互联网络测量

理论与应用

杨家海 吴建平 安常青 编著

人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

互联网络测量理论与应用

杨家海　吴建平　安常青　编著

人民邮电出版社
北京

图书在版编目（CIP）数据

互联网络测量理论与应用 / 杨家海，吴建平，安常青编著. —北京：人民邮电出版社，2009.10
ISBN 978-7-115-20197-3

Ⅰ. 互… Ⅱ. ①杨…②吴…③安… Ⅲ. 因特网－测量－基本知识 Ⅳ. TP393.4

中国版本图书馆CIP数据核字（2009）第149599号

内 容 提 要

本书从讨论互联网络测量与行为研究的动机入手，系统而全面地介绍了互联网络测量与行为研究领域涉及的各个方面的内容，包括网络测量方法与内容分类、网络测量的基础设施与体系结构、网络性能测量、网络流量测量、流量分析与建模技术、网络拓扑特性测量与路由监控、面向应用的测量以及网络测量的具体应用等。本书内容全面深入，既包括互联网络测量与行为研究的基本问题和基础知识介绍，更注重对互联网络测量领域涉及的各相关专题前沿研究的论述。全书基本上反映了近几年来网络测量领域的最新研究成果并逐章提供了详尽的参考文献。

本书既可以作为计算机通信与网络等专业的高年级本科生及研究生教材，也可供广大网络及网络运行管理技术的科研人员、网络工程技术人员、网络运行管理维护人员参考使用。

互联网络测量理论与应用

◆ 编　　著　杨家海　吴建平　安常青
责任编辑　滑　玉
执行编辑　武恩玉

◆ 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
北京铭成印刷有限公司印刷

◆ 开本：787×1092　1/16
印张：27.5
字数：724千字　　2009年10月第1版
印数：1－2 000册　　2009年10月北京第1次印刷

ISBN 978-7-115-20197-3

定价：62.00元

读者服务热线：(010)67170985　印装质量热线：(010)67129223
反盗版热线：(010)67171154

序

以互联网为代表的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。互联网作为当代信息社会的重要基础设施已经是一个真正意义上的复杂巨系统。对这样一个复杂系统的运行管理和管治，无论从社会、商业和技术的角度来看都显得愈益重要和迫切。

另一方面，当前全球范围内正在掀起重新规划和设计新一代互联网的热潮，我国也在国家的重视和支持下，和美国等世界一流的国家站在同一起跑线上展开下一代互联网的研究和建设工作。下一代互联网的研究和设计首先应该是在继承的基础上进行，需要先理解当前互联网运行中存在的问题。目前关于互联网行为的定量研究还非常有限，某种程度上也制约了下一代互联网发展的步伐。

测量是人类认识自然、改造自然的一种重要手段。网络测量、分析和建模也是当前我们理解和认识网络行为规律，优化和重新规划网络结构以及改善网络服务质量的重要手段。在过去十多年的时间里，学术界和工业界以网络测量作为基本的手段，对互联网的运行行为及变化规律进行了大量的研究，先后发表了大量的学术论文。遗憾的是，至今尚未见到有关的教材或著作对此进行系统性的总结。随着越来越多的高校和研究机构从事互联网络测量方面的研究工作，并开设相应的研究生和高年级本科生课程，对此的需求愈益迫切。

本书的作者是我国第一个全国性的互联网——中国教育和科研计算机网（CERNET）的主要建设者之一，长期从事互联网体系结构、新一代互联网设计、互联网运行管理与测量等方面的教学和科研工作，因此我一直鼓励他们写一本这方面的书。我深知他们都担负着非常繁重的科研和教学任务，何时能够完成书稿，我的心里并没有数。然近日欣闻书稿已全部完成，由人民邮电出版社很快完成排版，编辑送来了清样，遂从头到尾又仔细地读了一遍，匆匆写下数言，权作读后感或曰序言吧。

1. 内容新颖

本书反映的既是作者近年来的研究成果，也是对网络测量领域当前最新研究成果和进展的总结，内容新颖，重点讨论最新的网络测量基础技术、最新的流量分析、建模与预测技术、以 P2P 技术为代表的新型网络应用识别和分类技术等，给读者一个很高的起点。

