, 美国联邦网络委员会一致通过了一项提案, 为 Internet 做了如下的定义:

“Internet 是一个全球性的信息系统, 系统中的每台主机都有一个全球唯一的主机地址, 地址格式通过 IP 协议(网际协议: Internet Protocol)定义。系统中主机与主机间的通信遵守 TCP/IP 协议(传输控制协议/网际协议: Transmission Control Protocol/Internet Protocol)标准, 或是其它与 IP 兼容的协议标准来交换信息。在以上描述的信息基础设施上, 利用公网或专网的形式, 向社会大众提供资源和服务。”

虽然作为一个相互联网的计算机网络群, Internet 还远远不是信息高速公路, 但它是我

们今天所拥有的对未来信息高速公路的最佳模拟，并且毫无疑问地将会发展成为信息高速公路。

作为介绍下一代 IP 协议一书的第一章，本章将花点篇幅介绍一下 Internet 的发展历史，这应该是一件很有意思的事情，正是由于 Internet 的以“光纤定律”的发展速度，使 Internet 的技术人员和专家越来越感觉到版本 4 的 IP 协议（IPv4）将要变成 Internet 飞速发展中的绊脚石，十分有必要开展对下一代 IP 协议的研究。除此以外，本章还要对 TCP/IP 的体系结构作一简单的介绍。

第一节 Internet 的历史沿革

美国国防部高级研究计划局（ARPA: Advanced Research Projects Agency）计算机研究组的组长 J.C.R.Licklider 于 1962 年提出了“银河网络”（Galactic Network）的设想，这是有文字记载的最早的通过计算机网络实现人与人交流的梦想。1969 年 10 月首次计算机网络通信实验获得成功，这一天也成为 Internet 或者说是 Internet 的前身 ARPAnet 的誕生日。到 1971 年，连接到 ARPAnet 上的主机由 1969 年的 4 台增加到 23 台。1972 年 10 月在华盛顿特区召开的首届国际计算机和通信会议上，ARPAnet 首次向公众展示，这次演示是一个非常大的成功，在社会上引起了极大的轰动效应。1983 年，ARPAnet 完成了由早期的主机—主机通信协议(Host-Host Protocol)向 TCP/IP 协议（传输控制协议/网际协议：Transmission Control Protocol/Internet Protocol）的过渡，Internet 正式出现。1986 年 NSFnet (National Science Foundation Network) 计划启动，NSFnet 的成功不仅推动了美国国内计算机网络的发展，而且极大地推动了全球的计算机网络的发展，并逐步代替 ARPAnet 成为 Internet 的主干网，每年都有几十个国家的计算机网络连到 NSFnet 上来。80 年代后期，商业网络的投入使用和各种网络应用的普及，特别是 90 年代初期万维网（WWW: World Wide Web）的出现，极大地推动了 Internet 的发展，使 Internet 真正从象牙塔走向了普通大众，变成了人们日常交流的基础设施。

一、ARPAnet 的诞生

1957 年 10 月，原苏联成功地发射了人类历史上的第一颗人造地球卫星。这次发射的成功大大震惊了美国朝野，美国政府遂决定在美国国防部的领导下成立高级研究计划局 ARPA。ARPA 在国际互联网的建设和发展中起到了决定性的作用，可以说没有 ARPA 就没有今天的 Internet。

除了雇佣几百位美国顶尖的科学家，ARPA 还通过提供研究经费的方式将许多研究课题承包给了美国的一些顶级研究机构，如麻省理工学院（MIT）等。虽然早期 ARPA 的研究重点是在空间科学、弹道导弹和原子弹实验的监测领域，但是从一开始，ARPA 就对如何为参加研究计划的科学家以及课题研究机构和运转中心间提供高效的交流途径、如何实现他们之间的信息共享非常感兴趣。60 年代早期，昂贵的大型计算机是科研工作的主力，这些分时系统通过电话线与分布在各地的终端相连接。使用不同的计算机就需要从不同的终端登录，如后来接任 ARPA 计算机研究组主任（J.C.R.Licklider 是它的首任主任，他为该研究组起名信息处理技术办公室 IPTO: Information Processing Techniques Office）的 Bob Taylor 的个人办公室里就有三台终端分别连到了国内三个不同的计算机系统上，是否可以将这些计算机连

