

目录

第1章 通信发展史

古代通信：信息沟通的起步

近现代通信：电磁通信和数字时代的起步

当代通信：移动通信和互联网时代

未来通信：大融合时代

第2章 用什么实现通信

电信网中的通信工具

互联网的通信手段

专业领域的通信工具

家电中的通信工具

第3章 通信到底是干嘛的

第1个问题：用什么信息格式传递给对方——编码

第2个问题：如何找到对方——寻址

第3个问题：信息传递的额外要求——网络优化

额外的一个问题——人性化

第4章 说说“编码”

开场白

从声音到模拟信号

模数/数模转换（A/D 和 D/A）、PCM 和线路编码

复用与解复用

波特率和比特率

几种典型数据技术的数据格式

数据包、帧和信元名称的统一问题

图像和视频编码

第5章 讲讲“寻址”

[开场白](#)

[电话交换网的寻址](#)

[以太网内的寻址](#)

[IP 网的寻址](#)

[怎么会有这么多地址？](#)

[第 6 章 谈谈“优化”](#)

[处处都有“优化”在](#)

[分工和职责——通信分层结构](#)

[一根线“掰”成几“瓣”用——复用技术](#)

[“排兵布阵”有讲究——网络拓扑浅析](#)

[开车还是坐地铁？——面向连接和非面向连接](#)

[不可忽视的通信网络“摩擦力”——传输损耗](#)

[“非诚勿扰！”——网络安全基本概念](#)

[浓缩的，都是精华！——通信压缩技术](#)

[服务第一，顾客至上！——通信服务质量](#)

[从几个案例来看优化](#)

[节能与综合利用](#)

[第 7 章 通信网络基础框架透视](#)

[传送网——一切通信网的基础](#)

[语音网——百年历史，成就卓著](#)

[数据网——通信新贵，未来之星](#)

[支撑网——默默无闻，鞠躬尽瘁](#)

[综合网——通信网中的混血儿](#)

[各种网络的结构关系](#)

[第 8 章 通信网中的传送介质和传输网](#)

[如何选择传送介质](#)

[从频谱到带宽](#)

原创力文档

max.book118.com

预览与源文档一致, 下载高清无水印

[看得见的“线”——有线网络的传输介质](#)

[有线传输设备和网络](#)

[别拿空气不当导体——无线传输技术](#)

[高空孤独的通信巨人——卫星通信](#)

[第9章 电话交换网](#)

[自动交换：就来自于那次“灵感一闪”](#)

[公众电话交换网（PSTN）](#)

[交换机原理](#)

[作战图——程控交换机的路由](#)

[作战部署——信令](#)

[无所不能的智能网](#)

[软交换网络的诞生](#)

[几种 IP 呼叫信令——百舸争流](#)

[VoIP——忆往昔峥嵘岁月稠](#)

[NGN——万般业务竞自由](#)

[软交换的技术实现——对外开放，对内搞活](#)

[实时传输协议（RTP）——鹰击长空，鱼翔浅底，媒体实时流](#)

[IP 网络的语音编码——谁主沉浮？](#)

[IMS——移动网中的软交换](#)

[业务新目标——滚滚长江东逝水，统一通信成主流](#)

[ICT——CT 与 IT 渐行渐近](#)

[第10章 数据通信](#)

[还从电话网的铜线开始——xDSL](#)

[局域网互连的技术——帧中继](#)

[学院派经典技术——ATM](#)

[IPover SDH——驴唇对上了马嘴？！](#)

[IPover WDM/OTN——大速率，大流量](#)

[语音数据的“杂交”技术——MSTP](#)

[光纤进入千家万户的希望之星——无源光网络](#)

[用电视网传送数据——CATV 的双向改造和数据应用](#)

[第 11 章 路由与交换基础](#)

[IP 网的钢筋混凝土——HUB、以太网交换机和路由器](#)

[路由的发现——路由协议](#)

[TCP 与 UDP：IP 的传输协议](#)

[ICMP：IP 网检测基本工具](#)

[第 12 章 互联网通信](#)

[互联网的诞生](#)

[IP 技术在互联网中成功的诀窍](#)

[千变万化的接入方式](#)

[互联网内容的主要载体——IDC](#)

[E-mail——互联网的经典应用](#)

[WWW、HTTP 与门户网站](#)

[BBS、FTP、Telnet](#)

[即时通信](#)

[搜索引擎](#)

[电子商务、阿里巴巴的淘宝网和支付宝](#)

[远程教学和远程医疗](#)

[网络游戏](#)

[网络直播](#)

[共享经济](#)

[知识付费](#)

[互联网应用新时代](#)

[互联网的攻击手段](#)

[互联网的安全防护帮手——防火墙](#)

[互联网的安全防护帮手——态势感知](#)

[第 13 章 移动通信](#)

[先搞清楚“辈分”](#)

[1G——充满梦想的一代](#)

[GSM 创造历史](#)

[CDMA 打破垄断格局](#)

[专用业务移动调度系统——数字集群](#)

[“小灵通”横空出世](#)

[移动直放站和室内分布——目标：没有盲区！](#)

[3G 提速移动数据传送](#)

[4G 赋能移动视频服务](#)

[5G 催生革命性新业务](#)

[移动网增值业务](#)

[第 14 章 个人和家庭的通信](#)

[固定电话及其衍生的数据接入技术](#)

[个人移动通信](#)

[电力线也能上网？Yes！](#)

[利用有线电视电缆的通信新技术](#)

[IPTV 打破传统电视垄断](#)

[第 15 章 行业和企业通信](#)

[行业和企业里的语音通信](#)

[企业 IP 应用](#)

[视频会议系统](#)

[第 16 章 丰富的电信业务](#)

[电信业务的定义和分类](#)

[基础电信业务](#)

[增值电信业务](#)

原创力文档

max.book118.com

预览与源文档一致, 下载高清无水印

[增值业务举例](#)

[应急通信服务](#)

[第 17 章 运营支撑和管理计费](#)

[同步——让通信网有统一的时钟](#)

[认证和鉴权——通信网准入策略](#)

[网络管理——通信网忠实守护神](#)

[千变万化的电信计费模式](#)

[运营商之间的互连互通与结算](#)

[通信网的运营维护](#)

[运营商缴费系统](#)

[电信运营商的那些事儿](#)

[第 18 章 通信新热点](#)

[云计算](#)

[大数据](#)

[物联网](#)

[软件定义网络 \(SDN\)](#)

[那些云计算与 SDN 演化出的新技术](#)

[量子通信](#)

[区块链](#)

[人工智能](#)

[虚拟现实 \(VR\) 与增强现实 \(AR\)](#)

[第 19 章 通信网常见设施](#)

[机房与装修](#)

[机房监控](#)

[电信设备](#)

[工控机和服务器](#)

[线缆](#)

[常见物理接口和接头](#)

[DDF、ODF 与 MDF](#)

[空调](#)

[电源、电池与 UPS](#)

[基站铁塔](#)

[第 20 章 通信产品开发基础](#)

[智能性与产品开发](#)

[嵌入式与非嵌入式系统](#)

[基于 PC 或者服务器的通信产品开发基础](#)

[嵌入式系统的开发](#)

[关于产品的认证](#)

[通信产品开发的思路](#)

[第 21 章 通信行业价值链简介](#)

[通信行业的价值链条](#)

[工业和信息化部](#)

[主要电信运营商](#)

[第 22 章 相关国际标准化组织](#)

第1章 通信发展史

残阳如血，飞鸟归巢，远处山口突然尘土飞扬。你看到了成群的敌人从山那头层层逼近。你直起身，规整好有些凌乱的铠甲，放下那柄随身带的刀，从箭楼下面的火堆中拿出一根正在激烈燃烧的树枝，走到那一堆干柴和动物粪便混合而成的什物中间，点燃了它们。少顷，滚滚浓烟直插云霄！你站起来，拿好你的刀，望着这黑烟，祈祷上苍尽快把救兵派到，你很清楚，如果稍有差池，你将永远无法回到你日夜思念的亲人面前……你是这个地球上最早的通信人，你升起的那注狼烟就是人类远程通信的鼻祖。虽然你对此毫不知情，但这并不妨碍几千年后，中国一家知名通信设备制造商用它的名字命名自己的企业。这自你开始一站一站向你的都城传递的狼烟，有一个专有名词，叫作“烽火”。

2018年某座城市高楼林立的街角，你坐在星巴克品一口卡布奇诺，用右手食指在智能手机上点击“下单”，那只被你仔细研究并看好的蓝筹股立刻被委托买入。3~5分钟的焦急等待，股市开盘了，系统提示交易成功！你长舒一口气，顷刻间，大盘飘红，你买的那只股票已涨停！你通过钉钉给公司发了消息，又抿了一口咖啡，突然觉得这场景似曾相识。几千年前，烽火台上的将士也是这样长舒一口气，呷一口烈酒，仰天长啸！因为他看到救兵汹涌而来，敌人已闻风而逃！

开始，人类认为世界是由物质构成的；到了20世纪，爱因斯坦将质量和能量统一了，因此人类又说，世界应该是能量的，因为物质从本质上讲就是由能量构成的。于是我们意识到，过去常常说的信息，其实就是组织和调动能量的法则。人类发明语言、文字、信件、烽火台，并发明了纸张、印刷术、打字机、计算机，都是为了便于信息传播的。正是有了语言和文字，人类才与其他生物逐渐产生了区别，并逐渐成为地球的主人。今天我们知道，科学的本质就是通过一套有效的方法去发现这样一些特殊的信息。现代通信就是运用科学，将这些信息从人和自然界中发掘出来并传送到人类希望到达的任何地方，于是有了电报、电话、广播、电视、雷达、计算机、互联网、移动通信，以及云计算、量子计算机和量子通信。信息及其传递，是贯穿整个人类历史的一条主线。

让我们看看人类通信的发展史。

●古代通信，人类基于最原始的需求，利用自然界的基本规律和人的基础感官可达性建立通信系统，人们最熟悉的要算“烽火传讯”和“信鸽传书”了。

●近、现代通信，从电磁技术引入通信开始，人们尝试使用电话、电报、传真，到成规模地建设各种电信网络和专网网络，并创造了性能更强、质量更好、效率更高的数字通信、光纤通信。

●当代通信，是指在前人基础上创造的移动通信、互联网通信、物联网和融合技术的发展历程。

●未来通信，是在目前人类文明和科技发展的基础上，在可以预见和不可预见的未来，更加强大的通信工具变革和更加广阔的通信发展前景。

前文说过，要拿具体的“大事件”来进行清晰地分界是不太现实的。比如当代通信，一般被认为是从1996年至今的20多年间，其主要的特征是移动通信和互联网的高速发展，但是早在1979年，摩托罗拉就在芝加哥建成并试运行了高级移动电话业务（AMPS, Advanced Mobile Phone Service）。有趣的是，通信界任何一个时代里，都有专家把当前最先进的技术称为Advanced技术，孰不知，很快，这种先进技术会被更先进的技术所取代）。互联网则是源于美国军方1969年开始建设的基于分组交换技术的网络——ARPAnet。因此，无论采用何种分类方式，都不可避免地要模糊边界，强调技术的最强盛状态。

另外，本文的“古代”“近、现代”和“当代”与任何国家的历史教科书中所定义的相同名词不完全相同。我们这样命名，是希望从通信的眼光看历史，不要过分拘泥于特定日期发生在特定历史阶段的事件。

古代通信：信息沟通的起步

动物之间也是有沟通的，但不能称之为“通信”。蚂蚁通过互相碰触角、狼嚎时会发出不同的声音、鸟通过各种叫声来向同伴表达不同的含义，也许是发现了一块不错的食物要与同伴共飧，也许是发现了敌情通知同伴做好战斗准备。

通信本就是人类的本能，但远距离通信则起始于文明时代。人类最早有记录的用于远距离通信的工具之一，就是本章开始时讲述的烽火，用于“发送”烽火的设施，就是“烽火台”。

用当前的分类方式去理解，烽火通信是典型的“存储——转发”模式的、半双工模式的（两个相邻烽火台可以互相传递但不能同时互相传递信息）、广播模式的（传递给所有可看到的地方）、可视模式的（必须视线可达）、无线模式的（没有连接线）、数字化的（只有两种状态“无”和“有”）通信手段。

当最临近敌人的烽火台的守候部队发现敌情，守兵会点着狼烟。古人用“狼烟四起”来形容到处都在爆发战争，说明国家危机，百姓要遭殃！距离这支发现敌情的部队比较近的烽火台守候部队接着燃起狼烟，逐步向国内扩散，很快，国家中枢机构就得知前线有敌情，要么派兵增援，要么赶快挑几个王昭君这样的美女去议和。中国历史上著名的昏君周幽王，一手导演了“烽火戏诸侯”的闹剧（见图 1-1），就是利用诸侯国对烽火系统的敏感，在无敌情的状况下点燃狼烟，等各路诸侯派兵救驾，当诸侯们火速赶来，却发现这不过是个玩笑，周幽王的目的只是为了博得褒姒开颜一笑，却因此失去了诸侯们的信任，在真有敌情的时候却无人来救驾。这个故事给了通信人几点启示：

- 第一，古代的军事通信工具简陋而有效，传送介质可以借助一切自然力量和周边环境；
- 第二，再先进的通信工具，也需要合适的人使用它，才能发挥效能；
- 第三，千万别拿两样东西开玩笑：一个叫作战争机器，一个叫作通信设施。而周幽王，都违反了。



图 1-1 烽火戏诸侯

人类发展几百万年，是通过几个网络而发展起来的。最早是水网。西亚的两河流域、印度的两河流域、中国的黄河流域，淡水养育了勤劳、勇敢、智慧的人类，孕育了光辉、灿烂的古代文明；接着是路网，驿路、驿站以及当代的公路、铁路和飞机航路的使用让人与人之间的沟通越来越密切，有了路网，人类创造了一种文本语言的通信手段，也就是我们常说的“信件”；到了当代，电话网、互联网、移动互联网等通信网的发展，让人类进入新的历史阶段。因此可以说，人类的文明史，就是网络的发展史。

近现代通信：电磁通信和数字时代的起步

利用电和磁的技术，实现通信目的，被称为“电信”。近代通信起始的标志，就是开始应用“电信技术”。而电磁技术最早的电信应用，就是电报。人类发电报的历史已有 170 多年。

电报的原理是人们用长、短音电信号来标识文字或者词汇，相当于给每个字（或字母）做了一个编码，发报员只要按照编码把文字或者词汇翻译并通过专用的发报装置发送出去即可。在 20 世纪 90 年代以前，企业在邮电部门（那时候国内邮政和电信还没分家）注册后可获取一个“电报挂号”。

任何时代通信技术的发展都会受制于当时的科学基础。而在 100 多年前整个通信行业还未体系化、专业化，因此最初的技术突破是众多散乱的点，相互之间联系并不紧密，而其发展规律也不够清晰。

为了让读者更容易理解，让我们看看西方科技高速发展的同时，中国正在做着什么。通过这种对比，一方面让读者感性地了解一下中国的通信技术发展为什么暂时落后于西方发达国家水平；另一方面，也希望中国当代通信人“知耻而后勇”，为我国通信技术的发展尽快赶超世界先进水平而努力！

1835 年，美国雕塑家、画家、科学爱好者莫尔斯先生发明了有线的电磁电报。莫尔斯发明了以他自己名字命名的莫尔斯电码——利用“点”“划”和“间隔”，实际上就是时间长短不一的电脉冲信号的不同组合来表示字母、数字、标点和符号。（5 年后，中国结束了长达 2000 多年的封建社会。）

1860 年，意大利人安东尼奥·梅乌奇（Antonio Meucci）首次向公众展示了他的电话发明，并在纽约的意大利语报纸上发表了关于这项发明的介绍。美国国会 2002 年 6 月 15 日的 269 号决议确认梅乌奇为电话的发明人。

1875 年，苏格兰青年亚历山大·贝尔（A.G.Bell）发明了电话机，并于 1878 年在相距 300km 的波士顿和纽约之间进行了首次长途电话实验，获得了成功，后来就成立了著名的贝尔电话公司。

真正被公认的第一次电话通信是 1892 年纽约到芝加哥的线路开通当天实现的。贝尔因此被认为是现代电信的鼻祖，以其名字命名的实验室和电信运营商至今还活跃在美国以至全世界的电信领域。（1881 年，英籍电气技师皮晓浦在上海十六铺沿街架起一对露天电话，付 36 文制钱可通话一次，被认为是中国的第一部电话。）

1878 年，磁石电话和人工电话交换机诞生。

1880 年，发明了供电式电话机，通过二线制模拟用户线与本地交换机接通。

1885 年，发明步进制交换机。

1892 年，那个著名的殡仪馆老板史瑞乔发明了步进式自动电话交换机。（中国历史上，6 年后的 1898 年，戊戌变法开始并迅速失败。）

电报和电话开启了近代通信的历史，但是当时都是小范围的应用，在第一次世界大战以后，发展速度有所加快。

1893 年，美籍塞尔维亚裔科学家尼古拉·特斯拉（Nikola Tesla）首次公开展示了无线电通信，他所制作的仪器包含电子管发明之前无线电系统的所有基本要素。

1895 年 5 月 7 日，俄国物理学家亚历山大·波波夫在圣彼得堡俄国物理化学会的物理分会上宣读了论文《金属屑同电振荡的关系》，并且表演了他发明的无线电接收机。为了纪念波波夫在无线电方面的卓越贡献，1945 年 5 月 7 日，苏联政府将 5 月 7 日规定为苏联无线电节，俄罗斯人一致尊波波夫为无线电发明人。

1895 年，意大利工程师古列尔莫·马可尼（Guglielmo Marconi）发明了无线电报，并于 1896 年在英国获得了无线电技术的专利。1901 年 12 月，马可尼将无线电信成功地穿越大西洋，从英格兰传到加拿大的纽芬兰省。1909 年 11 月，马可尼因为发明无线电的功绩，荣获了诺贝尔物理学奖。

1904 年，美国专利局将特斯拉 1897 年在美国获得的无线电技术专利撤销，转而授予马可尼发明无线电的专利，据说这一举动可能是受到托马斯·爱迪生、安德鲁·卡耐基等马可尼在美国的经济后盾人物的影响。1943 年 6 月 21 日，在特斯拉去世后不久，美国最高法院宣布，尼古拉·特斯拉提出的基本无线电专利早于其他竞争者，无线电专利发明人是尼古拉·特斯拉（无线电发明之时正处于清朝末期，无线电技术发展落后，但其开始应用的时间几乎与世界同步。1899 年，清政府购买了几部马可尼猝灭火花式无线电报机，安装在广州两广总督督署和马口、威远等要塞以及南洋舰队各舰艇上，供远程军事指挥之用。这是无线电报业务在中国的首次使用）。

1919 年，发明纵横式自动交换机。（中国革命史的重要篇章——五四运动爆发。）

1930 年，发明传真、超短波通信。（第二年，“九·一八”事变爆发。）

20 世纪 30 年代，信息论、调制论、预测论、统计论获得了一系列的突破。

1935 年，发明频率复用技术，发明模拟黑白广播电视。（一年后，红军长征胜利结束；两年后，七七事变，抗日战争全面爆发。）

1947 年，发明大容量微波接力。（两年后的 10 月 1 日，中华人民共和国成立。）

1956 年，发明欧美长途海底电话电缆传输系统。

1957 年，发明电话线数据传输。

1958 年，发明集成电路（IC）。

20 世纪 50 年代以后，元器件、光纤、收音机、电视机、计算机、广播电视、数字通信业大发展。

1962 年，发射同步卫星。（两年后，中国的第一颗原子弹爆炸试验成功。）

1972 年，发明光纤。

1972 年以前，只存在一种基本的网络形态。这就是基于模拟传输、采用确定复用、有连接操作寻址和同步转移模式（STM）的公众交换电话网（PSTN）形态。这些技术体系和网络形态至今还有使用。

中国的电信网是从电话网开始的。1880 年，由丹麦人在上海创办的第一个电话局，开创了中国通信历史的重要一页。

1939 年，世界上第一台电子计算机的试验样机 ABC 开始运转。1946 年，莫克利和艾克特制造的电子计算机 ENIAC 诞生，它采用了更多的电子管、运算能力更强大，高速计算能力成为现实，二进制的广泛应用触发了更高级别的通信机制——“数字通信”，加速了通信技术的发展和运用。

1972 年光纤的发明和 CCITT（ITU 的前身）通过 G.711 建议书（语音频率的脉冲编码调制——PCM）及 G.712 建议书（PCM 信道音频四线接口间的性能特征），标志着电信网络开始进入数字化发展历程。

1972 年到 1980 年的 8 年间，国际电信界集中研究电信设备数字化，这一进程，提高了电信设备的性能，降低了成本，并改善了电信业务的质量。最终，在模拟 PSTN 形态的基础上，形成了综合数字网（IDN）的形态。在此过程中有一系列成就值得我们关注：

- 统一了语音信号数字编码标准；
- 用数字传输系统代替模拟传输系统；
- 用数字复用器代替载波机；
- 用数字电子交换机代替模拟机电交换机；
- 发明了分组交换机。

这个时代是中国命运的转折点。应该说，就是因为改革开放，彻底解放的生产关系带来了生产力的巨大发展，才让今天的中国人几乎与世界同步地享受着高科技的通信技术带来的全新体验，也让中国人感受到了全球移动通信和互联网时代一日千里的变化。

当代通信：移动通信和互联网时代

目前全球范围内，语音业务占比不断下降，数据业务成为主流。随着超高清视频（4K）、虚拟现实、智慧家庭、云计算、物联网、大数据等创新业务的兴起，用户对于网络带宽的需求持续爆发式增长。如果我们非要给当今时代命一个名的话，那么我们认为应该称为“全连接时代”。

看过中国香港电影的人，说起对 20 世纪 80 年代末、90 年代初中国香港社会的印象，大家会不约而同地提到“大哥大”。“大哥大”在当时是身份、地位、财富的象征。中国内地近几十年受到中国香港文化的影响可谓很深。中国香港无线电视台的电视剧、成龙的电影、“四大天王”的歌曲和中国香港的“大哥大”，影响了一代中国人。而中国内地的移动通信就是从那时候开始逐步发展起来的。

让我们看看这个时代全球通信界标志性的里程碑事件。

1982 年，发明了第二代蜂窝移动通信系统，分别是欧洲标准的 GSM、美国标准的 D-AMPS 和日本标准的 D-NTT（3 年后中兴通讯成立）。

1988 年，“欧洲电信标准协会”（ETSI）成立（华为公司成立）。

1990 年，GSM 标准冻结（北京亚运会成功举办）。

1992 年，GSM 被选为欧洲 900MHz 系统的商标——“全球移动通信系统”。

2000 年，提出第三代多媒体蜂窝移动通信系统标准，其中包括欧洲的 WCDMA、美国的 cdma2000 和中国的 TD-SCDMA（中国的第一次电信体制改革已经完成，中国移动通信集团成立）。

2007 年，ITU 又将 WiMAX 补选为第三代移动通信标准（第二年，北京奥运会成功举办）。

2012 年，ITU 将 LTE-Advanced 和 WirelessMAN-Advanced（802.16m）技术规范确立为第四代移动通信技术（简称 4G）国际标准（中国主导制定的 TD-LTE-Advanced 和 FDD-LTE-Advanced 同时并列成为 4G 国际标准）。

2018 年，第五代移动通信技术（简称 5G）独立组网标准正式确立。

而随着互联网爆发性增长，更是彻底改变了人的工作方式和生活习惯。看看一些标志性的里程碑。

1964 年，美国 Rand 公司的 Baran 提出无连接操作寻址技术，目的是在战争残存的通信网中，不考虑时延限制，尽可能可靠地传递数据报。

1969 年，美军 ARPANET 问世。

1979 年，局域网诞生（两年后中国刚刚恢复高考）。

1983 年，TCP/IP 成为 ARPANET 的唯一正式协议，伯克利大学提出内含 TCP/IP 的 UNIX 软件协议。

1989 年，欧洲核子研究组织（CERN）发明万维网（WWW）。

1996 年，美国克林顿政府提出“下一代 Internet 计划”（NGI）。

随后的 20 年，一大批太阳、月亮和星星一样的企业横空出世，一大批业界精英粉墨登场，一大批新技术、新思路、新理念、新思维风起云涌、叱咤风云……

2005 年，在突尼斯举行的信息社会峰会上，国际电信联盟（ITU）发布了《ITU 互联网报告 2005：物联网》，正式提出了物联网的概念。

同一年，亚马逊发布 AmazonWebServer（AWS）云计算平台，云计算的序幕正式拉开。

2008 年，史蒂夫·乔布斯向全球发布了新一代的智能手机 iPhone3G，从此开创了移动互联网蓬勃发展的新时代，移动互联网以摧枯拉朽之势迅速席卷全球。同年，中国 3G 牌照发放。

2008 年，《自然》杂志专刊提出了 BigData 的概念，大数据进入公众视野。

2012 年，4G 国际标准确立。

2013 年，工业和信息化部向三大电信运营商发放了 4G 牌照。

2017 年，华为超过爱立信，成为全球第一大通信设备制造商。

进入 21 世纪以来，互联网深刻改变着人们的生产和生活方式，互联网的终端正在迅速扩展开来，除了最常用的计算机、电视之外，利用手机、无线上网卡、PAD 等移动终端接入互联网的情况也越来越普遍，我国网民规模在 2017 年年底接近 8 亿人。未来家用电器、家居设施、交通工具也都会接入互联网，移动终端几乎成为人们身体功能的延伸，人类真正进入完全意义的网络时代。

新技术的探索是随着经济的发展、各种自然基础学科的发展、人们生活方式的改变而不断深入的。既然是探索，就很难一帆风顺，许多被看好的技术惨遭淘汰，而很多不被看好的技术却异军突起。

未来通信：大融合时代

通信技术是以现代的声、光、电技术为硬件基础，辅以相应软件来达到信息交流的目的。20 世纪末开始，多媒体的广泛推广、互联网的应用、移动通信的蓬勃发展，极大地推动了通信业的发展，现代物理学家和通信专家将不断提高声、光、电的传送能力。再加上以大数据、云计算、物联网、人工智能、融合通信、智慧城市/社区为代表的新的 IT 架构，极大地刺激了通信业新一轮的技术演进和产业升级。可以预见，未来的通信行业，将向着速度更快、损耗更低、移动性更强、连接性更快捷、融合性更彻底的方向发展。无处不在的通信网络，将在人与人、人与群体、群体与群体、人与物、物与物之间建立起井然有序的纽带，数据在光纤上、空气中有条不紊地传送，在每个节点的 CPU 里不断被运算、在磁盘里被存储、在交换芯片上被转发、在终端上被展示，这所有的一切，都将为几十亿人类提供更大的便利、谋求更大的福祉。

我们可以自豪地说，未来的电信网络一定是朝着技术融合、业务融合的方向发展，全面连接人和物，并最终全面融入人类生产生活的每个角落。

然而未来的通信究竟是什么样？通信终端是什么样？路由器将何时退出历史舞台？5G 后面还有 6G、7G 吗？先别急，看看我们老祖宗留下的警世恒言：“道可道，非常道。”规律总是有的，是可以描述的，但也是要用用心去体会的。今天人类的预测能力，还远远没有达到准确预测未来的地步。那么我们就更不敢无端猜测了。

与其盲目地预测明天，倒不如多发现一些规律来推演未来。我们知道，任何科学技术都有其“先修课”。贝尔固然伟大，但他也是站在巨人的肩膀上。如果没有数学、物理学、电磁波原理、几何学、材料学、电力学等学科的长足进展，没有牛顿、富兰克林、瓦特、爱迪生、贝尔等一大批先驱科学家、工程师的不断探索，绝不可能有世界上的第一部电话，也绝不会有通信高度发达的今天！未来的通信技术，绝对不会脱离今天的科技水平而“横空出世”，通信技术，只是人类智慧的结晶，没有社会的进步、科技的发展，通信不可能脱离当时的社会历史条件独立发展起来。然而，通信技术又是人类社会发展到一定阶段的必然产物，没有通信技术的不断进步，也不会有其他学科的高速发展。沟通，是提高效率的基本要素。

未来通信将会如何，期待广大读者们来勾画！宽带、多媒体、云计算、移动、人工智能、大数据……这些关键词的任意组合，都可以造就无数让我们热血沸腾的通信业未来的图景！套用一句广告词：“一切皆有可能！”

第2章 用什么实现通信

贝尔和他的助手华生，又一次失败了。是设计不对？还是制作有误？也许用电传递声音本身就是不可能的？1876年这个宁静的傍晚，注定要改变人类。然而这时，贝尔根本不可能对未来有什么期待。正当他静静地坐在躺椅上苦思冥想时，一阵吉他弹奏打破了他的思绪。声音优美而响亮。为什么吉他声音如此大，而电流传导到对面的声音却如此之小？