2. 综述全面

网络测量是在互联网技术发展的大背景下诞生的，因此，本书首先从互联网的发展历史和体系结构介绍入手，全面综述网络测量技术和学科发展的背景，给读者一个全景式的视角。

3. 理论和实践相结合

回顾互联网的成功发展历史，人们发现互联网的发展具有实验物理学的特点，即任何互联网技术的发展和成熟都需要大量的试验作基础，网络测量技术的发展更

是如此。因此，在讨论网络测量问题的时候就不能是从理论到理论，也不能只单纯地注重实践，而是要将二者有机地结合起来。作者的工作得益于一个良好的实践和实验环境，作者深入浅出地与读者分享了通过自身“体验”的理论和技术。

4. 系统性和前瞻性

本书系统地论述了网络测量领域的现状、存在的问题和挑战，也系统地总结了学术界在该领域研究所取得的进展和成果；并前瞻性地总结了网络测量研究面临的新挑战和可能的发展趋势。

本书作者所在的课题组代表了国内在互联网络管理和测量方面的先进水平，本书是国内第一本有关网络测量方面的著作和教材，因此，本书的出版必将繁荣和促进我国在互联网络测量方面的研究。同时，相信学生和广大读者通过本书的学习，将能全面掌握网络测量的基础理论与技术，为其今后的科研工作打下扎实的基础。

史美林

2009 年 8 月 于北京清华园

前　言

互联网是20世纪发展最为迅速的技术，以Internet为代表的计算机互联网络已成为现代信息社会最重要的基础设施，它已渗透到社会生活的各个方面，成为国家进步和社会发展的重要支柱。随着超高速的光通信技术和宽带无线通信技术的快速发展以及新一代互联网体系结构理论研究的突破，一个以“更大、更快、更及时、更方便、更安全、更可管理和更有效”为主要特点的新一代互联网将像第一代互联网一样走进我们的工作和生活。

但是对于这个人们日益依赖的信息基础设施，我们现在依然知之甚少。全面掌握互联网的运行状态、充分认识互联网的行为规律、及时而准确地预测互联网的发展趋势，为新一代互联网技术的研究提供实验和技术的依据，使新一代互联网能够更好地满足国家和社会的要求，已经成为摆在我们面前的紧迫任务。

19世纪英国著名的物理学家Kelvin在一次著名的演讲中说：“当我们可以测量并且用数字表达我们谈论的东西的时候，我们才算得上对此事物有所了解；如果我们不能测量或者是不能用数字表达所谈论的东西，那么我们对此的了解就是贫乏不足的”。网络测量和分析作为监控、理解和认识网络行为，并进而优化和重新规划网络结构以及改善网络服务质量的重要手段，受到了越来越多的研究人员和运行人员的重视，而使网络测量技术成为当前计算机网络领域重要的研究热点之一。

笔者有幸先后参与了两代中国教育和科研计算机网CERNET和CNGI-CERNET2的规划、设计、建设和运行工作。1994年3月开始作为主力参与中国第一个全国性的互联网络－CERNET的规划、设计和建设工作，并长期负责CERNET的运行工作；2002年开始，作为核心成员参加国家发改委重大软课题“下一代互联网发展战略研究”和“中国下一代互联网示范工程CNGI核心网CERNET2”等重大项目的预研、策划、设计和研究开发等工作。在此过程中既积累了大量网络管理运行的实践经验，也深深地体会到目前人类对互联网络的运行行为理解还非常有限，因此，在国家相关研究课题的支持下，笔者所在的研究团队开展了大量和网络管理与测量相关的研究工作，也发表了大量相关的研究论文。

然而总体而言，目前关于互联网行为的定量研究还非常有限，某种程度上制约了下一代互联网发展的步伐。为了使计算机系的研究生能够更加系统、深入地理解和掌握互联网测量的基本概念、基本理论，了解互联网测量的研究现状和最新发展，笔者为清华大学计算机系的研究生开设了“网络测量理论与分析技术”课程。在课程准备的过程中，笔者对国内外大学的相关课程进行了深入的调研，发现目前国内外都还没有一本能够系统全面地阐述互联网测量研究最新进展的教材。尽管国内已经有多所高校开设了和网络测量相关的课程，但由于没有教材，学生反映学习起来有诸多不便；在国外，和网络测量相关的教材也是凤毛麟角，而且由于成书时间较早，部分内容已经有过时的嫌疑。

