



21世纪全国本科院校电气信息类**创新型**应用人才培养规划教材

# 通信网络基础

主编 王 昊 王艳营



媒介传信息 诠释数字化进程  
理论助规划 展望宽带化趋势



北京大学出版社  
PEKING UNIVERSITY PRESS

21 世纪全国本科院校电气信息类创新型应用人才培养规划教材

# 通信网络基础

主 编 王 昊 王艳营  
副主编 孙桂芝 李慧慧  
冯进攻  
主 审 隋晓红



北京大学出版社  
PEKING UNIVERSITY PRESS

## 内 容 简 介

本书内容涵盖了通信网络的基本原理,全书共分7章。第1章主要讨论了通信网络的基本构成和协议体系、本书所需的数学基础及通信网络的基本问题;第2章详细讨论了链路层、网络层和传输层的点到点传输协议,包括组帧、差错检测、自动请求重发等;第3章首先描述了单个排队系统的基本时延性能,接着描述了多个排队队列组成的网络的时延性能,给出的分析模型是常用的网络时延模型;第4章分析了多个用户共享一个信道的问题(即多址技术),重点研究了随机多址的基本特征(时延、通过量和稳定性)及其改进的方法;第5章研究了如何为数据分组选定合适的传输路径问题(即路由算法),给出了常用的最短路由算法,并讨论了路由信息的广播;第6章讨论了维持网络正常运行的基本手段(即流量和拥塞控制),重点研究了窗口式及漏斗式流量及拥塞控制方法;第7章简要讨论了通信网络的可靠性理论、通信网络的可靠性、通信网络的联结性及两端之间的通信和综合可靠度问题。

本书取材恰当,内容难度适宜,说理清楚,可供普通高等学校电子信息工程、通信工程、信息工程专业及电子信息科学专业本科学生作为教材使用,也可供相关专业硕士研究生及工程技术人员作为参考书使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

通信网络基础/王昊,王艳营主编.—北京:北京大学出版社,2014.4

(21世纪全国本科院校电气信息类创新型应用人才培养规划教材)

ISBN 978-7-301-23983-4

I. ①通… II. ①王…②王… III. ①通信网—高等学校—教材 IV. ①TN915

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 036706 号



书 名: 通信网络基础

著作责任者: 王 昊 王艳营 主编

策 划 编 辑: 程志强

责 任 编 辑: 程志强

标 准 书 号: ISBN 978-7-301-23983-4/TN · 0111

出 版 发 行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> 新浪官方微博: @北京大学出版社

电 子 信 箱: [pup\\_6@163.com](mailto:pup_6@163.com)

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

印 刷 者: 北京飞达印刷有限责任公司

经 销 者: 新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 15.25 印张 351 千字

2014 年 4 月第 1 版 2014 年 4 月第 1 次印刷

定 价: 32.00 元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话: 010-62752024 电子信箱: [fd@pup.pku.edu.cn](mailto:fd@pup.pku.edu.cn)

# 前 言

通信意味着信息的传递和交换，这对人类社会来说是不可缺少的。尤其是在近代社会中，信息的交换日益频繁，随着通信技术和计算机技术的发展，人们已经能够克服空间和时间的限制，使大量的、远距离的信息传递和存取成为可能。随着通信的普及，人们的日常生活和通信的发展联系越来越紧密，通信的作用就显得更重要。

在现代化的信息社会中，社会生产活动中的各类信息由声音、文字、图像、数据等多种媒体承载，并通过高速通信网络系统实现信息的传递，到达各类信息应用系统，为全社会每个地方和每个人进行服务，实现信息资源的共享和基于信息的社会生产。可以说，通信网络已经极大地促进了人类的文明，它改变了传统的生产结构，改进了人类的职能活动，极大地增加了社会财富。在过去的几十年中，通信网一直向着数字化、宽带化方向发展。当前，通信网络的数字化进程已经基本完成，而通信网的宽带化仍然是当前通信发展的热点，各种类型的宽带网络正在规划和建设之中。在信息传递的快速性、有效性、可靠性、多样化以及经济性方面，通信网一直在不断地优化。未来网络将向着泛在化、移动化、多媒体化、宽带化、高可信化的趋势发展。通信网的这种飞速发展推动了通信网络理论的发展，目前通信网络已经成为一个专门的学科，其内容十分丰富，掌握通信网的理论知识对于网络的规划、设计、建设和维护等实践活动具有很大的帮助。

本书第 1、2、4 章由黑龙江科技大学王昊编写，第 3 章由黑龙江建筑职业技术学院李慧慧编写，第 7 章由黑龙江科技大学孙桂芝编写，第 5、6 章由黑龙江科技大学王艳营编写，全书由王昊统稿。在本书的编写过程中，冯进攻查阅了大量资料并做了部分校稿工作。