接起来，使它们之间能够相互通信，从而只需要一台终端就可以登录到不同的系统上呢？这也是当时困扰着参加 ARPA 工作的科学家们的的问题。因此，一开始计算机连网的目的并不是像后来的文章和书中所说的，是为了在冷战时期抵抗原子弹对通信的摧毁，而是为了共享信息。

1962 年 8 月，J.C.R.Licklider 发表了“在线人机通信”（On-Line Man Computer Communication）一文，文章中对银河网络的概念进行了描述。Licklider 设想可以将分布在全球各地的计算机连接起来，从任一点可以获取另一点上的数据。当时，人们还没有意识到计算机网络会发展到今天这样的水平，成为日常通信的工具，人们仅仅希望可以通过计算机网络相互交换论文、报告和各自编写的程序。

由于当时普遍使用电话线连接终端和主机，因此人们首先想到的是采用电路交换技术实现计算机间的网络连接。来自 MIT 的排队论专家 Leonard Kleinrock 却认为电路交换对于计算机连网并不是有效的和高效的技术。在 1961 年发表的学科论文“大型通信网络中的信息流动”（Information Flow in Large Communication Nets）中，Leonard 认为可以将数据报文分成一些小的“包”（package），这些“包”被分别发送，在收端再将它们重新组装起来，恢复出原有报文。Leonard 认为这种技术可以在需要的时候才占用线路，不同的“包”可以通过不同的路径传输到收端，比起电路交换技术来要更有效、灵活。而且，报文在传输前已被拆分，监听就变得很困难，甚至是不可能的，这在一定程度上保证了所传报文的安全性。这种技术也就是我们现在所熟知的分组交换技术。除了 Leonard，RAND 公司也于 1962 年开始计算机网络技术的研究。Paul Baran 于 1964 年发表了文章“关于分布式通信网络”（On Distributed Communication Networks），文中提出了分组交换网络的理论，认为在分组交换网络中，不存在一个致命的摧毁点，这个技术对于抵抗原子摧毁是非常有效的。Paul 本人因为在分组交换技术上的贡献于 1989 年获得了美国计算机协会数据通信主题组（ACM SIGCOMM）和国际电气电子工程师协会（IEEE）授予的 A.G.Bell 奖。

在差不多同样的时期，远在英国国家物理实验室（NPL, National Physical Laboratory）在 Donald Watts 的率领下也于 1964 年开始了计算机网络技术的研究，目的是建立 NPL 数据网络。非常有意思的是，Donald 也想到了可以将文件拆分再传输的方法，只不过在这里他称这些小的数据单元为分组（packet），这也是目前计算机网络中普遍使用的分组交换技术的名称由来。NPL 网络是一个分组交换实验网络，当时的线路连接速率为 768kbit/s。在互不知情的情况下，Leonard、Paul 和 Donald 先后都想到了分组交换技术，这种巧合从一定程度上说明计算机实现网络互联是科学技术发展到一定阶段的必然结果。但是另一方面，如果当时已有了今天的 Internet，信息的交流就不会如此闭塞了。

为了验证分组交换技术的可行性，并与电路交换技术做比较，Leonard 说服了 Larry Roberts 从 ARPA 争取到经费用于计算机连网的实验。1965 年，位于 MIT Lincoln 实验室的 TX-2 计算机通过一条速率为 1200bit/s 的低速电话线与位于 California 大学 Santa Monica 分校系统开发公司的 AN/FSQ-32 计算机连接起来。虽然是小得不能再小了，但是这就是第一个广域网络 WAN。这次实验证明可以利用电话线将分时计算机连接起来，彼此间相互在对方的计算机上运行程序，并相互传输数据。但同时人们也看到了电路交换的效率是非常低的。

只花了大约 20 分钟，Bob Taylor 就说服了当时 ARPA 的负责人 Charles Herzfeld 同意提供 100 万美元的经费用于计算机网络技术的研究，1966 年 Larry Roberts 加入 IPTO 继续