本书正是在这样的背景下，在结合笔者及其所在团队研究工作的基础上，在更

广更深的范围内对网络测量领域研究工作的一个系统总结。

写书的过程是艰苦的，尤其是编写一本涉及一个全新学科的教材。虽然笔者从事网络运行管理和网络测量研究多年，但对某些新兴的研究领域和分支也并不十分熟悉，往往需要查找资料，阅读大量文献。这样的工作虽然花去了笔者大量的时间和精力，但也使自己的知识点得到了一次全面系统的梳理，对网络测量研究工作的认识得到了一次升华。更为重要的是，如果此书的出版能够对我国计算机网络和通信专业相关教学和科研工作有所裨益，那么一切的付出都是微不足道的。

本书第 5、第 6、第 10 和第 11 章由安常青编写；第 3、第 4 和第 7 章由周静静编写；第 8 和第 9 章由章晋学提供初稿，由杨家海整理编写；其余章节由杨家海编写；全书的统稿工作由吴建平和杨家海完成。本书是作者多年研究工作的积累，作者所在单位的部分学生直接或间接地参与了本书的编写工作，他们是张军、佘伟、李云琪、鲁文斌、朱应武、张冠群、朱思宇等。张金祥博士在本书编写的过程中提出了许多宝贵的意见和建议，并审阅了部分书稿，在此一并表示感谢。

本书在编写与出版的过程中，得到了清华大学计算机系史美林教授的鼎力支持和帮助。史老师从选题策划到内容大纲的确定都给予了热情的指导；在初稿完成后，史老师又对全书进行了细致的审阅，提出了许多宝贵的意见和建议；尤其令我感动的是，史老师在身体欠佳的情况下还坚持为本书作了热情洋溢的序。在此，我由衷地感谢史老师为本书的顺利出版所做的一切，并衷心祝愿史老师早日康复！

互联网测量是一门新兴的学科，因此本书的出版并非一帆风顺，作者由衷感谢人民邮电出版社的武恩玉编辑在本书写作和出版过程中给予的宝贵支持和帮助。

在本书即将付印的时候，我还要感谢我的家人和朋友，特别是我的女儿，在她小升初的关键阶段里，我没有更多的时间陪在她的身边，谨以此书献给他们。

感谢国家基础科学研究计划（973）、国家高技术研究发展计划（863）、国家发改委和国家自然科学基金委员会多年来对作者研究工作的支持（项目编号：2009CB320505，2008AA01A303，2005AA103110-2，60473083）

限于作者的水平，书中难免存在这样那样的缺点甚至错误，殷切期望广大读者批评指正，以便笔者在适当的时候，根据大家的意见和建议，结合本领域的最新进展情况进行修订和补充。

杨家海

2009 年 6 月 于北京清华园

目 录

第1章 概论

互联网是20世纪发展最为迅速的技术，以互联网为代表的信息网络已经渗透到社会生活的各个领域，成为现代信息社会最重要的基础设施之一。随着国家和社会对信息网络的日益依赖，它已成为国家进步、经济运转和社会发展的重要支撑环境。信息网络及其应用水平已成为衡量一个国家基本国力和经济竞争力的重要标志。

互联网的成功有技术的、社会的和商业方面的因素，更有其运行和管理方面的因素。从技术方面来说，分组交换理论的提出以及TCP/IP的开发成功是推动互联网普及和发展的关键因素；从运行管理模式来说，互联网是一个没有中央集中管理的开放社会和系统，每个单位甚至个人都可以通过建立自己的网络和架设自己的网站，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，并使自己的研究成果成为互联网的标准或应用；从商业的角度来说，互联网可以说是科研成果转化为生产力的最成功的典范。

互联网的成功也是有代价的，由于互联网缺乏统一和集中的管理，使得我们难以全面地理解和掌握网络的运行行为，更难以预测其未来的发展趋势；由于从技术设计方面遵循了“中间简单，边沿智能”的原则，互联网缺乏基本的可观测性（observable），因而从技术上增加了监控、管理和理解互联网的难度，致使对于互联网这样一个人们日益依赖的信息基础设施，我们现在依然知之甚少。正是在这样的背景下，人们希望通过对网络的测量分析来比较深入地理解网络的基本特性，掌握网络的运行行为。

为了更好地对互联网进行测量，并对测量数据进行正确和合理的解释，我们有必要首先了解互联网的体系结构。事实上，互联网的许多设计原则直接影响到我们对其的测量，也决定了我们希望通过测量能够发现和解决的问题的范围。