黑龙江科技大学隋晓红教授担任本书的主审，提出了许多宝贵意见，在此表示诚挚的谢意！

本书的编写参考了大量的国内外著作和文献，在此向这些相关的作者表示衷心的感谢！

由于通信网络技术发展十分迅速，加之编者水平所限，书中难免存在疏漏之处，敬请各位专家和读者批评指正。

编 者

2013 年 11 月

# 目 录

|                               |    |                                       |     |
|-------------------------------|----|---------------------------------------|-----|
| 第 1 章 通信网络概论 .....            | 1  | 2.4.1 网络层(子网层)的点一点<br>传输协议 .....      | 59  |
| 1.1 概述 .....                  | 2  | 2.4.2 网际层(互联层)的<br>传输协议——IP 协议 .....  | 64  |
| 1.2 通信系统的概念 .....             | 3  | 2.4.3 运输层的点一点<br>传输协议 .....           | 67  |
| 1.3 通信网络的概念 .....             | 4  | 小结 .....                              | 72  |
| 1.3.1 数据传输链路 .....            | 5  | 习题 .....                              | 72  |
| 1.3.2 数据传输网络 .....            | 7  | 第 3 章 网络的时延分析 .....                   | 75  |
| 1.3.3 网络的互联 .....             | 10 | 3.1 Little 定理及其应用 .....               | 76  |
| 1.4 协议体系及分层的概念 .....          | 11 | 3.1.1 Little 定理 .....                 | 77  |
| 1.4.1 分层的概念 .....             | 12 | 3.1.2 Little 定理的应用 .....              | 79  |
| 1.4.2 OSI 协议的体系结构 .....       | 13 | 3.2 $M/M/m$ 型排队系统 .....               | 80  |
| 1.4.3 TCP/IP 协议的体系结构 .....    | 16 | 3.2.1 $M/M/1$ 排队系统 .....              | 80  |
| 1.4.4 混合的分层协议体系 .....         | 17 | 3.2.2 $M/M/m$ 排队系统 .....              | 84  |
| 1.5 通信网络中的数学基础 .....          | 17 | 3.3 $M/G/1$ 型排队系统 .....               | 88  |
| 1.5.1 随机过程的基本概念 .....         | 17 | 3.3.1 $M/G/1$ 排队系统 .....              | 88  |
| 1.5.2 Poisson 过程 .....        | 20 | 3.3.2 服务员有休假的 $M/G/1$<br>排队系统 .....   | 92  |
| 1.5.3 马尔可夫链 .....             | 22 | 3.3.3 采用不同服务规则的 $M/G/1$<br>排队系统 ..... | 95  |
| 1.5.4 图论基础 .....              | 26 | 3.4 排队网络 .....                        | 102 |
| 小结 .....                      | 33 | 3.4.1 Kleinrock 独立性近似 .....           | 103 |
| 习题 .....                      | 34 | 3.4.2 Burke 定理 .....                  | 105 |
| 第 2 章 点一点的传输协议 .....          | 35 | 3.4.3 Jackson 定理 .....                | 106 |
| 2.1 组帧技术 .....                | 37 | 小结 .....                              | 109 |
| 2.1.1 面向字符的组帧技术 .....         | 37 | 习题 .....                              | 109 |
| 2.1.2 面向比特的组帧技术 .....         | 38 | 第 4 章 多址技术 .....                      | 112 |
| 2.1.3 采用长度计数的组帧技术 .....       | 40 | 4.1 多址协议概述 .....                      | 115 |
| 2.2 链路层的差错控制技术 .....          | 40 | 4.1.1 MAC 层在通信协议中的<br>位置 .....        | 116 |
| 2.2.1 差错检测 .....              | 40 | 4.1.2 多址协议的分类 .....                   | 116 |
| 2.2.2 ARQ 协议 .....            | 42 | 4.1.3 系统模型 .....                      | 117 |
| 2.2.3 最佳帧长 .....              | 53 |                                       |     |
| 2.3 标准数据链路控制协议 .....          | 55 |                                       |     |
| 2.4 网络层和运输层的点一点<br>传输协议 ..... | 59 |                                       |     |



|                               |     |                              |     |
|-------------------------------|-----|------------------------------|-----|
| 4.2 固定多址接入协议.....             | 118 | 6.1.1 网络数据流的控制<br>技术分析.....  | 178 |
| 4.2.1 频分多址接入.....             | 118 | 6.1.2 流量和拥塞控制的作用和<br>准则..... | 180 |
| 4.2.2 时分多址接入.....             | 119 | 6.1.3 拥塞控制的基本原理和<br>层次.....  | 183 |
| 4.2.3 固定多址接入协议的<br>性能分析.....  | 119 | 6.2 流量和拥塞控制算法.....           | 184 |
| 4.3 随机多址接入协议.....             | 122 | 6.2.1 窗口式流量和拥塞控制.....        | 185 |
| 4.3.1 ALOHA 协议.....           | 122 | 6.2.2 漏斗式速率控制算法.....         | 188 |
| 4.3.2 载波侦听型多址协议.....          | 130 | 小结.....                      | 194 |
| 4.4 冲突分解算法.....               | 137 | 习题.....                      | 194 |
| 4.4.1 树形分裂算法.....             | 137 | <b>第 7 章 通信网的可靠性</b> .....   | 196 |
| 4.4.2 FCFS 分裂算法.....          | 139 | 7.1 可靠性理论概要.....             | 198 |
| 4.5 预约多址接入协议.....             | 141 | 7.1.1 不可修复系统的可靠度.....        | 198 |
| 4.6 分组无线网络.....               | 144 | 7.1.2 可修复系统的可靠度.....         | 199 |
| 小结.....                       | 145 | 7.1.3 复杂系统的分解.....           | 201 |
| 习题.....                       | 146 | 7.1.4 综合可靠度.....             | 207 |
| <b>第 5 章 路由算法</b> .....       | 147 | 7.1.5 可靠性设计.....             | 208 |
| 5.1 路由算法概述.....               | 149 | 7.2 通信网的可靠性.....             | 211 |
| 5.1.1 路由选择算法对网络性能的<br>影响..... | 149 | 7.3 通信网的联结性.....             | 212 |
| 5.1.2 路由算法的基本特性.....          | 150 | 7.3.1 联结度和结合度.....           | 212 |
| 5.1.3 路由算法的分类.....            | 151 | 7.3.2 局和线路故障下网的<br>联结概率..... | 217 |
| 5.1.4 路由表.....                | 152 | 7.3.3 可靠网的设计.....            | 220 |
| 5.2 常用的路由算法.....              | 155 | 7.4 两端之间的通信和综合可靠度.....       | 221 |
| 5.2.1 扩散法.....                | 155 | 7.4.1 两端之间联结性的计算.....        | 222 |
| 5.2.2 偏转路由算法.....             | 156 | 7.4.2 两端之间通信的综合<br>可靠度.....  | 222 |
| 5.2.3 源路由算法.....              | 157 | 7.4.3 通信网的综合可靠度.....         | 225 |
| 5.3 最短路由算法.....               | 158 | 小结.....                      | 228 |
| 5.3.1 集中式最短路由算法.....          | 159 | 习题.....                      | 229 |
| 5.3.2 分布式最短路由算法.....          | 168 | <b>参考文献</b> .....            | 231 |
| 小结.....                       | 174 |                              |     |
| 习题.....                       | 174 |                              |     |
| <b>第 6 章 流量和拥塞控制</b> .....    | 176 |                              |     |
| 6.1 流量和拥塞控制概述.....            | 177 |                              |     |

