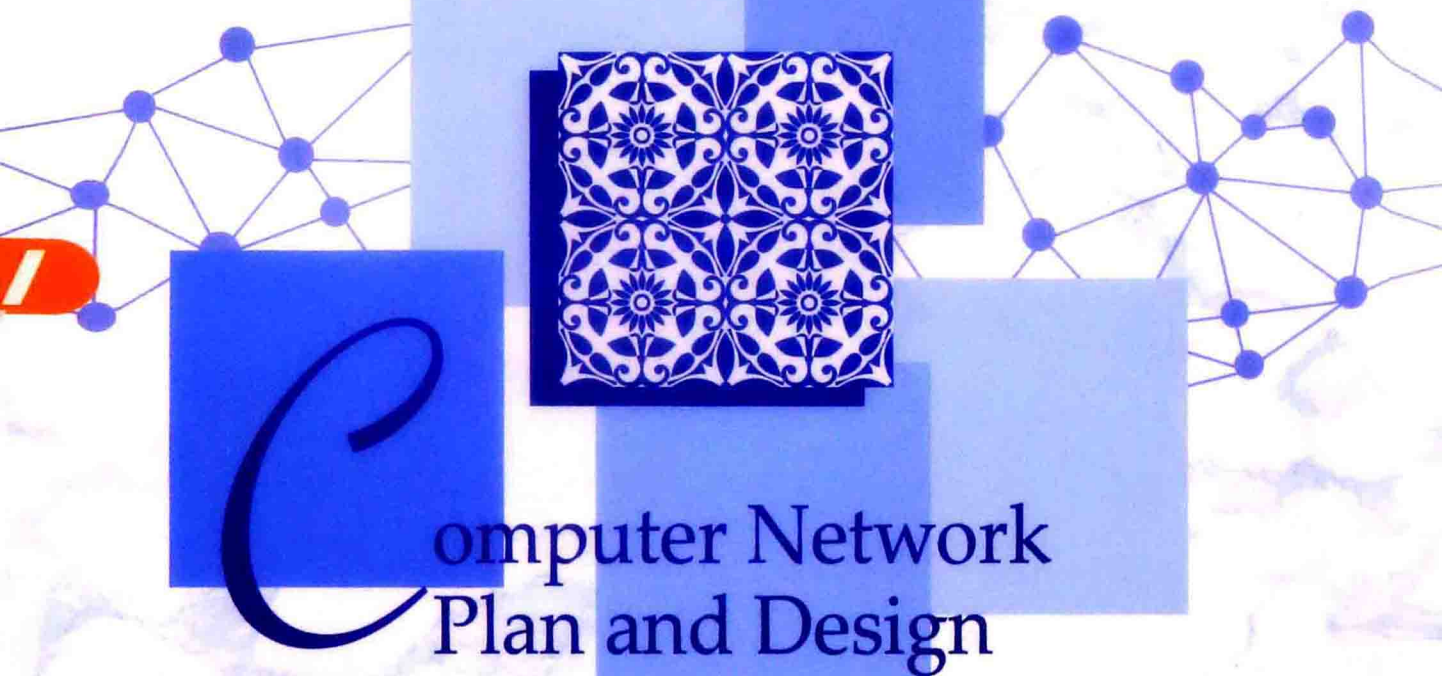


网络工程规划与设计

王波 主编



Computer Network
Plan and Design

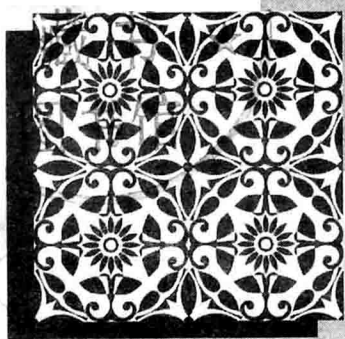


机械工业出版社
China Machine Press

网络工程专业规划教材

网络工程规划与设计

王波 主编



C

omputer Network
Plan and Design



机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目 (CIP) 数据

网络工程规划与设计 / 王波主编. —北京: 机械工业出版社, 2014.7
(高等院校计算机专业人才培养规划教材)

ISBN 978-7-111-47015-1

I. 网… II. 王… III. 计算机网络—高等学校—教材 IV. TP393

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 125805 号

本书以工程化思想和方法为主线, 以计算机网络技术为基础, 以计算机网络标准为依据, 理论联系实际, 面向工程应用, 全面系统地介绍计算机网络工程知识。

本书以网络工程中涉及最多的园区网为对象, 在结构上以网络工程设计各相对独立的部分 (包括网络架构、网络编址、第二层和第三层、可靠性、QoS、网络安全、网络管理、接入网和虚拟化等) 为设计单元, 系统地介绍不同单元设计所涉及的网络技术、网络设备、设计原则及设计要点, 在内容上结合网络技术和网络设备的新进展展开叙述, 随后专门安排了一章介绍网络设计方案的模拟测试方法、工具及应用, 最后给出了数据中心网络建设、网络安全和广域互联的参考方案。附录提供了 NS2 网络模拟实验大纲和实验。