本章的目的主要是提供深入理解网络测量所需的背景和基础知识。我们首先简单介绍互联网的发展历史、互联网的基本组织、互联网的设计原则，以及互联网的协议分层和应用等；然后讨论互联网的运作模式和运行管理方面的问题，以及互联网的治理（governing）等问题；最后讨论互联网的演进。

由于本书主要讨论网络的测量和分析方面的问题，因此本章只是简要介绍互联网的体系结构，有关这方面的详细内容，读者可参阅其他的文献[1-4]。

1.1 互联网的体系结构

简单地说，互联网是一个由众多的网络互连而成的网际网络。1995年10月24日，美国联邦网络委员会通过广泛征询互联网和知识产权方面专家的意见，一致通过了一项提案，为互联网做

了这样的定义：

“互联网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，地址格式通过网际协议（Internet Protocol，IP）定义。系统中主机与主机间的通信遵守传输控制协议/网际协议 TCP/IP 标准，或是其他与 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，利用公网或者专网的形式，向社会大众提供资源和服务。”

尽管从互联网的发展之初到现在，互联网的规模和组织结构等都发生了巨大的变化，但互联网体系结构中一些基本的元素始终保持不变，诸如分层的分布式结构、无连接的分组交换技术、可扩展的路由技术、端到端的网络连接技术、层次结构的域名及网络管理技术、开放通用的应用技术等，本节不拟对这些元素的细节做过多的讨论，将简单地讨论一下互联网发展的历史、互联网的组织结构、互联网的基本设计原则以及互联网协议分层与互联网应用等。

1.1.1 计算机网络的发展历史

从 20 世纪 60 年代到 80 年代，计算机技术和通信技术的结合，形成了现代计算机网络。1969 年第一个远程分组交换网 ARPAnet 问世，70 年代末形成计算机网络体系结构标准，到 80 年代局部网络技术飞速发展，到 90 年代互联网的飞速发展，计算机网络的发展留下了一个个里程碑式的成果。

1964 年巴兰（Baran）在“论分布式通信”的研究报告中提出了分组交换（paclzet switch）的概念[5]。1969 年 12 月，美国国防部高级研究计划署的 4 个结点的分组交换网 ARPAnet 投入运行。从此计算机网络的发展就进入了一个崭新的纪元。

20 世纪 70 年代，基于分组交换技术的计算机网络建设在世界各国迅速展开，英国的国家物理实验室（NPL）在 1973 年开通了分组交换实验网，法国也在同一年开通了其分组交换实验网 CYCLADES。随着分组交换技术的成熟，一些工业发达国家的电信部门开始建设公用分组交换网，如英国的 EPSS（PSS），美国的 TELENET、TYMNET 和 COMPAC，法国的 TRANSPAC，以及加拿大的 DATAPAC 等。随着一系列公用分组交换网的建设和投入运行，使国际电话电报咨询委员会（CCITT，即现在的国际电信联盟电信标准局 ITU-T）认识到尽快制定有关标准的紧迫性，遂以 DATAPAC 的有关标准为基础，于 1976 年首次正式提出了 X.25 建议书。此后，世界各国的公用分组交换网建设都以 X.25 标准协议为基础。

与此同时，在计算机网络体系结构研究方面也取得了重要的成果。1974 年，美国 IBM 公司宣布了它研制的系统网络体系结构 SNA。SNA 是第一个按照分层的方法制定的网络体系结构，以后又经过了不断改进，使得 SNA 成为同时期应用最广的一种网络体系结构，不久以后，其他一些公司也相继推出了本公司的体系结构，比较有名的是 DEC 公司的 DNA 体系结构。网络体系结构出现后，使得同一个公司所生产的各种设备都能很容易地实现互连。但要实现来自不同公司的设备的互连就很困难，然而随着社会的发展，这种异构系统互连的需求愈益迫切。为此，国际标准化组织（ISO）于 1977 年成立了专门机构研究该问题。不久，他们就提出了一个能使各种计算机在世界范围内互连成网的标准框架，这就是著名的开放系统互连参考模型（Open System Interconnection Reference Model，OSI/RM）。