# 第1章

## 通信网络概论

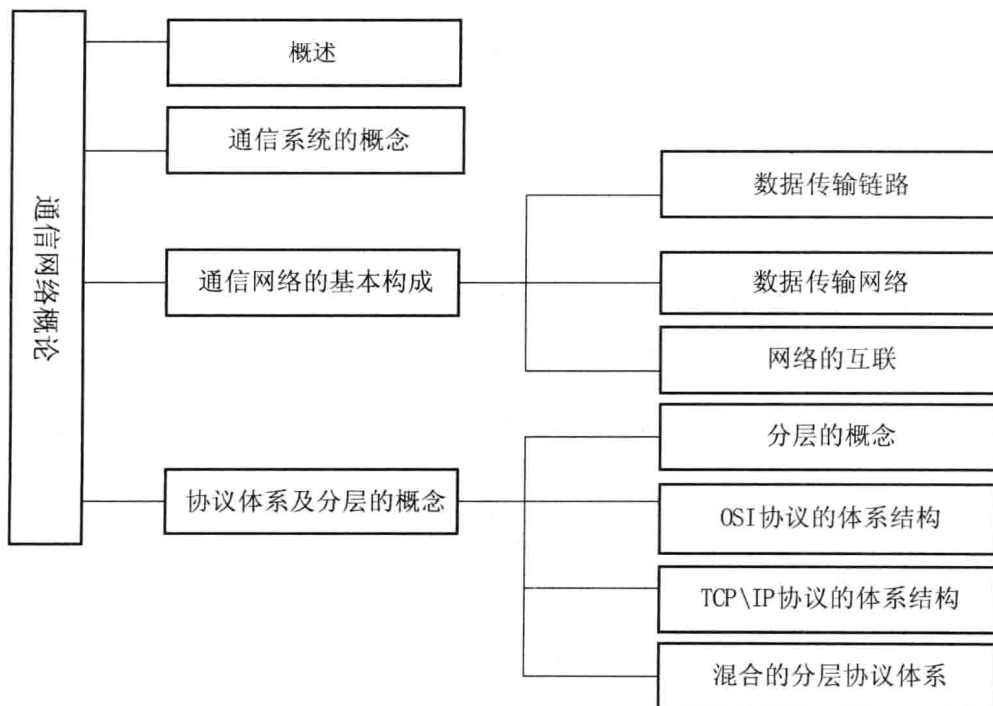


### 本章教学目的与要求

- 熟悉通信系统的概念。
- 掌握数据传输链路和数据传输网络的概念。
- 熟悉网络互联的概念。
- 熟悉分层的概念。
- 掌握 OSI 和 TCP/IP 协议的体系结构。



### 本章知识架构





## 引言

因特网(Internet)又称国际计算机互联网,是目前世界上影响最大的国际性计算机网络。其准确的描述如下:因特网是“一个网络的网络”(A Network of Network)。它以 TCP/IP 网络协议将各种不同类型、不同规模、位于不同地理位置的物理网络连接成一个整体。它也是一个国际性的通信网络集合体,融合了现代通信技术和现代计算机技术,集各个部门、领域的各种信息资源为一体,从而构成网上用户共享的信息资源网。它的出现是世界由工业化走向信息化的必然和象征。

因特网最早来源于 1969 年美国国防部高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)的前身 ARPA 建立的 ARPAnet。最初的 ARPAnet 主要用于军事研究目的。1972 年,ARPAnet 首次与公众见面,由此成为现代计算机网络诞生的标志。ARPAnet 在技术上的另一个重大贡献是 TCP/IP 协议簇的开发和使用。ARPAnet 试验并奠定了因特网存在和发展的基础,较好地解决了异种计算机网络之间互联的一系列理论和技术问题。

同时,局域网和其他广域网的产生和发展对因特网的进一步发展起了重要作用。其中,最有影响的就是美国国家科学基金会(National Science Foundation, NSF)建立的美国国家科学基金网 NSFnet。它于 1990 年 6 月彻底取代了 ARPAnet 而成为因特网的主干网,但 NSFnet 对因特网的最大贡献是使因特网向全社会开放。随着网上通信量的迅猛增长,1990 年 9 月,由 Merit、IBM 和 MCI 公司联合建立了先进网络与科学公司 ANS(Advanced Network & Science, Inc)。其目的是建立一个全美范围的 T3 级主干网,能以 45Mbps 的速率传送数据,相当于每秒传送 1400 页文本信息,到 1991 年底,NSFnet 的全部主干网都已同 ANS 提供的 T3 级主干网相通。

近 10 年来,随着社会、科技、文化和经济的发展,特别是计算机网络技术和通信技术的发展,人们对开发和利用信息资源越来越重视,从而强烈刺激着因特网的发展。在因特网上,按从事的业务分类包括了广告公司、航空公司、农业生产公司、艺术、导航设备、书店、化工、通信、计算机、咨询、娱乐、财贸、各类商店、旅馆等 100 多类,覆盖了社会生活的方方面面,构成了一个信息社会的缩影。

## 1.1 概 述

通信意味着信息的传递和交换,这对人类社会是不可缺少的。尤其是在近代社会中,信息的交换日益频繁,随着通信技术和计算机技术的发展,人们已经能够克服空间和时间的限制,使得大量的、远距离的信息传递和存取成为可能。随着通信的普及,人们的日常生活和通信的发展联系越来越紧密,通信的作用就显得更加重要。在现代化的信息社会中,社会生产活动中的各类信息由声音、文字、图像、数据等多种媒体承载,并通过高速通信网络系统实现信息的传递,到达各类信息应用系统,为全社会每个地方和每个人进行服务,实现信息资源的共享和基于信息的社会生产。可以说,通信网络已经极大地促进了人类的文明,它改变了传统的生产结构,改进了人类的智能活动,极大地增加了社会财富。在过去的几十年中通信网一直向着数字化、宽带化方向发展。当前,通信网络的数字化进程已经基本完成,而通信网的宽带化仍然是当前通信发展的热点,各种类型的宽带网络正在规划和建设中。在信息传递的快速性、有效性、可靠性、多样性以及经济性方面,通信网一直经历不断的优化。未来网络将向着泛在化、移动化、多媒体化、宽带化、高可信化的趋



势发展。通信网的这种飞速发展推动了通信网络理论的发展,目前通信网络理论已经成为一门专门的学科,其内容十分丰富,掌握通信网的理论知识对于网络的规划、设计、建设和维护等实践活动具有很大的帮助。

本章将从通信网的构成、协议和理论问题等方面进行阐述。

## 1.2 通信系统的概念

点与点之间建立的通信系统的基本组成包括信源、变换器、信道、噪声源、反变换器及信宿 6 个部分,如图 1.1 所示。信源是指生产各种信息(如语音、文字、图像及数据等)的信息源,可以是发出信息的人,也可以是发出信息的机器,如计算机等。不同的信息源构成不同形式的通信系统。