突然，他意识到，送话器和受话器的灵敏度太低，所以声音微弱，如果像吉他一样，利用音箱产生共鸣，就一定能听到声音！他和华生连夜用床板制作音箱，改装实验装置，然后回到各自屋子开始实验。这时，贝尔不小心把桌上的一瓶酸性溶液碰翻了，溶液洒在西装上，已经有些穷困的贝尔懊恼地大叫“华生，我需要你马上过来！”想不到这句普通得不能再普通的话，竟成为世界上第一次用电传送的人类的声音（见图2-1）。

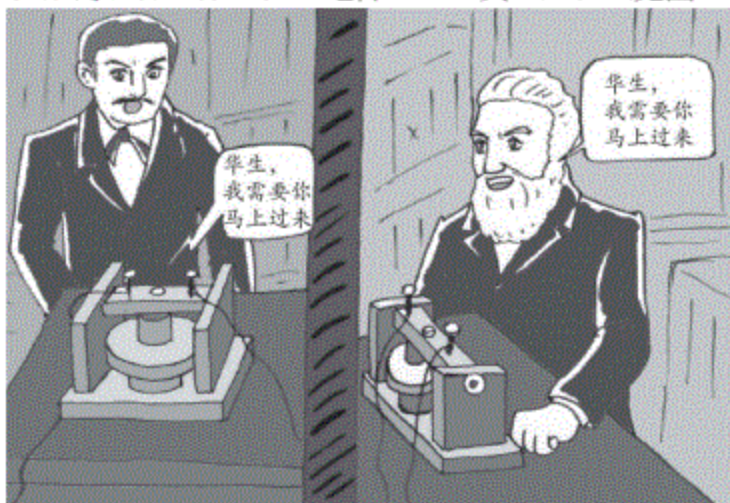


图2-1 贝尔发明电话

当代的通信系统已经基本满足了人们生产生活的需要。传送声音的，有了；传送图像的，有了；传送文件的，有了；传送视频的，有了。电话、传真、手机、计算机、互联网、电子邮件、PAD、微信……在通信业高速发展的今天，很多手段之间的边界已经淡化，形形色色的通信终端，你中有我，我中有你。作为通信人，要学会在这种情况下清晰地剥离出它们原本的特色。虽然我们知道嫁接的水果营养可能更丰富、味道更鲜美，但是为了吃到更好的水果，我们必须学习被嫁接前这两种水果的自然特性。

人类最大的缺点就是永不满足，人类最大的优点也是永不满足，人类能够不断进步，其源动力也是永不满足。今天丰富多样的通信手段，让我们的世界绚丽多姿，让人类生活便捷而富有乐趣。我们可以预见，未来的通信手段将更加多姿多彩且不拘一格。

我们常用什么东西进行通信？我们常常看到的、常常看不到的、昨天能看到的、今天能看到的、明天可能会看到的，在此给各位列举几例。我们后面谈论的所有通信技术原理、协议、规范、术语，都是为这些通信手段服务的。历史上的“通信”方式如图 2-2 所示。



图 2-2 历史上的“通信”方式

在通信技术开始进入人类社会以后，电报、传真、电话、传呼机、手机、计算机、可视电话、电视机，成为现代人类远距离沟通的基本工具（见图 2-3）。



图 2-3 近现代的通信方式

电信网中的通信工具

1.电话机——通信网昔日第一终端

电话机是指“固定电话”，曾经是人类最普遍使用的通信终端，统治全球的通信界近100年的时间。电话机被人称为普通老式电话系统（POTS, Plain and Old Telephone System）——这说不定是手机的发明者起的名字——普通、老式，极尽奚落之词。而普通电话却并不以为然，百年沉淀，让它深入人心，政府、企业，要彻底放弃电话机，恐怕不是短期能实现的事。我们对电话机应该再熟悉不过了吧！一根从运营商那里拉过来的铜线，连接到电话机的插孔上，接头插入接口时会发出清脆的“咔嚓”声。有的固定电话还带有子母机功能，母机带有发射装置，可以带多部无线子机，在距离几十米以内，子机可以像手机一样拿在手里，并在移动中通话。这就是无绳电话，它是利用无线信号将固定电话扩展，从而实现家庭内的“移动通信”。

电话机是将声音和电磁信号互相转换的最常用的工具。别小看电话机，人类自从有了文字，经历几千年才发明了电话。电话机的各个模块都体现了人类的智慧。无论从电子学、通信学还是机械学看，电话机都是人类的经典发明！

2.传真——不可或缺的通信配角

传真最有价值的地方在于能够将印章、签名通过网络传送到对端。传真件在绝大部分国家的法律上是具有效力的。自诞生之日起，传真在通信行业中的地位始终是配角，电话盛行的时代，传真终端的数量远远小于电话机的数量，但它仍是不可或缺的通信手段。政府机关、商务企业，都会安装传真机传送和接收重要文件。

传统的传真终端是传真机，两台传真机分别连接到电话交换网上，通过拨打对方的电话号码，就可以相互收发传真了。现在，越来越多的人通过互联网发送传真，有的根本不用传真机，而是用计算机上的传真软件收发传真。

传真机的发明构思形成在160多年前。1843年，英国人亚历山大·贝恩（Alexander...Bain）就申请了传真机的专利，它比电话专利整整早了30年！但是直到1925年才由美国贝尔实验室利用电子管和光电管制造成世界上第一台传真机，使传真技术进入到实用阶段。

传真机将需发送的原件按照规定的顺序，通过光学扫描系统分解成许多微小单元（称为像素），然后将这些微小单元的亮度信息由光电变换器件顺序地转变成电信号，经放大、编码或调制后转化为一种被称为“霍夫曼编码”的数字信号送至信道。接收机将收到的信号放大、解码或解调后，按照与发送机相同的扫描速度和顺序，以记录的形式复制出原件的副本。传真机按其传送色彩，可分为黑白传真机和彩色传真机；按占用频带可分为窄带

传真机（占用一个话路频带）和宽带传真机（占用 12 个话路、60 个话路或更宽的频带）。

3.手机——时尚先锋

手机，也称移动电话，严格地说应该叫作“个人手持移动终端”，这是学名，学习才用的名，生活中千万别这么叫，否则会被别人笑话。固定电话是通信网昔日的第一终端，手机是通信网当今第一终端，截止到 2018 年 4 月末，中国 3 家基础电信运营商的手机用户数达到 14.8 亿，而固定电话用户数不足 2 亿。

人类通信史上的第一次手机通话是在 1973 年 4 月 3 日，摩托罗拉前高管马丁·库珀用自己研发的手机在街上给竞争对手贝尔实验室打了一个电话，这一天也被后人定为手机的“生日”，马丁·库珀成为令人敬仰的“手机之父”。所有的通信技术和手段都在融合，手机也不例外。传统手机厂家制造的常规意义上的“手机”，无论是在界面上，还是在功能上，越来越多地学习 PDA，形成了智能手机，像个人电脑一样，具有独立的操作系统、独立的运行空间，可以由用户自行安装软件、游戏、导航等第三方服务商提供的程序，并可以通过移动通信网络来实现无线网络的接入。智能手机的鼻祖是摩托罗拉公司 1999 年推出的一款名为 A6188 的手机，它支持无线上网，是全球第一部触摸屏手机、第一部中文手写识别输入的手机。而把智能手机发扬光大的，无疑是苹果公司创始人史蒂芬·乔布斯。

目前，全面屏、双摄/四摄、高像素摄影摄像、指纹/人脸识别、人工智能（AI）正在成为手机产品的新标配。

4.寻呼——大盛大衰的落魄平民

“手机、呼机、商务通，一个都不能少”，这是 20 年前非常流行的广告语。那时，拥有一台寻呼机是很多人的梦想。呼机在身边不断响起的声音清脆而震撼，因此人们根据这个声音给呼机起了个别名，叫作“BP 机”。“请您速回电话”，是那个时代寻呼机收到的最多的内容了；“呼我”，是那个时代最流行的广告语。随着手机的普及，寻呼迅速退出了通信业主流市场，全国成千上万家寻呼公司一转眼烟消云散。

5.电报——逐渐消逝的电波

想起 20 世纪 80 年代初的电视广告，经常会看见“该厂生产的***牌**，质量可靠，实行三包，电话：12345，电报挂号：0123。”

电报挂号！20 世纪 80 年代前的人恐怕对这个词都不会太陌生。这是百年来通信常青树——电报业务——地址码。对于时间敏感型通信要求而言，在电话不够发达、互联网还在实验室里的年代，电报是企业之间、个人和家庭之间极为重要的通信手段。电报的实时

性比较强，这边发出去立刻抵达对方，比信函速度快很多。电报是按字收费的，于是人们就尽量减少字数，从而节约费用。

就有这么一个小故事，出差在外的老公发电报问妻子，“知道我行李箱的密码吗”，妻子回答，“知道”。笑话归笑话，但也反映出人们在电报内容上惜字如金的情形。比较一下现在通过电子邮件发消息的长篇大论，今天的人们是多么幸福啊！

当然，随着电话的迅速普及，互联网的高速发展，新的通信工具逐步取代了电报，电报业务已退出了大众市场。2017 年，北京电报大楼营业厅正式宣布停业。

互联网的通信手段

互联网是近十几年高速发展起来的通信手段。互联网的终端正在迅速扩展，除了最常用的计算机之外，利用手机、无线上网卡、MiFi、PAD 等移动终端接入互联网的情况也越来越普遍，很多家用电器也都接入到互联网上了。大家平时上网所使用的万维网（WWW，World Wide Web）是最基础的应用，在互联网上衍生的各种应用，如电子邮件、网络电话、网络传真、即时通信（IM，Instant Message）、网上购物、电子商务、网络游戏、网络聊天等，都是基于互联网通信手段的。就连千百年来人们读书的习惯，都发生了巨大的变化。有人形象地说：“过去人们习惯在文字的海洋里潜水，现在则在奔腾的信息海洋上冲浪！”

互联网正在彻底地改变着人们的生活。电子邮件逐步代替了普通信函，网络新闻对传统的报刊发行量造成了很大影响，日记变成了微博或朋友圈，知识付费如火如荼……当然，网络对一些青少年太有吸引力了，以致于把过去玩沙包、踢毽子的时间挤出来用于网络游戏，这都是不争的事实。

很多人说互联网是潘多拉的盒子，打开的未必都是好事。那么如何管理互联网内容，如何让互联网向着对人类有利的方向发展，将是未来互联网研究的重要课题之一。

接下来让我们看看互联网通信的常用工具。

1. 计算机——人类最伟大的生产工具

技术的融合已经说不清很多东西。计算机是什么？仿佛每个人都可以指着自己的计算机说，就是它。但是要给计算机这个名词一个极准确的定义，却很不容易。从字面意思上讲，能运算的机器就是计算机，那么，游戏机、电子表、计算器、数控机床、带有智能芯片的家用电器，都是计算机——这只是广义的“计算机”。本节所说的“计算机”是一般意义上大家理解的狭义的“计算机”，带有 Intel 或者 AMD 的 CPU，带有内存、磁盘，安装操作系统和应用软件的计算机。它可能以台式机的形式存在，也可能是笔记本、上网本，还有可能是服务器或者工控机。

迄今为止，计算机是人类发明的最伟大的生产工具。

计算机在通信网络中用于接入互联网，它所涉足的通信方式非常多。如 WWW、电子邮件、网络传真、即时通信、网络电话（如软电话）、办公自动化、呼叫中心、电子商务，等等。最为明显的例子是，互联网的内容信息，都是在计算机中进行存储的。

计算机的 CPU 是核心处理部件，一块网卡（或者无线网卡）是通信的必备武器，硬盘或者光盘是其存储媒介。鉴于大家都熟悉计算机，我们就不多讲了，但还是要注意，它是个很宽泛的名词，有时候你分不清一部 PAD 或手机和一台计算机的区别，在未来的某一天，这些差异也许会完全消失。

在通信技术里面，尤其是电信设备里面，计算机可能以很多形式出现，比如一块板卡，你可能根本看不出来，但是它的确是一台计算机，因为它也有 CPU、内存，可能还有硬盘或者 Flash 存储设备，也许没有声卡、显卡和显示器，但是你不能否认它具有很强的运算功能，甚至软硬件的设计架构都与普通 PC 一模一样。

与“狭义的”计算机系统相对应的，是一种被称为“嵌入式系统”的东西。嵌入式系统绝大部分也有 CPU、存储设备（如硬盘或者 Flash）等，但是其 CPU 一般采用专用的 CPU，价格与 Intel 或者 AMD 制造的 CPU 相比便宜很多（有的只有几十元），专门服务于某种特定应用，如电视机顶盒、微波炉温控系统，整体价格低廉很多。其实，嵌入式系统是一种专用的计算机系统，是广义的“计算机”的一种，而我们平时所说的“计算机系统”则是通用的系统。我们将在第 20 章向读者讲述嵌入式系统。

我国的计算机行业在努力追赶世界潮流。很多知名企业都已在市场中建立起自己的品牌。2005 年，联想收购 IBM 的笔记本事业部，成为全球 IT 行业的重大事件。但是，我国的计算机行业技术含量依然不高，核心的技术，如 CPU、内存、显卡等计算机主要部件都不得不依赖进口，一直处于能被人卡脖子的状况。

计算机软件方面，我国也处于较弱势的地位，除了杀毒软件的一部分财务软件外，在操作系统、办公软件、游戏、图形图像处理、监控和管理软件方面，都达不到国际先进水平。应该说，在这方面，中国依然有很长的路要走。结合通信领域，目前我国自主知识产权的通用软件非常匮乏，绝大部分通信软件都是专用定制的软件，如电信 BOSS 系统、DNS 系统、网管系统、云管平台、DPI 系统、大数据分析平台等。

2. 电子邮件——逐步取代普通信函

电子邮件，不知道这个词在名词分阴阳性的语言里，是否属于阴性，刚刚普及时，很多年轻人喜欢把它叫作“伊妹儿”，“她”是企业办公自动化最基础的应用，也是个人用户最青睐的互联网应用之一。这个“伊妹儿”出现后，纸介质的信函，除了明信片、公函外，流行了上千年的“家书”一下子消失了（见图 2-4）。编辑方便、传送速度快、无纸化、成本低是电子邮件相比于纸介质邮件最大的特点，是她最惹人喜爱的地方。

要实现电子邮件功能，每个人都需要拥有一个邮件账号，或者叫作“邮箱地址”，形式为 name@domain.xxx，name 为个人的姓名标识，domain 为域标识，对企业而言是企业的公司名称，如 mike@microsoft.com；对 ICP 而言是 ICP 的名称，如 abc@263.net；xxx 是组织或者企业，如 net、com、org 等。电子邮箱有一定的磁盘存储空间。虽然叫作“邮箱账号”，实际上并不存在这么一个“箱子”，但是通过电子邮件地址，可以精确地把信息传送到目标接收者。电子邮件有单发、群发等功能，由于几乎没有传递成本（除了宽带费用以外不需要邮筒和邮差），于是也变成了广告推销、信息发布的上选平台，全世界

30%的邮件都是企业或个人群发的广告邮件，其中的绝大部分我们不得不称为“垃圾邮件”。

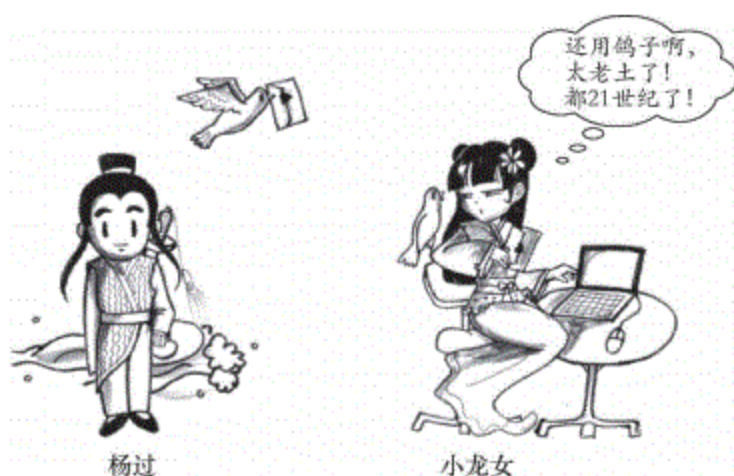


图 2-4 电子邮件替代了过去的信件

3.即时通信——时尚年代的通信新贵

自 ICQ 开始，网络上流行着诸如微信、QQ、Skype、陌陌、淘宝旺旺之类的软件，用户需要下载软件，注册账号。登录到网络中以后，可以添加好友，和好友文本聊天，有的还可以视频聊天、群聊、发送文件等。这些软件有一个专业的名称——即时通信。

现在常用的即时通信软件，还带有其他信息频道，如游戏、购物、广告等。

MSN 是美国微软公司（Microsoft）提供的，后来更名为 Windows Live Messenger，2014 年微软关闭了 Windows Live Messenger 并引导用户迁移至 Skype。

QQ 是腾讯公司提供的，前身是 OICQ，在美国版的 ICQ 前面加了一个字母“O”。最早叫 OICQ 的意思是：Oh, I Seek You！（哦，我找你！）。

2011 年，腾讯推出一款通过网络快速发送语音短信、视频、图片和文字，支持多人群聊的手机聊天软件——微信。用户可以通过微信与好友进行形式上更加丰富的类似于短信、彩信等方式的联系，而微信更成为一个集即时通信、生活服务、朋友圈、支付、游戏等内容为一体的综合系统。2018 年，微信的全球用户数已经达到惊人的 11 亿之多！

钉钉是阿里巴巴集团为企业打造的一款集商务办公、沟通会议为一体的通信平台，很多商务应用功能也确实颇具特色。

专业领域的通信工具

1. 对讲机——我服务于专网应用

对讲机是用途很广的专网通信工具，是“专用”工具。说其“专用”，是因为其客户群主要是政府机构或大企业的专用系统，如公安、保安、公路、石油开采、工厂调度等，很多车友会也采用对讲机来相互联系，并非是对大众提供普遍服务的系统。

对讲机的使用主要是一对多的通话，选择群组很方便，一个地方有情况，只要一个人通过对讲机发布出去，群组中的其他人都是可以听到，这样便于快速地开展工作。只要把一个群组使用的机器调整为一个频率就可以了。

对讲机的工作方式比手机略微复杂，不按住“通话”键时只能听，要说话时按住“通话”键，同一个群组的人都能听到，这个功能叫作“Push To Talk (PTT)”。对讲机也可以单独通话，但必须两人约定转换同一个频率。对讲机的缺点是通话内容不够安全，在一定的范围内，只要有另一个频率相同的对讲机，就可以听到通话内容。

2. 视频通信——沟通看得见

视频通信是用可见的方式进行远程通信。一根网线（甚至连网线基本都不需要了）、一个屏幕、一个摄像头，齐活啦！今天，视频通信系统已经广泛地应用在各个行业中——会议、娱乐、监控、医疗、教育，从QQ、微信上的视频对聊，到网络直播间的在线直播，到高分辨率大型视频会议系统，都可以归为“视频通信”（见图2-5）。



图 2-5 视频通信，大有文章可做

自远古以来，人们就有随时能看到对方的冲动。“我住长江头，君住长江尾，日日思君不见君，共饮长江水”，古人思念的哀怨，引发了人类不懈的努力。人们从发明照相机开始，就知道可以将自然景观和图像存储下来；从贝尔发明了电话开始，人们就知道可以把声音从天涯发送到海角；接着，人们又将看到的图像通过与照相机类似的镜头，经过数学家创造的处理算法后，经过物理学家研究的导线或者光纤传送到对端，并在显示器上显现出来。你在长江头莞尔一笑，长江尾的张三冲你点头招手，古人的梦想，在现代人的智慧面前成为现实！利用视频通信，你很难再有“一日不见，如隔三秋”的惆怅，很难再有“士隔三日，当刮目相看”的必要。有了视频通信，地球就真的成了同一个“村落”，天涯和海角的距离，恐怕也只能用带宽来测量了。

在电力、石油、仓库、机房、社区、道路应用中，随处可以请一个“千里眼”帮人视察机器、库存、管道、车辆、访客的一举一动，这些“千里眼”把看到的景物通过通信网传送到服务器、磁盘、屏幕，最终射入监视者的眼帘，它是忠实的看门人。这叫“视频监控”。

在教室里、讲桌前，摄像头和电视大屏幕分别对着教授、讲师、学生，教授的答疑解惑、讲师的谆谆教导、学生的好奇提问，相映成趣。这叫“远程教学”。

在办公室，摄像头对着老板、经理、员工、客户、合作伙伴，老板的发号施令、员工的紧张述职、客户的疑惑、合作伙伴的建议，都被对方尽收眼底。这叫“视频会议”。

在医院、病房、诊所，摄像头对着病患和CT、屏幕对着专家和医生，专家和医生们共同会诊、反复论证，而病患则在千里之外。这叫“远程医疗”。

在你家里的写字台上，摄像头对着你，你在北京，你的朋友在遥远的纽约、巴黎或者佛罗伦萨、夏威夷或者世界的任何一个角落，他在那边冲你哈哈大笑，还是那个童年的伙伴，还是那么意气风发！这叫“视频聊天”。

这就是视频通信，是当今社会重要的通信手段。安防行业、远程教育行业，视频通信都是重要的技术基础。“沟通看得见”，不仅仅完成的是人类长久以来的夙愿，更是人类提高自身、改造自然界的重大突破！

家电中的通信工具

1.特殊的通信工具——电视机

1883 年圣诞节，德国电气工程师尼普科夫用他发明的“尼普科夫圆盘”、使用机械扫描方法，进行了首次发射图像的实验。每幅画面有 24 行线，且图像相当模糊。1908 年，英国的肯培尔·斯文顿、俄国的罗申克夫提出电子扫描原理，奠定了电视技术的理论基础。

如果说电视机是通信终端，通信行业的人总是不太情愿，广电行业的人也总是不冷不热。其实，我们来分析一下，电视机有作为通信终端的一切必备要素——信息源、目的地、传送线路、内容、终端、协议，历史让这本属于通信技术的事物归为专门的一类——广播电视，因内容的特殊性而造就了广电行业，而在今天技术和业务的融合、内容的共享，让广电与电信又一次重逢。这次的见面，会带给用户更多的喜悦！

电视只是一个大屏幕，屏幕尺寸、分辨率、清晰度、色彩仿真度是其主要的技术指标，这些内容与通信并没有直接关系。这几十年来，背投、液晶、等离子、LED、3D 电视、裸眼 3D 电视、4K/8K 电视，不断给人们带来新的感官体验。电视机的进步，除了其本身显像技术的进步外，电视信号的接入方式也在不断发生变化。早期的电视是通过天线接收节目，由于频率限制，电视清晰度普遍较差。后来有了同轴电缆，有了 HFC（光纤同轴混合）网，也就是“有线电视”，清晰度大幅度提高。近 10 多年来，随着用户接入带宽的提高，电视节目可以直接通过 IP 网络传送了，市场上有各种各样的 IPTV 盒子，就是通过互联网接收电视节目，并在电视机上呈现图像的。只要有足够的带宽，传送的图像、声音可以更加逼真，于是才有了不断发展的各种电视显示新技术。如 4K 电视，即（UHDTV，Ultra High Definition Television），代表“超高清电视”，是 HDTV 的下一代技术，其分辨率是 3840×2160，总像素达到 830 万，比 1080P 全高清电视高 4 倍，要传送这样的节目，在压缩的情况下需要 50Mbit/s 左右的带宽。4K 电视目前正在普及过程中，由于受到接入带宽的限制，用户量还不足，但可以看到的趋势是 4K 的节目源未来将爆发式增长。如任何能够提高生产力、提高生活品质的新生事物一样，随着国家“提速降费”战略的深入实施，4K 电视很快就能走进千家万户。

2.智能家电

冰箱、空调、音响、汽车、电视，都可以成为通信的手段，它们内置智能的通信芯片或者模块，通过有线或者无线网络与目前的任何通信网络连接，实现远程控制、监控家用电器的目的。随着人工智能时代的到来，它们已经从若干年前的“信息家电”蜕变为“智能家电”，即将微处理器、传感器技术、网络通信技术引入家电设备后形成的家电产品，具

有自动感知住宅空间状态和家电自身状态、家电服务状态，能够自动控制及接收住宅用户在住宅内或远程的控制指令（见图 2-6）。

3.智能穿戴设备

除了家庭里“摆”的产品，还有我们身上穿的东西，都可以实现智能化，这就是穿戴智能设备。苹果的智能手表、小米的智能手环、谷歌的智能眼镜，都被年轻人疯狂地追捧。手表、手环、眼镜、服饰，只要内置智能芯片，可以测量运动距离、可以定位，智能眼镜可以识别不同类型的动植物、识别各种物品等，智能服饰能够感受体温，根据环境做出颜色调整，等等。随着智能芯片的日臻成熟，人工智能在穿戴设备中将发挥更大的作用，除了日常穿着，在特殊环境从事特殊工作的人还可以利用智能穿戴产品实现安全保护、环境数据获取等功能。

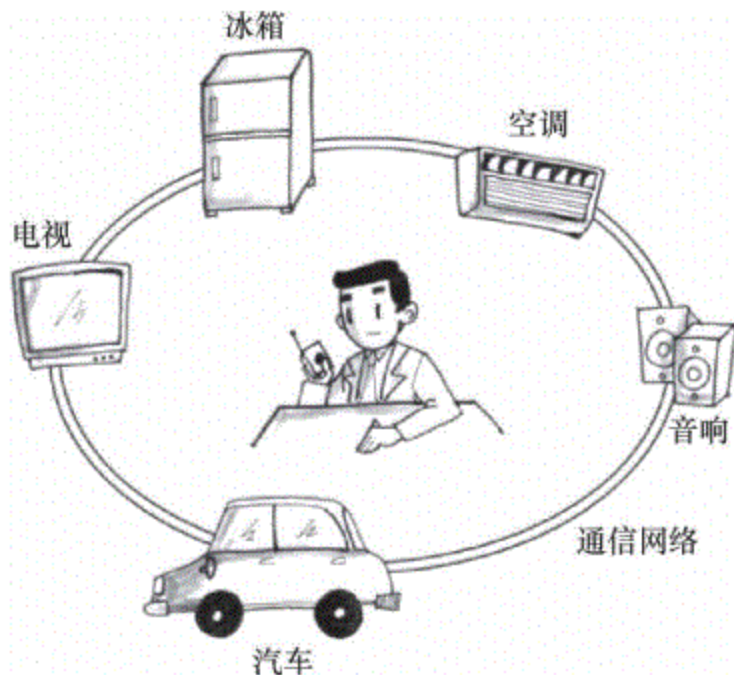


图 2-6 家电的智能化——信息家电

穿戴式智能设备时代的来临意味着人的智能化延伸，通过这些设备，人可以更好地感知外部与自身的信息，能够在计算机、网络或者其他工具的辅助下更为高效率地处理信息，能够实现人与人、人与自然界更为无缝的交流。

第3章 通信到底是干嘛的

第二次世界大战期间，贝尔实验室里有一位喜爱杂耍的年轻人名叫香农。他常常手里抛着3个球来到实验室的大厅，有时踩着高跷骑摩托横冲直撞，令同事害怕不已。但这位小哥十分了得，在战火纷飞的年代，他和他的破译团队追踪德国飞机，在德国对英国进行闪电战期间，为英国成功对抗德国立下了汗马功劳。第二次世界大战胜利后3年，他发表了一篇著名的论文——《通信原理的数学方法》，这篇论文是建立在他对通信的观察上，即“通信的根本问题是报文的再生，在两个端点上报文应该精确地或者近似地重现”。香农奠定了现代电信信息论的理论基础。

当我们在互联网上享受冲浪的乐趣，或者夜半时分抱着手机和密友在微信聊天，你可曾想过，你正在进行的通信过程有多复杂？我们先看看和通信技术有关的英文字母的组合吧！通信行业中大量术语都采用字母和数字的组合，它们简化了协议或者技术的称谓，但也让初学者陷入迷茫之中。TCP/IP、ICMP、QoS、SDH、V5、V.35、TD-SCDMA、WAPI、DWDM、IPRAN、RFID、LTE、OSS、NB-IoT.....很多人之所以害怕学习通信技术，从某种角度上来说，就是被这些貌似简单却又极易混淆的术语吓怕了！这些字母数字组合的泛滥，常常违背了其容易记忆的初衷。

这个难题如何解决呢？如果掌握了一些基本的学习方法，把通信的名词、术语、概念、定义、推论等有机地“串”起来，其结果就未必再让你头痛了。所有的困难就怕“方法”二字，学习通信知识也不例外。