80 年代计算机网络发展的标志之一是局部网络技术的飞速发展。局部网络技术是从远程分组交换网和 I/O 总线结构计算机系统派生出来的。局部网络的结构和协议最初来源于分组交换通信，而其硬件技术又来自于计算机和远程网络这两者。最为普遍应用的一种局部网络是局域网（LAN）。世界上第一个局域网产品以太网是由美国施乐公司于 1975 年研制成功的，1980 年施乐公司与 DEC 和 Intel 公司合作提出了以太网的标准规范。这个规范后来就成为 IEEE 802.3 标准的基础。1985 年 IBM 公司研制成功令牌环技术，该技术构成了后来 IEEE 802.5 标准的基础。80 年代末，光纤分布式数据接口

（Fiber Distributed Data Interface, FDDI）技术的出现，在连网速率和连网范围上都向前大大推进了一步。

与此同时，围绕 ARPAnet 网的研究和开发工作也蓬勃展开，并取得一系列重大的成果，1982 年以 TCP/IP 为基础的协议体系结构趋于成熟，1986 年美国国家科学基金会（NSF）资助建成了基于 TCP/IP 技术的 Internet（注：文中出现英文“Internet”的地方均特指这个网络，其他场合用中文“互联网”表示）主干网 NSFNET，连接国内 5 大超级计算中心和一些主要的大学和研究机构，Internet 初具规模，Internet 也首次从军用走向了民用。90 年代，随着 Web 技术和相应的浏览器的出现，互联网的发展和应用出现了另一次飞跃。1995 年，Internet 的商业化，使互联网的应用大规模走向了商业和平民化。

1.1.2　互联网的历史

从某种意义上讲，互联网可以说是美苏冷战时期的产物。1957 年 10 月，前苏联成功地发射了人类历史上第一颗人造地球卫星，这次发射的成功极大地震惊了美国朝野，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署（Advanced Research Projects Agency，ARPA）。ARPA 在后来互联网的建设和发展过程中起到了决定性的作用。1962 年，美国国防部及 ARPA 认为有必要设计出一种分散的指挥系统，以确保在美国本土防卫力量和海外防御武装受到前苏联第一次核打击以后仍然具有一定的生存和反击的能力。这样的一个指挥系统由一系列分散的指挥点组成，当部分指挥点被摧毁后，其他点仍能正常工作，并且这些点之间能够绕过那些已被摧毁的指挥点而继续保持通信联系。为了验证这一构想，1969 年，ARPA 资助建立了一个由 4 个结点互联而成的试验性的分组交换网络 ARPAnet。这个网络把位于洛杉矶的加利福尼亚大学、位于圣芭芭拉的加利福尼亚大学、斯坦福大学，以及位于盐湖城的犹他州立大学的计算机连接起来。这个 4 结点的网络采用分组交换技术，这种技术能够保证：如果这 4 个结点之间的某一条通信线路因某种原因被切断（如核打击）以后，信息仍能够通过其他线路在各结点之间传递。基于分组交换技术的 ARPAnet 的建成和运行标志着计算机网络发展的新纪元，分组交换技术一经提出就被广泛接受，一方面，ARPAnet 网本身的规模在迅速地扩大，另一方面，分组交换技术迅速成为其他各类数据通信网的核心技术。ARPAnet 就是 Internet 最早的雏形。

20 世纪 70 年代末到 80 年代初，可以说是计算机互联网发展的“春秋战国”时代，一方面，各种各样的计算机网络应运而生，在网络的规模和数量上都得到了很大的发展；另一方面，在网络的应用开发上也取得了丰硕的成果。与此同时，由于许多网络是各自独立发展的，不同网络之间的通信需求最终导致了 TCP/IP 的诞生。

1. 网络的发展

1972 年 ARPAnet 网上的主机数量已经达到 40 台；而到 1977 年，ARPAnet 上的交换结点已发展到 57 个，连接各种不同的计算机 100 多台，联网用户 2 000 多人，联网的用户可以进行电子邮件的发送及大文件的传输和共享。同时为了实现对远程主机计算资源的共享，还设计和实现了通过把一台计算机模拟成另一台远程计算机的一个终端而使用远程计算机上的资源的方法，即 TELNET。此后，连到 ARPAnet 网上的交换结点数量和计算机数量不断增长，军方的通信已经越来越离不开它了。有鉴于此，1982 年，美国国防部通信局将 ARPAnet 分成了两个独立的网络：一个用于进一步的研究，仍叫 ARPAnet；另一个用于军事通信，叫 MILNET。