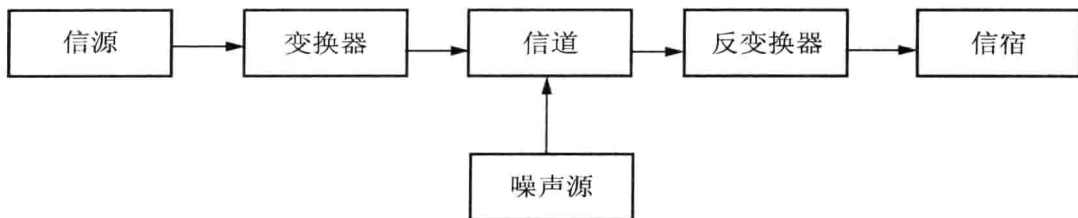


图 1.1 点一点单向通信系统构成模型

变换器的作用是将信源发出的信息变换成适合在信道中传输的信号。对应不同的信源和不同的通信系统,变换器有不同的组成和变换功能。例如,对于数字电话通信系统,变换器包括送话器和模/数变换器等。模/数变换器的作用是将送话器输出的模拟话音信号经过模/数变换、编码和时分复用等处理后,变换成适合在数字信道中传输的信号。

信道是信号的传输介质。信道按传输介质的种类可以分为有线信道和无线信道。在有线信道中电磁信号被约束在某种传输线(如电缆、光缆等)上传输;在无线信道中电磁信号沿空间(大气层、对流层、电离层等)传输。信道如果按传输信号的形式又可以分为模拟信道和数字信道。

反变换器的作用是将从信道上接收的信号变换成信道接收者可以接收的信息。反变换器的作用与变换器的作用正好相反,起着还原的作用。

信宿是信息的接收者,与信源相对应,可以是人或者机器。

噪声来自系统的各个部分,从发出和接收信息的周围环境、各种设备的电子器件,到信道所受到的外部电磁场干扰,都会对信号形成噪声影响。为了方便分析问题,一般将系统内所存在的干扰均折合到信道中,并用噪声源表示。

以上所述的通信系统只能实现两用户之间的单向通信。若想实现双向通信还需要另一个通信系统完成相反方向的信息传送工作,即构成双工通信系统。而要实现多个用户之间的两两通信时,就需要有一个通信网,并利用一些中转节点,将多个通信系统有机地组成一个整体。

### 1.3 通信网络的概念

一个基本的通信网络通常由用户通信终端、物理传输链路(通道)汇聚点(网络节点)组成,如图 1.2 所示。在该网络中,网络节点可以是交换设备(电信网中的节点),也可以是路由器(互联网中的节点),其主要功能是将多个用户的信息复接到骨干链路上以分离出用户的信息。网络节点的汇聚作用,使得用户可以低成本地共享骨干链路,进而低成本地实现任意用户之间的信息交换。

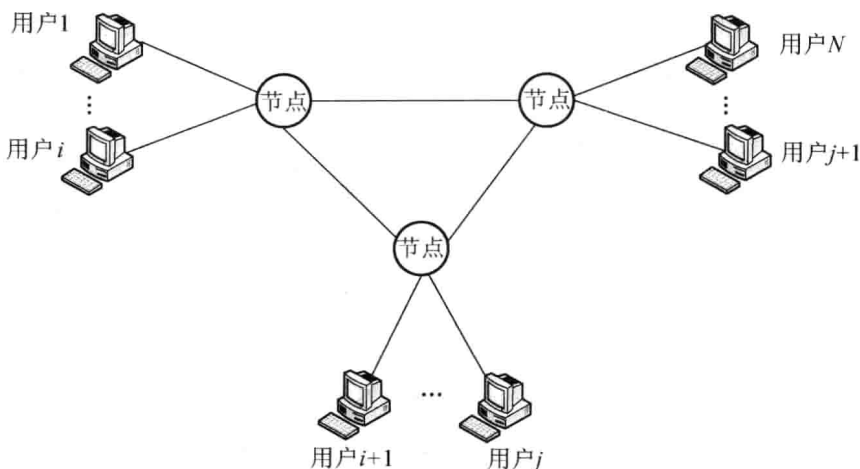


图 1.2 一个基本的通信网示意图

根据用户类型(移动或固定)、业务的种类(电话、多媒体、计算机数据)、传输链路或媒介(有线、光纤、无线)、节点采用的技术体制(ATM 交换体制、电路交换体制、分组交换体制)或应用领域等将已有的通信网络进行分类,可分为固定电话网、移动通信网、ATM 网络、局域网、民用通信网、军用通信网、专用通信网等。

当前实用的覆盖全国的通信网,通常由多种不同类型的网络互联互通而构成。一个可能的网络如图 1.3 所示。它包括的网络(通常称为子网)有 ATM(Asynchronous Transfer Mode, 异步转移模式)网络、X.25 分组数据网、PSTN(Public Switched Telephone Network, 公用电话交换网)/ISDN(Integrated Service Digital Network, 综合业务数字网)、移动通信网/卫星通信网、FDDI(Fiber Distributed Data Interface)环网、局域网及高速骨干核心网等。整个网络通过以 WDM(Wavelength Division Multiplexing, 波分复用)链路作为核心路由器的高速通道,形成高速信息传输平台,并将上述各子网互联互通,便可形成一个无缝覆盖的网络。

路由器是网络互联的核心设备,它负责分组(分组是由若干数据比特组成的可以进行独立传输的数据块,其长度为几个字节到几千个字节)的转发和为各个分组选择适当的传输路径。正是由于路由器的存在,任一用户(用户 A)的分组可以通过一个最优的路由(用户 A→路由器 R13→路由器 R1→路由器 R3→ATM 网络→路由器 R14→用户 G)转发给任一目的用户(用户 G)。