通信技术有其自身的规律，是前人在了解世界、认识世界和改造世界的过程中逐渐成熟起来的一门实用性技术。任何人在初学通信技术时，都应该先放下任何已经听到的各种专业词汇，把自己变成只看得懂报纸、只了解基本生活常识的人。然后，我们按照事物的基本发展轨迹来分析：通信技术要做什么？能解决什么问题？如何解决这些问题？解决了这些问题以后还会出现什么新问题？逐次追问，不断探求，才能让信息交互起来，最终做到融会贯通。知识不是一摊泥，而应该是一串糖葫芦，是一张蜘蛛网。梳理好基本的知识架构，把握基础的逻辑关系，再去理解日新月异的技术革新，就会水到渠成、事半功倍。

专家是什么？专家与普通人相比，不是有什么特殊才能，只是他们比别人考虑问题更仔细、更透彻，把别人忽略的东西拿起来当宝贝，利用别人喝咖啡的时间来研究人们习以为常的东西，发现其中的规律，并在实践中运用，于是他们成为了某个领域的专家。他们不但“知其然”，还能“知其所以然”（见图3-1）。科技是什么？这很难用一个定义来说明这一包罗万象的概念，但科学技术中任何一个推理过程都是严谨的，当然，也是富有想象力的。它们都是脚踏实地、符合自然发展规律，符合辩证法，可以被引用并被反复论证的，甚至，是可以“证伪”的。在科学的征途中，永远没有“水变油”的神话，没有似是而非，

只有残酷的逻辑和冰冷的推演。当你深入这一领域多年，你才会慢慢感受到科学的温度和技术的美。掌握真理的人，永远是暖洋洋的。

上面的描述有助于你建立信心，并掌握方法去学习通信知识，用常规思维去分析和思考任何你见到的外表冷漠、内心火热的所有科学规律，你会快速获得对自己有用的知识并可以举一反三。我们不会白说这么多题外话，希望你从中受益。

下面言归正传。

通信既然是要把信息通过某种方式传递给对方，那么不可避免地要研究以下几个问题：用什么方式传递给对方？如何找到对方？有没有信息传递的额外要求，如安全、便捷、节约、多需求的并行处理？那么，我们对通信进行研究的几个问题如下所述。

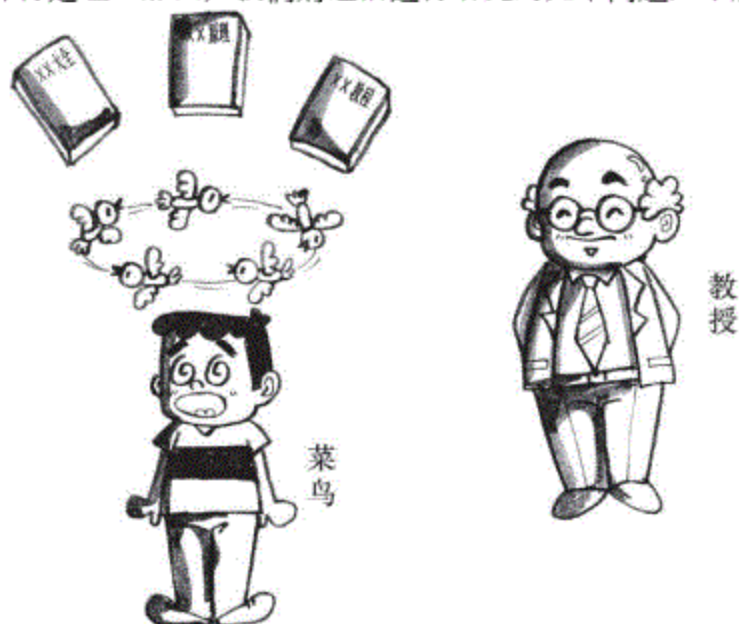


图 3-1 被大量术语搞晕的菜鸟

首先，用什么信息格式传递给对方——编码问题。研究类似人类“语言学”的问题，用什么样的表达方式“表述”信息，通过什么媒介将表述内容传递到对方（假设已经能够确定找到对方），对方能够接收并接受？

其次，如何找到对方（就是“首先”里面的那个假设）——寻址问题。研究类似门牌号码规划、寻找道路等问题。

最后，信息传递的额外要求，如安全、快捷、高效、低成本等——优化问题。研究加密、节省成本、提高效率、增强管理、方便运营等问题。

第 1 个问题：用什么信息格式传递给对方——编码

我们从最基本的语音通信开始讲什么是“编码”。形容某地比较贫穷，“交通基本靠走，治安基本靠狗，通信基本靠吼”——这段极具戏谑色彩的文字，却道出了没有现代化工具，社会生活的真实状况。两个人说话，没有现代化通信手段，该怎么做？就是那句话——“通信基本靠吼”，在这一方面，我们只能说，生理学给你满意的解释。

现代社会中两个人说话，方法就多了。除了“吼”之外，人类还发明了麦克风、扩音喇叭等工具，借助于它们将音量放大，那是物理学、声学的范畴。我们单说两个人远距离通话，也就是两人“吼”不到的地方，用麦克风和扩音喇叭也传递不到的地方，怎么做呢？首先，你要解决传送问题。这么远的距离，用电磁信号传送是个好的选择，电信号在金属介质上传送最好，而你总不能用一根钢管来传送吧？那样投入太大且很不实际。我们需要用合适的铜丝来解决电磁信号的传送。那么如何把一个人的语音变成电磁信号呢？抛开一切你知道的东西，我们从头开始想象——在信息的源头，需要一个盒子，这个盒子里有能够把人的说话声音变成电磁信号的装置，并且有一个出口，以防止其成为“孤岛”；而在信息目的地，放另外一个盒子，这个盒子里有能够把电磁信号还原成人声音的装置。考虑信息双向传递，也就是“你说给我听，我说给你听”，那么两边的盒子各自都应带有声音和电磁信号互相转换的装置。如果你生活在 18 世纪或者更早，你会给这个盒子起什么名字呢？很不幸，你生活在 21 世纪，已经失去了对此盒子的命名权，因为这个盒子就叫作“电话机”！

前面我们讲过，“通信”，也就是“电信”，是用电磁信号传送媒体情报信息，那么通信第一个要解决的问题是，如何把声音、图像、文字等信息变成电磁信号，如何把一系列的电磁信号有效地传送到对方，又如何在对端还原为声音、图像和文字？对于语音通信，从这部电话机开始，信息开始进入“编码之旅”，声音信息通过整个通信网，被数次变换编码样式，最终成功到达彼岸。就像人的出行，坐火车也好，坐飞机也罢，坐船也有可能，其间还不可避免地要走几步路，最终到达目的地。而通信中的每一种编码，都必须有非常严格、规范的定义，都要考虑诸多因素。本书中的若干章节，我们都会提到与编码有关的技术，而本节，只探讨编码技术的总体概念。

我们把编码问题用货物运输的例子来做类比。“编码”过程就像是将货物拆分和打包，以利于货物通过交通工具和道路进行安全运输的全过程。

货物根据体型、重量、客户要求的到货时间、价格等因素考虑，需要用火车、飞机、汽车还是轮船来运输？有些命题更加复杂，比如货物要运送到一个地方，必须经过陆路和水路，那么采取何种方式的组合才是最佳的运输路径？

一件形状复杂的物品，比如复杂的数控机床，你可以把它拆成若干份，物品到达目的地以后，是不是还要考虑组装？别指望组装的人对这个货物很了解，你只有把每个部件做好编号，两个货栈协商好拆包、组装规则（也许是一张图纸），才能把货物拆散、打包。同时，你要考虑通过哪种交通工具在特定的轨道上传输？是不是要考虑在外包装上标注“轻放”“向上”“防潮”？到达目的地后还要检查是否所有部件都已经安全到达，若没有安全到达，你还要考虑，如何以最小的代价重新发送一个新的部件？

任何选择都是适应需求的，“绝对适合”任何场景和需求的选择是不存在的。任何编码都是为了适应不同的传送需求，这一点和货运的例子如出一辙。

飞机是迄今为止人类最快捷的交通工具（火箭的运输性太过特殊这里不讲），但其运输成本也是最高的，如果运输货物从北京到天津，你大可不必用飞机来“摆谱”。轮船是大宗货物的上佳选择，但要运输新鲜瓜果蔬菜的话，你千万不要指望它，希望在船上腌酱菜除外。再比如，有的货物运输要求实时性很高，而体积较大，那么你就要考虑如何把货物拆得大小得体，并通过较快的交通工具和轨道进行运输。太大的包会需要很大的车（如火车和卡车，如果有水路，还需要考虑轮船航运），而很大的交通工具，其运送时间会较长；拆分后的包如果很大，丢失一个包造成的影响将会很大；而太小的包又会增加你的打包时间，并且会增加额外的开销。比如要考虑货物打包后的外包装，既占用体积又增加重量，可能还要多印刷几个“轻放”之类的标签呢。另外，包多了以后，车的数量也要增加，你又需要增加司机和押运员，所有成本都会不同程度地增加。除此之外，有的包丢失一个两个没有关系，就像公路上运输煤，丢一包煤，并不会影响其他煤的使用（如图 3-2 所示）；而有的货物，比如运送一台数控机床，一旦拆开，必须保证每个部件都送达对方，少一个包（就是少若干部件），会造成整台机床无法使用。总之，货物需要根据自身特点打包，然后选择合适的交通工具运输。

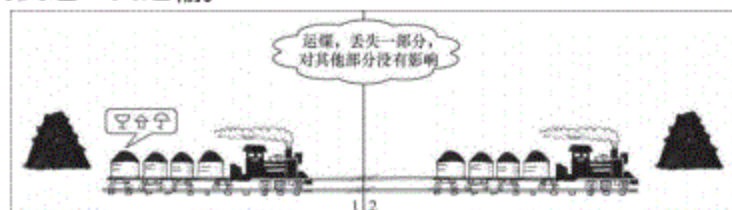


图 3-2 交通运输的拆包合包示例

当然，通信和货运还是有很大区别的。货物和汽车，绝对不会有人把这两者弄混，用肉眼就能区别出来。而通信中，传送的信息和承载这些信息的额外“包装”是组合在一起的，要区分它们，就没这么容易了。比如铜线上传送的是电压的高低，无论是信息开销（“包装”），还是信息本身，都类似于 0、1 这样的状态电压，如果不用特定的技术，你是没

办法区分出来的。后面讲到的每种技术体制，以太网、IP、ATM、MPLS、SDH、PPP，都有专门的技术把“开销”和“信息”区别开来。前文已经提过，通信中的信号还有一些特性是货运不具备的，那就是电磁信号的可复制性和可再生性。货运中，货物如果丢失，你只能重新购买一份相同的，因为货物无法复制和再生。而在通信网中，如果某个信号丢失，从信息源处可以很容易复制出一个一样的信号再次发送，而整个通信系统的设计，只要考虑如何侦测是否有信号丢失，若有丢失，如何通知信息源重传送该信号即可。

第4章将详细介绍编码问题。

第 2 个问题：如何找到对方——寻址

第 2 个要解决的问题是给任何信息的出发点和目的地做个编号，通过编号可以识别世界上任何一个出发点和目的地，并通过相关机制，使信息依照一定的路径在这两者之间传送。

要想寻址，首先得有地址，因此“寻址”的第一个课题是如何分配地址，接着才是让信号通过特定规则找到目的地地址。如何传递，那是上一节所讲的编码的事情了。

这里我们先说说什么是“地址”？电话号码、电报挂号、IP 地址、邮箱账号，这些都是“地址”，在各类通信手段中，“地址”的定义是完全不相同的，相对应地就有各种各样的寻找地址的方式。比如用信令寻址后自动建立专门的通道；比如在路由器上做好路由策略，让数据包根据这些策略寻找到达目的地的路径；比如将目的地址在全网做广播宣告，真正的目的地址给出回应；或者在出发地和目的地之间人工建立一条专门的通道等。数据网常说的“路由策略”，就是描述寻址问题的。而寻址又和地址编号有着密切关系。如果地址编号合理，寻址就会快捷而准确，这和我们日常生活中的门牌号码多么相似！合理定义的门牌号码，有助于陌生人快速寻找到目的地。通信的寻址问题，还包括如何在一个局部区域分配了地址之后，能够让全网知道该地址所在的位置。无论是电话网、传输网，还是数据网，都各有各的编址方法和寻址方法；移动通信中的 FDMA（频分多址，如 TACS、AMPS）、时分多址（TDMA）、码分多址（CDMA）等技术体制，都有一整套完善的寻址方式。

第 5 章将详细介绍寻址问题。

第3个问题：信息传递的额外要求——网络优化

第3个问题是网络优化。人们改造世界的过程总是这样——先保证解决基本问题，再思考如何用更好的方法解决问题。在温饱问题解决之前，我们讨论鱼香肉丝的新做法，是不合时宜的。网络优化，就是在基本的通信问题（如连通性、信息还原能力）得以解决后，如何更方便、快捷、安全、经济地规划网络、建设网络、使用网络的问题。

我们先列举一个简单的例子。在两个人的语音通信中，两人之间直接拉一根电缆就可以使二者之间的通信成为可能。那么如果不是简单的两个人通话，而是无数人互相通话，每两个人之间都拉一条线，现实吗？如果世界上有10部终端，按照某种通信协议进行信息交互，为了保证任何两者之间都能互通，我们可以在任何两个人之间都建立连线，这样需要 $9+8+7+\dots+1=10\times9/2=45$ 条连接。事实上，任何一部终端连接10条线是不现实的，如果是1亿部终端，全世界岂不都布满了电缆？更加可怕的是，每增加1部终端，都需要将这部终端通过1亿根线缆连接到已经存在的1亿部终端上，这样根本行不通！好，我们换一种方式：在这10个终端中间加一个盒子，每个终端都连接到这个盒子上，任何两个点互通，让这个盒子把这两个点的线缆连接起来，一共只需要10根线缆，要增加一部终端，只增加一根线缆就够了。线缆数量大幅减少，扩展难度也大幅降低！

用什么方式能让许多人都能同时通话而投入的平均成本不会大幅度增加？有没有方法让很多人共用中间的传送线缆？这就是优化问题中最经典的“N平方问题”（如图3-3所示）。

网络优化是通信永恒的主题。节约成本、提高安全性，是网络优化的本职工作。一种新的技术，未必非要带给客户新的体验，而通过降低成本，可能让各种新的业务迅速普及。

从一般意义上讲，新的技术都比旧的技术更具有竞争力，用新的技术替代旧的技术，本身就是一种优化。通信技术的快速迭代，就是对原有技术不断优化过程。

比如，早期技术只能实现一条线路在两个用户之间传递信息。后来有了复用技术，多个用户逻辑线路共用一条物理线路，原理是将信号汇聚到某一条特定物理线路上传送，比如通信技术中常见的时分复用（TDM）、频分复用（FDM）和波分复用（WDM）。而复用有两种：确定复用和统计复用。这两种复用方式，分别应用于不同的业务场景，紧密结合各种业务类型的实时性、便捷性、经济性的特点。当然，最终，不同的方式都是为了满足不同人群和业务类型的需求。

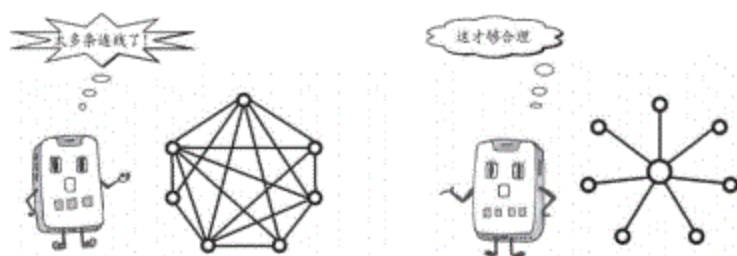


图 3-3 N 平方问题

从信息实时性角度考虑，任何终端间的信息交互都可以采用两种方式：一种是先建立一条确定的线路然后传送信息，比如全封闭的高速公路，从北京出发，只要进入京津塘高速，收费站出来就到了天津；另一种是让每个信息源发出的信息包“一跳一跳”（Hop-Hop）向下一个网络节点迈进，即采用“存储——转发”模式，就像从天安门到鸟巢，在每个路口都需要选择是直行、左转、右转还是掉头。前一种方式组成的通信网络我们称为“面向连接”的网络，如 PSTN、帧中继、ATM、MPLS 网络等；而后一种方式组成的通信网络则是“无连接”网络，最典型的是传统 IP 网络（如图 3-4 所示）。从唯美的角度看，面向连接更让人赏心悦目，因为一切都遵循计划，按部就班，循规蹈矩。但在实际应用中，以 IP 为代表的无连接技术却占了上风。

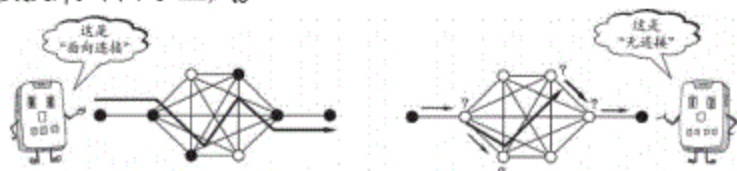


图 3-4 面向连接和无连接的对比

在网络进化过程中，IP 技术更符合人们对便捷接入、区域自治、开放标准、统一接口、成本低廉、业务丰富的要求。通信发展 100 多年来，无数经验教训一再证明，通信是一门实用性技术，它无法超脱于人类的生产实践，否则，是否对其委以重任，它都无法在激烈的竞争中生存下来。

密码的暗文传送，网页的防篡改，带宽的灵活控制，无线网络的频谱规划、天线方位角的调整、数据流按质量要求被分门别类并被区别对待等，这些也都是优化的范畴。

网络优化使社会资源大幅节省。比如在公众网络上建立专用网络的虚拟专用网（VPN）技术。在互联网上，将几个企业的分支机构互连。如果没有 VPN，分支机构也能实现各种数据的传送，但是有了 VPN 以后，就能在公共网络上开展企业专用的数据交换，避免企业支付高昂的成本来建立单独的物理链路，这对节省社会资源意义极其重大。

额外的一个问题——人性化

有了上述对通信基础架构——通信网的诸多问题的分析，我们是不是就可以组建一张完美的通信网了呢？其实，编码也好，寻址和优化也罢，都只解决了通信业技术层面的需求。而通信的最终表现形式是业务，业务的最终表现形式是用户体验。用户体验必须以人为本，因此有人提出了以人为本的新的通信服务理念。

通信的本质是服务于人的，即使是物联网，最终对通信结果做出评判的也依然是人，因此通信本就应该以人为本。任何通信协议，最高层都是应用层，也就是说，通信介质最终要和人有关，这种接口一定要具有美学完整性、界面一致性、操作便捷性、用户控制能力，也就是“人性化”。

通信理念发展的进程，可以用这句话来表述：前人无，我有；前人有，我优；前人优，我人性化。“人性化”是优化问题的高级阶段。

人性化是一个很难标准化的东西。不同地区、不同年龄、不同性格的人群，对人性的要求不完全相同，这与宗教、人文、风土、传统、时尚潮流、审美等社会科学密切相关。那么，通信网如何更加人性化、更容易让客户接受呢？这个问题在本书并不进行详细介绍，因为这可能与通信技术本身的关系并不是十分密切，就像图书的封面设计，和文字本身如何组织的关系并不是十分密切一样。通信业务都是让用户去体验的，是一种商业行为，你很难用“斯是陋室，惟吾德馨”这样的古训来批驳用户的需求。从商业的角度讲，第一，用户需求永远是没错的；第二，用户需求若有错，请参看第一条。

因此，“用户体验”成了无法用任何一个规范、标准去定义，但却是目前通信领域中最重要课题之一。

通信产品的外观设计，包括硬件设计（手机、电话机、路由器等的模具设计，机架线缆的梳理方式）、软件界面设计（界面外观、操作方法、表单展现设计）等，都是人性化的具体表现形式。通信的这个额外问题，更多的是人文科学，如美工、装饰、色彩搭配等，有自然科学的成分但不全是自然科学。

第4章 说说“编码”

宇宙中承载光传播的是什么物质？19世纪的物理学家百思不得其解，于是“发明”了一个假设的媒体术语——“以太”，后来的研究证明，以太并不存在。有趣的是，“以太”这个词在1973年，被一个叫作施乐的美国公司使用了。这家公司不断拓展新的领域，开发了不少先锋项目。其中一个项目由27岁的罗伯特·梅特卡夫负责，他在做了大量研究后，给老板写了一篇一种新型网络的设想，对“以太网”的潜力进行了描述，但老板对此并不感冒。

1979年，梅特卡夫为了开发个人电脑和局域网，离开施乐，成立了3Com公司。正是这家公司，把以太网的事业做大做强，并在这个市场中大赚一笔，可谓“名利双收”。

梅特卡夫还创造性地提出了一个著名的定律：网络价值与用户数的平方成正比。网络使用者越多，价值就越大。换句话说，某种网络，比如电话网的价值会随着用户数量的增加而增大。现在几乎所有的互联网巨头，都在实践着这一定律的正确性。

即网络的价值 $V=K \times N$ ；（ K 为价值系数， N 为用户数量。）

编码是通信的基本组成部分，是通信里面的“语文课”。从小我们就学习语文，学拼音、认识汉字、遣词造句并学写作文。没有语文，我们就无法理解基本的词语、句子的表达方式，所有自然科学和社会科学知识我们都无法传播，前人的研究成果我们也无法理解，我们的研究成果几乎无法传承给后人。语文是所有学科中的基础学科，而编码则是通信专业里面的基础课程。

开场白

几乎所有通信原理的教材，都会从香农的“信息论”开始讲起，把通信系统抽象成如图 4-1 所示的一般模型。

香农提出并严格证明了“在被高斯白噪声干扰的信道中，计算最大信息传送速率 C 的公式”： $C = B \log_2 (1 + S/N)$ 。式中， B 是信道带宽 (Hz)， S 是信号功率 (W)， N 是噪声功率 (W)， $\log_2$ 就是以 2 为底的对数——这就是著名的香农公式。显然，信道容量 C 与信道带宽 B 成正比，同时还取决于系统信噪比以及编码技术种类。这一公式也是本书中最复杂的公式，各位只需要有一个大概的了解。

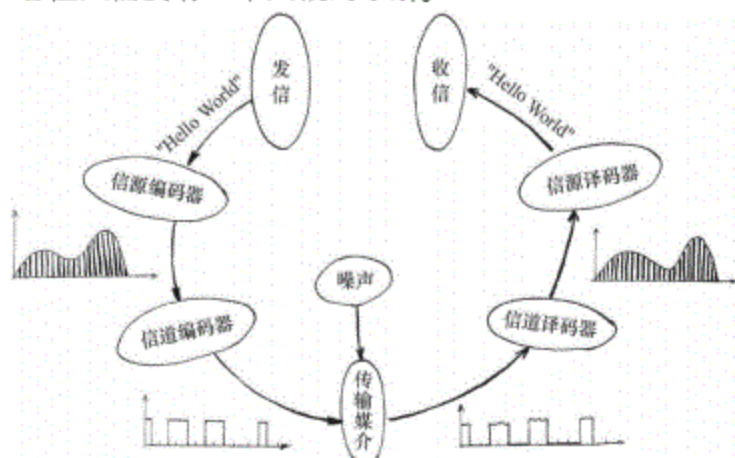


图 4-1 通信系统的一般模型

香农公式中的 S/N 是信号与噪声的功率之比，没有量纲单位。比如，如果 $S/N=1000$ ，那么就是指信号功率是噪声功率的 1000 倍。

但是，当讨论“信噪比”时，常以分贝 (dB) 为单位。公式如下：

$$\text{SNR (信噪比, 单位为 dB)} = 10 \lg (S/N)$$

上述公式表明，信道带宽 B 限制了比特率的增加，信道容量 C 还取决于系统信噪比 (SNR) 以及编码技术。

这里发信的东西就是“信源”，是指人、生物、机器以及自然界一切其他发送信息的事物。信源编码器、信道编码器是把“信息”变成信号的各种设施；信道译码器、信源译码器则是将信号还原为自然界信息的各种设施。这是人类对通信系统的高度总结，无论是电报、电话、电视、广播、数据通信、遥测、遥控、雷达、导航，都是该模型在各种应用场景的具体实现。

本章所指的“编码”问题，是更广泛范围的“编码”问题，可以归纳为“信息用什么信息格式传送到目的地”的问题的集合，包括信息论中的信源编码和信道编码过程，包括数模、模数转换、抽样、复用解复用，也包括各种数据帧、分组、信元等数据报文的封装格式。

通过电话线传送人发出的声音信息，是个漫长的过程——从时间长短来说，“漫长”似乎有点言过其实，因为每个波形传递到对方一般都以“毫秒”甚至“微秒”计，但是整个路程中的复杂程度，足以覆盖电信理论中几乎所有最基础的技术！从电话机接收人的声音，进行基本的信号变换开始，通过模拟电话线传送到电信机房的交换机，经过一系列转换、传输、交换后到达其目的地，把编码信号再进行相反的变换，再送到另外一部电话机使之还原成为声音，通过空气传送到接收人的耳朵里。

我们可以想象，用一根 1km 长的金属线伸直铺在间隔 1km 的两个房子之间，你能对着一端说话，指望对端有人能听到吗？从生活常识来看，金属线不是“听诊器”，上述情况，声音本身根本无法通过这种“传导”方式传递。

再来看看另外一个问题，你研究过计算机录音吗？不管录成什么格式，.mp3 也好，.avi 也好，.wav 也好，都是数字格式的文件，而声音本身是“模拟”的、连续的，这就要用到“模数转换”（A/D）的技术。把模拟信号通过某种方式变成数字信号，到了接收端再转换成模拟信号，这并不是通信行业的专利，但是却很大程度上影响了现代通信的发展历程，成就了通信领域的重大进步。

“模拟信号”和“数字信号”，所有初学者都会遇到这样的术语。用形象的比喻有助于我们更快速地理解。我们一般形容一个东西很大，说它“非常大”，不难让别人接受，因为你形容它的时候加入了个人感情，写散文、小说，这类口语化语言会更受欢迎。但是假如这句话在人群中传来传去，一定会变味儿的。因为“非常大”无法精准表述到底有多大，转述的人很可能把意思理解错，造成混乱，以讹传讹随处可见。如何让信息在人群中精确传送呢？一般情况下，我们应该说这个东西有几平方米大，或者说比同类东西大几倍，这个精确的数字不容易传错。数字的东西，更精确，更便于传播，也更便于存储、检索和分析。

我们应该知道，任何一种通信编码都不是凭空定义的，都是为了更好地在网络上传送信号。而每种原始信号的情况又千差万别：人发出的声音、计算机保存的文档、大自然的景色，这些信息本身都有特点，对传送的要求也不完全相同，如实时性、准确度、信息量的大小、压缩的可能性等，它们决定了网络技术体制、网络拓扑结构、带宽等的规划和设计。这都造成了编码形式的多样性。

那么我们就来说说各种编码及其转换。

从声音到模拟信号

声音是自然界最奇妙的事物之一。很难想象没有声音，自然界将是何种景象。

语音通信中第一个要解决的问题就是如何把声音变成电信号。很早以前，人们就希望把声音保留下来，古人早就有“余音绕梁三日而不绝”的美好愿望，然而这种“绕梁三日”只能是梦想、幻想和空想。在留声机发明之前，人类曾不断试图使用各种方法来达成这个美好的愿望。19 世纪，人们开始尝试用机器记录振动来记录声音。随着录音机、点唱机、电视机等的发明，人类实现了梦寐以求的“人机交互”。接着，永远不满足现状的人们又有了新的需求：将信息实时地与别人分享。如何来达到这个目的呢？贝尔解决了这个问题，他发明了碳粒电话机。

我们现在不再使用碳粒电话机了。但当前无论如何高级、如何先进、如何昂贵的电话，也都是碳粒电话原理的变形：把话筒内振膜的振动转化成强弱不同的电流。而这个电流信号，就是我们所说的“模拟”信号，它和振膜的振动规律是完全一致的。

“模拟”是 Analog 的翻译名，它不属于我们常规思维模式内的东西，以后我们可能还要碰到很多这样的概念和名称，你不能用中国文化中的东西去理解它，就像外国人很难理解什么叫“道”，什么叫“太极”一样。

在物理学上，语音是一种声波，它是由人的声带生理运动所产生的。声波的传播就像水波的扩张。空气压力的影响有点类似于水波起伏，气压在某一平均值上下波动，就像水波的高低起伏。能振动的物体在空气中都能发出声音，而几乎所有的物体都能振动。人耳感受到的音量与压力振动的振幅有关。振动越大，声音越强。同时，声音还与频率有关，频率变化越大，声音越尖锐，能量越大。女性的声音频率较高，因此声音比较尖；而男性则相反，如图 4-2 所示。