1972 年受到 ARPAnet 网络成功的鼓舞，ARPA 又资助建立了另外两个基于不同传输介质、不同物理协议和不同介质访问控制协议的网络，一个是分组无线网（Packet Radio Network，PRNET），另一个是分组卫星网（Packet Satellite Network，SATNET），并通过 SATNET 连接了挪威和英国。

1979 年，美国杜克大学的 Steve Bellovin 等人创立了后来被称之为网络新闻组（UseNet）的网络，这个网络的主要功能是允许该网络中任何一个用户可以把一条信息发送给网上的一个用户、

几个用户或所有用户，大家可以利用这个网络就自己所关心的问题和其他人进行讨论。

1981 年，由美国纽约市立大学牵头建立了一个合作网络，叫做 BITNET（Because It's Time Network）。该网络连接的第一个结点是耶鲁大学，主要提供电子邮件服务、电子论坛服务和文件传输服务等。

同年，由美国国家科学基金会提供启动资金，特拉华大学（University of Delaware）、普渡大学（Purdue University）、威斯康星大学（University of Wisconsin）、RAND 公司和 BBN 的计算机科学家们合作建立了计算机科学网络（Computer Science Network，CSNET），为那些不能与 ARPAnet 连接的科学家提供网络服务（主要是电子邮件服务）。与此同时，美国联邦政府的一些部门也相继建成了部门专用的网络，如能源部的 HEPNET 网络、NASA 的 SPAN 网等。

2. 网际互连需求及 TCP/IP

一系列各自独立的网络的建成，也导致了不同网络的主机之间互联互通的矛盾日趋突出。事实上，由于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，就是要将 ARPA 自己资助建设的三个网络 ARPAnet、PRNET、SATNET 互连起来也是非常困难的。因此，1972 年，Bob Kahn 提出了“开放结构互连”（Open Architecture Networking）的概念，试图在允许不同的网络可以保持不同的体系结构、采用不同的拓扑结构、不同的通信协议的情况下，通过一个网际的转换层实现不同网络的互连。

1973 年，ARPA 启动了网际互连（Internetworking）的研究项目。早期的研究重点是针对 PRNET 的，因为无线传输的环境比较恶劣，受到空间和地理环境的影响较大，信号在传输中由于受到无线电干扰等而引起中断的情况经常发生。因此 Kahn 以及在此之前就已经参与 ARPAnet 的网络控制协议（Network Control Protocol，NCP）设计和开发工作的 Vint Cerf 等人最初的考虑是只针对分组无线网开发一套通信协议，这样一方面还可以继续使用 NCP，另一方面也避免了与许多不同的操作系统打交道。但是在互联网的环境下，NCP 的寻址功能只能做到将数据报文发送给最后一个交换结点，而且 NCP 不提供端到端的差错控制能力，因此，原来的 NCP 也还是需要改动。因此最终 Kahn 和 Cerf 还是决定重新开发一套能够满足开放结构互连环境需要的新的通信协议，Kahn 和 Cerf 的研究成果以《A Protocol for Packet Network Interconnection》为题发表在 1974 年 5 月期的 IEEE Transactions on Communications 上，这就是后来的传输控制协议/网际协议（Transmission Control Protocol/Internet Protocol，TCP/IP）[6]。但这时的 TCP/IP 还只是一个协议，即 TCP，IP 还没有从中分离出来。为了将流量控制和差错控制的功能从基本的寻址和包转发功能分开，以提高网络交换结点的处理速度，1978 年，TCP 正式被划分为 TCP[7]和 IP[8]两部分，前者主要处理流量控制和差错控制，后者则只负责寻址和转发功能。

虽然 TCP/IP 研制的出发点是网际互连，然而，该协议也可以用于组建任何内部网络。因此在 TCP/IP 研制成功后的 1980 年，ARPA 开始把 ARPAnet 上运行的计算机转向新的 TCP/IP。1982 年，美国国防部通过命令方式要求所有连入 ARPAnet 的网络必须采用 IP 互连，1983 年完成了这种转换。