从事网络的研究。一年以后，在 1967 年 10 月的 ACM 操作原理专题讨论会上，Roberts 宣读了他的论文“多计算机网络和计算机通信”（Multiple Computer Networks and Intercomputer Communication）。这篇论文是 Roberts 这一年研究的总结，在论文中 ARPAnet 的构想首先被提出。又经过了约一年时间的讨论、研究，1968 年 8 月 ARPA 正式发布了关于建立 ARPAnet 的需求说明书。整个项目被分成了三个部分，分别由三家研究机构赢得了合同，分别是：BBN(Bolt Beranek and Newman, Inc.)的 Frank Heart 赢得了分组交换的合同，目的是研制 ARPAnet 的关键设备接口报文处理器 IMP（Interface Message Processors）。Roberts 和 Howard Frank 在网络分析公司（Network Analysis Corporation）的小组赢得了网络拓扑结构设计、优化和网络经济研究的合同。Leonard 在 UCLA 的研究小组赢得了网络测试中心的合同。

基于 Leonard 在分组交换理论上的突出贡献，及他在网络分析、设计和测试方面的研究基础，由他领导的 UCLA 网络测试中心被第一个选为 ARPAnet 的节点。1969 年 9 月，BBN 在 UCLA 安装了第一台 IMP，这是一台 Honeywell DDP-516 小型计算机，内存仅有 12kB。对端节点选择在 Stanford 研究院 SRI，SRI 成了后来的网络信息中心 NIC，负责维护主机名到地址的映射表。1969 年 10 月 25 日进行了第一次网络通信实验，UCLA 的 Charley Kline 试图登录到 SRI 的计算机上，访问它的数据库并试图向它发送数据。虽然当 Charley 键入“LOGIN”的“G”时系统死机了，但是实验说明设想是可行的。紧接着进行了第二次尝试，登录成功了。到 1969 年 11 月，位于美国西海岸的另外两所大学 UCSB(University of California, Santa Barbara)和 Utah 大学也分别连了进来，共同组成了最早的 ARPAnet。在 ARPAnet 刚刚诞生的时候，网络技术的研究就沿着两条主线在走，即网络的建设和网络的应用。这种习惯，或说是分工一直延续到今天，这一点是需要特别受到注意的。下面的图 1.1 简单而直观地表明了当时最早的 ARPAnet 的情况。

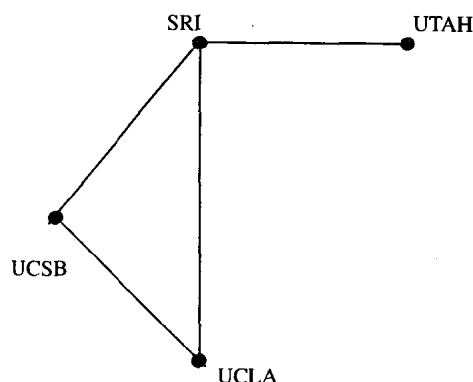


图 1.1 1969 年 12 月的 ARPAnet

ARPAnet 四个节点使用的计算机以及计算机上使用的操作系统是不一样的，UCLA 使用的是 SDS SIGMA7 计算机，安装了 SEX 操作系统；SRI 的是 SDS 940 计算机和 Genie 操作系统；UCSB 的是 IBM 360/75 计算机和 OS/MVT 操作系统；Utah 大学的则是 DEC PDP-10 和 Tenex 操作系统。为了实现与 IMP 的通信，需要为不同的计算机编写一些辅助软件，这就是早期的主机—主机通信协议的研究工作。在主机—主机协议（host-to-host protocol）出现以前，只能做到通过远程终端访问主机上的文件。主机—主机协议允许从一台主机远程登录到网上的另一台主机上并运行该主机上的程序，申请登录的主机对于被登录的主机来说就

是一个远程终端。当需要进行数据传输时，数据在传输前被拆分成适当大小的“分组”，每个“分组”在加上发送方和接收方的地址以及序号后被发送出去，接收方则将收到的“分组”按序号重新组装恢复出原始数据。早期的研究成果由 Steve Crocker 写成了第一篇 RFC（征求评议：Request for Comment）发表，它是后来网络控制协议 NCP（Network Control Protocol）的前身。在随后约两年的时间里，连入 ARPAnet 的计算机以每月 1 台的速度增加。这时的研究重点是开发功能完善的主机—主机通信协议及应用软件。图 1.2 表明的是 1970 年 6 月 ARPAnet 网的情况。