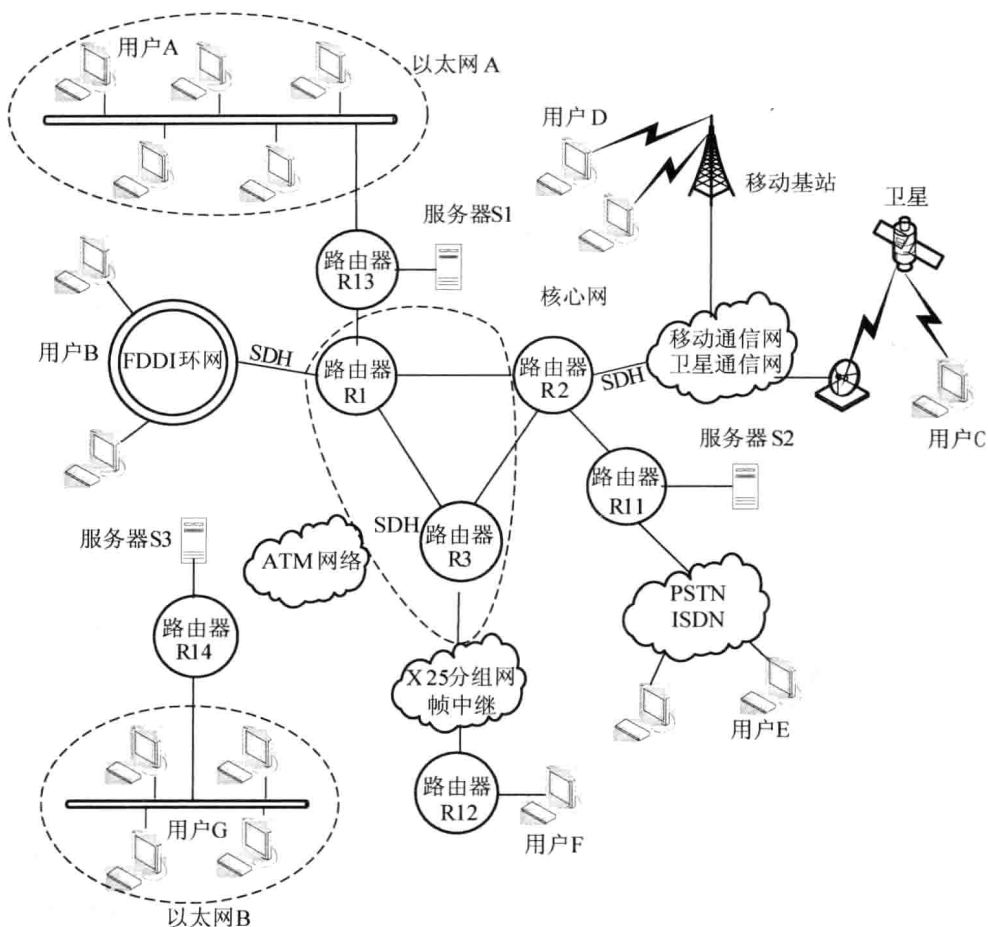


图 1.3 通信网络示意图

在上述网络中，以分组作为载体来运载不同类型的业务。这些业务可以是语音、图像、视频，也可以是电子邮件、Web 业务等。为了向用户提供不同的服务，除通信网络本身以外，网络中还挂有不同类型的服务器，如 S1、S2、S3 等。因此在通信网中，通信的双方可以是人与人、机器与机器、人与机器等，通信的形式既可以是一个用户对一个用户，也可以是一个用户对多个用户或多个用户对多个用户。

### 1.3.1 数据传输链路

所谓数据传输链路，是指在物理传输媒介(如双绞线、同轴电缆、光纤、微波传输系统、卫星传输电路等)上利用一定的传输标准(它通常规定了电气接口、调制解调的方式、数据编码的方式、比特同步、帧格式和复合接的方式等)形成的传输规定速率(和格式)的数据比特传输通道。

例如：在传统的电话线路上利用 Modem(调制解调器)构成的数据传输链路。在链路上，用户侧和网络侧的计算机和服务器分别与各自的 Modem 相连，而 Modem 之间通过双绞线相连。



该链路规定了计算机与 Modem 的电器接口为 RS-232 接口, 传输媒介为电话线(双绞线)。在该线路上, 利用不同的频带分割和不同的调制方式可以实现 300、1200、2400、4800、9600、19200bps 以及更高的传输速率。在 CCIT TV.22 标准规定的 1200bps 双工调制解调器标准中, 将电话线提供的语音信道分为上、下两个子信道, 一个子信道占有 900~1500Hz 的频带, 另一个占有 2100~2700Hz 的频带, 已调信号的载频分别为 1200Hz 和 2400Hz。调制方式为四相高频段信道接收数据, 从而实现全双工操作。

数据传输链路分为两大类: 一类是用户到网络节点(路由器或交换机)之间的链路(简称为接入链路); 另一类是网络节点(路由器或交换机)到网络节点(路由器或交换机)之间的链路(简称为网络链路)。

接入链路有多种形式, 如 Modem 链路、xDSL 链路、ISDN 链路、无线链路(移动通信和卫星通信链路)、局域网链路等。

Modem 链路是利用传统 PSTN 的电话线路, 在用户侧和网络侧分别添加 Modem 设备来实现数据传输的, 其传输速率可以为 300bps~56Kbps。

xDSL 链路是通过数字技术, 对 PSTN 端局(本地电话交换机)到用户终端之间的线路进行改造而成的数字用户线 DSL(Digital Subscribers Line)。DSL 的前缀 x 表示不同的传输方案, 例如, ADSL(Asymmetric DSL, 非对称数字用户线)的上行速率为 640Kbps~1Mbps, 下行速率为 6~8Mbps; HDSL(High Speed DSL)上下行速率相同, 均为 768Mbps 或 1.5Mbps; VDSL(Very High Speed DSL)下行速率为 12.96Mbps、25Mbps、52Mbps, 上行速率为 1.6~2.3Mbps。ISDN 链路也是利用传统的电话线路实现数据传输, 它提供两个基本的信道: B 信道(64Kbps)和 D 信道(16Kbps 或 64Kbps)。供用户使用的基本接口速度为 2B+D(144Kbps), 一次群速率接口为 23B+D(1544Kbps)或 30B+D(2048Kbps)。

无线链路最典型的链路就是数字蜂窝移动通信的链路, 根据使用的空中接口标准(如 GSM、IS-95、IMT-2000 等)的不同, 支持的数据传输速率为十几 Kbps 到几 Mbps(例如, 采用 TD-SCDMA HSPA 标准, 下行速率可达 2.8Mbps, 上行可达 384Kbps)。对于卫星链路, 根据星座结构(低轨道、中轨道和精致轨道)和卫星数目几百颗(如 Teledesic 系统 288 颗), 几十颗(如 Iridium 系统 66 颗), 几颗或单颗(Spaceway)的不同, 支持的数据传输速率从几 Kbps 到几百 Kbps。如果采用短距离的无线接入技术(如无线局域网), 其速率可达几十 Mbps 至几百 Mbps(如 IEEE 802.11n 无线局域网标准可支持 600Mbps 的传输速率)。新一代的移动通信系统(IMT-Advanced)和新一代的无线局域网将提供 1Gbps 以上的数据传输速率或链路通过率。

有线局域网链路中最典型的是利用以太网构成的传输链路, 它在双绞线上可传输的峰值数据速率为 10Mbps、100Mbps、1000Mbps。以太网是在办公室环境下最常用的接入链路。网络链路也有多种形式, 如帧中继、SDH、WDM 等。