本书适合作为网络工程专业、计算机科学与技术专业网络规划与设计课程的教材, 也可供相关设计研究院、网络工程建设单位、网络系统公司、信息系统公司、建筑智能化系统集成公司、电信运营商等单位的相关技术人员参考。



出版发行: 机械工业出版社 (北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码: 100037)

责任编辑: 余 洁

责任校对: 董纪丽

印 刷: 北京市荣盛彩色印刷有限公司

版 次: 2014 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

开 本: 185mm×260mm 1/16

印 张: 16.5

书 号: ISBN 978-7-111-47015-1

定 价: 35.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

客服热线: (010) 88378991 88361066

投稿热线: (010) 88379604

购书热线: (010) 68326294 88379649 68995259

读者信箱: hzjsj@hzbook.com

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问: 北京大成律师事务所 韩光 / 邹晓东

前 言



无论是绿色生态住宅小区还是各种智能园区，无论是数字城市还是智慧城市，也无论是云计算还是物联网，计算机网络都是不可或缺的信息化基础设施。随着我国信息化进程的加快，需要大量地建设和运行计算机网络，而规划与设计则是计算机网络建设工程的基础性、指导性工作。

十年前，网络工程专业被列入教育部本科专业目录，各高校的专业教学计划中普遍设置了网络规划与设计课程，随后各高校计算机科学与技术专业也纷纷开设该课程。网络规划与设计课程既是一门“入海口”课程（须综合应用以前所学各相关课程的网络知识），也是一门工程性、实践性很强的课程。本书作者长期从事计算机网络、网络规划与设计等课程的教学工作以及建筑与城市智能化的研究与工程咨询工作，深感计算机网络工程规划与设计人才的匮乏和高校网络规划与设计教材存在的问题，诸如：技术与工程脱节，大量重复网络原理课程内容，不关心网络工程标准，技术内容陈旧，缺失网络设计方案模拟测试及应用等。

本书基于作者“网络规划与设计精品课程”建设经验和教改项目“计算机网络类课程实验教学仿真平台”的研发及其在课程实验中的应用，对教材结构体系进行了创新：以网络工程设计各相对独立部分（包括网络架构、网络编址、第二层和第三层、可靠性、QoS、网络安全、网络管理、接入网和虚拟化等）为设计单元，围绕每个设计单元集中地介绍与该设计单元密切相关的网络技术、网络设备、设计原则和设计要点。

本书以工程化思想和方法为主线，以计算机网络技术为基础，以计算机网络标准为依据，以培养学生计算机网络规划与设计工程能力为目标，全面系统地介绍计算机网络工程知识，重点介绍计算机网络工程中应用最多的园区网规划与设计。

本书适合用作32~48学时（含8~16学时课内实验）的网络规划与设计课程教材，也可用于网络规划与设计的课程设计。为强化学习效果 and 工程能力实践，可在课程伊始布置一个大作业（例如，某高校校园网的规划与设计），学生以小组为单位，伴随着课程教学进度分阶段同步完成大作业的网络规划、逻辑设计和物理设计任务。若有课程设计环节，宜安排对已提交大作业中的网络设计方案进行模拟测试，并提交设计方案模拟测试与优化报告。

本书由王波任主编并编写第1、3、4、5章（不包括3.3.1、4.4.1、4.4.2和4.5.1节），2.1~2.5节，附录A，以及第7、8、9章；陈自郁编写3.3.1、4.4.1、4.4.2、4.5.1节；杨广超编写2.6~2.10节；王波、孙焱、周志伟、柯军编写第6章和附录B。

本书历时多年终于成稿，首先要特别感谢华为技术有限公司提供的网络技术资料，还要

感谢对本书编写不可或缺的所有参考文献的作者，感谢机械工业出版社华章公司各位编辑的理解和支持，感谢先后作为重庆大学计算机学院建筑与城市智能化研究室成员的张攀、宋诗波、孙焱、周志伟、柯军、施晴红、郑宇航等研究生对相关教改项目和教材编写的支持和帮助。

本书得到重庆大学教材建设基金的资助，还得到“国家高等学校特色专业建设点项目——重庆大学计算机科学与技术专业”和重庆大学教改项目“专业核心大类课程建设——网络工程专业核心课平台”的资助，在此一并表示感谢！

也借此表达对成书期间去世、曾为“白云山团”一员的父亲的怀念！

本书错误及不当之处，敬请读者不吝指正（wangbo@cqu.edu.cn）。

王波

2014年4月



本书内容分为9章，每一章的主要内容与课堂教学的学时安排为：

第1章：简要介绍计算机网络的定义、功能、性能、要素、类别、体系结构、技术和设备，以及计算机网络工程和网络工程规划与设计的基本知识。（建议学时：4～6）

第2章：主要介绍网络工程需求分析的目的和任务，并通过多个角度对网络工程需求分析进行阐述，并给出了需求分析说明书的组成。本章还介绍了适用于现有网络分析的两种方法：估算法和基准法。估算法主要用于估算网络的流量，基准法可以对包括网络流量在内的更多网络性能指标进行实时测量和分析。（建议学时：4～6）