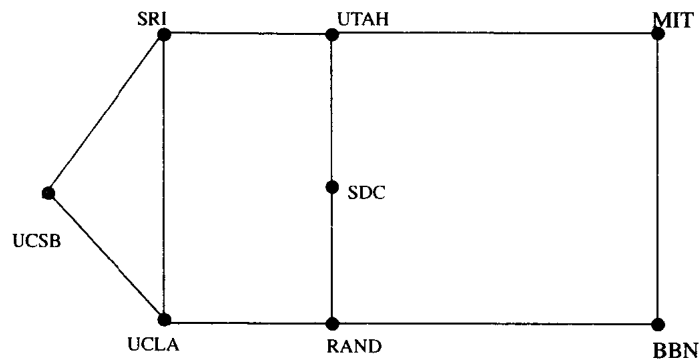


图 1.2 1970 年 6 月的 ARPAnet

1970 年 12 月，由 Steve Crocker 领导的网络研究工作组 NWG（Network Working Group）完成了 NCP 的开发工作。1971 年，NWG 完成了远程登录协议 Telnet 的开发并在文件传输协议 FTP 的研究方面也取得了很大的进展。同样在 1971 年，BBN 的 Ray Tomlinton 在电子邮件软件的开发方面取得了进展，这时的电子邮件软件已可以实现在分布式计算机网络上发送报文的发送和接受的功能。从 1971 年开始，ARPAnet 上的主机逐步开始支持 NCP。到 1971 年 3 月，ARPAnet 网的结构又有了变化，如图 1.3 所示。

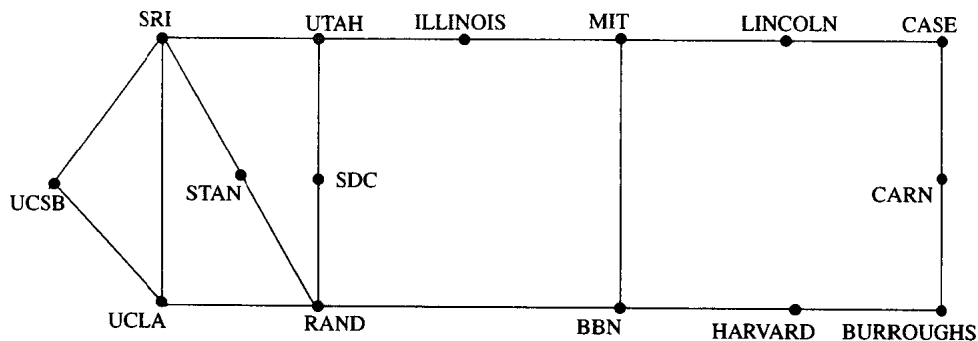


图 1.3 1971 年 3 月的 ARPAnet

到 1972 年，网上的所有主机都能支持 NCP 了，这是非常重要的，因为有了一致的网络通信协议，用户就可以开发自己的网络应用程序了。

1971 年 9 月，可以支持 64 台主机通信的终端型 IMP，即 TIP（Terminal IMP）由 BBN 研制成功。

许多小项目的研究开始在网络上进行，如航空母舰着陆模拟器的研究。但是网络的使用效率并不高，网络上的流量远远低于当时的网络带宽。由于 ARPAnet 只局限在参加该项目研究的范围内使用，即使对于学术界来说，计算机网络也是个陌生的名词。Larry Roberts

和 Bob Kahn 决定应当寻找机会向公众展示 ARPAnet 的魅力，他们选择了 1972 年 10 月在华盛顿特区召开的第一届国际计算机和通信会议（ICCC: International Conference on Computer Communication）。参加这次展示的有分布在全国各地的 40 台计算机，展示了网上弈棋、网上测验、空管模拟等应用，第一次的网上聊天演示是其中最吸引人的。展示引起了极大的轰动，来自于世界各地的越来越多科学家投身到网络建设和网络技术的研究上来。图 1.4 就是 1972 年在展示会上展示的 ARPAnet 的发展情况。