SDH(Synchronous Digital Hierarchy, 同步数字系统)是在美国贝尔实验室提出的 SONET(Synchronous Optical Network, 光同步数字网)的基础上制定的技术标准, 它具有一套标准化的结构等级 STM-N(N=1、4、16、64), 它们的传输速率分别为 STM-1(155.520Mbps), STM-4(622.080Mbps), STM-16(2488.320Mbps), STM-64(9953.280Mbps)。

WDM(Wave Length Division Multiplexing, 光波分复用)技术是在一根光纤中能同时传输多个波长光信号的一种技术。在发射端将不同波长的光信号组合(复用)起来。在接收端又将组合的光信号分开(解复用)并送到不同的终端。目前在一根光纤上可提供的数据速率



为 $4 \times 2.5$  Gbps(第一个数字 4 为波长数, 第二个数字 2.5 为每一波长上的速率, 后同)、 $16 \times 10$  Gbps、 $160 \times 2.5$  Gbps、 $128 \times 10$  Gbps 等, 理论上可达 5Tbps 的传输速率。

根据上面的知识, 并对照图 1.2 可以看出: 在通信网中的用户根据他们在网络中所处的位置不同, 他们到网络之间的接入链路是多种多样的。例如, 用户 A 是通过局域网接入, 用户 D 是通过移动网接入, 用户 E 是通过 ISDN 链路接入。由于网络中采用了多种网络链路, 所有任意两个用户之间信息传输的路径要经过多种类型的链路。例如, 局域网 B 中的任意两个用户之间是相同特性的链路, 而用户 D 与用户 F 之间要经过多种不同特性的链路, 如无线链路、SDH 链路、WDM 链路和 X.25 链路等。

### 1.3.2 数据传输网络

数据传输网络的基本功能是通过网络中的交换机(或路由设备)为运载用户业务的分组选择合适的传输链路, 从而使这些分组迅速可靠地传送到目的用户。一个分组经过的所有传输链路的集合称为一条路径。

在数据传输网络中, 要传送的基本内容称为消息(Message)。根据不同的应用场合, 消息可有不同的含义。例如, 消息可以是一份电子邮件(E-mail)、一份文件、一幅图像等。在要进行交互操作的场合, 如 A 可以发一个消息给 B, B 可以发一个应答给 A, 双发需要交互多次才完成信息交换的过程, 或者说, 双方需要按一定的顺序交换大量的消息。这样一个消息的序列称为一个会话过程(Session)。数据传输网络必须保证每一个会话过程可靠、及时、高效地完成。典型的数据传输网络有分组交换网和 ATM 网等。

#### 1. 分组交换网

在分组交换网中, 将消息分成许多比较短的、格式化的数据块(称之为分组(Packet))进行传输和交换。每一个分组由若干比特的数据组成。每一个分组通常包括一个附加的分组头。分组头指明该分组的节点及其他网络控制信息。在每一个网络节点中采用存储转发的工作方式来将输入的分组送到选定的输出链路上。这种按照一定的规则(路由算法)将输入分组送到选定的输出链路上的过程称为交换。分组交换网如图 1.4 所示。

对于图 1.4 所示的分组交换网而言, 需要完成 3 个基本的过程。

(1) 分段和重装的过程。在发端需将一条消息分成规定长度的分组, 在收端需要将分组重新装配, 恢复原始的消息。

(2) 选择传输路径(确定路由)的过程。

(3) 各网络节点的交换过程。

#### 2. ATM 网络

ATM(Asynchronous Transfer Mode)是在传统电话网使用的电路交换以及分组交换网基础上发展起来的一种交换技术, 可以较好地支持不同速率、不同种类的宽带信息交换。它与分组的差别是采用一个全网统一的固定长度的分组(称之为信元)进行交换。在 ATM 网络中, 信元的长度为 53 个字节, 其中 5 个字节为信元头, 48 个字节用来运载信息。由于信元长度和格式固定, 可用硬件电路对信元进行处理, 因而缩短了每一个信元的处理时间。它采用面向连接(即虚电路)方式, 以提高信息传送的实时性。ATM 设计是以光纤传输为基础, 因此在传输链路上采用了非常简单的差错控制和流量控制等措施, 提高了信元在网络中的传输速率。

ATM 网络的接口、信元格式和信元交换的过程如图 1.5 所示。

ATM 用户(终端)到 ATM 交换机(网络)之间的接口称为 UNI(User Network Interface, 用户网络接口)。交换机(网络节点)之间的接口称为 NNI(Network Node Interface, 网络节点接口)。接口 UNI 和 NNI 的位置如图 1.5(a)所示。

ATM 的信元格式如图 1.5(b)所示。UNI 接口和 NNI 接口的信元格式除前 12 个比特格式不同外, 其余格式完全相同。

GFC(Generic Flow Control)是流量控制比特。VPI/VCI 用来表示信元传递的路径。其中, VPI(Virtual Path Identifier)是虚通道标识; VCI(Virtual Channel Identifier)是虚信道标识。从发端到收端的一条虚电路由若干段独立的 VPI/VCI 链路组成。例如, 在图 1.5(c)中从 A 到 B 的虚电路(A→交换机 X→交换机 Y→交换机 Z→B)是由 A→X 之间的(VPI=8, VCI=17), X→Y 之间的(VPI=6, VCI=35), Y→Z 之间的(VPI=9, VCI=26), Z→B 之间的(VPI=2, VCI=55)等逻辑链路组成。每个交换机要根据信元应经过的虚电路, 完成输入 VPI/VCI 到输出 VPI/VCI 的转换。PT(Payload Type, 复合类型)用来区分该信元是用户信息还是控制信息。