第3章：在完成用户需求分析后，进入网络工程的逻辑方案设计阶段，即网络逻辑设计阶段。由于网络逻辑设计的内容多，分别在第3章和第4章介绍。

本章在介绍逻辑设计的目标与基本原则和任务的基础上，围绕网络逻辑设计阶段的网络架构设计、网络编址设计、第二层设计和第三层设计等设计单元，介绍相关的技术、设备、设计原则与设计要点。（建议学时：6～8）

第4章：接续第3章，本章继续介绍网络逻辑设计阶段的可靠性、QoS、网络安全、网络管理、接入网和虚拟化等设计单元，介绍相关的技术、设备、设计原则与设计要点，最后介绍逻辑设计说明书的主要内容。（建议学时：10～12）

第5章：在网络需求分析阶段明确了新网络在功能和性能上的要求，在网络逻辑设计阶段确定了能满足新网络功能和性能要求的网络总体技术方案。在接下来的网络物理设计阶段，主要完成那些与具体物理设备和物理位置相关的设计内容。

本章主要介绍物理设计的目标与任务、综合布线系统设计、无线局域网设计、网络设备的产品选型和物理设计说明书的框架。（建议学时：6～8）

第6章：本章简要介绍网络设计方案的验证方法和网络设计方案模拟测试软件，尤其是对基于NS2的网络设计方案模拟测试给予了较详细的介绍。（建议学时：2）

第7章：数据中心是大型企事业信息化系统建设的重要内容。本章针对数据中心的网络建设，以华为公司的解决方案为背景做了相关介绍。（课外阅读）

第8章：网络安全已经超过对网络可靠性、交换能力和服务质量的需求，成为人们最关心的问题。本章在分析网络安全问题的基础上，介绍了华为的NAC安全解决方案。（课外阅读）

第9章：随着信息化规模的扩大及网络建设的深入，对于跨地区的广域网互联需求在不

断扩大。本章深入介绍了广域网互联的需求和规划设计时需要考虑的问题，并介绍了华为的解决方案。(课外阅读)

第1~6章为教学主体内容，建议前6章的授课学时数为32~42学时。第7~9章为扩展阅读内容，可选学。任课教师可以根据实际情况调整学时和选择重点内容。

本课程可包含8~16学时的实验。实验内容可以是网络规划与设计过程中涉及的相关工具的使用，例如使用NS2网络模拟软件进行网络设计方案的建模及网络性能模拟测试。

目 录



前言	
教学建议	
第 1 章 计算机网络与网络工程概述	1
1.1 计算机网络概述	1
1.1.1 网络功能	1
1.1.2 网络要素	3
1.1.3 网络性能	3
1.1.4 网络类别	8
1.1.5 网络体系结构	10
1.1.6 网络设备	13
1.1.7 以太网	15
1.2 计算机网络工程概述	17
1.2.1 网络生命周期与网络工程环节	17
1.2.2 网络工程招投标	19
1.2.3 网络工程监理	19
1.2.4 网络工程建设标准	21
习题一	24
第 2 章 网络工程需求分析	25
2.1 需求分析的目的和任务	25
2.2 了解客户和项目的基本信息	25
2.3 分析客户的商业目标	26
2.4 分析网络应用需求	27
2.5 分析网络性能与非性能特征需求	28
2.6 分析项目的制约因素	29
2.7 现有网络分析——估算法	30
2.7.1 有关网络通信流量的概念	30
2.7.2 估算法步骤	31
2.8 现有网络分析——基准法	33
2.8.1 网络基准工具	33
2.8.2 网络基准步骤	37
2.9 需求分析说明书	39
2.10 现有网络分析说明书	40
习题二	41
第 3 章 网络逻辑设计——架构、编址、第二层和第三层设计	42
3.1 逻辑设计的目标、基本原则和任务	42
3.2 网络架构设计	43
3.2.1 网络架构	43
3.2.2 网络架构设计原则	45
3.2.3 网络架构设计要点	46
3.3 网络编址设计	47
3.3.1 IP 地址摘要	47
3.3.2 IP 编址设计	51
3.3.3 DHCP 设计	52
3.3.4 DNS 设计	54
3.4 网络第二层设计	55
3.4.1 第二层技术	55
3.4.2 第二层网络设备	58
3.4.3 第二层设计要点	60
3.5 网络第三层设计	61
3.5.1 第三层技术	61
3.5.2 第三层网络设备	74
3.5.3 第三层设计要点	76
习题三	79