人的耳朵能听到的声音频率范围是 20Hz~20kHz，如图 4-3 所示。而实际上，人们只需要 3.4kHz 电周期的可用和可理解信息，这也是电话线路的语音信号带宽。当然，对人耳可分辨的范围，频率的提高意味着质量的提高，如普通声道的带宽是 11kHz，立体声的带宽是 22kHz，高保真立体声的带宽是 44kHz。当然，带宽越大，对传递信号的介质要求越高。经济学理论告诉我们，实现的代价越大，需要的一般人类劳动也越多，价值也就越高，很可能价格也会越高。这可能就是高保真立体声音响价值不菲的原因所在吧！

让我们看看声音是如何转化为电话系统能够接收的模拟信号吧。一般来讲，这个转换设备就是我们最常使用的通信设备——电话机。

贝尔发明的碳粒电话机，是基于振膜对碳粒造成忽紧忽松的压力引起其电阻大小的变化，我们学过的最简单的电路公式， $\text{电流} = \text{电压} / \text{电阻}$ ，在电阻变化而电压不变的情况下，电流就会发生线性变化。忽大忽小的电流，就是我们未来要讲述的希望传输到世界上任

何角落的电信信号。我们先假设这些信号已经陆续传送到对方的听筒。听筒内有一电磁铁随电流大小而磁性不同，它对埋有金属丝的薄膜时吸时放，薄膜便发出了像人说话一样的声音。



图 4-2 女歌唱家和男歌唱家声音频率有所不同



图 4-3 耳朵听到的声音的分辨率

了解了声音与模拟信号之间是如何转换的，我们即将进入真正的通信领域。就好比一部电影，你看到了开头和结局，现在问题是中间过程将如何发展。讨论这个问题非常重要，假设你是一名编剧，你该如何设计引人入胜的剧情？

除了语音，现实世界中还有很多原始的信息，如图像、文字等。我们把语音、声音、图像、文字等自然界的信信息叫作“原始数据”，那么从专业通信的角度来分析，要想把这些原始数据通过网络传送，必须将原始数据“表示”或者说“转换”为电磁信号。

如果是可见的东西，转换过程比较好理解。比如文稿，可以通过计算机 I/O 系统输入，使用键盘、鼠标、手写板、手指等输入工具将其转换为计算机的“文本”；而图像，可以通过照相机拍照、人工手绘并扫描等方式转换为计算机的“图像”。

而声音呢？它是人们看不到的东西，怎么“表示”或者“转换”？

还好，人们发现声音是波的一种，而对于波来说，有两种主要的转换方式：以信号的原始频率（被称为“基带信号”）表示或以另一种频率表示。

例如，当我们拿起电话机并对着它说话，电话网络以“原始值”（在 300~3400Hz 范围的某处）接收模拟语音信号。另一种方式是，电话网络可以将我们的信号与另一更高频率的信号（称为“载波”）结合，然后在不同的频率上传输这些合成的信号。

载波是工作在预先定义的单一频率的连续信号。改变载波以便它能以适合传输的形式表示数据，就是我们常说的调制（Modulation）。

在模拟调制中，表示数据的模拟信号被转换成另一模拟信号，后者就是“已调载波”。如果你觉得“调制”这个词不大好理解，那么不妨回忆一下你在家上网一般用什么东西？对！Modem，我们俗称为“猫”，因为 Modem 发音的第一个音节是“mao”（人类是乐观而富有创意的，很多动物都被赋予了 IT 的意义，猫，用作调制解调器，当然只有中国人才这么叫；狗，用作正版软件监护；鼠，用作计算机外设“鼠标”；驴，用作 P2P 下载，“电驴”曾经是 P2P 下载的佼佼者……这些都是很强、很 IT 的专业术语），全称是“调制解调器”，就是用于完成“载波”并“卸载”的装置。你尽可以展开想象的翅膀，把“调制解调器”想象为一艘大而快的船，可以在浩瀚的海洋里航行，任何小船都可以搭载在这艘大船上，到达大洋彼岸。如果小船直接出海，它抗击风浪、颠簸、礁石的能力太弱，等待它的很可能是灾难。

模数/数模转换 (A/D 和 D/A)、PCM 和线路编码

两个人面对面地交谈，在没有外在干扰的情况下，很容易听到对方的声音。但是如果在闹市街头、堵车严重的地方、喇叭声连绵不绝呢？如果两个人的距离是 50m、100m、1km 甚至更远呢？“吼”恐怕都解决不了问题了。“模拟”信号也存在同样的问题。模拟信号在传输过程中，由于受到外界干扰，总能量会损失惨重，信号本身也会发生畸变和衰减。所以模拟信号在传输过程中，每隔一定的距离就要通过放大器来放大信号的强度，但与此同时，由周边噪声引起的信号失真也随之放大。传输距离增大时，多级放大器的串联会引起失真的叠加，从而使信号的失真越来越大——进入管子里的是纯净水，出来竟然成了污水！何以解忧，唯有数字技术！

我们都知道，计算机的底层逻辑，本质上只有两个符号：“0”或者“1”，无论是数据信息还是控制信息，本质都是“0”和“1”这两个符号在处理器、磁盘里的布尔代数的运算。这似乎比人的语言简单得多，就算是英文，还有 26 个字母呢！这种类型的信号在传送过程中都采用脉冲方式，并且只有两种状态：高电压和低电压，高于某个值（如 A1）的电压就是“1”，低于某个值（A2）的电压就是“0”，而 A1 和 A2 之间还有较大的差值，避免信号传送的中转站（也就是各种网络节点）的误判。

传输过程中，电压依然会由于噪声的干扰和能量的损失发生衰减，但是在传输一段距离之后，加入一种“再生器”的装置，读出要传送的电压值。

其实再生器并不用读出具体的电压，只要读出是否高于 A1 或者低于 A2，即可判断传送的是 1 还是 0（如图 4-4 所示）。精确读出电压值是需要一些功力的，但判断高于 A1 还是低于 A2，这是个几乎没有技术含量的工作，用简单的电子元器件就能够轻松做到。

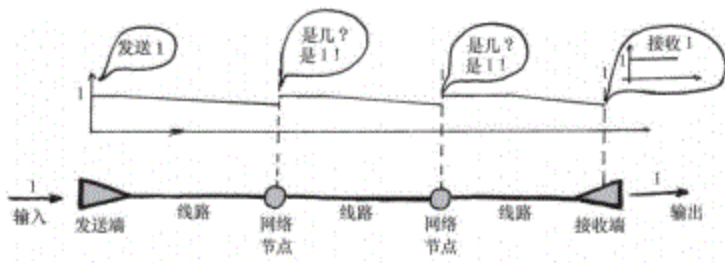


图 4-4 0 和 1 在线路上的传送

接着，再生器将重新生成信号并传送下去。重新产生的新的电压信号完全消除了前一段电路周边环境对信号的衰减和畸变。这样多级的再生不会累积噪声引起的失真。

聪明的读者们一定都明白了：并不是说数字信号天生的“衰减”程度小，也不是“畸变”的可能性低，而是通过传送过程中识别、增强、再生这样的中转手段，防止网络上的噪声

干扰信号内容而已。只要让低电压保持低电压，高电压保持高电压，无论传送多远，信号总还是一样的。

通过上述办法，人类搭建起数据通信的基础。

电视，我们要数字的。手机，当然也要数字的，全世界的移动运营商早就向模拟网说了 Bye-Bye。

像心电图一样的锯齿波是模拟信号的典型波样一样，我们的声音其实也是如此。面对如图 4-5 所示的锯齿波，我们也就明白了为什么人类社会如此复杂。因为人类的、原始的、现实的生活中，各种信号都是模拟的。不仅仅是声音，不仅仅是我们的心跳的规律，更包括我们的感情，都是“模拟信号”。“情绪化”一词又总是用来代表不稳定的、非理智的.....和生活相比，数字通信的世界却是那么简单。它 0 就是 0，1 是 1，正所谓“爱憎分明”。

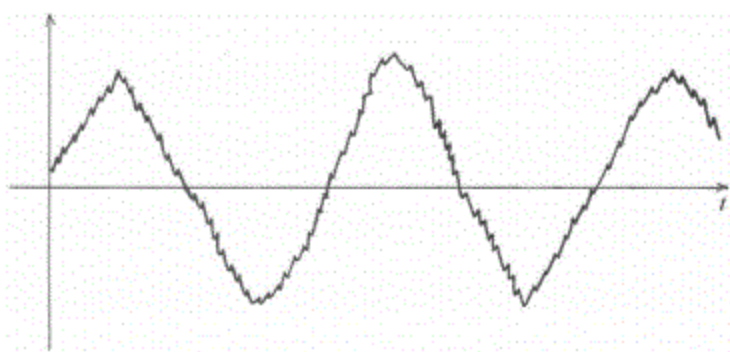


图 4-5 锯齿波

为什么必须是数字的？这是传送和表示的需要。前面讲过，任何在线路传送中发生的对数据的影响，都可以通过再生器予以“矫正”。因此任何明确的 1 或者 0 都不容易受到各种噪声的影响，不容易引起歧义，因此传送要求也会很低。当然这一点很难和人类社会进行对比：人与人的交流中，人可能说谎话，天天吹嘘自己是专家的，未必是真的专家；天天说这是真的华南虎，其实根本就是纸老虎。因为人会骗人，而机器不会，人会遗忘，而机器则忠实地保留你的信息。你赋予它的使命，它会不折不扣地完成，如果它没有完成，你只能找自己的原因，怨不得机器。

你知道 20 世纪最伟大的科学家是如何创造数字通信的吗？这要从一个叫作奈奎斯特的牛人说起。20 世纪 20 年代，这位牛人发现了一个规律：如果模拟信号以规则的时间间隔抽样，且抽样速率是模拟信号中最高频率的两倍，那么所得样本是原始信号的精确表示。

在语音通信中，人类语音产生的频率的正常范围是 300~3400Hz。为了让这个频率范围内的信号顺利地通信网上传送，我们取其最大值 3400Hz 来进行抽样（对于 300Hz

的，多抽样几次也不会有什么问题的），这意味着需要每秒 $3400 \times 2 = 6800$ 个抽样值。但实际上，电话系统不是分配 3400Hz 频率的信道，而是分配 4000Hz 的信道，这是为了标准化和方便计算——看，这又印证了通信是应用型技术，这个 4000，就是人为定义的；在 300Hz 和 3400Hz 处设置一个筛网——在电子学里面叫作“滤波器”，滤波器其实就是一个过滤装置，只不过过滤的不是泥沙，而是高于 3400Hz 或者低于 300Hz 的所有频率的信号。被过滤掉的那些信号，人基本上都听不见，再花精力去传送，意义并不大（当然，如果未来传送 Hi-Fi 质量的语音，也许能听见哦，现在已经有这样的技术了）。当模拟语音信号转换为数字形式时，要保证每秒 8000 次抽样（4000Hz，就是每秒钟 4000 次，为了以防万一，让我们再乘以 2，即是 8000 次）。在数学上，这等于每个抽样的时间是 $125\mu\text{s}$ （1 秒除以 8000 次，就是每次的持续时间了）。

我们借助奈奎斯特的伟大定律，知道在电话系统中每秒钟要抽样 8000 次。对每次抽样所得的量值还必须进行“阶梯量化”。为什么要量化呢？因为抽样后形成的脉冲信号在幅度上仍是连续取值的，这显然不符合数字信号的基本要求，说明这种抽样后的脉冲信号仍是模拟信号。而将抽样得到的脉冲信号变成数字信号的过程中很关键的一步就是对其进行量化，因为数字信号要求脉冲幅度只能取有限个数值。量化的层次或者阶梯越多，声音的真实感就越强，当然，需要的网络资源也会越多。这就像用水彩笔画画，12 色的当然没有 48 色的色彩丰富。

科学家把每次抽样的幅度按照 256 个阶梯排列，每个排列都是一个 8 位的二进制数（如 01000110，从 00000000 到 11111111，正好是 256 个阶梯）。这时候，我们会得到一个你可能听到过的数字： $8000 \times 8 = 64000$ ，也就是 64k（如图 4-6 所示）！与计算机的基础知识一样，“位”和“字节”是 8:1 的关系。每个字节由 8 位组成，其英文简称比较相似。“位”是 bit，用小写字母表示，我们常写的“带宽达 50Mbit/s”；而字节的英文简称是 Byte，一般用来形容文件或存储区大小，如硬盘 50G，就是指 50G 的 Byte，你购买中国联通手机流量套餐，一个月 10G，这也是指的 Byte。这里要提醒各位读者，通信中的 64k，是指 64000，而计算机中的 64K，则是 65536，因为 1K 表示的不是 1000 而是 1024。

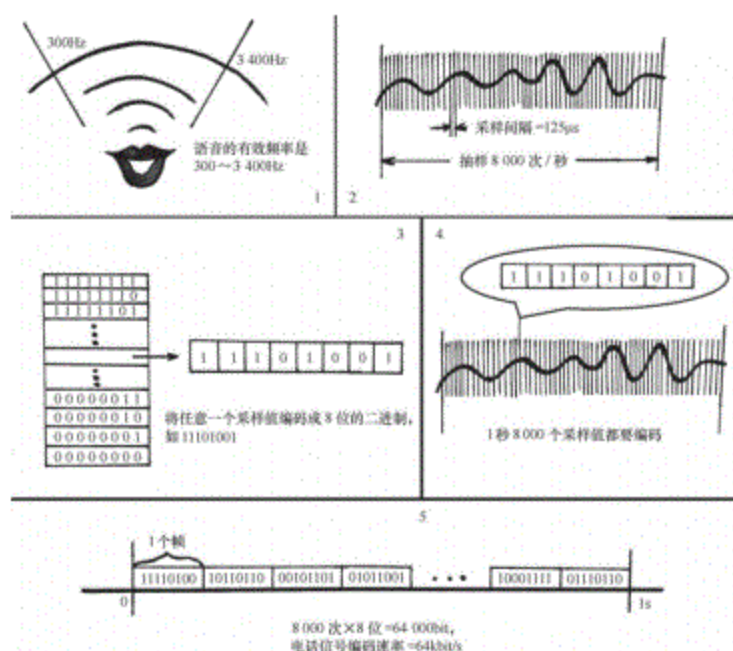


图 4-6 电话信号的编码速率为什么是 64kbit/s

继续描述 64k 这个数字的含义。语音信号如果采用每秒 8000 次的抽样频率，而每次抽样用一个 8 位 (bit) 二进制数表示其振幅，那么每路需要的数据“宽度”是每秒 64kbit，也就是每秒钟在线路上必须通过 64000bit 的“0”或者“1”，才能保证有足够的线路宽度供一路语音通过，而不至于发生语音信号“走样”。我们将 64kbit/s 称为一路语音信号的带宽需求量。这种量化的方式被称为脉冲编码调制 (PCM, Pulse Code Modulation)。

当然，如果你用 32 位二进制数表示一个抽样的振幅，那么带宽需求量会增加到 $32 \times 8000 = 256$ kbit/s。如果采用压缩算法，每次抽样是 6 位二进制数，每路语音信号的带宽则为 $6 \times 8000 = 48$ kbit/s。

经历了抽样量化以后，就开始另外一个通信过程——信道编码，这是一个将数字信息转换为可以在线路上传送的数字信号的过程。前面我们说，用高电压表示 1，低电压表示 0，这是数字信号的表示方式，然而通信线路上的实际情况远比这个复杂，要使数字信号能够在线路中传送，就要使信号的传递方式适应线路的要求。因此，必须进行适当的调整，以适应处理芯片和光电传输的需要，这种调整就是“信道编码”。用于完成这项任务的 3 种常用编码技术是曼彻斯特编码、差分曼彻斯特编码和翻转不归零 (NRZI) 编码 (如图 4-7 所示)。这 3 种方式就像做一道中学的趣味数学题，并不难理解。

在曼彻斯特编码中，用电压跳变的不同来区分 1 和 0，即从低电压到高电压的跳变表示 0，从高电压到低电压的跳变表示 1。这种编码的好处是易于差错恢复，部分从高到低的信号跳跃可能被削减或扭曲，但在一定的时间间隔中仍然能智能地确定信号是上升还是

下降的。这就提供了在传输过程中的信号恢复，从而把错误概率降低到最小。它应用于以太网线路上非常合适。

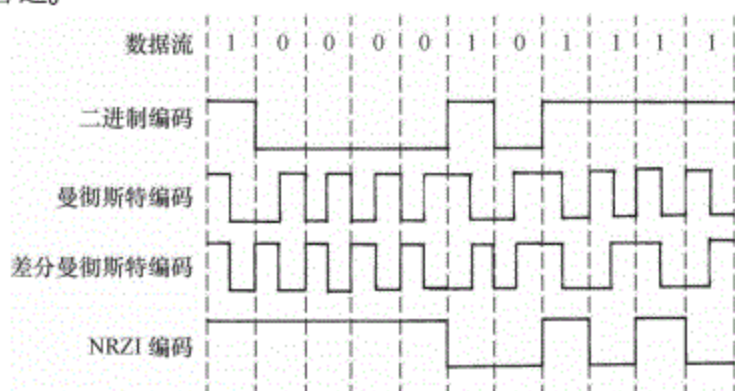


图 4-7 几种格式的编码

差分曼彻斯特编码是曼彻斯特编码的一种修订格式，其特殊之处在于：每位的中间跳变只用于同步时钟信号；而 0 或 1 的取值判断是用位的起始处有无跳变来表示（若有跳变则为 0，若无跳变则为 1），所以只检测当前位的电压及跳变情况无法判断究竟是 0 还是 1，必须和前一位进行比较才能得出结论。

NRZI 编码是不归零编码（NRZ）系列的一部分，其中，正、负电压分别对应于编码 0 和 1。它是基于从一个电压状态向另一个电压状态的跳跃（从高到低和从低到高状态），而不是采用电压级别对数据进行编码。在 NRZI 中，如果不发生跳跃，数据被编码为 0，反之，在跳跃的开始处，数据被编码为 1。

可能读者会很好奇，为什么要定义这么复杂呢？用最简单的二进制编码进行电压的传送不行吗？从理论上讲，用高低电压表示 1 和 0 当然是可以的，但是在工程实践中，要考虑误码率最低、传送准确率最高、最易于差错恢复，需要遵从电流在导线中传导的物理规律。这就造成不同的技术体制采用的信道编码方式会有一定的差异。

好了，讲了这么多，回归到本节的核心内容——模拟与数字的转换。前面已讲述了模拟信号如何经过抽样、量化和编码，变成通信网可传送的数字信号，并描述了这样做的理论依据。在数字信号在网络上传送、到达目的地以后，经过相反的过程，将电压及其跳变转换为二进制代码，并采用 D/A 转换技术还原为模拟信号（这个过程的原理就像数字代入公式计算一样简单），并经过前面所描述的那样恢复成“模拟信息”，成功回归大自然！

接下来的一节，将为读者们讲解在数字化传输过程中的一种多个信号源共用物理通道的技术——复用技术。

复用与解复用

如果不考虑节约成本，一条线传送一路信号，把编码格式确定下来似乎就万事大吉了。但是实际情况是，我们需要在一根线上传送多路信号。复用和解复用就是为此而设计的。

上一节我们描述了 8000Hz 抽样，抽样周期是 $1 \text{ 秒} / 8000 \text{ 次} = 125\mu\text{s}$ 。在 $125\mu\text{s}$ 时间内，抽样值所编成的 8 位 PCM 码顺序传送一次，我们现在要做的事情就是想办法在这 $125\mu\text{s}$ 时间内“挤”进来自多条线路的 8 位 PCM 码。

任何一根电缆上，在同一时刻不可能传送两个电平。这就好像一个人做广播操，不管他多么优秀，速度多么快，那也只是他的动作频率高而已，绝不可能在同一时刻做两个动作。回到我们的 PCM 编码，对于一个 $125\mu\text{s}$ 间隔的信息，虽然有 8 位信号需要传送，它只能按照顺序传送这 8 个 0 和 1 的组合。

我们希望一条电缆能够同时承载多路语音，这就需要“复用”。“复用”这个词本身，可以理解为“反复使用”或者“多个共同使用”，而通信中“复用”显然是指后者，就是让多个信息源共同使用一条物理通道。通信要做的工作也很容易理解，就是让这多个信息源发出的信号在同一条物理或者逻辑信道上不要发生冲突，和平共处，共同分享信道资源，并安全到达目的地。

我们想象一下汽车和道路的例子。某条道路上只能跑一辆车，3 个车队从甲地出发到达乙地，每个车队都运载一个客户的货物，3 个车队的车辆数分别为 100、80 和 75 辆汽车。接不同车队的人都在乙地等候，谁接哪个车队是明确的，每个接车队的人都希望自己的车队尽快到达。假如你开了这个运输公司，你如何安排最为合理？这其实是一个有趣的数学命题（如图 4-8 所示）。

我们有以下两种方案可供选择。

第一种方案是把所有车队的车按照如下顺序排列（如图 4-9 所示），从 A 车队的第 1 辆开始，第 2 辆……第 100 辆，接下来是 B 车队的第 1 辆、第 2 辆……第 80 辆，最后是 C 车队的第 1 辆、第 2 辆……第 75 辆。顺序编号以后，从 1 号开始到最后一辆，从前向后排。

这种方案比较容易理解，结果是 A 车队先到，B 车队紧跟其后，然后是 C 车队。但是你要理解接车的人的心情，越往后的车队，到达时间越晚，接车的人就得苦苦等待！还有，第一车队有可能很长，等第一车队过去，第二车队再出发，很可能影响了第二车队的效率，更不要提后续的车队了。这是我们刚才讲的第一种“复用”——对一条道路的反复使用。

我们建议用另外一种方案（如图 4-10 所示）。A 车队第 1 辆车在第 1 个位置，B 车队第 1 辆车在第 2 个位置.....C 车队第一辆车在第 3 个位置，A 车队第二辆车在第 4 个位置，B 车队第二辆车在第 5 个位置.....如此排列下去。

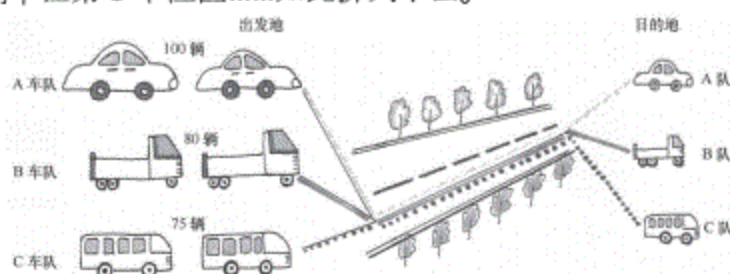


图 4-8 问题的提出

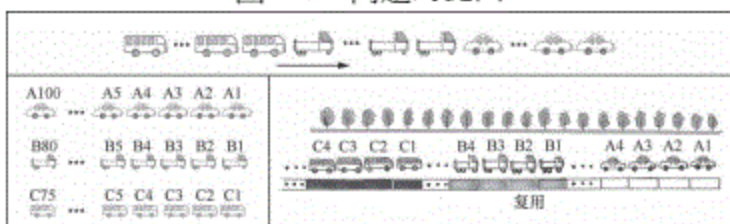


图 4-9 解决车队传送的第一个方案

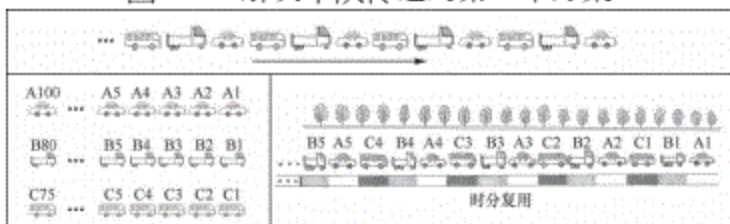


图 4-10 解决车队传送的第二个方案

这种方案最大的特点是实时性好，接车的人不用长时间的等待，他可以根据车到达的情况安排卸载工作，到达一辆，卸载一辆，并可以利用空闲时间检验货物、休息。

第二个方案，就是在通信中我们采用的时分复用技术（TDM），不同之处在于通信中的时分复用，不采用汽车运货，而是采用“时间片”运送信号。在同一条线路上按照时间位置均匀分片，每个时间分片被一个用户的信息流占用。这就是“时分复用”——把时间拆分，然后大家一起共享它。

就好比 1 个幼儿园老师管理 100 个宝宝，她非常能干，把每分钟分成 100 份，第 1 份管理第一个宝宝、第 2 份管理第二个宝宝.....第 100 份管理第 100 个宝宝（如图 4-11 所示），并周而复始地循环。

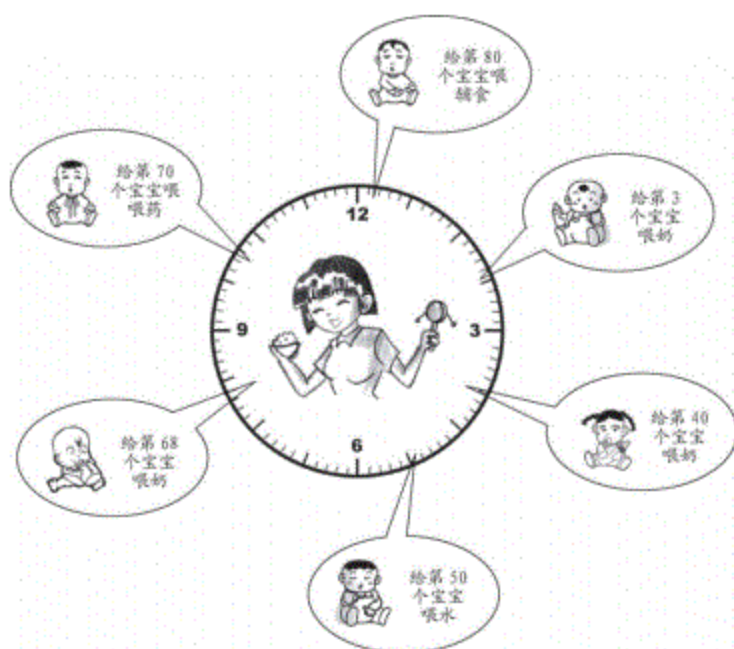


图 4-11 时分复用

当然，在现实生活中的确很难做到这一点，因为这样的时间切片，人根本无法完成任何一个肢体动作，但是在通信设备中，要实现这个功能并不难，因为计算机处理能力太强了！知道 4GHz 的 CPU 是什么意思吗？是每秒钟有 4000000000 个时间分片，每个时间分片可以做不同的事情。虽然这个数字对我们“复用”的理解并不是十分关键，但是你可以想象，在与计算机设备类似的通信设备中，时间分片并加入活动是一件轻松愉快和手到擒来的事情。

按照时间分片来“复用”，叫作时分复用（TDM，Time Division Multiplexing）。还有按照频率分片的，那叫频分复用（FDM）。本书还会讲到光通信中的波分复用（WDM）。一个苹果，你可以横着切，可以竖着切，当然也允许我们拿着水果刀从外向里一层层地切——就像平时削苹果皮一样。总之，你可以利用其特性，从多个角度去“切分”。对于物理线路而言，无论哪种切法，切成的每一片（不管是时间切片、频率切片还是波长切片）都可以被不同的信号占用，并且相互之间不干扰，从线路的整体来看，它被“重复利用”，因此形成“复用”。

花开三朵，各表一枝。我们以 TDM 为代表进行分析。

前文讲过 PCM，即脉冲编码调制，就是时分复用的典型应用。通信技术往往比现实生活的例子要复杂。我们用道路和汽车的例子是为了让读者有感性认识，这比烦琐的公式推导和混乱的图表要清晰很多。如人们发明了钟表以表示时间，但在通信设备中并没有这样的“时间”概念，大家采用信息内容本身来获取相互间的一致性，这就是“同步”。

在若干个语音 64kbit/s 的信息流汇聚到一起时，必须步调一致，就像一个大型乐队，需要步调一致才能奏出美妙的音乐。在复用中，引入了“同步”的概念。同步的概念相当于解决车队在采用第二个方案运送货物时，如何指挥该哪辆车出发，而不要引起混乱。TDM 提出了“同步码”的概念，来保持若干路信号步调一致地在一条线缆上“复用”。另外，当电话处于占线、拨号、应答、挂机过程时，是需要在主叫方和被叫方交互一些信息的，这些信息被称为“信令”。同步码和信令码要各自占用一定的通道。

接下来的事情就是人为规定了。

国际电信联盟（ITU）将语音 PCM 复用做了两种建议：一种叫作 PCM30/32 制式，另一种叫作 PCM24 制式（相当于一种可以通过 30/32 个车队，另一种可以通过 22/24 个车队）（如图 4-12 所示的是 PCM30/32 制式）。两种系列不但路数不同（一个 30 路语音，另一个 22 路语音，另外两路分别被同步和信令占用），而且因为历史的原因，帧结构及压扩律（高振幅信号将在传输过程中被压缩，放大程度小于低振幅信号，然后在接收器中被扩展，放大程度大于低振幅信号，采用不同的压扩方法，这些方法就叫作压扩率）也不同（PCM30/32 采用 A 律，PCM24 采用 μ 律）。TDM 中每个时间切片被称为一个“时隙”。时隙是指能明确决定其时间位置及用途的周期性重复的时间间隔。如在 1 帧上分配给各路信号的特定位置称为路时隙。在 PCM30/32 制式中，帧分为 32 个路时隙，1 帧的帧长为 125 μ s。在 TDM 中，我们将大量用到“时隙”这个词。