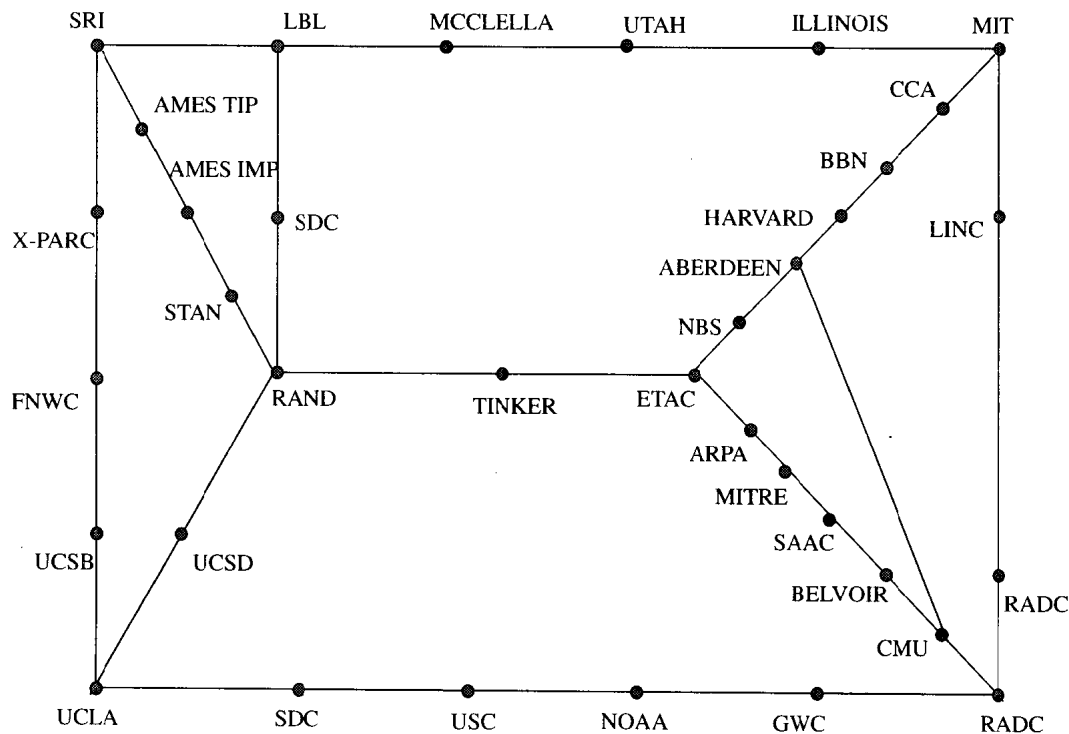


图 1.4 1972 年 9 月的 ARPAnet

二、从 ARPAnet 到 Internet

ICCC 展示的成功证明了分组交换技术对于计算机连网来说是可行的、高效的，随后 ARPA 又投资建设了另两个网络：分组无线网 PRNET (Packet Radio Network) 和分组卫星网 SATNET (Packet Satellite Network)，通过 SATNET 连接了挪威和英国。Bob Kahn 进入 ARPA 后的第一件事就是设想是否能将 ARPANET、PRNET 和 SATNET 连起来，问题是这三个网络各自的接口定义、分组长度、传输速率和通信协议都是不同的，互联是一件非常困难的事情。早期，人们想到的是两种网络互联方式。一种就是用传统的电路交换技术，但是 1965 年的实验就已证明电路交换技术在计算机数据传输方面的效率是非常低的。另一种想法就是是否可以将一个网络作为另一个网络的一个组成元素，或是节点。但是被互联的网络应该在地位上平等。

Bob Kahn 于 1972 年提出了“开放结构互联”(open architecture networking)的概念。基于开放结构的思想，为了适应不同的需求和环境，不同的网络可以有不同体系结构，采用不同的网络拓扑结构、不同的网络通信技术和接口定义。互联的网络通过一个转换层实现彼此间的连接，这个转换层被称为“互联结构层”(internetworking architecture)。开放结构