第 4 章 网络逻辑设计——可靠性、QoS、网络安全、网络管理、接入网和虚拟化设计	80	5.3.1 无线局域网技术	129
4.1 可靠性设计	80	5.3.2 无线局域网架构	134
4.1.1 可靠性技术	80	5.3.3 无线局域网设计要点	138
4.1.2 可靠性设计方案	82	5.4 网络产品选型	139
4.2 QoS 设计	85	5.4.1 网络产品选型要点	139
4.2.1 QoS 技术	86	5.4.2 网络产品的主要技术参数	140
4.2.2 QoS 设计要点	89	5.5 物理设计说明书	141
4.3 网络安全设计	89	习题五	142
4.3.1 网络安全问题与网络安全等级	89	第 6 章 网络设计方案模拟测试	143
4.3.2 网络安全技术	91	6.1 网络设计方案验证方法	143
4.3.3 网络安全设备	99	6.2 网络设计方案模拟测试软件及对比	144
4.3.4 网络安全设计原则与要点	101	6.3 基于 NS2 的网络设计方案模拟测试	148
4.4 网络管理设计	102	6.3.1 OTcl 语法	149
4.4.1 概述	102	6.3.2 NS2 模拟结果的数据结构	154
4.4.2 网络管理技术	104	6.3.3 awk 语言	155
4.4.3 网络管理设备	106	6.3.4 Gnuplot 绘图工具	156
4.4.4 网络管理设计要点	107	习题六	161
4.5 接入网设计	107	第 7 章 数据中心网络建设参考方案	162
4.5.1 接入网技术	107	7.1 数据中心网络简介	162
4.5.2 接入网设备	109	7.1.1 数据中心网络总体需求	162
4.5.3 接入网设计要点	109	7.1.2 数据中心网络解决方案	163
4.6 虚拟化设计	109	7.2 业务需求	165
4.6.1 横向虚拟化	110	7.2.1 数据业务	166
4.6.2 纵向虚拟化	111	7.2.2 Web 业务	168
4.6.3 整体虚拟化	113	7.2.3 计算业务	170
4.6.4 业务逻辑隔离方案	113	7.3 数据中心网络方案	171
4.7 逻辑设计说明书	119	7.3.1 数据中心网络架构	171
习题四	119	7.3.2 核心区网络规划	174
第 5 章 网络物理设计	120	7.3.3 服务器区网络规划	177
5.1 物理设计的目标与任务	120	7.3.4 存储区网络规划	181
5.2 综合布线系统设计	120	7.3.5 互联区网络规划	182
5.2.1 综合布线系统概述	120	7.3.6 管理区网络规划	184
5.2.2 网络传输媒体种类及特点	121	7.3.7 VLAN 规划	186
5.2.3 综合布线系统设计要点	127	7.3.8 IP 规划	187
5.3 无线局域网设计	128		

7.3.9 路由规划	190	第 9 章 广域互联参考方案	212
7.3.10 VPN 及业务区隔离规划	191	9.1 广域互联概述	212
第 8 章 网络安全参考方案	193	9.1.1 广域互联面临的挑战	212
8.1 网络安全方案概述	193	9.1.2 广域网主要需求	213
8.1.1 方案背景	193	9.2 广域互联规划建议	215
8.1.2 主要需求	194	9.2.1 广域网组网原则	215
8.2 NAC 安全方案	195	9.2.2 IP 地址规划	218
8.2.1 概述	195	9.2.3 路由规划	221
8.2.2 认证方案规划建议	200	9.2.4 IP 承载层可靠性规划	224
8.2.3 接入层认证方案		9.2.5 光传送层可靠性规划	226
规划建议	205	9.2.6 IP+ 光保护协同规划	234
8.2.4 汇聚层认证方案规		9.2.7 QoS 规划	236
划建议	208	附录 A NS2 网络模拟实验大纲	239
8.2.5 汇聚层旁挂认证		附录 B NS2 网络模拟实验	240
方案规划建议	211	参考文献	251

计算机网络与网络工程概述

进入 21 世纪后社会信息化的速度越来越快，信息化社会的典型特征是数字化和网络化。

计算机网络已成为继排水网、电网、电话网、电视网和交通网之后新的社会基础设施，人们的工作、学习和生活与计算机网络已密不可分，并将越来越依赖于计算机网络。

我国现阶段社会发展的特点是工业化与信息化并进，强调社会的和谐和可持续发展。计算机网络在产业结构调整、民意畅通、城乡统筹、教育资源共享、社会治安、能源节约和环境保护等方面发挥着不可替代的作用。

计算机网络的规划与设计是计算机网络工程的基础和首要环节。正确理解计算机网络基本概念，掌握计算机网络基本知识，是进行计算机网络规划与设计的必要条件。本章简要介绍（回顾）计算机网络的定义、功能、性能、要素、类别、体系结构、技术和设备，以及计算机网络工程和网络工程规划与设计的基本知识。