若干路电话被分割为若干等份，在不同时间切片中被“复用”到电话网中传送；到达对方后又被“解复用”回去，将分割的等份再重新组合起来，形成完整的一路语音。从宏观上看，实现了几十路电话同时通过一条线路从源点到达目的地。

图 4-12 中，每一行就是 125 μ s（1 帧）8 位 PCM 码分为 32 个从线路上通过，而每一列则是一个“车队”，也就是一路通话。我们可以计算出，如果一共有 8000 行，就是整整一秒钟时间，能够通过 $8000 \times 32 \times 8\text{bit} = 2048\text{kbit}$ ，这就是 PCM 的“一次群”速率——2048kbit/s。

有时候初学者总混淆 PCM 和 TDM。我们可以这么理解：TDM 是一种复用方式，而 PCM 是利用 TDM 原理而人为规定的具体编码格式。用户信息经过 PCM 编码后，可以在 TDM 技术模式的网络（如 SDH、DDN 等）上传送，也可以在 FDM 或者 WDM 技术模式的网络上传送。

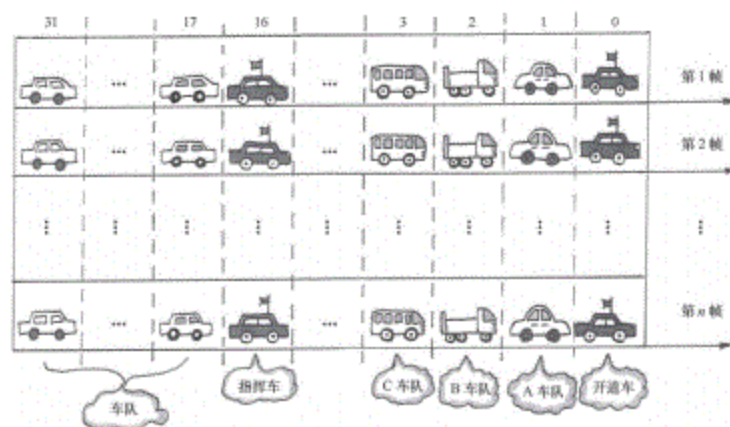


图 4-12 PCM30/32 的原理

波特率和比特率

波特率和比特率是数字编码的基本概念。理解这两个概念，将有助于读者理解信道编码的方式。

波特率是指载波调制状态以多进制数表示时单位时间内信号状态的改变次数。当采用二进制时，即为比特率。“比特”可理解为“位”的意思，而通信中的一位，只有两个选择——“1”或者“0”。如果线路上的信号传送比特率是 64kbit/s，就是指线路上每秒钟传送 64000 个 1 或者 0 信号。

任何一个波形的变化带来的可能是若干个比特的数据变化（当然也可能是一个比特的变化）。我们把波特率想象为人做动作。一个人每做一套动作是一个波形，那么这套动作中的每个身形变化就是一个比特的数据传送。如果一套动作有 4 个身形变化组成，每个身形变化是 0 或者 1，那么每套动作可以代表一个 4 位的二进制数。4 位的二进制数则可以代表 0~15 一共 16 种情况，也就是说，一共存在 16 种套路的动作。

图 4-13 将对我们理解波特率和比特率有很大的帮助。

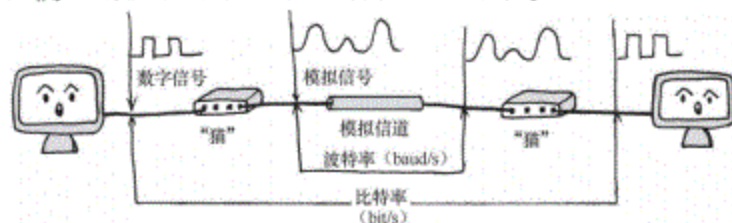


图 4-13 波特率和比特率的比较

几种典型数据技术的数据格式

通过前面所讲的内容，我们已经知道，任何数字通信的信息，都被转换为 0 和 1 的组合并通过各种物理信道传送，从源地址发送到目的地址。然而，要保证这些 0 和 1 安全到达正确的地点，是需要一定的组织管理的。通信网络将如何组织这些 0 和 1？根据信息自身特点的不同，需要采用不同的“容器”。也就是说，信息是如何在源地址把原始信息转化为 0 和 1 的组合，这些 0 和 1 的组合通过怎样的包装，才能安全到达正确的目的地？

好了，这是通信中最关键的环节之一，也是最不容易理解的环节之一。我们把信息的出发地和目的地想象为几个城市，把要传送的信息想象为在城市间需要互相运送的货物，前面所讲的以曼彻斯特编码为代码的物理编码实施后，我们可以理解为几个城市之间的道路已经修通了，路标合理、信号灯正常、没有坑坑洼洼，只要按交通规则驾驶汽车，就不会因为道路对运送货物造成影响。接下来的工作是把货物在出发地拆分、打包、装车、寻找路径、到达目的地，在目的地拆包、安装（组合）货物。其中寻找路径的方法在第 5 章会讲到，但寻址和编码是相互联系的，也就是说，合理的打包方式会给寻址工作带来便利。如图 4-14 所示，数据拆分、打包的方式很像货物打包装车的方式。

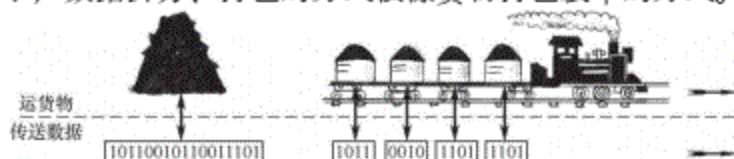


图 4-14 出发地到目的地的煤和 0、1 逻辑的信息

数据被拆分、打包的方式，实际上就是选用何种类型容器的问题。容器的特性取决于以下几方面因素。

- 道路的特征：比如单行道和双向车道是不一样的，车道宽窄是不一样的，水运和空运是不一样的，道路不同，选用容器的类型也不完全相同。
- 货物的特征：运送不同类型的货物，选用容器的类型也会相同。
- 货物本身的运送要求：时间要求、安全性要求、完整性要求等，都会对选用容器的类型带来影响。

很多初学者对这么多技术体制采用不同的编码格式表示不解，如果认真分析上述 3 个决定条件，对理解多种编码格式的区别很有帮助。

值得一提的是，通信中的“容器”还不仅仅运送信息本身，它可能还要运送许多为了保证信息运送成功而增加的一些额外的“容器”，这些容器和运送信息的“容器”类似，但并不装载用户信息，它们只是运送过程中所需要的。比如在以太网里面，ARP 帧就是一种容

器，它运送的是寻找目的地的特殊信息，它也需要有一定的编码格式，这种编码格式既要和承载数据的容器类似，以保证线路传送信息格式的统一性，又要有所区别，以保证所有接收到该 ARP 帧的终端都能识别出此帧包含的内容并非用户信息。

有了这样的基础，在分析任何一种网络技术的数据包、帧、分组等的编码格式以前，都要对这种技术有一个基本的了解。技术本身的特性和所承担的业务类型，决定了其编码格式。反之，编码格式也决定了这种技术本身的特性和适用的业务类型。那么一项技术到底是先有编码格式，还是先有业务类型呢？请参考“先有鸡还是先有蛋”的答案。

1.以太网帧

以太网，我们再熟悉不过了。IEEE 制定的 IEEE802.3 标准给出了以太网的技术标准，它规定了包括物理层的连线、电信号和介质访问层协议的内容。在 20 世纪 90 年代的网络课程中，还有令牌环网、FDDI 和 ARCNET，而现在它们仿佛都像梦一样神秘地消失了，只留下部分教科书上支离破碎的讲解，供后人做一些原理性的了解。

以太网的标准拓扑结构为总线型，但快速以太网（100BASE-TX、100BASE-FX 和 100BASE43 类）和吉比特以太网（1000BASE-CX、1000BASE-T、1000BASE-SX 和 1000BASE-LX4 类）甚至更高的万兆以太网，以及下一代以太网技术的 40G 以太网、100G 以太网，为了最大限度地减少冲突，并最大限度地提高网络速度和使用效率，使用交换机来进行网络连接和组织，这样，以太网的拓扑结构就成了星型。但在逻辑上，以太网仍然使用总线型拓扑和载波侦听多路访问——冲突检测（CSMA/CD，Carrier Sense Multiple Access/Collision Detect）的总线争用技术。CSMA/CD 的有趣之处，是它把一组叽叽喳喳叫着要发言的计算机有序地组织起来，让它们有条不紊地召开会议，我们后面对这个技术将进行专门的讲解。

20 世纪 90 年代的以太网网卡也可称为以太网适配器（NIC，Network Interface Card）。这张卡可以支持基于同轴电缆的 10BASE2（BNC 连接器）和基于双绞线的 10BASE-T（RJ-45）。今天的以太网卡已基本没有 10BASE2 接口了。

以太网采用的技术是 CSMA-CD。以太网采用总线型结构，一根主线贯穿始末，其他的线只是主线的分叉，每台主机都通过网线连接到“总线”上，当某台电脑要发送信息时，必须遵守以下规则。

- （1）开始：如果线路空闲，则启动传输，否则转到第（4）步。
- （2）发送：如果检测到冲突，继续发送数据直到达到最小报文时间（保证所有其他转发器或终端检测到冲突），再转到第（4）步。
- （3）成功传输：向更高层的网络协议报告发送成功，退出传输模式。
- （4）线路忙：等待，直到线路空闲。

(5) 线路进入空闲状态：等待一个随机的时间，转到第(1)步，除非超过最大尝试次数。

(6) 超过最大尝试传输次数：向更高层的网络协议报告发送失败，退出传输模式。

其实用不着做这么复杂的解释。我们可以想象一个没有主持人的座谈会（如图 4-15 所示），没有领导和员工之分，没有上下级之分。每个参加者如果有话要说，都必须礼貌地等待别人把话说完再发言。这个会议如果采用 CSMA-CD 技术，相当于做了如下规定。

(1) 每次只能有一个人发言。

(2) 任何人想发言，必须举手。

(3) 如果多个人同时举手，就让每个人等待一个随机时间。

(4) 一个人发言完毕，看刚才等待的人是否到了等待时间可以发言了，如果没有，则等待下一个人举手发言。



图 4-15 一个会议的“冲突检测”



图 4-15 一个会议的“冲突检测”（续）

因为所有的通信信号都在共享线路上传输，即使信息只是发给其中的一个目的地，任何一台计算机发送的消息都将被所有其他计算机收到。在正常情况下，网络接口卡会滤掉不是发送给自己的信息，只有正确的接收者才会读出信息的内容。这种“一人说，大家听”

的特质是共享介质以太网在安全上的弱点，因为以太网上的任何节点都可以选择是否监听线路上传的所有信息。共享电缆也意味着共享带宽，所以在某些情况下以太网的速度可能会非常慢。

有了以上的基础，我们不难判断，作为以太网，它必须有合适的编码机制来保证上述方法的实施。以太网的帧格式如图 4-16 所示。

目的地址：“我要到哪里去？”48 位的目的 MAC 地址。

源地址：“我从哪里来？”48 位的出发地 MAC 地址。

类型：“我是干什么的？”以太网的大池子里跑的不仅仅是数据信息，还有主机间相互交流所必需的握手信号，比如后面将讲到的 ARP 和 RARP。为了将数据信息和握手信号区分出来，需要有类型定义字段。如果类型是 0806，就是 ARP 的请求和应答；如果类型是 8035，就是 RARP 请求和应答。这两种情况下，数据字段最后还有 18 位填充字段（PAD）。社会车辆和警车，无论在道路上还是在停车场，受到的待遇当然不完全相同，数据信息和握手信号在网络中和主机中享受的待遇也是不完全相同的。

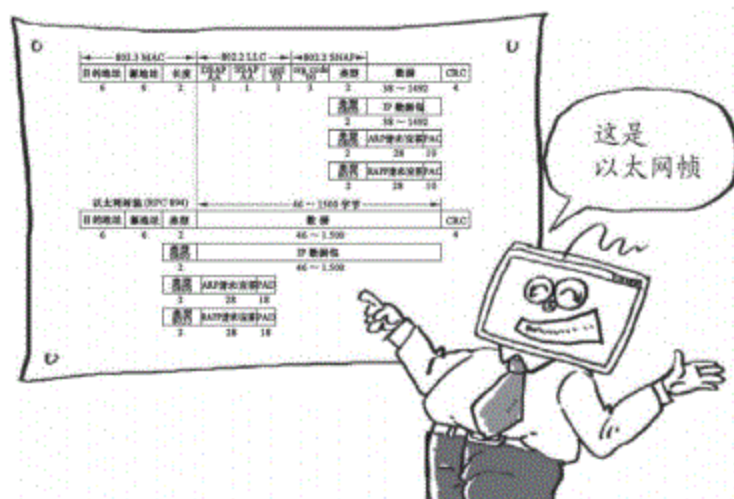


图 4-16 以太网的数据帧格式

数据：“根据类型，你知道我葫芦里卖的什么药？”这是以太网承载的数据信息，根据上面的“类型”字段推断出数据是何种类型后，再根据这种类型的格式要求进行拆包和分析。按照 RFC894 的规定，数据字段的长度为 46~1500 字节。而 RFC1042 中规定，其长度为 38~1492 字节。

CRC 校验（如图 4-17 所示）：“看，这是我的装箱单。”以太网的校验机制，用于检查整个帧传送过程中是否出现了错误。在通信领域，几乎每种技术体制的分组格式都要进行校验，因此都包含校验字段。在这个纷纷扰扰的世界里，传送、运输、速递、邮寄，总不是那么让人放心，于是，一张“装箱单”还是很必要的。当发送站发出数据分组时，一边

发送，一边逐位进行 CRC 校验。最后形成一个 32 位“CRC 校验和”填在帧尾 FCS 位置中，并随着整个帧在网内传输。接收站接收后，对数据帧逐位进行 CRC 校验，如果接收端形成的校验和与帧的校验和相同，则表示媒体上传输帧未被破坏；反之，接收端认为帧被破坏，要求发送站重发这个帧。



图 4-17 CRC 校验

从物理层提取到的 0 和 1 的数据集合，被“框”入以太网帧格式中。目的地址、源地址、长度、校验和、数据信息等。每台接收到以太网帧的交换机或者主机都将根据其中的信息接收、转发或者处理这个以太网帧。

那么有一个问题，各位不知道是否想到过——物理层发送上来的 0 和 1 的序列，节点设备如何能识别出一个帧是从哪个 0 或者 1 开始的？

这的确是个棘手的问题。10 个班的小学生排队去参观博物馆，如果他们全部排成一列，您如何能区别出这 10 个班来？最简单的方法是，每个班第一个学生前面加一个老师，这样，每当看到一个老师，就知道后面第一个学生是下一个班的第一个人，再看到一个老师，这个老师前面的一个学生就是上一个班的最后一个人，而接下来，是一个新的班级了（如图 4-18 所示）。

以太网也是采用类似的方式在帧与帧之间“划清界限”。当然，以太网帧中不可能插进一名老师，而是采用 0 和 1 交替出现的 7 个字节。当接收装置连续接收到 7 个这样的字节，就可以判断出，从下一个字节开始，将接收一个新的以太网帧了，直到再次出现连续的 7 个 0 和 1 交替的字节，一个以太网帧结束，下一个以太网帧又开始了。

一个以太网帧的长度是 64~1518 字节。

在 10Gbit/s 以后, 又出现的 40Gbit/s 和 100Gbit/s, 都是 IEEE 高速研究组制定的下一代以太网技术标准。40Gbit/s 主要针对计算应用, 而 100Gbit/s 则主要针对核心和汇聚应用。通过提供两种速率, IEEE 意在保证以太网能够更高效、更经济地满足不同应用的要求, 进一步推动基于以太网技术的网络汇聚。这两种速率的以太网标准保留了 802.3MAC 的以太网帧格式, 但定义了多种物理介质接口规范。这里就不再赘述。



图 4-18 学生排队

2.IP 数据包格式

IP 技术是互联网的基础, 其编码格式也是适应互联网的需求的。本节我们先来看看 IP 数据包的编码格式, 如图 4-19 所示。

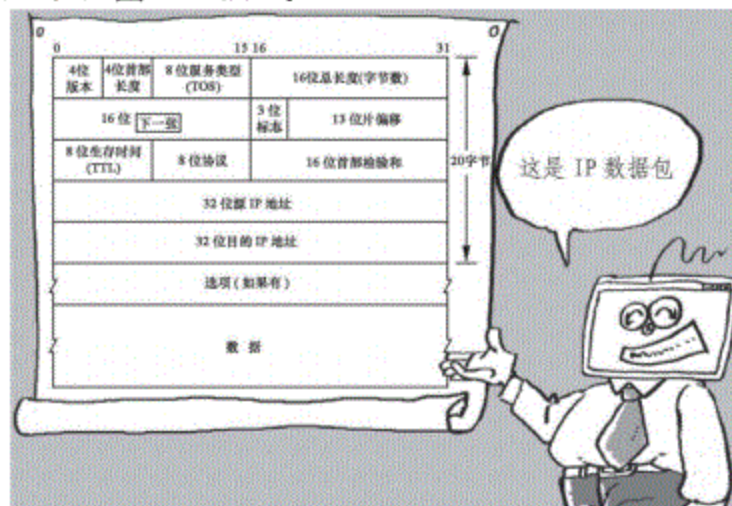


图 4-19 IP 数据包的格式

让我们看一看一个 IP 数据包的各个字段含义。

版本号：“我是哪个版本”，这是 IP 的版本号。众所周知，版本只有两个：IPv4 和 IPv6。

包头长度：“我的车头有多长”，这是指 IP 包头的长度。IPv4 以 32 位（4 字节）为一个单位，从“首部长度”4 位的情况看，IP 包头最大也就 64 字节，512 位。

TOS：“我有多重要”，标识传送优先级。在传统的 IP 技术中，TOS 字段用于标明 IP 包的类型。在没有 QoS 的网络中，TOS 字段只是自娱自乐，没有任何实际意义；而在具有 QoS 保障的 IP 网络，比如 MPLS 里，TOS 的意义才真正体现出来。这个字段由现在不再使用的 3 个优先权位、4 个 TOS 位和 1 个必须为 0 的未用位组成。4 个 TOS 位是：最小延迟、最大吞吐量、最高可靠性和最小费用（见图 4-20）。我想读者一定都在嘀咕：那这 4 个我都要！NO！IP 包装法规定：这 4 位只能有 1 位为 1！正所谓：鱼和熊掌不能兼得，4 种好东西，只能四选一。Telnet 采用最小延迟为 1；SNMP 采用最高可靠性为 1；其他位，只能设置为 0。

字节总长度：“我这列车一共有多长。”这是整个 IP 包的总长度指示，以字节为单位。用这个字段和包头长度做减法，可以得出 IP 包中数据部分的起始地址和长度。由于这个字段是 16 位，所以 IP 数据包的最大尺寸是 2 的 16 次方，即 65536 字节。



图 4-20 最小延迟、最大吞吐量、最高可靠性、最小费用，单选

标识：“我是第几个包”。一个大的报文，经常要被拆分为几个小包进行传送。一列火车拉不了这么多货物，分批次很正常。这个字段就是为了标识该 IP 数据包是这一报文被拆分成的第几个包。

片偏移：“我在最早那个数据包中的位置”。一个 IP 包在网络中可能会再次被拆分，比如以太网帧中数据字段的最大长度为 1500 字节或者 1492 字节（RFC894 和 RFC1042

的规定略有区别），数据链路层都有此特性，这个最大传送长度被称为 MTU。如果 IP 数据包长度大于链路层的 MTU，等待它的是“裂刑”——将一个大的 IP 包拆分为多个小的 IP 数据包，并各自带有 IP 包头，拆分后的 IP 包在网络中被独立地路由，它们在到达目的地之前不会被重组。这可能会造成一种现象：某个大包的各个分段不按顺序到达最终目的地，如果这种情况发生，怎么保证目的地成功地将这些分段组合起来呢？IP 包头需要足够的信息让接收者正确地重组这个大包。“片偏移”字段，就是拆分包的终端告知重组的终端，这个包是从最早那个数据包的哪个位置开始的。

标识和片偏移配合使用，才能使分段和重组工作正常进行。

标识字段为发送者送出的每个包保留一个独立的值，这个数值被拷贝到某个特定 IP 包的每个分段。标识字段用一位作为“更多分段”位，除了最后一段外，该位在组成一个数据包的所有分段中被置位。

片偏移含有该分段自初始数据包开始位置的位移，并且，当一个数据包被分段后，每分片的“总长度”字段为该分段的相应长度。

标识字段中的其中一位称为“不许分片”位，若此位被置位，则不会对该包分段，而是扔掉该包并且送给发送者一个 ICMP 错误。

当一个 IP 数据包分段后，每个分段变为一个独立的包，带有其自己的 IP 包头，并且各自独立地被路由。这使得有可能某包的分段不按顺序到达最终目的地，但 IP 数据包中有足够的信息让接收者正确地重组这个包。

TTL：“我能跨越多少台路由器”。可以想象，必须对 IP 数据包能跨越的路由器数目进行限制，否则，某些陷入路由死循环的 IP 数据包将永远在路由器之间闲逛。TTL 就是这种事件的终结者。IP 数据包被发出时，发送者将 TTL 初始化为某一值，比如 32 或者 64，每个处理过该数据包的路由器将这个字段值减 1，假设到达某台路由器，发现减去 1 以后，这个字段变成 0，那么这台路由器将举起“尚方宝剑”，毫不留情地砍掉这个 IP 数据包。

协议：“我携带的信息是属于哪类服务协议的”。1 是 ICMP，2 是 IGMP，6 表示 TCP，17 表示 UDP。

头检验：“我的车头的检验值”。仅在包头范围进行计算，不涉及包头后面的任何数据。校验的目的只有一个：判断 IP 包头是否被正确传输。

源地址：“我从哪里来”。用 4 个字节来标识包是从哪个 IP 地址出发的。

目的地址：“我要到哪里去”。用 4 个字节来标识包的目的地 IP 地址。

选项：“我还有啥要携带的”。是该数据包可选信息的可变长列表。目前定义的选项有：安全和操作限制（军事目的）；路径登记（让每个路由器登记其 IP 地址）；时间戳（让每个路由器登记其 IP 地址和时间）；松散源选径（规定该数据包必须穿越的 IP 地址列

表)；严格源选径(规定该数据包只能经过规定的 IP 地址)。这些选项很少使用，并且，不是所有的计算机和路由器都支持所有的选项。

数据：“我所携带的货物”。这是 IP 数据包携带的真的数据信息。IP 数据包其他所有字段，都是为了传送本字段而设立的。

IP 数据包理论上最长可达 65535 字节，但大多数的链路层都会对它进行“切分”货物太大，而箱子并没有那么大，那么对货物的拆分就不可避免。

在 IP 数据包中还有一种 ICMP(报文控制协议，第 11 章介绍其应用场景)的报文协议，如图 4-21 所示，我们看到的只是“火车的车身”，它会加上 IP 数据包头、以太网帧头后在局域网中传送。关于 ICMP，我们在第 11 章会详细讲解。

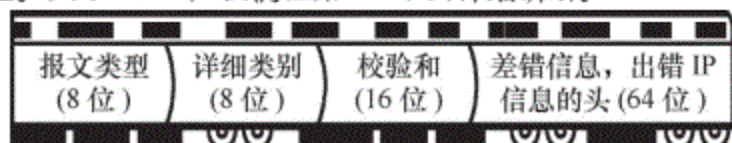


图 4-21 ICMP 的数据包格式

3. 帧中继帧格式

帧中继技术被用来连接两个局域网——企业分支机构之间的互连，或者企业连接到运营商的骨干 IP 网络上。帧中继是典型的数据链路层的技术，因此帧中继的编码封装也被称为“帧”。国际上，帧中继网络发展一度非常快，而我国数据通信起步较晚，并没有大规模发展起来。

如图 4-22 所示的帧结构可以方便地将以太网的帧交换变换到骨干传输的电路交换(如 SDH)或者 ATM 交换上来。



图 4-22 帧中继的帧结构

4. ATM 信元

通信网上的传递方式可分为同步传递方式(STM)和异步传递方式(ATM)两种。STM 的特点是：在由 N 路原始信号复合成的时分复用信号中，各路原始信号都是按一定时间间隔周期性出现，所以只要根据时间就可以确定现在是哪一路的原始信号。而异步传递方式的各路原始信号不一定按照一定的时间间隔周期性地出现，因而需要另外附加一个标志来表明某一段信息属于哪一段原始信号。

ATM 与 STM 传输方式示意如图 4-23 所示。

前面讲到的 PCM 编码格式属于 STM，按照时间切片，整齐划一地传送信息，如果当前线路没有数据分组，则传送空分组。STM 不是对每个字符单独进行同步，而是对一组字符组成的数据块进行同步。同步的方法是在数据块前面加特殊模式的位组合（如 01111110）或同步字符（SYN），SYN 是一种特殊的字符串，用以表示“接下来就是一个完整分组”。

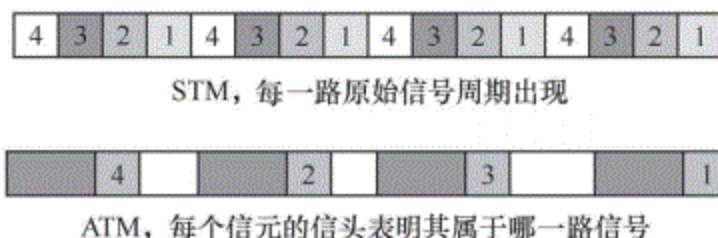


图 4-23 ATM 与 STM 传输方式示意图

ATM 的工作原理是：每个分组作为一个单元独立传输，分组之间的传输间隔为任意时间。ATM 技术一度被认为是未来通信网的核心，它在设计之初就被定义为能够承载任何信息的载体，这就很容易理解它为什么被设计为定长的 53 字节的帧格式（如图 4-24 所示）——适应快速交换能力，提高网络传输速度，尤其是语音信息，必须实时性强，那么采用 53 字节的信元，就有利于语音的快速传送。

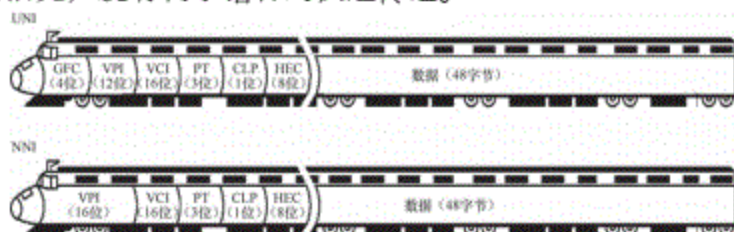


图 4-24 ATM 信元的帧格式

在这里我们要知道，既然是异步传递方模式，那么任何 ATM 交换机都必须能够识别从端口进来的信元，尤其是识别以下所述的两大信息。

第一，每个信元到底从哪里开始呢？ATM 的信元头中藏有相关信息，可以识别信元处在哪个位置。这个隐藏的信息就是 HEC。如何识别出哪一位是信元的开始位，我们称为“信元同步的检测”，如图 4-25 所示的方法，就是一般 ATM 交换机的检测方式。

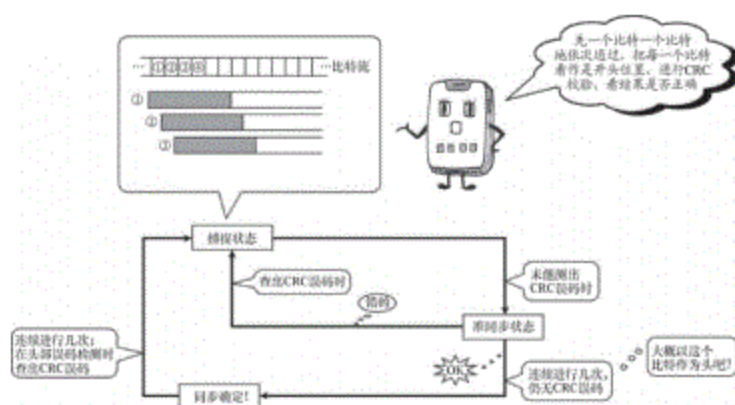


图 4-25 信元同步的检测

第二，这个信元属于哪条逻辑链路呢？ATM 信元头中的 VPI/VCI 值，就是链路标识符，通过这两个值的搭配使用，系统就能很容易识别这个信元属于哪条逻辑链路，如图 4-26 所示。