3. Internet 主干网——NSFNET

互联网的第一次快速发展源于美国国家科学基金会对 NSFNET 网络的介入。1985 年，美国国家科学基金会出资在美国普林斯顿大学、匹兹堡大学、加州大学圣地亚哥分校、依利诺斯大学和康奈尔大学建立了 5 个国家级的超级计算中心。1986 年，NSF 出资建立了 NSFNET 主干网（速率为 56kbit/s），以将 5 个超级计算中心连接起来。1987 年，NSF 通过公开招标的方式确定了由 IBM、MCI 和由多家大学组成的非赢利机构，位于密歇根大学的 Merit 来负责 NSFNET 的升级、运营和管理。1989 年 7 月，NSFNET 的通信线路速率升级到 T1（1.544Mbit/s），并且连接了 13 个骨干结点，采用 MCI 提供的通信线路和 IBM 提供的路由设备，Merit 则负责 NSFNET 的运营和管理。

与此同时，NSF 鼓励和资助大学、政府资助的研究机构甚至私营的研究机构将自己的局域网

接入 NSFNET 主干网。从 1986 年至 1991 年，接入互联网的计算机网络从 100 个增加到 3 000 多个，几乎每年都以百分之百的速度增长，主干网的速率也从开始的 56kbit/s 升级到 45Mbit/s。

由于 NSFNET 同样采用 TCP/IP，并且 NSFNET 面向全社会开放，这样 NSFNET 很快取代了 ARPAnet 成为 Internet 的主干网，使 Internet 进入了以资源共享为中心的实用服务阶段。从此，互联网开始迅速发展，很快走向了整个世界。

4. 互联网的商业化

互联网历史上的第二次飞跃归功于互联网的商业化和 WWW（World Wide Web）技术的诞生和迅速广泛应用。

在 20 世纪 90 年代以前，互联网的使用一直仅限于研究与学术领域。商业性机构进入互联网一直受到这样或那样的法规或传统问题的困挠。然而，互联网在 80 年代的扩张不单带来量的改变，同时也带来某些质的变化，由于多种学术团体、企业研究机构，甚至个人用户的进入，互联网的使用不再限于纯计算机专业人员。新的使用者发现，加入互联网除了可共享 NSF 的巨型计算机外，还能进行相互间的通信，而这种相互间的通信对他们来讲更有吸引力。于是，他们逐步把互联网当作一种交流与通信的工具，而不仅仅只是共享 NSF 巨型计算机的运算能力。

人们对这种交流和通信的巨大需求和互联网作为这种快速便捷的交流和通信工具的无可替代性，使得许多商业机构看到了互联网潜藏的巨大商业利益。再加上构成互联网的许多网络（除了 NSFNET 主干网）本来就是由不同的公司兴建或拥有的，这使得在互联网上进行商业活动有了可能。

1994 年，正值 ARPAnet/Internet 建成 25 周年，美国各界举行了隆重的纪念活动，互联网开始进入社区、国会众参两院、银行甚至购物中心，从此拉开了互联网商业化的序幕。

看到互联网的羽翼丰满，NSFNET 意识到自己已经完成了历史使命。于是，1995 年 4 月 30 日，NSFNET 正式宣布停止运作，美国大部分的主干网业务由通过商业互连交换中心（CIX）互连的网络服务提供商办理。至此，互联网的商业化彻底完成。

5. WWW 技术的诞生和迅速广泛应用

WWW 技术的诞生为互联网的应用带来了革命性的变化。WWW 技术是 1991 年由欧洲分子物理实验室（CERN）发布的，其主要研究人员是 Tim Berners-Lee。1993 年，NCSA（National Center for Supercomputing Applications）的研究人员 Marc Andresen 开发了一个叫做 Mosaic 的程序，用以浏览 WWW 文档。该应用程序的发布将互联网的应用推向了一个全新的高潮，互联网随即刮起 Mosaic 旋风，使 WWW 在互联网上的通信量的年增长率达到 341 634%（相比 Gopher 的年增长率 997%）。

6. 美国政府的“信息高速公路”计划

1993 年，美国政府提出“信息高速公路”计划，要在 21 世纪初用光缆把美国所有的企业、商店、研究机构、学校和家庭连接成一体。这再次为互联网的研究发展注入了全新的活力。虽然在当时，信息高速公路计划并不直接等于互联网，但是，互联网以其极快的发展速度及巨大的渗透力和影响力，迅速被人们认为是信息高速公路的雏形。这使互联网技术的研究继续有政府的经费资助和宏观协调。与此同时，信息高速公路计划的提出也极大地触动了世界各国，西方发达国家也相继提出了“全球信息基础设施”（Global Information Infrastructure，GII）计划以谋求共同发展。这加快了互联网在全球的扩展步伐。