1.1 计算机网络概述

什么是计算机网络？《计算机科学技术百科全书》中关于计算机网络的定义是：计算机网络是指地理上分散的多台独立自主的计算机通过软、硬件设备互连，以实现信息交换和资源共享的系统。

计算机网络系统包括通信子网和资源子网。网络设备和传输链路的集合构成通信子网，通信子网实现网络结点（网络设备、网络主机）之间的相互通信。网络主机（服务器、用户机等）的集合构成资源子网，资源子网提供共享的网络资源（各种软硬件和数据资源）。

计算机网络是一种数据通信网络。数据通信是指数字终端之间的通信，信道可以是数字信道或模拟信道，传输介质可以有有线介质或无线介质，传输信号可以是电信号或光信号。而数字通信是指信道为数字信道的通信。

简便起见，本书中的“网络”指代计算机网络，“网络工程”指代计算机网络工程。

1.1.1 网络功能

计算机网络功能涉及基本功能、支撑功能和应用功能三方面。

网络基本功能——网络的最主要功能。

网络支撑功能——那些能支撑网络基本功能得以实现的功能。

网络应用功能——面向不同应用需求在网络平台上实现的功能，例如网站、电子邮件、电子商务、网络游戏等。

1. 网络基本功能

无论哪一种计算机网络，都具有两种基本功能。

(1) 信息交换

计算机网络可以在网络结点之间进行信息交换。网络中交换的信息是用二进制编码形式表示的，其在网络体系结构不同层上的数据包格式是由该层上的网络协议规定的。

与电信网络传输语音信号、电视网络传输视频信号不同，计算机网络传输的是二进制编码的数据文件。

(2) 资源共享

通过计算机网络共享各种资源，包括（多媒体）信息资源、软件资源和硬件资源。

在计算机网络平台上可提供的网络应用功能已经很多，随着 Internet 和 Intranet 的普及将极大丰富。

2. 网络支撑功能

联网计算机之间信息交换和资源共享的实现，要求网络具有以下支撑功能。

(1) 信号传输

数据通信首先必须在结点之间有电信号、光信号或电磁波的传输，信号可以是数字信号或模拟信号，信号是通过信道（电缆、光缆或大气）进行传输的。采用复用技术（频分复用、时分复用和码分复用），可以在一个信道上同时传输多路信号。

(2) 帧传输

在点到点（相邻结点）信道，实际上是将传输的数据文件分割后封装成若干帧（数据帧）进行传输的。帧是数据链路层的协议数据单元（PDU）。

(3) 网络寻址

为了保证把数据文件（数据帧）传输给网络中指定的计算机，就需要给联网的每台计算机编址。每台计算机都使用网卡实现联网，可以使用网卡上全球唯一的 MAC 地址（一种数据链路层地址）来标识各计算机，但只是在一个独立的网络或使用集线器、交换机（L2 交换机）互连的网络范围内可用。实际上，绝大多数网络是互联网，而网络之间的互连主要是通过网络层协议（例如 IP）实现的。因此，在互联网或国际互联网（因特网）中，通常使用网络层地址（如 TCP/IP 中的 IP 地址）标识互联网中的计算机。

(4) 网络路由

在互联网中，从发送端到接收端的传输路径可能有多条。网络路由功能就是要在多条传输路径中选择一条最佳路径进行传输。IP 支持网络路由功能。

(5) 差错控制

有些网络应用（如电子邮件）需要可靠的网络传输来保证传输的数据文件百分之百正确。传统的数据通信网络（如 X.25）是在数据链路层使用 CRC（循环冗余校验码）进行差错控制，发现差错帧后重传。而在以太网中，当接收端用 CRC 查出帧有差错后直接丢弃，其他什么也不做。差错帧是否需重传由网络高层（如 TCP/IP 的传输层）决定。传输层若采用 TCP 则要求重传，若采用 UDP 则不要求重传。

(6) 流量控制

如果发送端数据发送速率过快，接收端来不及接收，会导致数据丢失。流量控制就是设法让发送端的发送速率不要太快，以便让接收端来得及接收。

(7) 拥塞控制

若在某个时间段内,对网络中的某种资源(如信道带宽、交换机或路由器中的缓存或处理机的处理能力)的需求超过该资源所能提供的可用部分,网络的传输性能就要变坏,这种情况叫拥塞。拥塞控制就是防止过多的数据加载到网络中,以使对网络资源的需求不致超额。

1.1.2 网络要素

计算机网络由以下要素构成。

(1) 网络主机

联网的计算机设备称为网络主机(简称主机)。联网的PC、服务器、笔记本电脑、打印机、PDA、PLC(可编程逻辑控制器)、DDC(直接数字控制器)、智能家电等都是主机。