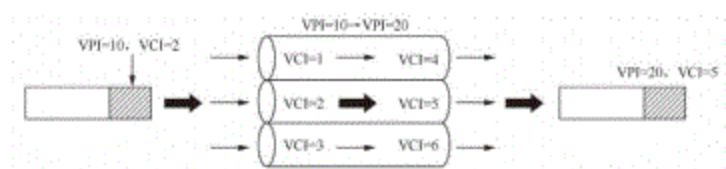


图 4-26 信元头中的 VPI/VCI 识别该信元属于哪条链路

5. SDH 与 SONET

同步数字体系（SDH）与同步数字光纤网（SONET）是国际电信传输的两大标准体系，它们统一了世界上原有的数字传输系列，实现了数字传输体制上的国际标准及多厂家设备的横向兼容，这一点明显比其先驱——准同步数字体系（PDH）有更多的优势。这里所说的“兼容”，包括统一的数字速率等级、帧结构、复接方式、线路接口和监控管理，从而简化了信号的互通以及信号的传输和交叉连接。

正因此，SDH/SONET 被广泛应用，语音、数字数据网（DDN）、帧中继、以太网、IP、ATM 都可以承载在 SDH/SONET 上。那么对 SDH/SONET 编码格式的研究就很有价值。在 SDH/SONET 中，定义了“虚容器”，它是一种用来支持通道层连接的信息结构，这个容器并不是用来盛水盛物，而是用来存放各种数字信息。研究 SDH 的帧结构，读者就可以了解“虚容器”是如何构造的，以及 DDN、IP 数据包、ATM 信元都是如何“装进”这些“虚容器”中的。

生活中人们创造出各种容器用来装固体、液体和气体。而 SDH/SONET 是如何设计“虚容器”的呢？SDH/SONET 是以 155.52Mbit/s 为基础的序列。在这里说的“基础”，是指

现有的北美日本体系 1.544Mbit/s、欧洲和亚洲（日本除外）的 2.048Mbit/s 系列的速率全以 155.52Mbit/s 的速率进行“多路复用”，凡是超过这个速率的传送，其速率是 155.52Mbit/s 的 4 倍、16 倍、64 倍，也就是 622Mbit/s（严格地说，622Mbit/s 应为 622.080Mbit/s。接下来我们可能会简化一些数字，如 155.52Mbit/s 简化为 155Mbit/s、2.048Mbit/s 简化为 2Mbit/s）、2.5Gbit/s、10Gbit/s、40Gbit/s。

好，先让我们假设这个容器是一个长方形，里面有 9 行、270 列的正方形小格子，每个格子代表 8 位（也就是 1 字节），每秒钟，这个长方形格子在线路上传送 8000 次。还记得 8000 这个数字吗？对，在 PCM 一节有过介绍，而这里是人为定义，目的是方便计算。那我们看看每秒钟实际传送了多少位，这个数字其实就是线路的速率了。

$9 \times 270 \times 8 \times 8000 = 155520000$ ，也就是 155.52Mbit/s！

当然，这个长方形是经过专家精心设计的，每个数字都恰到好处，于是我们得到了 SDH/SONET 的传输速率：155.52Mbit/s，这在欧洲和中国的 SDH 标准中被称为 STM-1（往下还有 STM-4、STM-16、STM-64、STM-256 等），而在美国和日本的 SONET 标准中则被称为 OC-3（往下还有 OC-12、OC-48、OC-192 等）。国际上的两大传输标准，在这里完成了“统一大业”。

可以看看每个小格子的速率，每个小格子有 8 位，而每秒钟会重复 8000 次，于是每个格子的传输速率为： $8 \times 8000 = 64000$ ，也就是 64kbit/s。为什么这么设计呢？因为每路 PCM 语音是 64kbit/s，DDN 是以 64kbit/s 为基准的，要么是它的整数倍，要么是它的整数分之一。

接下来我们更进一步地告诉各位，SDH/SONET 的 155.52Mbit/s 并不都用来承载信息，这个长方形容器如图 4-27 所示，前 9 列被称为段开销（“开销”的英文叫作 Overhead）。而 SDH 的段开销是整个长方形的先验信息，传送时插入误码监视信息以及用于网络维护管理的信息。开销以外的部分才真正承载用户要传递的信息，被称为“有效负载”（英文叫作 Payload）。（英文的原意比较有趣，Payload 是指收费运输的货物，而 Overhead 则表示“直接赚不了钱”。）那么在线路上，这个长方形怎么被传送呢？要知道，线路上某一个时刻只能有一个电压信号，同一时刻只能传送一位“0”或者“1”。把这 9×270 的长方形想象为小学生用的作文纸，中文的书写顺序就是长方形中信息的传送顺序。

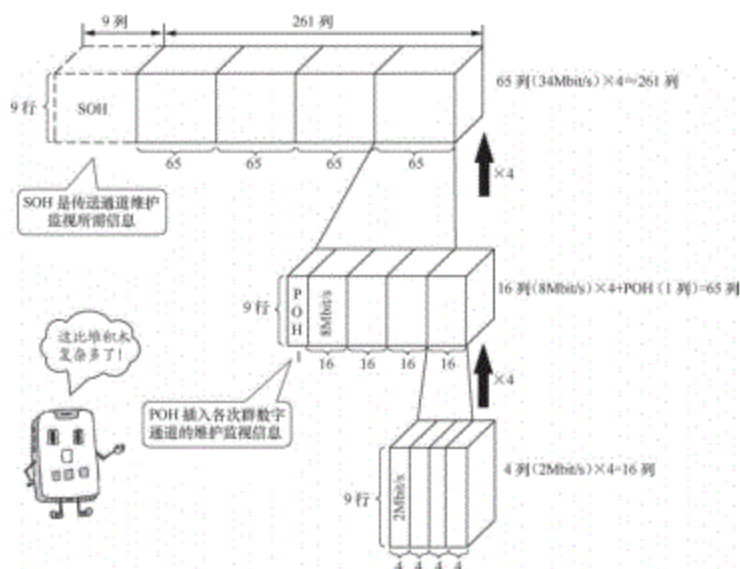


图 4-27 SDH 的帧结构 (以 155Mbit/s 为例)

好了，容器介绍完了。那怎么把信息装到容器中，然后在线路上传送呢？我们拿 ATM 为例说明 (如图 4-28 所示)。

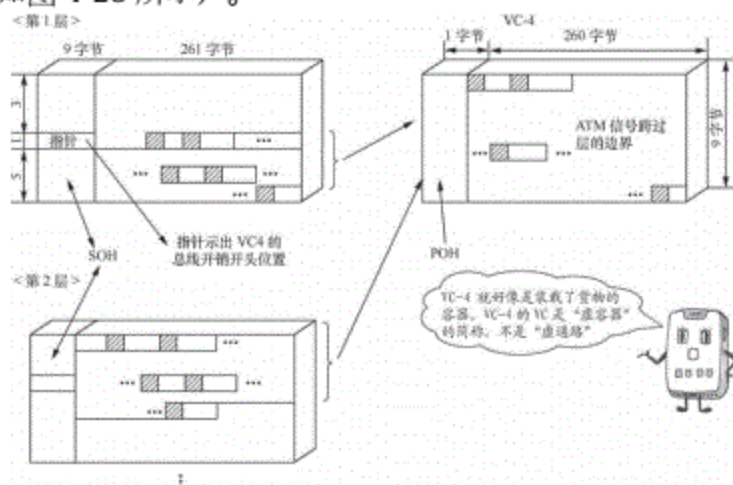


图 4-28 ATM 信元是如何封装到 SDH 上的 (以 155Mbit/s 为例)

最后我们看一下 622Mbit/s 速率的容器是如何设计的 (如图 4-29 所示)。

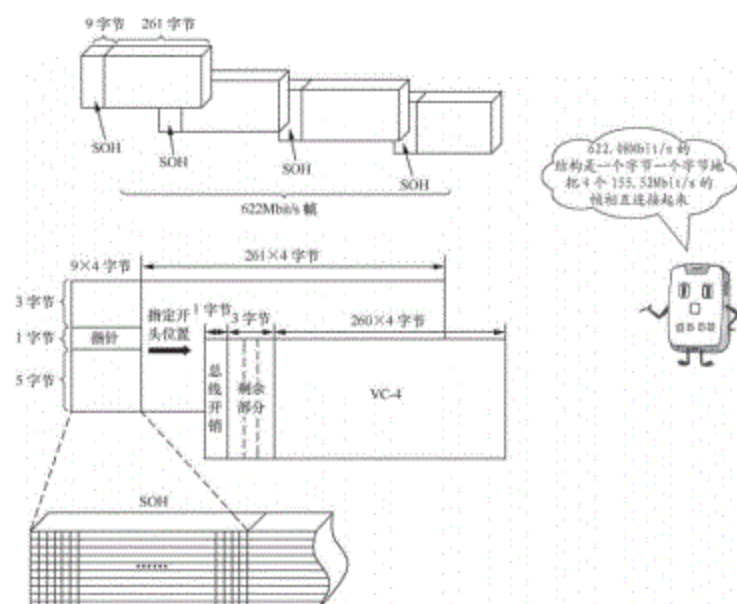


图 4-29 622Mbit/s SDH 的帧结构

数据包、帧和信元名称的统一问题

在数据通信中，各种技术体制都有自己对数据格式的严格定义，而每种技术体制的数据格式名称各不相同，加上翻译方法上的差别，造成名称不像数据格式的定义那样统一。

比如 IP 的数据格式，有的人称为“IP 数据包”（IP Packet），有的人称为“IP 数据报”（IP Datagram）；以太网的数据格式，有的人称为“以太网数据报”（Ethernet Datagram），有的人称为“以太网帧”（Ethernet Frame）；最统一的叫法，是帧中继中的“帧”和 ATM 技术中的“信元”（Cell）。一般来说，“数据报”是比较通用的说法，不限定在任何层，也不限定任何技术；而“帧”一般指数据链路层的数据报；“数据包”一般指网络层的数据报。

通信中不“统一”的事情时有发生，即使“统一”了，容易引起歧义的地方也有很多，通信行业的这种状况，需要我们的通信人在学习过程中多问几个为什么，多去查查资料，多去和资深人士交流，多看看专业书籍，尽量用规范的语言来描述专业的概念，避免在技术理解上出现偏差。这很重要！

图像和视频编码

传真能够让静态图形、图像异地传送，拍下来的照片或者录像存放在存储介质中，通过电子邮件可以发送给你的朋友。但是在通信中我们提到的图像和视频，有一个专用的英文词叫作 **Videograph**，研究的核心问题是如何实时地传送它们。电话会议、可视电话、即时通信中的视频聊天、远程监控，都需要将视频实时传送到远端。也就是说，要现场直播，而不要实况录像！

那么，考虑到实时性要求和清晰度，视频编码比语音编码要复杂很多，同时还要考虑视频编码中的声音搭配——必须让视频和语音同步。在视频会议中，没有人希望屏幕上的发言者嘴形和听到的声音对不上。

推动图像编码技术走向大规模应用的基础是图像压缩编码的国际标准。国际上音视频编解码标准主要有两大系列：ISO 制定的 MPEG 系列标准，以及 ITU 针对多媒体通信制定的 H.26X 系列视频编码标准和 G.7 系列音频编码标准。1994 年由 ISO 和 ITU 合作制定的 MPEG-2 是第一代音视频编解码标准的代表，也是目前国际上最为通行的音视频标准。此外在互联网上被广泛应用的还有 Real-Networks 的 RealVideo、微软公司的 WMT 以及 Apple 公司的 QuickTime 等。音视频产业可以选择的编码标准有 MPEG-x/H.26x 和中国自主知识产权的 AVS 系列。

MPEG 使用起来比较简单，在压缩的第一步，构建一种参考帧，它是原视频画面的一个拷贝，在传输中，MPEG 在每 15 帧中加入一个所谓的 I 帧，而一系列视频画面中，在帧与帧之间只有少量信息发生了变化，有了参考帧，其他帧就很容易被压缩。因此，MPEG 就有了“预测帧”和“双向内插帧”这样有助于视频最大化被压缩的帧。

H.264 既是 ITU-T 颁布的标准，又是 ISO 的 MPEG-4 高级视频编码（AVC, Advanced Video Coding）的第 10 部分，因此，不论是 MPEG-4AVC、MPEG-4Part10，还是 ISO/IEC14496-10，都是指 H.264。与其他现有的视频编码标准相比，它能在相同的带宽下提供更加优秀的图像质量。当然，技术的先进性总伴随着实现的复杂性，看一看 H.264 所采用的编码流程的名称，就知道 H.264 技术的复杂了：帧间和帧内预测、变换和反变换、量化和反量化、环路滤波、熵编码。

2012 年，爱立信提交了首款 H.265 编码器，6 个月后，ITU-T 批准了这一新标准——高效视频编码，这一标准，又在 H.264 基础上进行了大幅度优化，华为公司在 H.265 上拥有最多的专利。H.265 的目的，是在有限带宽下传输更高的网络视频，仅需原先的一半带宽，就可以播放相同质量的视频，同时也支持 4K（4096×2160）和 8K（8192×4320）超高清视频！在 H.264 统治了几年之后，H.265 又将成为业界主流。

另外一个标准，是我国拥有自主知识产权的第二代“信源编码”标准——AVS（先后有 AVS1、AVS+和 AVS2 等版本）。“信源”是信息的“源头”，信源编码技术解决的重点问题是数字音视频海量数据（初始数据、信源）的编码压缩问题，故也称“数字音视频编解码技术”。显而易见，它是其后数字信息传输、存储、播放等环节的前提，因此是数字音视频产业的共性基础标准。AVS 标准是《信息技术先进音视频编码》系列标准的简称，它包括系统、视频、音频、数字版权管理 4 个主要技术标准和一致性测试等支撑标准。目前，AVS 系列标准已经成为中国广播电视行业的强制标准。2013 年，IEEE 将 AVS 列为 IEEE 标准（标准号 1857），AVS 正在逐步走向世界。

所有与标准有关的讨论，都不可回避专利费问题。H.264 和 H.265 标准都有着比较复杂的专利费缴纳体系，而 AVS 标准相对简洁和实惠，采用 AVS 专利池统一许可模式，实际上，AVS 至今也没有收取过专利费。未来，AVS 也可能只对设备象征性地收费，而不对内容收费。有关通信行业专利问题是个复杂的集技术、资本、政治为一体的问题，有兴趣的读者可以进行专项学习。

2019 年，我们将迎来 AVS3 标准的问世，面向 8K 电视、VR 等视频应用，编码效率将比 AVS2 再提升一倍。我们拭目以待！

第5章 讲讲“寻址”

1889年，美国堪萨斯城，殡仪馆生意竞争惨烈。任何人要找殡仪馆，都要先接通接线员，说“请接殡仪馆”。但这位接线员已经被×老板做了工作，每次来电都接到×老板那里（用现在互联网行业语言，这叫“导流”）。这让以殡仪馆为生的史瑞乔苦不堪言，生意越来越差，濒临破产。然而史瑞乔非常聪明，他在发现问题后，潜心研究，发明了一种机器——不靠人工接线而通过机器进行“自动交换”（见图5-1）。这台机器虽然看起来很笨重，但获得了巨大的商业成功，甚至这种成功连这位发明人自己都没有想到，对后世有如此大的影响！

这台机器就是最早的交换机，学名“步进制自动交换机”，是今天程控交换机的祖先！后来的公共通信网，无论是语音通信还是数据通信，如果不是特殊的应用场合，一般都不再用人进行信息转接，而是用机器自动“寻址”。



图 5-1 史瑞乔发明自动电话交换机

编码的事情讲解完了。大家已经知道，自然界的任何信息，都需要通过特定的编码方式在通信网络和线路上传送。

有了基本的信息传送方式和传送通道，我们将涉足通信网络中另外一个核心环节——寻址。也就是说，有了车辆，有了道路，解决了货物如何装箱、车辆如何排序之后，我们该进入一个新的课题——车辆如何从出发地顺利地到达目的地？

开场白

最初级的寻址是寻找方向，寻找方向是为了不做“南辕北辙”的傻事。通信网络有几种通信的方向。

- 单工 (Simplex)：数据只能在一个方向上流动，如传统的电视信号传送。

- 半双工 (Half-Duplex)：可切换方向的单工通信，从某一时刻看，是单工的；从总体看，又是双工的，如行业使用的对讲机。

- 全双工 (Full-Duplex)：通信允许数据在两个方向上同时传输，它在能力上相当于两个单工通信方式的结合，如我们的电话、互联网、交互式视频通信等。

单工就像单行道，半双工就好比独木桥，全双工就是来回可对行的轨道交通，如图 5-2 所示。这里要注意，通信的方向是指两个网络节点设备之间的数据流方向，并不是指管线本身的数据流方向。一对同轴电缆，一根由 A 向 B 传送，一根由 B 向 A 传送，并不能说每根都是“单工”的。因为从 A 和 B 的角度来说，它们可以同时相互传送信息，这应该属于全双工模式。



图 5-2 单工、半双工和全双工分别像单行道、独木桥和高铁
有了方向，才有寻址的可能。

任何接入通信网络的终端 A，若需要从网络中另一个终端 B 获取信息，必须知道 B 所在的位置。这个位置，就要用地址来表达。比如你要给某个人打电话，就必须知道对方的电话号码；要浏览某个网站，必须知道网站的 WWW 地址，或者，某个页面上有这个地址的链接。总之，无论何种通信网络，要获取信息或者进行信息交互，发起者一般要知道信息所在的地方，而这些地址必须通过某种统一格式（如电话号码、IP 地址、域名）或者风格（超文本链接、电视频道）的标识来表示。

在任何一个通信网络上，每个节点都需要有规范的、可查询的地址标识。比如在电话交换网上，电话号码就是地址标识；对 IP 层网络，IP 地址就是地址标识；对以太网，MAC 地址就是地址标识；在互联网上，网址或者超文本链接地址就是地址标识（如图 5-3 所示）。



图 5-3 各种各样的地址格式

不同的网络，地址标识的设置方式不同。比如 IP 网，可以手动设定计算机的 IP 地址；在以太网中，MAC 地址一般是网卡出厂时写“死”的（当然也有修改方法）；在电话交换网上，电话号码是电信部门和基础运营商统一规划和分配的，企业分机号则是企业网络管理员分配的。相同的通信技术体制，地址标识都有统一的规范，避免人为造成的互通障碍。

有了地址，还要有找到地址的方法。前边我们说过，至少在目前，任何网络元素都是非生物的，只能由人赋予一定的“智能”，而同类的网络节点，赋予智能的方式、方法以及规则必须相同或者类似，否则各个网络设备无法理解其他设备的方式、方法和规则，整个网络若没有共同语言，会让网络上传送的信息无所适从。通信网中要寻址，就要有统一的地址规划和寻址方式。

我们先来回忆一下，在生活中我们从 A 地到 B 地是如何“寻址”的，如图 5-4 所示。

如果把 A~F 这 6 个地点看作 6 个网络节点，每个节点都应有一个道路指示牌，指示牌的格式是：

目的地 可选路径

这在通信网中就叫作“路由表”。

在本例中，我们所说的“网络节点”，在工程实践中有可能是以太网交换机、路由器、程控交换机、ATM 交换机、MPLS 交换机、SDN 交换机、防火墙、负载均衡器等。

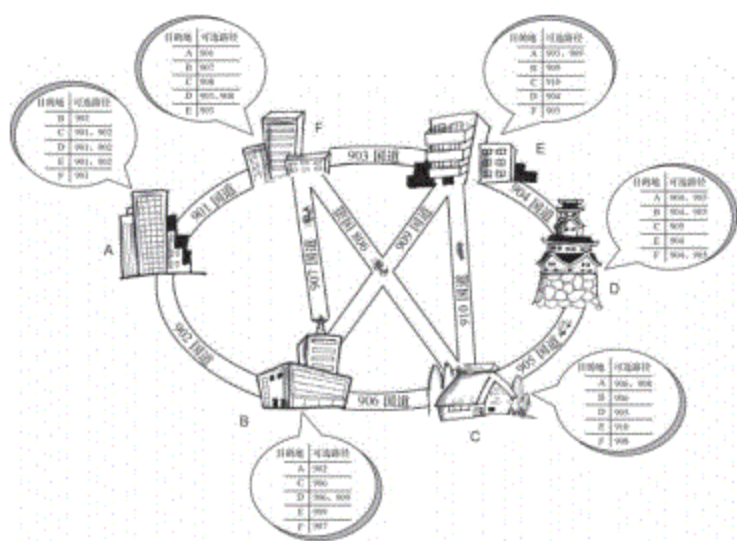


图 5-4 6 个节点设备的图和每台设备的路由表

下面我们从电话交换网的寻址讲起。

电话交换网的寻址

电话交换网的地址编号就是我们熟悉的电话号码。电话号码在全球都有统一的规范。我们暂不考虑企业内部的交换机，只考虑整个统一的电话交换网，有以下几个原则：

- (1) 电话交换网上的电话号码（地址）必须统一分配；
- (2) 任何电话交换机都必须了解这一分配规则；
- (3) 电话交换机将无条件执行人赋予它的功能，绝不能“随心所欲”，更不能“为所欲为”；
- (4) 电话交换网上的终端才分配号码，交换机本身并不分配电话号码。

当然，第（3）条说了也是白说，毕竟它是机器，机器绝对会听人的话，如果你认为机器没有按照你的指令办事，请查你的指令是否出了问题，千万别怀疑机器是不是太过聪明，于是单独行事了——那是好莱坞电影的常见桥段，今天的科技还远未达到这种水平！

有了上述原则，我们看一看电话号码是如何分配的。

给每个国家分配一个唯一标识的国家代码，比如中国是 86，美国是 1。每个国家可以选择是否设置城市级别的区域号码。如在中国，长沙是 0731，北京是 010。

然后，每个城市都把号码分成“块”，每个块分属不同的地区。比如北京的号码，我们可以把 11xxxxxx（以 11 开头的所有号码，11 称为“前缀”）分配给海淀区，12xxxxxx（以 12 开头的所有号码）分配给朝阳区，等等。这样分的好处是简化了路由表的长度。比如你把 11 和 12 开头的号码打乱分给两个区的终端，如果一个电话从朝阳区的交换机进入北京骨干网络，来寻找 11234567 这个终端，而这个终端在海淀区，那么这个号码在朝阳区的交换机上必须有条路由，**11234567C1-2-3**，也就是说，要到达 11234567，必须从 C1-2-3 这个接口出来。如果另外一个号码 12345680 也在海淀，朝阳区的交换机就要增加这么一行路由：**12345680C1-2-3**，也就是说，要到达 12345680，也必须从 C1-2-3 这个接口出来。

这样太复杂啦！海淀区每增加一个终端，就要在朝阳区的交换机上增加一个路由条目。而如前文所说，11 前缀分配给海淀，12 前缀分配给朝阳，问题就简化了很多。如上例中的情况，只需在朝阳交换机上设置这么一条路由就够了：**11xxxxxxC1-2-3**。这里面的叉号，叫作“通配符”。

其实国家代码、区号起到的作用和终端号码前缀的作用是一样的。在同一个国家，号码具有唯一标识，在同一个城市，号码也具有唯一标识。如果在不同的国家，有可能存在除了国家代码不同，号码其他部分相同的情况；如果国家代码相同、地区代码不同，也可能出现不同地区拥有相同的号码的情况。

这和门牌号是非常相似的。我们去某个朋友家，朋友把地址告诉你，你肯定不会先去查看他的具体楼层，而是先看属于哪个城市、哪条街道、哪个小区，然后再看具体的楼层和房间号码，这样才能快速找到朋友家。只是通信技术中的地址（号码）更加规范和严格，稍有分配错误，就别指望系统有自恢复能力。

接下来介绍以太网的寻址。

以太网内的寻址

接下来要介绍刚刚提到的著名术语——媒体访问控制（MAC，Media Access Control）。MAC 可以理解为信号在通信线路介质传送中的一种最基本的管理和控制能力。

这里的“管理”是指通过某些标准化操作，避免传送发生错误；而“控制”是指通过某些规范化的操作，让信号按照既定策略传送和转换。媒体访问控制，其实就是对物理层传送的 0 和 1 进行最基本的管理和控制，防止它们出现错误，并在这一层展开寻址工作。通过 MAC 层，将物理层获取的信号经过上述的规范化操作处理后送到更高层去处理，让更高层专注于路由、传输和应用，无须操心底层的传送过程。这就像老师带着几个班级的孩子们穿越斑马线，通过斑马线的过程可能是散乱的、不规则的，队伍中人与人之间的距离忽远忽近，这取决于当时路口的路况和交通灯状况，在穿越过程中还要防止孩子丢失、摔倒、顺序错乱，等到孩子们全部通过后，再重新规整，点好名、排好队，向下一站进发。

以太网的每一个节点都被分配了一个全球唯一的 48 位地址，由 IEEE 统一管理。前面我们也讲过，网卡制造商将 MAC 地址烧录到每一块网卡中。MAC 地址就像身份证号码一样具有唯一性。当然，这种唯一性也不是绝对的。身份证还能造假，更何况 MAC 地址。

我们看一下老杨这台计算机的 MAC 地址吧：在 Windows 上运行 cmd，在 DOS 界面下输入 Ipconfig-all 命令，显示的 Physical Address 就是这台计算机网口的 MAC 地址：00-1B-38-8AA4-A1（见图 5-5）。注意，这是按照 16 进制数字表示的，每个数字都代表 4 位 2 进制。

如果这个数字用 2 进制表示，0~23 位（也就是 16 进制前 6 个数字）叫作“组织唯一标志符”，是识别 LAN（局域网）节点的标识。24~47 位是由厂家自己分配。其中，第 40 位是组播地址标志位。

主机获取了以太网帧以后，会拆掉以太网帧的头部，这时，净荷将裸露出来。接下来，就是 IP 层及其上层的操作了。

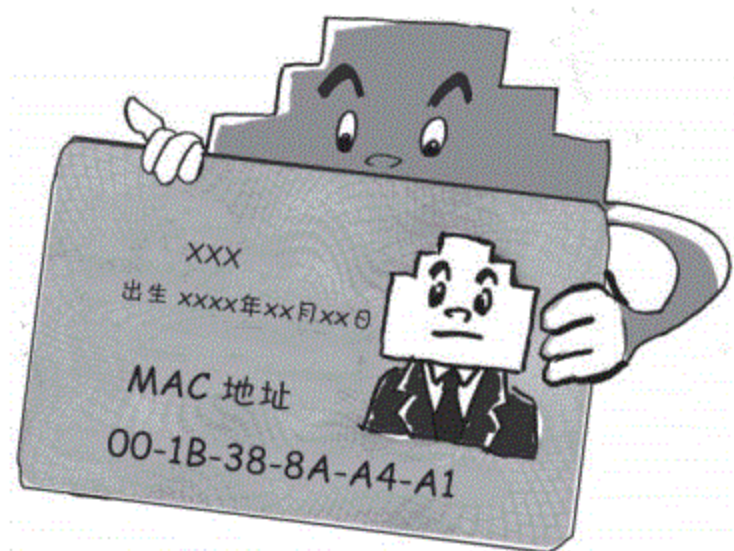


图 5-5 MAC 地址的含义

在一个以太网内，连接了几台到几十台主机。要把信息从 A 主机送到 B 主机，一般都通过 IP 层进行互通。但是对于一台主机而言，其底层的硬件和 IP 地址并没有直接关联，也就是说，一个 IP 数据包从 A 传送到 B，B 并不能通过 IP 地址匹配的方式识别自己是不是这个数据包的目的地地址，而是要通过底层硬件来匹配。那么底层硬件知道什么呢？硬件只知道 MAC 地址——很多时候，MAC 地址被称为“硬件地址”。

MAC 地址确定了，“门牌号”就编好了。继续讨论数据帧寻找目的地 B 的过程。首先，主机 A 发送一种叫作 ARP（“地址解析协议”，我们在第 4 章介绍过其帧格式）的以太网帧，这个帧包含 A 的 MAC 地址、A 的 IP 地址、目的地 B 的 IP 地址，而把目的地的 MAC 地址设置为 00000000，意思是：本数据包要发送给所有局域网中的主机——这就像 A 要送礼物给 B，但是只知道 B 的名字（IP 地址）却不知道 B 的住址（MAC 地址），那么这个 ARP 包的广播，就像 A 挨家挨户去敲门一样，它要寻找叫作 m.n.p.q 的主机。于是所有住户（主机）判断自己的名字（IP 地址）是否为 m.n.p.q。只有 B 发现自己的名字（IP 地址）是 m.n.p.q，于是 A 就记下了 B 的门牌号码（MAC 地址），以后 A 和 B 之间的礼尚往来，就不需要再去挨家敲门了，如图 5-6 所示。