1.1.3　互联网的设计原则

互联网的成功和其所采用的技术是密不可分的。互联网的先驱者们在设计互联网各关键技术的时候所作出的一系列决定或者说所遵循的设计原则，为今日互联网的成功奠定了坚实的基础，

互联网的主要设计原则表现在以下几个方面。

1. 分层的分布式结构

两个计算机系统之间的通信是非常复杂的，为了设计这样复杂的计算机网络，早在最初的ARPAnet设计时就提出了分层的方法，分层可以将庞大而复杂的问题转化为若干较小的局部问题，从而使之较易于研究和处理。一个典型的例子就是：1978年，TCP正式被划分为TCP和IP两部分，以便将流量控制和差错控制的功能从基本的寻址和包转发功能分开，以提高网络交换结点的处理速度。这种分层的结构和ISO的开放系统互连体系结构是不谋而合的。

另一方面，互联网本身是一个由众多网络以比较松散的方式互连起来的集合体，其中的每个网络都可能分属于不同的单位或组织，各网络的建设、配置和运行都是由各单位自己负责的。用户希望将一台主机联入互联网时，只需要从其本地的服务提供商获得必要的资源和权限即可，而无需获得某个全球性的权威组织的同意。可以说，互联网的这种分散性特点是其快速发展的一个重要因素，因为这使得互联网非常易于扩张。然而，也正是这个特性使得我们现在很难获得关于互联网整体配置的情况，也使得网络的测量变得困难和迫切。

2. 无连接的分组交换技术

分组交换技术的出现奠定了现代计算机网络的技术基础。无连接（无状态）的分组交换技术是互联网的另一个重要技术和设计原则。作为分组交换网之父的ARPAnet采用无连接的分组交换技术，这种技术允许连续通信的任何一个数据分组独立地选择自己的路由，而将流量和顺序控制等内容留给上层（或端系统），这种做法在保持通信子网的简单性的同时，最大限度地提高了网络服务的可靠性。

通常每个路由器都会维护一张路由表，该表描述了哪些目的网络（目的地址）应该通过哪个出口链路转发。这样，当一个数据分组到达路由器的时候，路由器只检查IP分组的报文头，并根据报文头中的目的IP地址从路由表中选择合适的出口链路来转发这个分组。这个过程并不涉及检查任何封装在该IP分组中的高层协议报头，也就是说，路由器在转发分组的时候并不考虑某个分组是否为一个TCP连接的一部分。

和传统的电话交换机相比，这样的设计原则大大简化了互联网路由器的功能和降低了实现难度，也体现了互联网“中间简单，边沿智能”的设计原则，但是，路由器的这种简单性却为互联网的测量带来了很大的难度，因为，路由器不能捕获或者追踪经过它们的流量的许多重要特性。

3. 网络互连协议

TCP/IP及其相应的体系结构研制的初衷是网际互连，即将一些网络体系结构不同、物理通信技术各异的网络连接起来，使处于不同网络的任何两个计算机系统之间都可以互相通信。网际互连协议IP（IP over everything）的出现满足了这种需求，IP在分层的网络体系结构中处于第三层，因此完全独立于任何厂家的硬件，这就是典型的IP沙漏（hourglass），也是互联网设计的一个重要原则，如图1-1所示。该图说明了在单一的IP之上可以支持许多不同的应用层或者传输层协议，而在数据链路层它也可以支持许多不同的通信技术，诸如以太网技术、SONET技术、PPP技术、ADSL技术、无线WiFi技术等。近些年来，随着光通信技术的飞速发展，通信介质的可靠性越来越高，人们又提出了IP over Optical技术，以进一步降低协议的开销，提高传输的效率。

IP沙漏原则使得互联网非常易于开发新型的网络应用以及引入新型的网络通信技术。在开发新型网络应用方面，只需要想办法将应用层数据单元通过现有的传输层协议（TCP或者UDP）封装为IP分组即可；在引入和使用新型通信技术方面，则只需要想办法使相关的介质传输IP数据分组即可。这样的设计原则使得互联网非常易于通过各种通信介质进行扩展，但也使网络的测量变得更加困难：因为它从网络层屏蔽了所用物理介质的细节。