(2) 网络设备

网络设备是指在网络通信子网中使用的设备,包括连网设备、网络互连设备及网络配套设备。

连网设备是指把主机连接到计算机网络的设备,主要有网卡、中继器。

网络互连设备是指在不同网络(同构或异构网络)之间实现互连的设备,主要有集线器、交换机、路由器、L3交换机、网关等。

网络配套设备是指那些根据专门的网络需求而配置的网络设备,主要有防火墙、密码机、网络管理工作站、电子配线架等。

(3) 传输介质

在网络设备之间、主机与网络设备之间实现信号传输的媒介称为网络传输介质(又称通信介质、传输介质),例如光纤、双绞线、空气。

(4) 拓扑结构

一个计算机网络中,网络设备、主机之间的连接形式(结构形式)称为网络拓扑结构。基本的网络拓扑结构有总线型、星形和环形。扩展型拓扑结构有树形、网状型和全连通型。实际网络中经常使用混合型拓扑结构。

(5) 通信协议

计算机网络中的通信规则就是网络通信协议,这类似于交通网络中的交通规则。

网络通信协议是分层的,例如,IP是网络层的通信协议,TCP是传输层的通信协议,HTTP是应用层的通信协议。

(6) 网络软件

计算机网络是一个系统,由网络硬件和网络软件构成。此处所指网络软件是指构成计算机网络系统的系统软件,不包括网络应用软件。常用的网络软件有网络操作系统、网络通信协议软件、网络管理软件和网络安全软件等。

1.1.3 网络性能

计算机网络的性能可用几个重要的指标来衡量。此外,还有一些非性能特征也对计算机网络性能有较大影响。

1. 计算机网络的主要性能指标

(1) 速率

网络信道上传送数据的速率,称为数据率或比特率。速率是计算机网络中最重要的一个性能指标,基本单位是bit/s(或b/s, bps)。

(2) 带宽

带宽有3种不同的含义。

① 带宽本来是指某个信号具有的频带宽度。信号的带宽是指该信号所包含的各种不同频率成分所占据的频率范围，其单位是 Hz。例如，在传统的通信线路上传送的电话信号的标准带宽是 3.1kHz (300Hz ~ 3.4kHz)。

② 在过去很长的一段时间，通信线路传送的是模拟信号（即连续变化的信号）。因此，表示通信线路允许通过的信号频带范围就称为线路的带宽（或通频带）。

③ 在计算机网络中，带宽用来表示网络的通信线路（或信道、端口）所能传送数据的能力，即网络带宽表示在单位时间内网络的最高数据传输速率，基本单位是 bit/s（或 b/s、bps）。

(3) 吞吐量

吞吐量表示在单位时间内通过某个网络（或信道、接口）的数据量。吞吐量常用于描述网络的实际流量。吞吐量还可用每秒传送的字节数（B/s）或数据包数（PPS）来表示。

显然，吞吐量受网络带宽的限制。例如，对于一个 100Mb/s 的以太网，其最高速率是 100Mb/s，那么这个数值也是该以太网的吞吐量的绝对上限值。一个网络的平均吞吐量应为带宽的 30%，以保证在高峰负载时仍能提供足够的剩余带宽。在吞吐量超过带宽的 50% ~ 70% 后，会产生拥塞，网络会明显变慢。

(4) 时延

时延是指数据（一个报文或分组，甚至比特）从网络（或链路）的一端传送到另一端所需的时间。时延是一个很重要的性能指标，也称为延迟或迟延。

一般说来，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、大时延的网络。

网络总时延是四种不同时延之和：发送时延、传播时延、处理时延和排队时延。

- 发送时延。发送时延是主机或路由器发送数据帧所需要的时间，也就是从发送数据帧的第一个比特算起，到该帧的最后一个比特发送完毕所需的时间。

对于一个网络，发送时延并非固定不变，而是与发送的帧长成正比，与信道带宽成反比。

- 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。

电磁波在自由空间的传播速率是光速 $3.0 \times 10^5 \text{ km/s}$ 。电磁波在铜线电缆中的传播速率约为 $2.3 \times 10^5 \text{ km/s}$ ，在光纤中的传播速率约为 $2.0 \times 10^5 \text{ km/s}$ 。

- 处理时延。主机或路由器在收到分组时要花费一定的时间进行处理，例如分析分组的首部、从分组中提取数据部分、进行差错检验或查找适当的路由等，这就产生了处理时延。

- 排队时延。分组在经过网络传输时，要经过许多的路由器。但分组在进入路由器后要先在输入队列中排队等待处理。在路由器确定了转发接口后，还要在输出队列中排队等待转发。这就产生了排队时延。排队时延的长短往往取决于网络当时的通信量。当网络的通信量很大时会发生队列溢出，使分组丢失，这相当于排队时延为无穷大。