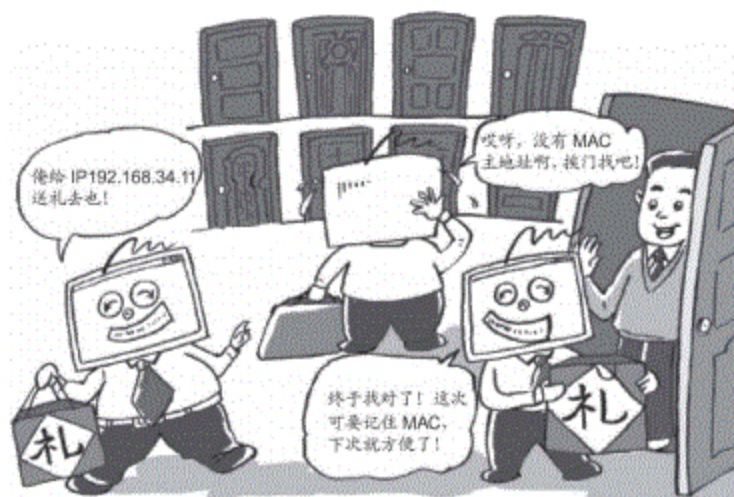


图 5-6 MAC 地址寻址

MAC 地址和 IP 地址的映射关系，被每台主机不断更新并保存，就成了“地址映射表”。当然，每次的添加或更改地址映射表表项的工作都被赋予一个计时器，这使得这种对应关系只能存储一段时间，如果在计时器倒计时结束之前没有再次捕捉到更新，该表项将被删除。也就是说，主机的 MAC 缓存是有生存期的，生存期结束后，将再次重复上面的过程。这样操作是为了防止 IP 地址“搬家”。许多运营商或者企业在分配 IP 地址时采用动态分配方式，电脑关机后，该 IP 地址会在一段时间后失效，新连网的电脑可能会占用这个 IP 地址，该 IP 地址会有新的 MAC 地址，造成这个局域网里所有电脑的地址映射表都过期了。

当局域网的主机通信量增大、主机数量进一步增大时，通信效率将会大幅度降低。这很好理解。任何一个会议，如果没有主席控制，几千个人——即使他们都文质彬彬，即使他们都遵守纪律，势必也需要很长时间才能讨论清楚任何一个议题。很难想象这样的会议会有什么好的效果！解决这个问题一个很好的方案是设置几个分会场，每个分会场分别讨论，然后汇总。而以太网技术中，可以把所有主机分为几个组，每个组采用桥接的方式连接，每个组，就被称为一个“网段”，连接主机组的设备被称为“网桥”。注意，一个网段的 IP 地址，必须是同一个子网下的！在现实生活中，网桥可以是一台独立的设备，也可以是一段链路层的线路，比如前文我们介绍过的帧中继或者 ATM 电路，它就可以用于连接局域网，当然也可以连接几个局域网的网段了。

想象一下以太网中熙熙攘攘的热闹景象吧，各种类型的以太网帧川流不息，找“路”的、发“货”的、广播的，忙得不亦乐乎。但是以太网有一些基本规则，比如只有格式完整的数据包才能从一个网段进入另一个网段；再比如冲突和数据包错误都将被隔离到本网段，

“家丑不可外扬”。通过记录、分析网络上设备的 MAC 地址，网桥可以判断它们都在什么位置。这样，它就不会向非目标设备所在的网段传递数据了。

早期的网桥要检测每一个数据包，因此同时处理多个端口时，数据转发相对 HUB 来说要慢。1989 年网络公司 Kalpana（后被思科收购）发明了世界上第一台以太网交换机。以太网交换机把桥接功能用硬件实现，这样就能保证很高的数据转发速率。

在同一个网段内的寻址问题解决以后，我们将着手讨论不同网段的 IP 寻址，这就是常说的“IP 网寻址”问题。

IP 网的寻址

IP 网寻址是 TCP/IP 中的精华，它简单、灵活、开放、实用。从 IP 地址规划开始，IP 寻址就开始了一套严格的规划，路由和交换的基本原则、DNS、NAT 的应用等，无不体现着人类的智慧！

1.IP 地址规划

IP 的地址编码比 MAC 地址复杂。要了解 IP 地址的规划，就必须先学习二进制。IP 网和 PSTN 的建设主体不同，地址规划和寻址方式差异也很大。互联网是全球最大的 IP 网，它的地址规划是由全球唯一的 IP 网地址管理机构——互联网名称和数字地址分配机构（ICANN）来负责的。

注意，IP 网络中，所有的终端都应该有 IP 地址，而网络上的路由器和带路由功能的交换机，一般情况下每个路由接口也都应分配 IP 地址，这一点和 PSTN 不同。还记得吗，PSTN 中，程控交换机本身是不被分配电话号码的。路由器的每个接口可以是一个接口，也可以被切分成多个“逻辑接口”。比如一个信道化 E1 接口按不同时间隙分成多个组，每个组可设定为一个“逻辑接口”。

IP 地址是一个 32 位二进制数字，理论上从 32 个 0 到 32 个 1，一共 232 个地址。如果我们用二进制表示 IP 地址，那将非常烦琐，并且不容易记忆和书写。办法总比困难多。于是人们用 4 段数字表示，每一段就是 8 位二进制数，用十进制表示就是 0~255。一个 IP 地址可以用如下形式表示出来：

A.B.C.D

上面的 A、B、C、D 分别是 0~255 中的任何一个十进制数字。但是我们经常见到的 IP 地址，往往后面带着一个以 255 开头的另外一组数字，如一个 IP 地址是：

211.99.34.33

255.255.255.248

这才是完整的某台主机的 IP 地址描述。它分为两个部分，第一部分是我们常说的 IP“主机地址”，后面的叫作“子网掩码”，用来标识该 IP 地址所在的子网（大部分是局域网）网段有多大。有了这个规范的 IP 地址，你甚至能计算出这个子网的网段是从哪个地址开始、到哪个地址终止。这就像做自我介绍——“我叫老杨，我来自北京市海淀区××街”一样。

在 IP 地址中，采用子网掩码，其实就像一个国家要设置省（州）、市、县（区）、乡、村一样，而不是直接给每家每户设置一个没有范围可供检索的门牌号。这样做的目的，就是要简化管理，提高查询的效率。

比如上述的例子，211.99.34.33 是从 211.99.34.32 开始到 211.99.34.39 结束的整个子网网段中的一个 IP 地址。该网段的第一个 IP 地址 211.99.34.32 叫作“子网地址”；最后一个 IP 地址 211.99.34.39 叫作“广播地址”。

这是怎么计算出来的呢？下面给出简单的算法。

假如子网掩码是 $M.N.P.Q$ ，你可以套入这样一个公式： $(256-M) \times (256-N) \times (256-P) \times (256-Q)$ ，得到的结果，即是这个网段一共有多少 IP 地址。在本例中， $(256-255) \times (256-255) \times (256-255) \times (256-248) = 8$ ，那么你就知道这个网段一共有 8 个 IP 地址。

再看看这个 IP 地址 211.99.34.33，因为我们已经计算出它所在的网段一共有 8 个地址，所以你只要把最后一个小圆点后面的数字从 0 到 255 分组，每 8 个连续的地址编号作为一组，看 33 在哪个组里面即可。0~7 是第 1 组，8~15 是第 2 组，依次类推，32~39 是第 5 组，而 33 正在 32~39。我们一般说的“网段”，就是指这样的“组”。于是得出结论，211.99.34.33 在子网地址为 211.99.34.32、掩码为 255.255.255.248 的网段中。

如果在书写 IP 地址时，只写地址，不写子网掩码，就无法判断这个地址属于哪个网段。就好比你知道你朋友家的门牌号和所在楼的单元号，而不知道他住哪个区的那条街，这样你是无法找到朋友家的。子网掩码还有一种简单的书写方法，就是在 IP 地址后面加上“/n”，如果你知道这个网段有 X 个 IP 地址，假设 $2^Y=X$ ，那么 $n=32-Y$ 。比如上面例子中的网段有 8 个 IP 地址， $2_3=8$ ，那么 $n=32-3=29$ 。上述例子的 211.99.34.33 就可以表示为：

211.99.34.33/29

互联网上使用的 IP 地址，被人为地分为 A 类、B 类、C 类、D 类和 E 类共 5 种，如表 5-1 所示。

表 5-1 IP 地址类别

类别	地址范围
A	0.0.0.0 ~ 127.255.255.255
B	128.0.0.0 ~ 191.255.255.255
C	192.0.0.0 ~ 223.255.255.255
D	224.0.0.0 ~ 239.255.255.255
E	240.0.0.0 ~ 255.255.255.255

A 类、B 类和 C 类是最常用的单播 IP 地址，D 类地址用于组播，E 类地址被保留用于扩展和实验开发与研究。还有一些地址有特殊功能，如下说明。

● 0.0.0.0/0，未知网络，通常默认保留，常用于代表“缺省网络”，在路由器表中用于描述“缺省路径”。缺省路径的意思是享有最低优先级，在没有特别定义的情况下，IP 数据包会按照该地址所定义的路由表项进行转发。

●127.0.0.0/8，表示回环地址和本地软件回送测试之用，保留而不分配。

●255.255.255.255/32，有限广播地址。

我们经常在公司里配置自己的计算机，用到的却是上面没有规定的一些地址，比如192.168.3.1，就不属于上述任何一类。这是为什么呢？原来，还有一种地址叫作“私有IP地址”，它们也被分为3类，如表5-2所示。

这3个IP地址段不会被互联网的公用服务器使用，而是在企业内网里使用。怎么理解呢？你到A公司，可能某台主机的地址是10.1.1.30/8，那么你到另外一个公司B。很有可能另外一台主机也被分配了10.1.1.30/8的IP地址。

表 5-2 私有 IP 地址空间

私有 IP 地址	A 类	10.0.0.0 ~ 10.255.255.255 (8 或者 255.0.0.0 子网)
	B 类	172.16.0.0 ~ 172.31.255.255 (16 或 255.255.0.0 子网)
	C 类	192.168.0.0 ~ 192.168.255.255 (24 或 255.255.255.0 子网)

各位读者，不管你是否参与通信产品的技术类工作，请记住上述的IP地址分类，互联网已经渗透到我们生活、工作的各个角落，而对IP技术而言，地址规划是互联网的基础。学会它、掌握它，你才能更加熟练地应用它。

对于二进制学得不太好的人，可以借助一些不错的小软件计算IP地址，如SubNet Masks，可以帮助你轻松理解和计算IP地址。

2.DNS——互联网地址翻译家

太棒了，我们终于可以通过IP地址访问互联网上的任何主机了！我们只要想访问它，就记住它的IP。可是，这些数字真的让人头痛！有没有更好的方法呢？比如，用一串好记忆的名字来替代这些由数字组成的枯燥的IP地址，岂不是更方便？只要你在IE浏览器里面输入这些名字就能够访问服务器，这样多方便啊！这个名字就叫作“域名”（见图5-7）。

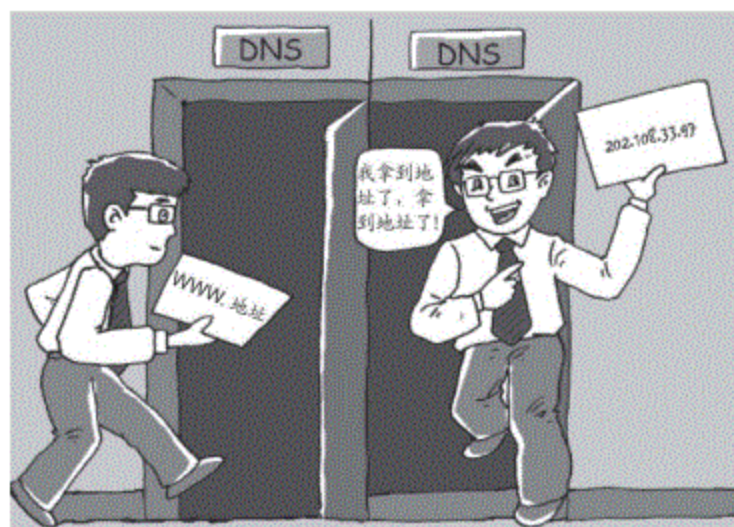


图 5-7 DNS

域名类似于写信时信封上的地址，如城市名、区名、街道名和门牌号等，有一定的层次。域名解析体系把地址自左向右分成几段“根域”，通常是分为 3~4 段，分别用字符表示主机名、网络名、机构名和最高域名。其中，最高域名也可称为“第一域名”，一般是代表国家或地区的名称，比如 **cn** 代表中国、**uk** 代表英国、**us** 代表美国，等等。美国是互联网的发源地，所以美国的许多单位和组织都采用国际顶级域名，而其他国家一般都用国家代码作为第一级域名。机构名称称为“第二级域名”，通常是代表组织或城市名，例如，**com** 代表商业组织、**edu** 代表教育机构、**gov** 代表政府部门、**org** 代表社会团体等。我国的省市名也属于这一级，如 **bj** 代表北京、**sh** 代表上海、**gd** 代表广东等。1999 年国内出现了“中文网址”。

我不说大家也能猜出来，域名和 IP 地址肯定是有对应关系的，网络上一定有一个机构能够把这些“域名”翻译成枯燥的 IP 地址。事实也是如此！互联网“聘请”了一个翻译，叫作“DNS 服务器”。

这样的翻译工作并不容易，因为翻译的工作量大，工期还很紧，从客户角度出发，这个翻译过程只能以 **ms** 计时！DNS 是一个大型分布式数据库，存储了互联网上所有已经被确认域名的主机和 IP 地址以及它们的对应关系。每个域名都配备主、辅两套服务器存储上述对应的信息。而全球还有 13 个处于顶端的“根服务器”，存储了所有授权域名服务器的列表。

好，最后一个问题，域名是由谁管理的？还记得我们在 IP 地址规划中曾经提到的那个全球唯一的 IP 网地址管理机构——互联网名称和数字地址分配机构（ICANN）吗？对，就是成立于 1998 年 10 月，集合了全球网络界商业、技术及学术各领域精英的非盈利

性国际组织，负责 IP 地址的空间分配、协议标识符的指派、通用顶级域名（gTLD）以及国家和地区顶级域名（ccTLD）系统以及根服务器系统的管理。真可谓“一网之下，亿众之上”的强权机构！

3.IP 路由

IP 地址的规划，让整个 IP 网络有了行政区划和门牌号码。一个 IP 数据包从一台主机出发，要到达另外一台主机，就需要“路由”了。严格地说，不同网段之间的 IP 数据包的传送被称为“路由”。如果你要把包裹寄给上海的亲戚，那么你需要通过邮局走复杂的“邮路”，而如果你只想给你的邻居送圣诞礼物，你就直接送过去好了，根本没必要经过邮局。IP 的路由就类似邮政中的“邮路”。

进入 IP 网的 IP 数据包，就像一个刚从外地来访友的人，他手里握着朋友的地址，在熙熙攘攘的城市边缘，不知道前面等待他的是什么。IP 数据包和这个人一样，他知道自己的目的地，却不知道如何到达这个目的地。这么多出口，走哪条呢？路由器是个诚实的哲学人，它问 IP 数据包：你从哪里来？要到哪里去？IP 数据包从自己的分组结构里取出自己的出发地和目的地，路由器经过判断，会告诉它，你要从第 5 个出口出去！IP 数据包根据哲学家的指示离开这台路由器，到达下一个路由器，继续上述过程。如此反复，直到它到达了自己的目的地。这时读者就明白了，原来，路由器会告诉 IP 数据包怎么选择到达目的地的路啊！是的，的确如此！但路由器是根据什么来指路的呢？奥秘就在于每台路由器都存储着一张路由表，这张表中的内容会正确地指引每个 IP 数据包前进的道路！

IP 路由的技术原理，就是将任何一个 IP 数据包的目的 IP 地址取出，与路由表对照，定位出口在哪里，并将 IP 数据包输送到该出口上去。当然，如果该输出端口为帧中继端口，那么 IP 数据包必须按照相关规范封装成特定 DLCI 值的帧中继帧格式，从该端口传送出去。

现实存在着这样一种状况，在路由器的路由表项中，一个目的地地址可能有多条路径可供选择。读者会说了，“条条大路通罗马”，可以理解啊。别急，一个 IP 数据包进入路由器，路由器告诉它，“兄弟，你要到罗马，这有多条路，你随便选一条吧！”IP 数据包是没有智能的，如果让“非智能体”自己选择出路，它只有一个结局——迷失方向！虽然路由器指出了到罗马的多个（最多 8 个）出口，但是就某个特定 IP 数据包而言，究竟选择哪个出口，权力依然在路由器。路由器的组织相当严密，会让目的地是罗马的 IP 数据包按某个规则（其实是有很多规则的）从不同的出口出发，比如第 1 个包从端口 1 出去，第 2 个包从端口 2 出去……也就是说，对于某个特定的 IP 数据包，路由器只会给它某个确定的出口，如果其端口在同一网段内，则路由器会发生混乱，如图 5-8 所示。这就是路由器的“转发”机制，而这种转发机制，同时也实现了“负载均衡”。

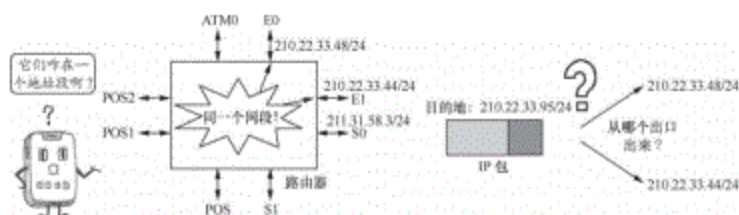


图 5-8 路由器的两个端口在同一个网段内，路由会发生混乱

看来，有了路由表，就像正在城市边缘迷茫的年轻人拿到了地图一样，终于有办法找到城里的亲戚了。看来这张路由表太重要了！爱刨根问底的读者又会问新的问题了：路由器是如何获取路由表的呢？下一节告诉你！

4.IP 路由协议

在 PSTN 里，每台交换机都存储着一张路由表，这张表，是人为输入的。整个 PSTN 是一个完全可管理的、可控制的、分层的网络。但是 IP 网则不同，它不是一个自上而下管理的网络，而是一个庞大的分布式系统。IP 地址所处的地理位置根本没有统一的规律可以遵循，不像电话号码那样携带国家代码、区号等信息。所有路由节点都人为地设置路由表是不可行的。最好有一种办法，能让每一台路由器“自动”获取路由表。

这种办法，IP 专家已经替你规划好了——使用 IP 路由协议！换句话说，IP 路由协议就是路由表获取和建立的机制。在第 11 章，我们会专门介绍各种 IP 路由协议，如 RIP2、OSPF、IS-IS 和 BGP。

5.地址单播、组播和广播

现实世界里，人讲话的目标可以是一个人、一组人和所有在场的人。IP 世界与之相对应的，是单播、组播和广播。在前言里我们曾介绍过这 3 种模式。

一对一的情况，叫作“单播”。大部分的通信模式都是单播。

某主机发送同一数据包到多台主机（一次的、同时的），叫作“组播”。组播可以在一个局域网范围，也可以扩展到整个 IP 世界。如果想跨越局域网，组播必须得到所有经过的路由器的支持。

一台主机发送同一数据包到子网内所有主机，叫作“广播”。广播的适用范围很小，只在本局域网有效，路由器会封锁广播消息，否则，后果很严重。

在网络音频、视频应用中，尤其是 IPTV、VoD、直播等业务中，需要将一个节点的信号传送到多个节点去，无论采用重复点对点的方式，还是采用广播方式，都会严重浪费网络带宽。这时采用组播技术，是最好的选择。

组播能使一个或多个组播源把数据包只发送给特定的组播组。只有加入该组播组的主机才能接收到数据包，并不影响组播组之外的其他终端。

怎么标识组播组的地址呢？各位还记得前面介绍的 5 类 IP 地址中的 D 类地址吗？这类地址的范围是 224.0.0.0~239.255.255.255，它们又被划分为局部链接组播地址、预留组播地址、管理权限组播地址 3 类。

局部链接组播地址是为路由协议和其他用途保留的地址，范围是 224.0.0.0~224.0.0.255，只有 256 个地址，路由器并不转发属于这个范围的 IP 包。

预留组播地址为 224.0.1.0~238.255.255.255，可用于全球范围的网络。

管理权限组播地址是剩下的 239.0.0.0~239.255.255.255，可供组织内部使用，类似于私有 IP 地址，不能用于互联网，可限制组播范围。

要实现 IP 组播，要求介于组播源和接收者之间的路由器、交换机必须都支持 IP 组播。这在今天来看，完全是纸上谈兵！

虽然今天 IP 组播已经得到了硬件、软件厂商的广泛支持，但电信运营商早期部署的网络，并未对组播进行详细规划，而要整体支持组播，必须对当前网络进行彻底的改造，投入巨大，而产出不明，以至于目前的 IP 组播技术只能在局部网络内小打小闹。

当然，我们不能刻舟求剑，要用面向未来的眼光看待问题。假设，我的意思是“假设”，我们今天大部分路由器都支持组播，那么新加入的一台路由器，该怎么做，才能支持组播服务呢？

一言以蔽之：这台路由器必须提供对 IGMP 和组播路由协议，如对协议独立组播（PIM）或者距离向量组播选路协议（DVMRP）等的支持能力。

IP 的组播技术可以被广泛应用于 IPTV、VoD、视频会议、网络直播等音视频广播领域，只是目前在网 IP 设备支持组播的还不多。就像 20 年前无法想象今天互联网的状况一样，我们同样无法预测 20 年后的状况。如果发展趋势不变，20 年后的组播应用将极为广泛，除了才提到的 IPTV、VoD 业务外，还有视频会议、网络直播、多媒体远程教学、虚拟现实游戏等，都急切盼望组播技术尽快普及。

6.TCP/UDP 的端口

在网络技术中，端口（Port）这个词经常会被初学者混淆。集线器、交换机、路由器中俗称的“端口”指的是连接线缆的物理接口，如 RJ-45 端口、Serial 端口等。

我们这里所指的“端口”不是物理意义上的端口（或者严格地说，路由器上的物理端口应该称之为“接口”），而是特指 TCP/IP 中的一种逻辑标识，是一种特殊的“地址”。

那么 TCP/IP 中的端口指的是什么呢？如果把 IP 地址比作一间房子，端口就是出入这间房子的门。一间房子最多只有几个门，而一个 IP 地址的端口可以非常多！端口是通过“端口号”来标记的，端口号的范围为 0~65535。

我们来看看端口号的应用（如图 5-9 所示）。一台网络上的主机很可能同时提供许多服务，比如 Web 服务、FTP 服务、SMTP 服务等，这些服务完全可以通过一个 IP 地址来实现。那么，主机是怎样区分不同的网络服务呢？也就是说，当它接收到一个 IP 包，如何判断这个 IP 包属于哪种类型的应用？

这很重要。根据端口号，主机中的操作系统和应用软件才能判断这个 IP 包该如何处理。

IP 地址与网络服务的关系是一对多的关系。在实践中，主机将通过“IP 地址+端口号”这一组合来区分不同的服务。

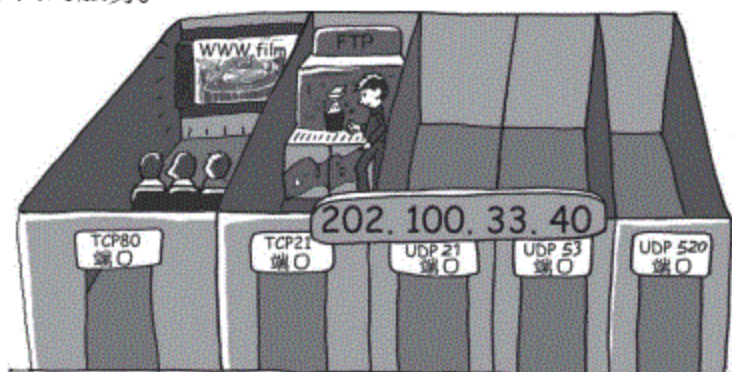


图 5-9 端口号的应用

需要注意的是，即使是同一种服务，两个通信终端的端口号并不是一一对应的。比如你的计算机作为客户机访问一台 WWW 服务器时，WWW 服务器使用 80 端口与你的计算机通信，但你的计算机则可能使用 3457 这样的端口。这叫“本地有效”。

按对应的传输协议类型，端口有两种：TCP 端口和 UDP 端口。它们各自的端口号相互独立，比如 TCP 有 235 端口，UDP 也可以有 235 端口，两者既无冲突，亦无关联。

为特定应用服务的固定端口也被称为“众所周知的端口号”，范围为 0~1023，比如 TCP 的 80 端口分配给 WWW 服务，TCP 的 21 端口分配给 FTP 服务，UDP 的 500 端口分配给互联网密钥交换等。我们在 IE 的地址栏里输入一个网址时（比如 www.sina.com.cn）是不必指定端口号的，因为浏览器在默认情况下，WWW 服务的端口号是 80。

使用其他端口号的，则应该在地址栏上指定端口号，方法是在地址后面加上冒号“:”（半角），再加上端口号。如使用 8080 作为 www 服务的端口，则需要在地址栏里输入 <http://192.168.34.38:8080>。

有些系统协议使用固定的端口号，它是不能被改变的，如 139 端口专门用于 NetBIOS 与 TCP/IP 之间的通信，不能手动改变。

动态端口的范围是 1024~65535。之所以称为动态端口，是因为它不被固定分配给某种服务，而是采用动态分配的方式。

动态分配是指当一个系统进程或应用程序进程需要网络通信时，它向主机申请一个端口，主机从空闲的端口中分配一个号码供它使用。当这个进程关闭时，同时也就释放了所占用的端口号。

7.IPv6——让 IP 地址枯竭成为历史

应该说 IP 寻址在技术原理上是完美和可靠的，这也成为互联网蓬勃发展起来的主要支撑力量。然而令所有专家们始料不及的一件事情发生了——互联网发展如此之快，以至于……以至于，门牌号不够用了！！！！

我们来看看，IP 地址一共有多少个？2564，约 43 亿个！也许是足够了吧？前面老杨讲过，其中一部分属于私有地址，还有相当一部分被定义为网络标识、广播地址，真正可以给终端用的 IP 地址可谓“多乎哉，不多也”！还有一些事情雪上加霜！我国目前只有不足 4000 万个地址！与其他很多事物类似，这势必造成很多事实上的不平等。要知道，IP 地址数量如果不足，会大幅度增加地址转换设备的投入。很多资源看似“虚幻”，其实很真实，IP 地址就是如此；有些资源看似很“真实”，其实很“虚幻”，就好比某机构向公众出售的月球上的土地。

幸运的是，方法总比困难多。专家们开始琢磨怎么改变这种状况。当然，即使不是专家，也能想到解决 IP 地址枯竭问题最直观的方法就是增加地址的长度，就像当年 5 位数的电话号码满员，就增加 1 位，再不够，再增加。按照这个思路，一个新的技术出现了——IPv6（见图 5-10），而原有的 IP 技术被称为 IPv4。IPv6 的本意再简单不过了：原来是由 32 位地址组成，现在扩展到 128 位。这似乎“小小”的改动，让 IP 地址增加到 2128 个！这个数字太庞大了！除了地址大幅度增加，IPv6 还增强了组播能力、加入对自动配置的支持能力，并提高了安全性。IPv6 的 128 位地址通常写成 8 组，每组为 4 个十六进制数的形式。例如，AD80:0000:0000:0000:ABAA:0000:00D2:00F2 是一个合法的 IPv6 地址。这个地址比较长，看起来不方便也不易于书写。零压缩法可以用来缩减其长度。如果几个连续段位的值都是 0，那么这些 0 就可以简单地以 :: 来表示，上述地址就可写成 AD80::ABAA:0000:00D2:00F2。这里要注意的是只能简化连续的段位的 0，其前后的 0 都要保留，比如 AD80 的最后的这个 0，不能被简化。还有，这一简化过程在一个地址中只能用一次，在上例中的 ABAA 后面的 0000 就不能再次简化。当然也可以在 ABAA 后面使

用::，这样的话前面的12个0就不能压缩了。这个限制的目的是为了准确还原被压缩的0，不然就无法确定每个::代表了多少个0。



图 5-10 IPv6

IPv6 拥有这么多地址，该怎么用呢？我们先别关心它多了怎么办，只要够用且不麻烦就 OK。但 IPv6 在部署过程中还真遇到了麻烦。

诚然，IPv6 让很多严重缺乏 IP 地址的国家欢呼雀跃，但其市场进程一度并没有预想中那么快。首要原因，就是原有设备的再利用问题。全球那么多已经在应用的、尚不知 IPv6 为何物的路由器、交换机、主机，尤其是储量庞大的终端，怎么办？能更新软件支持 IPv6 的还好说，那些不能通过软件更新支持的，总不能把它们全都抛弃吧？IETF 专门成立了一个研究如何部署此过渡过程的研究小组，提交过各种演进策略草案，并力图使之成为标准，如双栈策略、隧道技术、隧道代理、双栈转换、协议转换等技术，它们各有各的优点和缺陷，也都在实践中不断成长和成熟。人人都知道，如果 IP 地址能够走出这一小步，互联网将走出一大步，但是这毕竟是个循序渐进的过程！