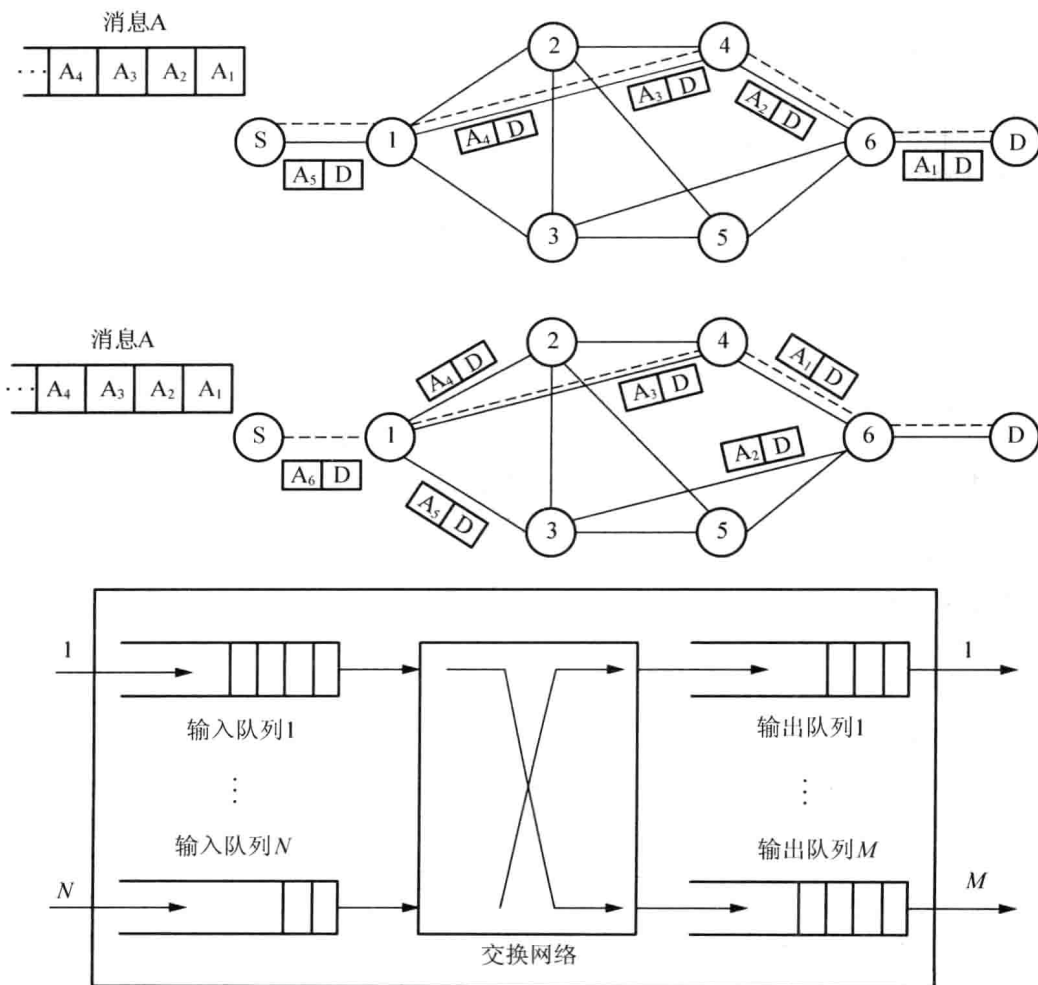
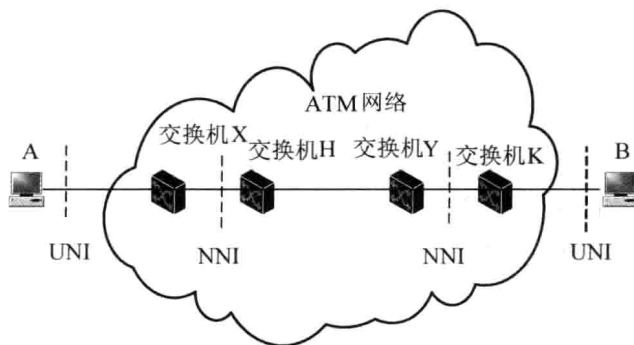
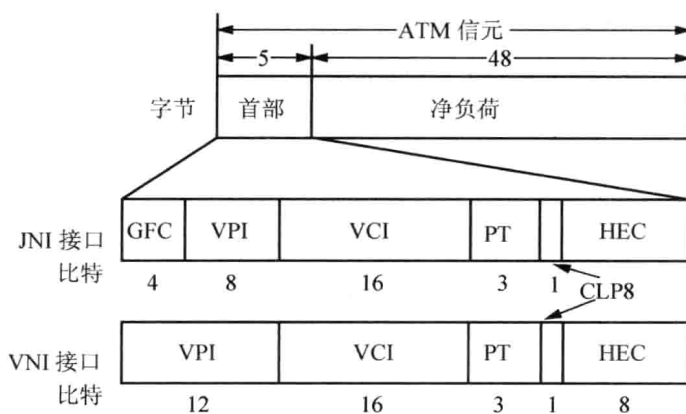


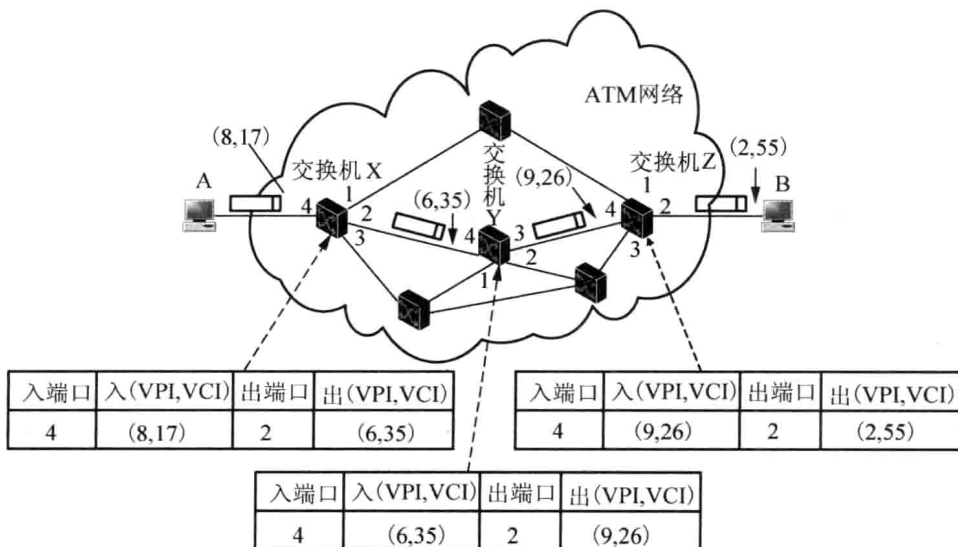
图 1.4 分组交换网



(a) 接口UNI和NNI的位置



(b) ATM的信元格式



(c) 虚电路

图 1.5 ATM 网络



CLP(Cell Loss Priority, 信元丢失优先级)指示信元的丢失优先级。它用来表示当网络发生拥塞时如何处理该信元。例如, CLP=1, 表示信元丢失优先级高, 则当网络负荷很重时, 可以丢失该信元, 以减缓网络可能出现的阻塞。HEC(Header Error Control, 信元头差错控制)提供信用头 4 个字节的差错控制, 可进行多个比特的检错和单个比特的纠错。