(5) 时延抖动

时延抖动是指时延的变化。抖动大多起源于网络中的队列或缓冲，尤其是在低速链路时。电子邮件等数据业务对时延抖动不敏感，而语音、视频等多媒体业务对时延抖动敏感。

(6) 时延带宽积

把网络性能的两个度量——传播时延和带宽相乘，就得到另一个很有用的度量——时延带宽积。

构造高性能网络时知道时延带宽积是很重要的，因为它相当于第一个比特到达接收方之前，发送方最多发送的比特数。如果发送方希望接收方给出比特已经开始到达的信号，而且这个信号发回到发送方需要经过另一信道时延，那么发送方在接收到到达信号之前能够发完 2 倍时延带宽积的数据。另一方面，如果发送方停下来等待到达信号，那么发送方就不能充分利用网络。

(7) 误码率

数字通信是用脉冲信号携带信息的。由于噪声、串音、码间干扰以及其他突发因素的影响，当干扰幅度超过脉冲信号再生判决的某一门限值时，将会造成误判而成为误码。误码用误码率来表征，它指在一定统计时间内，数字信号在传输过程中发生错误的位数与传输的总位数之比。

IEEE 802.3 标准为 1000Base-T 网络制定的可接受的最高误码率为 10^{-10} 。在光纤数字链路中的误码率为 10^{-11} ，可以忽略不计。

(8) 丢包率

丢包率是指传输中丢失的数据包数量占所发送数据包的比率。网络丢包的原因主要有物理线路故障、设备故障、网络拥塞、路由器缓存区容量不足、病毒攻击等。

(9) 利用率

利用率有信道利用率和网络利用率两种。信道利用率是指某信道有百分之几的时间是被利用的（有数据通过）。完全空闲的信道利用率是零。网络利用率则是全网络的信道利用率的加权平均值。信道利用率并非越高越好。这是因为根据排队论的理论，当某信道的利用率增大时，该信道引起的时延也就迅速增加。当网络的通信量很少时，网络产生的时延并不大。但在网络通信量不断增大时，由于分组在网络结点（路由器或结点交换机）进行处理时需要排队等候，因此网络引起的时延就会增大。当网络的利用率达到其容量的 1/2 时，时延就要加倍。特别值得注意的是，当网络利用率接近最大值 1 时，网络的时延就趋于无穷大。也就是说，信道利用率或网络利用率过高会产生非常大的时延。当信道利用率超过 50% 时，就需要提升信道的带宽。

(10) 效率

网络的效率具体是指发送数据需要多少开销，开销可能是由碰撞、错误报告、重新路由、确认、帧头、不好的网络设计等引起。

帧的头部是导致低效率的原因之一。对于带宽不足的网络来说，使用 MAC 层允许的最大数据帧，以减少帧头的比特数。使用巨帧，可使用于帧头的带宽开销很少，从而提高了网络带宽资源的有效利用率，提高了网络的效率。

(11) 往返时间

往返时间也是计算机网络的一个重要性能指标，它表示从发送方发送数据开始，到发送方收到来自接收方的确认（接收方收到数据后便立即发送确认），共经历的时间。在互联网中，往返时间包括各中间结点的处理时延、排队时延以及转发数据时的发送时延。

显然，往返时间与所发送的分组长度有关。发送长数据块的往返时间，应当比发送短数据块的往返时间要多些。

当使用卫星通信时，往返时间相对较长，这是卫星通信的一个重要性能指标。

(12) 响应时间

响应时间是用户最关心的网络性能目标，是指用户等待网络系统做出响应的的时间。若响应时间过长，用户会感到烦躁，并影响工作效率。

2. 计算机网络的非性能特征

计算机网络还有一些非性能特征也很重要，这些非性能特征与上述计算机网络性能指标有很大关系。

(1) 安全性

计算机网络的安全性，即网络安全，对计算机网络能否正常运行的影响越来越大。网络安全是指网络系统的硬件、软件及其系统中的数据受到保护，不因偶然的或恶意的原因而受到破坏、更改、泄漏，系统连续正常地运行，网络服务不中断。网络安全包括联网主机安全、网络互连安全（包括网络互连设备、通信链路、网络软件、网络协议的安全）、网络应用和服务安全。

网络安全具有三个基本属性：机密性、完整性和（授权）可用性。

- 机密性。机密性是指保证信息与信息系统不被非授权者获取与使用，主要防范措施是密码技术。

在网络系统的各个层次上有不同的机密性及相应的防范措施。在物理层，要保证系统实体不以电磁的方式（电磁辐射、电磁泄漏）向外泄漏信息，主要的防范措施是电磁屏蔽技术、加密干扰技术等。在运行层面，要保障系统依据授权提供服务，使系统任何时候都不被非授权人所使用，对黑客入侵、口令攻击、用户权限非法提升、资源非法使用等采取漏洞扫描、隔离、防火墙、访问控制、入侵检测、审计取证等防范措施，这类属性有时也称为可控性。在数据处理、传输层面，要保证数据在传输、存储过程中不被非法获取、解析，主要防范措施是数据加密技术。

- 完整性。完整性是指信息是真实可信的，其发布者不被冒充，来源不被伪造，内容不被篡改，主要防范措施是校验与认证技术。

在运行层面，要保证数据在传输、存储等过程中不被非法修改，防范措施是对数据的截获、篡改与再送采取完整性标识的生成与检验技术。要保证数据的发送源头不被伪造，就要对信息发布者的身份、虚假信息发布来源采取身份认证技术、路由认证技术，这类属性也可称为真实性。

- （授权）可用性。（授权）可用性是指保证信息与信息系统可被授权人正常使用，主要防范措施是确保信息与信息系统处于一个可靠的运行状态之下。

在物理层，要保证信息系统在恶劣的工作环境下能正常运行，主要防范措施是对电磁炸弹、信号插入采取抗干扰技术、加固技术等。

在运行层面，要保证系统时刻能为授权人提供服务，对网络被阻塞、系统资源超负荷消耗、病毒、黑客等导致系统崩溃或死机等情况采取过载保护、防范拒绝服务攻击、生存技术等防范措施。

保证系统的可用性，使得发布者无法否认所发布的信息内容，接收者无法否认所接收的信息内容，对数据抵赖采取数字签名防范措施，这类属性也称为抗否认性。

从上述可以看出，维护信息载体的安全与维护信息自身的安全两个方面都含有机密性、完整性、可用性这些重要属性。

未经用户授权便干扰或破坏计算机系统/网络的程序或代码，称为恶意软件或恶意代码。恶意代码的种类很多，主要有计算机病毒、网络蠕虫、特洛伊木马、后门、DoS/DDoS程序、僵尸程序、Rootkit、黑客攻击工具、间谍软件、广告软件、垃圾邮件和弹出窗体程序等。

恶意代码具有如下共同特征。

- 具有恶意的目的。

- 自身是计算程序。
- 通过执行发生作用。

(2) 可管性

网络的可管性是指网络的非人工、行政管理，即网络管理。

网络管理，简称网络管理，包括对硬件、软件和人力的使用、综合与协调，以便对网络资源进行监视、测试、配置、分析、评价和控制，这样就能以合理的价格满足网络的一些需求，如实时运行性能、服务质量等。

网络管理系统的主要构件包括管理站、被管设备和网络管理协议。

管理站上的管理程序通过访问被管设备上的网络管理代理程序（简称代理程序），而代理程序则提取所在被管设备上的 MIB 数据库中的被管对象参数，并返回给管理站，从而实现网络的动态的自动化管理。

在被管网络中有很多的被管设备，包括主机、路由器、打印机、交换机、服务器或调制解调器等。在每一个被管设备中可能有许多被管对象。被管对象可以是被管设备中的某个硬件（例如一块网络接口卡），也可以是某些硬件或软件（例如路由选择协议）的配置参数的集合。

网络管理协议，简称为网络管理协议。常用的网络管理协议是简单网络管理协议（SNMP）。SNMP 中的管理程序和代理程序分别按客户 / 服务器方式工作。在被管对象上运行的 SNMP 服务器程序不停地监听来自管理站的 SNMP 客户程序请求（或命令）。一旦发现，就立即返回管理站所需的信息，或执行某个动作（例如把某个参数的设置进行更新）。在网络管理系统中，往往是一个（或少数几个）客户程序与很多的服务器程序进行交互。

关于网络管理有一个基本原理：若要管理某个对象，就必然会为该对象添加一些软件或硬件，但这种“添加”必须尽量减少对原有对象的影响。

SNMP 正是按照这样的基本原理来设计的。SNMP 发布于 1988 年。虽然 OSI 在这之前就已制定出许多的网络管理标准，但当时（到现在也很少）却没有符合 OSI 网络管理标准的产品。SNMP 最重要的指导思想就是要尽可能简单。SNMP 的基本功能包括监视网络性能、检测分析网络差错和配置网络设备等。在网络正常工作时，SNMP 可实现统计、配置和测试等功能。当网络出故障时，可实现各种差错检测和恢复功能。经过近 20 年的使用，SNMP 不断修订完善，现在的版本是 SNMPv3。目前，SNMPv3 已成为因特网的正式标准。SNMPv3 最大的改进就是安全特性，即只有被授权的人员才有资格执行网络管理的功能（如关闭某一条链路）和读取有关网络管理的信息（如读取一个配置文件的内容）。

基于 SNMP 的网络管理由三个部分组成，即 SNMP 本身、管理信息结构（Structure of Management Information, SMI）和管理信息库（Management Information Base, MIB）。SNMP 定义了管理站和代理之间所交换的分组格式。SMI 定义了命名对象和定义对象类型（包括范围和长度）的通用规则，以及把对象和对象的值进行编码的规则。MIB 在被管设备中创建了命名对象，并规定了其类型。

(3) 可用性

可用性是指用户可以正常利用网络的时间，通常是网络设计时客户的一个重要目标。可用性可用每年、每月、每天或者每小时内正常工作的时间占该时期总时间的比例，用百分率来表示，例如 99.999% 的可用性。

可用性与可靠性紧密相连，但是比可靠性的含义更为特殊：