ATM 信元通常是在 SDH 链路上进行传输的。为了支持不同类型的业务, ATM 网络向用户提供 4 种类别的服务, 即 A 类、B 类、C 类、D 类。服务类别是根据业务的比特率是固定的还是可变的、源节点到目的节点是否需要同步以及是面向连接还是无连接来划分的。对于不同类别的业务, ATM 网络采用不同的适配方法(即如何将业务比特流分段, 形式数据协议单元(CS-PDU), 再如何将 CS-PDU 分成信元, 最后如何有效地传输这些信元)。这些适配的方法称为 AAL1~AAL5。AAL1 支持 A 类: 恒定比特流、收发需要定时关系、面向连接的业务。AAL2 支持 B 类: 可变比特流、收发需要定时关系且面向连接的业务(如语音和图像等业务)。AAL3/4 支持 C 类/D 类业务, 服务即可以是面向连接的也可以是无连接的, 支持的业务可以是报文模式也可以是流模式。AAL5 为面向连接的应用提供更为有效的运载措施。

以上仅仅列举了两个典型的数据传输网络, 实际应用的网络还有多种多样, 如 X.25 分组交换网、ISDN、快速中继网(帧中继网和信元中继)、移动 GPRS 系统, 以路由器+光纤传输系统构成的高速信息网、1Gbps 或 10Gbps 的以太网等。

### 1.3.3 网络的互联

前面两小节主要讨论的是一个子网内的问题, 这时所有的链路具有相同特性, 采用某种数据传输链路协议和寻址方式, 通过交换设备来实现子网内的路由选择和信息交换。

当多个子网要互联互通构成一个大的网络时, 需要采用路由器(设备), 如图 1.6 所示。路由器的基本功能有两个: 一是根据路由表, 将分组发送到正确的目的地; 二是维持和更新决定分组传输路径的路由表。路由表工作方式如下: 从接收分组中提取目的地址, 并确定该地址中的网络号, 查找路由表以获得与该目标网络相匹配的表项。该表项包括分组应到达的下一网络及到达下一网络的必要信息(如对应的路由器输出端口)。分组被封装在选定的输出端口的数据帧中, 并由输出端口输出。

路由器区别于交换机的关键特征是它可连接使用不同物理传输媒介、具有不同传输协议的数据链路。在一个典型的网络中, 通常会有一种以上的局域网(LAN)和广域网(WAN)技术, 而每个子网都有独立的数据链路传输协议和寻址方式。

为了实现全网互联需要两个基本条件: 一是全网统一编制; 二是路由算法。编址解决如何区分网络中的节点(路由器、服务器)、用户终端等, 例如, 在 Internet 中是采用 IP 地址来区分路由器、服务器、用户计算机等。路由算法解决从源到目的地之间应经过的子网、路由器、网络节点等。例如, 可以采用从源到目的地经过的路由器最少的原则来选择一条路由。

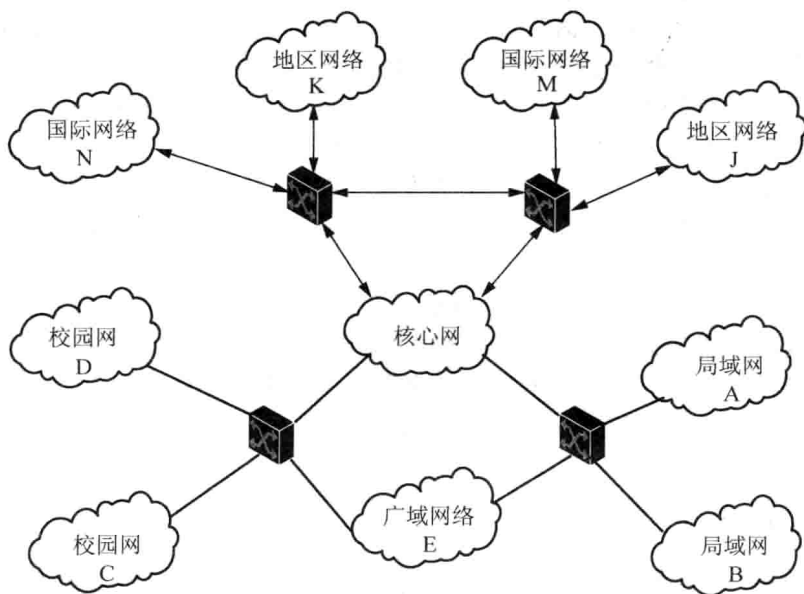


图 1.6 网络互联示意图

## 1.4 协议体系及分层的概念

上一节已经给出了多种可能的通信链路，仅仅有通信链路双方还不能进行有效的通信，还需要一系列的通信规则或协议方可进行通信。这里以一个通俗的例子来说明通信协议的重要性。

假设有 3 支部队：红军 1 队、红军 2 队和蓝军部队。红军的两支部队被蓝军隔开，如图 1.7 所示。

如果两个红军部队同时攻击蓝军，则红军胜；否则蓝军胜。两个红军之间通信的唯一手段就是信使(通信员)，但信使必须要通过蓝军阵地。任一信使都有可能被蓝军抓获，导致信息丢失，这相当于通信链路不可靠。

红军为了取胜，他们想要两个部队同时进攻。但每一个部队必须得到对方也想进攻的确认后，才会进行，否则任意一方都不愿意进攻。下面来看能否设计一种协议确保双方同时进入进攻状态？

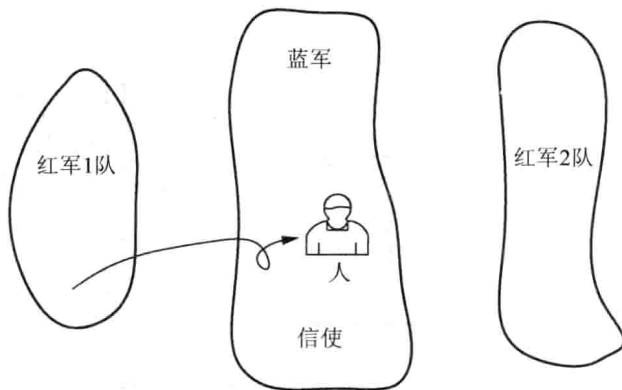


图 1.7 红军和蓝军部队的部署情况

假设红军一方要通过信使向对方发送一条信息“让我们在星期六晚上 8:00 同时进攻。如果同意，请回复”，并期待对方的回复。对方在收到该消息后，会发回一条消息“我们