正是由于过渡周期很长，很多专家们继续兴致盎然地在 IPv4 上辛勤耕耘，努力延续 IPv4。随着时间的推移，人们渐渐习惯了节约使用 IPv4 地址的方式，大量使用私有地址和 NAT（这是下一节的话题）。然而物联网终端的数量是惊人的，物联网需要的 IP 地址数量无疑也是海量的，预计到 2020 年，将会有 200~500 亿的联网设备，采用 NAT 技术肯定是不现实的。要从根本上解决 IP 地址匮乏问题，还要 IPv6 出马！近几年，IPv6 在全世界已进入实际部署阶段。

值得一提的是，IPv6 的部署对高速发展的中国具有极其重要且现实的战略意义。IPv4 全球根服务器没有一台在中国，1 主 12 辅的根服务器，大部分在美国，少部分在欧

洲、日本，中国只有 3 个根域名镜像服务器。之所以多了“镜像”二字，是因为 DNS 解析的结果最终还会汇总到根域名服务器上，也就是说中国一天没有根域名服务器，无论再多多少个镜像服务器，也仅仅是提高网民访问网页的速度，安全问题得不到彻底解决，拥有 10 个根域名服务器的美国可以轻松得到的中国互联网 DNS 解析相关数据，这对中国的国家安全是非常大的威胁。而 IPv6 领域，我国已经抢占先机，随着全球“雪人计划”——在基于全新技术架构的全球下一代互联网（IPv6）根服务器测试和运营实验项目中，已经在全球完成 25 台 IPv6 根服务器的架设，而中国目前以 1 主 3 辅位列全球各经济体首位。这样的布局，对国家战略极为重要！2018 年年初，中共中央办公厅、国务院办公厅印发了《推进互联网协议第六版（IPv6）规模部署行动计划》，为中国 IPv6 的大改造吹响了号角，近段时间，国内 IPv6 改造的热潮逐渐显现，在 2025 年，中国绝大部分内容、终端、网络基础设施都将支持 IPv6。

8.NAT——网络地址转换

在 IPv6 大规模商用前，如何解决 IP 地址短缺问题？互联网的缔造者和设计者们提供了一种特殊机制：让局域网的计算机关在一个门里面，谁要出去，在门口领一张“出门条”——公用的、合法的 IP 地址；而局域网内的每台计算机，尽量使用私有 IP 地址。这种机制叫作网络地址转换，就是我们常说的 NAT（Network Address Translation），一种将 IP 地址从一个编址域映射到另外一个编址域的方法。

顾名思义，NAT 是一种把内部私有网络地址（IP 地址）翻译成合法网络 IP 地址的技术。前文我们讲过，在 IP 地址规范中，10.0.0.0/8、172.16.0.0/16、192.168.0.0/24 被定义为私有 IP 地址段，企业可以利用这些 IP 地址规划自己的局域网。在互联网上的公用计算机，是不存在上述地址段的 IP 地址的。

我们可以把一个使用私有 IP 地址的局域网想象为一个院子，院子里有很多屋子，每个屋子有它的门牌号。这个门牌号是本院子内部编号，比如 M 、 N 、 P 、 Q 。而这个院子的大门则有一个城市统一规定的门牌号，如西大街 5 号院，这就是地址转换环节。任何人出门，都要告诉别人自己来自西大街 5 号院，而不能说自己在 N 号居住——在这个城市里，存在无数的大院，很多大院可能都有 N 号！

根据不同应用环境，NAT 机制分为 3 种类型：静态 NAT、动态地址 NAT、网络地址端口转换 NAPT。它们应用于不同需求的场合，如图 5-11 所示。

其中，静态 NAT 是设置起来最简单，也最容易实现的一种。内部网络中的每个主机都被永久映射成外部网络中的某个合法的地址，就像院子有 4 个编号，而每个编号都对应该院内的每个屋子。内外地址数量一样，很显然是无法解决 IP 地址短缺问题的。动态地

址 NAT 则是在外部网络中定义了一系列的合法地址，采用动态分配的方法映射到内部网络。NAPT 是把内部地址映射到外部网络的一个 IP 地址的不同端口上。

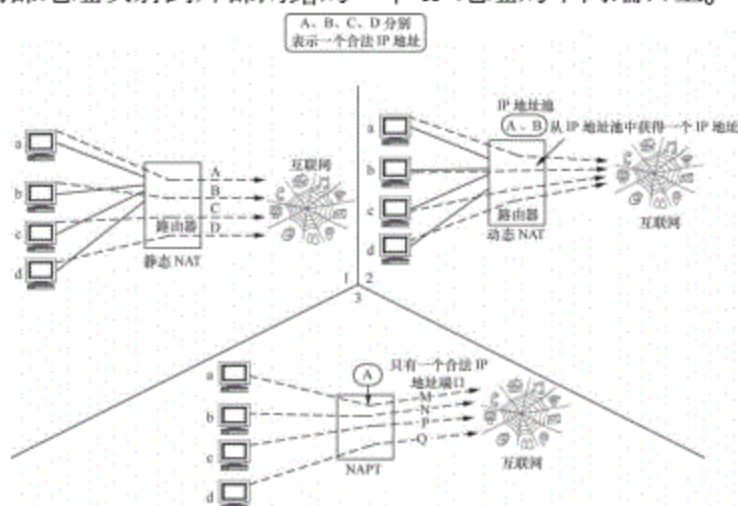


图 5-11 静态 NAT、动态 NAT 和 NAPT

那个发布 RFC 规范的 IETF 组织（在第 22 章我们会提到 IETF 和 RFC）一直主张利用 IPv6 技术解决地址短缺问题，因此 IETF 虽然出版了几个与 NAT 相关的 RFC，但对 NAT 技术一直没有系统的标准化工作，尤其是媒体流的私网“穿越”问题，如 SIP 和 Mobile IP 就是 NAT 出现后设计的一些协议，都未考虑到 NAT 的穿越问题。业界意识到 IPv4 和 IPv6 将长期并存，NAT 以及 NAT-协议翻译（NAT-PT）将继续得到长期应用，还出现了 STUN（UDP 对 NAT 的简单穿越方式）这样的定义 UDP 对 NAT 穿越方法的规范。

怎么会有这么多地址？

通信技术中最抽象的问题之一，就是到处都是“地址”。既然两台主机之间有了 MAC 地址，为什么还要设置 IP 地址？为什么用计算机上网浏览信息，还要用域名地址？看似简单的问题，其实要回答它还真得需要费一些口舌。

人最容易理解和接受的地址在最上层，比如在 IE 的地址栏输入 `www.sina.com.cn`，在电子邮件的收件人一栏写上 `liqiang@ptpress.com.cn`（本书责任编辑的电子邮件地址），这是能看懂、理解、记忆的地址。

但是 `www.sina.com.cn` 这个名称的本质是什么？它是存放在某台或者某组服务器中的一段信息。很可能有多个服务器，每个服务器 IP 地址不同，但是却拥有相同的 WWW 地址，当你去访问这些信息，整个互联网会让你到距离你最近的那台服务器去找，因此 WWW 地址比 IP 地址更适合放在 IE 的地址栏中。

而当输入 `www.sina.com.cn` 之后，互联网的 DNS 会协助找到最适合你访问的那个服务器的 IP 地址，从而形成了你的计算机（也有一个 IP 地址）的 IP 层语言和对方服务器的 IP 层语言互通，获取信息。然而这背后的一切，访问互联网的人是感觉不到的。

如果你的计算机在局域网内部，你的计算机 IP 层发出的信息被准确发出，要通过该局域网的出口路由器。你的计算机需要告诉出口路由器：“我要通过你出门”，那么用 IP 层语言就不够了。因为在局域网里面，你怎么知道那台路由器在哪里呢？你需要把 IP 层语言包装成以太网能读懂的语言，寻找出口路由器并告诉它你要出门。在另外一端，信息服务器所在的局域网也是一样的。当信息经过 IP 网到达入口路由器，入口路由器也要把相关内容翻译成局域网能读懂的语言并送达服务器，反之亦然。

这样就很容易理解，两台主机之间要进行信息交互，信息内容被一层层地翻译成各个层面的语言（如图 5-12 所示），传递到对方后，再一层层翻译回来。这种翻译的过程其实是把原始信息拆包、解包的过程。而在每一层，都有特定机制保证传送的实时性、稳定性和完整性。



图 5-12 多层地址的问题

现实技术中，“层”的概念被创造性地应用。比如 IP 网，大家熟悉的 TCP/IP 架构，一般来说只有 5 层：应用层、传输层（TCP/UDP 层）、IP 层、数据链路层（以太网居多）和物理层。每层都有各自的功能，也都有各自的标准和协议。

国际标准化组织（ISO）定义了一套极其规范、不太实用却又富含哲学意义的 OSI 架构，我们在下一章详细介绍。

第6章 谈谈“优化”

17 世纪的一个下午，德国的莱比锡市郊，一辆马车在泥泞的道路上匆匆地走着，坐在马车里的大律师莱布尼茨，此刻正在苦思冥想，并不断地在纸上写写画画。“我们的宇宙，是上帝创造的最好的一个吗？”“一系列点在空间中的位置是由其间距唯一决定的吗？”“这个世界是离散的还是连续的？”正是基于这些问题的思考，让莱布尼茨在数学、哲学等多个领域都成为当时世界上最有贡献的人，他与牛顿同时发明了微积分这一崭新的数学方法。也正是继续这些思考，使他提出了“形势分析学”的概念，也就是后来的拓扑学。拓扑学对后来的诸多学科都影响重大，包括通信网络的优化领域。

在建立了基本的通信基础架构之后，我们就可以打电话、接入互联网、微信聊天、发送邮件了。很多人认为，通信已经搞定了，还折腾什么呢？从表面上理解，人类文明进展到这个阶段，竟然能够实现远程通信，夫复何求？让我们尽情享受通信的快乐吧！在现实生活中，我们知道这样的常识——要满足相同的需求，投入可大可小，建设可繁可简，质量可高可低，稳定性可严格可凑合，占用资源可多可少。说白了吧，通信业要追求“物美价廉”。这就需要“优化”了！

“优化”隐藏在通信领域的每个细节中，是对诸多技术体制、诸多工程实践的高度浓缩，它无孔不入、无处不在、见缝插针，又由表及里、由外至内、由浅至深。而“优化”又是相对的，新的代替旧的，先进的代替落后的，哪怕同一种技术体制内，也会出现越来越频繁的技术迭代，因此对“优化”的探讨很难有清晰的脉络。试图用分层的思想、分技术类别的思想都很难完整地展现“优化技术”的内在规律，也很难覆盖优化技术的每一方面。因此我们选择通信技术中最常用的技术和思想来进行分析，抛砖引玉，期待各位读者能够理解和掌握其中的规律。

处处都有“优化”在

“优化”是通信中最为宽泛的主题，所有试图增加功能、增强性能、保证安全性、节省投资、提高利用率、减少错误、鼓励创新的技术和理念，都可以归为“优化”的范畴。要想充分利用对通信网的投资、减少浪费，就必须保证已经投资的设备充分发挥潜能。为此，人们付出了艰苦卓绝的努力，把优化融入编码、复用、寻址、交换、传输、信令、安全、调度、开发、建设、运维等各个环节中去。其实，也就是融入到通信技术的每一个细节中去。

满足通信需求最好的方式是无休止地叠加设备，而优化工作就是使通信网建设者将投入进行充分优化从而达到相同的目的。通信网络是由传送线缆和网络节点组成。网络节点或网络拓扑若不做好优化，再宽的光纤带宽，都无法满足人们对通信的需求，因为数据堵塞就发生在这些网络节点上。不信的话，可以想象在城市里，到处是超宽的马路，而十字路口却没有红绿灯，交通状况会是什么样子。

“优化”类似于家庭里面的“理财”。你可以源源不断地赚钱，但是这样未必存款就会增加，更好的方式是你把所有资源有效地利用起来，在最值得消费的场所消费，在最值得投资的项目上投资，把拥有的资产运用在最恰当的场合，发挥最大的效能。

为了让整个通信概念更加清晰，整个行业具有更强的创造力，将通信网络分为若干“实体层”，每个层面分管不同的工作，相互之间拥有标准接口。几乎所有计算机通信类的书籍，都在首要位置把 ISO/OSI 的 7 层结构罗列出来，本书并没有这样做，因为老杨在开始学习计算机网络时，也是从 OSI 开始的，可是在继续学习时反倒更加糊涂了，因为无论是哪种通信技术体制，仿佛都与 ISO 所倡导的 OSI 有些出入——它们总是少几层，还有的根本闹不清究竟在哪一层。

为了保证资源有效利用、通信效率更高，复用技术被广泛应用，这是节约传输资源的基本思想。另外，如何减少传输损耗、用何种网络拓扑最适合人群的通信需求、在网络的哪个位置摆放智能设备而其他地方部署“傻”设备？这是通信网规划设计者的重要研究课题。

为了保证通信网络的正常工作，网络安全成为重中之重，虽然通信中并不存在“车匪路霸”，但是影响网络安全的人或者事物，其性质可能更为恶劣，破坏力可能也更强。对通信安全的威胁，有的是通信人能感知的，如造成通信中断、音质变差、等待时间长等；而有的是无法感知或很难感知的，如窃听、盗打、修改计费数据等。和网络安全有关的“优化”工作层次多、种类繁。

为了提高传输速率，通信网络在线路编码过程中经常采用压缩技术。压缩技术也是提升通信网承载能力，让通信网发挥更大效能的重要手段。

SDH 网的自动倒换技术，是通信网络优化性能、提高安全性的经典案例。SDH 就是凭借这一关键技术，曾经一度长期占据传输领域的统治地位。后来的 ASON 技术延续了 SDH 的这一优势。

IP 和 ATM，孰优孰劣，通过对技术原理进行比较得出的结论恐怕和市场普及状况正好相反。不得不说，最有生命力的技术，一定有其深刻的哲理蕴含其中。IP 和 ATM 之争，即使在若干年后，依然会为通信专家们在制定新的标准和规则时提供宝贵的理论依据和实践经验。目前，大量路由交换设备采用了 ATM 中许多有价值的设计理念（如固定帧长的硬件交换），但必须承认这是新的 IP 技术而非 ATM 技术的苟延残喘。

从数据网络互连和安全的角度考虑，多协议标签交换（MPLS）在高端企业用户市场获得了广泛应用，企业用户可以在骨干 IP 网络上构建企业专网，实现跨地域、安全、高速、可靠的数据、语音、图像多业务通信，并结合差别服务、流量工程等相关技术，将公众网可靠的性能、良好的扩展性、丰富的功能与专用网的安全、灵活、高效结合在一起。MPLS 将在本书多个章节出现，下面介绍 IP 技术优化方面时会专门介绍其基本概念，后面还有第 8 章的 PTN 一节，第 10 章的数据通信，以及第 15 章的企业网应用，都将涉及这个术语。

但仅仅有 MPLS 似乎仍不够智能，扩容速度慢，用户个性化需求的部署速度慢，在云计算时代，更是缺乏对云计算平台的灵活接入能力。企业需要更高的效率、更快的速度、更短的时间，以及更加低廉的成本访问所需内容，数据中心需要更加灵活的流量调度策略互联互通，云计算平台之间也需要更加便捷的管控机制实现虚拟机之间的互操作。于是，有了软件定义网络（SDN），以及其在广域网上的衍生品——软件定义广域网（SD-WAN）。SD-WAN 的典型特征是通过软件方式将网络“云化”，优化网络的控制能力、交付能力及开放方式，让用户通过更加智能的网络部署模式快速接入互联网和云计算平台，并实现分支机构的安全互连，实现网络“切片”。

仅仅把互联网的内容获取方式定义为“客户端——服务器”是远远不够的，海量的用户访问会让任何高性能服务器成为访问瓶颈。内容分发网络（CDN）、VPN 技术、P2P、边缘计算、雾计算、负载均衡等网络技术因此诞生。这些新技术，能够让内容距离用户更近，能够让访问流量获得总体均衡，提升用户访问资源的速度，解决互联网的拥挤状况，更节省了骨干网宝贵的传输资源……

总之，“优化”这一思想，贯穿于通信技术的每一个领域，融入了通信行业的每一个细节，很难说某个技术体制中，哪个协议或者标准属于“优化”的范畴，也很难说哪个技术就纯粹是“优化”型技术。

下面将列举通信技术中一些有代表性的技术规范和技术机理，通过对它们的分析，我们能够更加清楚地了解通信技术的优化环节是多么巧妙、有趣而优美。

分工和职责——通信分层结构

1.为什么要分层？

网络通信要进行优化，就如一个公司混乱的管理要进行改革一样。我们首先思考一下一个企业最可能出现的管理混乱有哪些表现？

●员工“越界”：如员工不经过部门经理，直接向公司总经理汇报工作；秘书经常到总经理处指责其对公司的未来规划缺乏想象力。

●部门经理做“二传手”：如提交给总经理的汇报，是员工汇报的简单叠加；总经理给部门经理分配的工作，部门经理不假思索地推给某个员工。

●两个部门之间职责不清：如市场部经理经常指责客服部员工 A，因为 A 没有按照市场部经理的要求向某个客户提供服务，而是把有限的时间给了另外一个客户，而这个工作是由客服部经理指派的；采购部经理要求市场部员工 B 在某个项目中必须向客户提供联想笔记本，而实际情况是，客户要求必须使用小米笔记本但采购部经理并不知情。

●总经理一抓到底：布置任务跳过部门经理直接与员工沟通，而部门经理也经常布置任务给员工，部门经理无从了解员工的工作量，总经理也无法把控任务的进度。

●公司与客户接口混乱：任何人都可以向客户随意承诺，而承诺出来的东西又无法兑现。

上述问题是很多公司管理混乱的常态。如何改变上述状况呢？不管你做多少培训，增加多少职业经理人，最终改变这种状况的，无非是以下几个举措。

●分层：确定总经理——部门经理——员工的三层结构。每层的职责范围明确定义：公司总经理负责公司战略和重大事务的处理；公司部门经理负责管理部门，公司员工负责具体事务的处理。

●明确层之间的关系：需要明确任何一个层面的人员与上下层的关系。明确谁向谁汇报，谁向谁分配工作。

●对等层之间的关系：需要明确任何一个层面的人员，与对等部门或对等公司的关系（对等公司有可能是客户，也有可能是原材料供应方），任何对等层之间的沟通，有哪些权利和义务。

这样，公司就形成了 3 个层次的机构，每个层次都与上下层次责权利清晰明了，对外业务接口统一，因此业务也开始顺畅。

通信网也必须分出层次（如图 6-1 所示），以保证各种网络技术能清晰地共存和良好地配合，并不断激励新技术的创新。通信网的分层与公司的组织结构很相似。加入通信网中的各个实体就好比是公司，路由器、交换机、防火墙是通信实体，Web 服务器是通信实体，网络游戏服务器和客户端软件都是通信实体，家里的 EPON 小盒子也是通信实体。

一台硬件可以有一个或者多个通信实体，比如一台计算机上同时运行着两个软件，它们可能分属一个操作系统下的两个进程，也可能运行在两个虚拟机（每个虚拟机拥有不同的操作系统）上，还可能封装在同一个操作系统的不同容器内。但通信实体无论怎么承载，都必须满足以下要求：

- 要分出若干层次，管理上类似的功能要放在同一层，在实现技术经常变化的地方增加层次，每个层次有自己的职责；

- 要明确每个层次与上下层的关系，层次之间的边界要合理，使层次间的信息流量尽量最小；

- 要明确每个层面与其对等层面的关系。

基于上述要求，ISO 建立了一套非常抽象的分层结构，这就是著名的 ISO/OSI（国际标准化组织的开放网络架构）。与其说这是一个通信标准，不如说是一种管理哲学。任何事物之间的联系都可以用 OSI 表示出来，虽然不是所有的事物都必须具备其所有的层面（通信网本身大部分实体也不具备其所有层面），但是这对我们分析复杂事物是非常有帮助的。

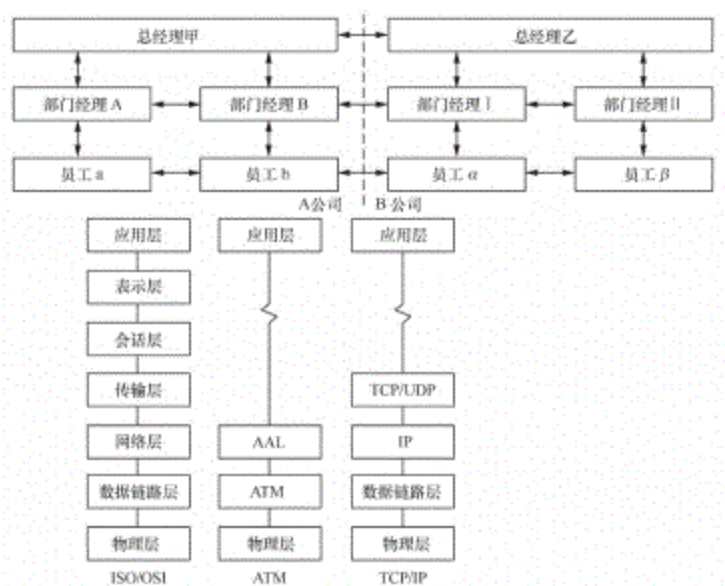


图 6-1 企业管理和 ISO/OSI

两个通信实体可能友好合作，也可能不互相信任，但是它们必须能互相理解对方说的什么。就像三国演义，他们可以打若干年的仗，但是必须都具有能互相理解的语言展开外交辞令，可以和谈、破裂，可以下战书、声明、抗议，如果没有统一的、能互相理解的语言，那么一切将无从谈起。为了让两个通信实体保持最基本的沟通，在“层”的基础上，专家们定义了“协议”“标准”和“规范”。

我们把这 7 层 OSI 结构与实现生活中的“说话”联系起来，有助于大家对 OSI 的理解。

2.物理层

物理层就像人与人沟通中能够互相听懂“发音”。物理层解决最基础的传送通道问题，涉及建立、维护和释放物理链路所需的机械的、电气的/光学的、功能的和规程的特性等，如光缆如何抗衰耗、无线设备如何提高发射功率、为什么双绞线要“绞”起来、为什么 SDH 能实现自动倒换等。

3.数据链路层

有了发音，才能有“字”或者“词”，对于说错的话，要尽快予以纠正，如果不能很好地纠正，就要把话重新说一遍。

接下来，我们开始考虑在物理层提供的按“位（bit）”服务的基础上，在相邻的网络节点之间提供简单的、以帧为单位传输的数据，同时它还强调数据链路不要拥堵，减少出错，出错了要想办法弥补。

4.网络层

说话应该有目标、内容和语速，向谁说，说什么，以多快的速度说。网络层所干的工作，就是进行路由选择、拥塞控制和网络互连。对它的上级——传输层，它可以提供两种服务，一种叫作“面向连接”的网络服务，一种叫作“无连接”的网络服务——这有点像有轨交通和无轨交通。这两种网络服务有各自的特点，后文会专门讲述。两个人对话，网络层只负责找到倾诉对象、选合适的语言、建立说话者和收听者之间的路径，并不关心对方是否认真听了以及是否听得明白。

5.传输层

要保证别人听到你说的话，不能“自说自话”。

传输层的任务是向用户提供可靠的、透明的端到端的数据传输，以及差错控制和流量控制机制。由于它的存在，网络硬件技术的任何变化对高层都是不可见的，也就是说会话层、表示层、应用层的设计不必考虑底层硬件细节，因此传输层起到应用软件和底层硬件之间“承上启下”的作用。

所谓“端到端”，是相对链接而言的。这里读者们要记住，OSI 参考模型的第 4~7 层属于端到端的方式，而第 1~3 层属于链接的方式。有了“端到端”，也就有了流量控制的能力。如果你说话语速太快，看对方表情已经有些招架不住了，你就赶快放慢语速吧。

6.会话层

说话要有开始、过程和终止。在不同的机器之间提供会话进程的通信，如建立、管理和拆除会话进程。你可能要考虑这个话是在大庭广众之下说还是专门对某个人说，或者是说一句以后，等对方答复后再说下一句。

会话层还提供了许多增值服务，如交互式对话管理、允许一路交互、两路交换和两路同时会话；管理用户登录远程系统；在两机器之间传输文件，进行同步控制等。

7.表示层

对于有些话要以悄悄话的形式，避免第三者听到，对于有些话，要简单明了，不要拖泥带水。表示层就是处理通信进程之间交换数据的表示方法，包括语法转换、数据格式的转换、加密与解密、压缩与解压缩等。

8.应用层

有了上面所列的网络层次，你已经把要说的话通过声带的振动，一字一句、清晰明了地告诉了你的某个好朋友，并且保证他听到了，而且没有让第三者听到。

应用层负责管理应用程序之间的通信。应用层为用户提供最直接的服务，包括虚拟终端、文件传输、事务处理、网络管理等。

应用层是 OSI 参考模型的最高层，低层所有协议的最终目的都是为应用层提供可靠的传输手段，低层协议并没有直接满足用户的任何实际需求。我们日常使用的电子邮件程序、文件传输、WWW 浏览器、多媒体传输等都属于应用层的范畴。

应用层是距离用户最近的层面，这时候微信开始聊天、网络游戏开始战斗、可视电话开始通话、会议开始、短信发送成功、邮箱接收到对方邮件.....一切一切的通信应用都正在进行。

9.是哲学，而不仅仅是技术！

通信“层”的概念，让各种协议、规范、标准变得有所不同——它们更灵活但可控，更开放但不混乱，更清晰但不拘束。上面的论述会让一些读者觉得乏味，但是如果你能够紧密结合通信网络的一些实际应用，类比生活中的例子，你会发现其实枯燥中蕴含着无穷乐趣，你也会发现，其实分层是一种哲学而非技术。

一根线“掰”成几“瓣”用——复用技术

如果一根线缆只能传送一个业务流，浪费将非常严重，“N平方问题”将使实施者陷入崩溃。最淳朴的思路就是，让一根线传送多条业务连接，这将大幅度节省资源。

“只有想不到，没有做不到。”复用技术诞生了。复用技术是电信网络的基本技术机理之一。专家们把复用技术分为“确定复用技术”和“统计复用技术”，如图 6-2 所示。



图 6-2 确定复用和统计复用

1. 确定复用

确定复用是指将管线拆成若干部分（无论是用频率拆分还是用时隙拆分），每个部分确定由某条业务连接独占，各行其道，相安无事。以下都属于确定复用范畴：

- FDM；
- PDH；
- SDH；
- MSTP；
- WDM。

确定复用技术来源于电话网，在一次呼叫过程中，同时建立两个方向的连接，每个方向只涉及一条电路，使用某条电路的一部分确定的容量，而在整个呼叫过程中，始终专用这部分容量。当通话结束，这部分容量被释放，可以供新的呼叫使用。

2. 统计复用

统计复用，是指将管线不进行确定的“拆分”，而是每条业务连接通过各自的标识号来进行区分，各个业务连接根据自身需要来争抢资源，系统会定义争抢的优先级以及拥塞时的抛弃优先级。下列技术都属于统计复用范畴：

- PSPDN (X.25)；
- 帧中继；
- 点对点协议 (PPP, Point-to-Point Protocol)；

- ATM；
- 以太网；
- IP 网；
- IP-RAN，PTN。

PPP 是高级数据链路控制（HDLC）协议族的一般报文格式。它是为两个对等实体间传送数据包建立简单链接而设计的全双工操作。

如何理解点对点这个概念呢？用户的终端访问所有服务器，难道不是点对点吗？这里的所谓“点对点”，是指在 OSI 第二层——数据链路层中的点对点，对标这一层中像以太网这样“广播”类型的通信方式。

IP 数据包不一定非要架构在以太网上，在点对点模式下，可以采用 PPP 封装。在 RS-232 串口链路、电话线路上，都可以采用 PPP 封装格式。PPP 本身就是可以支持多种网络层协议的，包括 TCP/IP，因此适应性比较强，并且假定数据包是按顺序投递的。

PPP 是为数不多的不需要“寻址”的协议，因为一根线两头的两个“通信实体”，就是通信双方，不需要设置地址，任何一方天生知道要把信息传给谁，因为它只有一个“对端”。虽然 PPP 的封装格式设置了 8 位的地址字段，但这个字段毫无价值，在工程应用中都填充为全 1 的广播地址。

在 PPP 之前，曾经有一种 SLIP，SLIP 只能运行一种网络协议，缺乏容错控制，并且不能进行认证和授权，而 PPP 则提供了一种广泛的解决办法，方便将多种多样、不同的网络协议无差错地点对点传送，并支持认证鉴权。在后面第 10 章介绍 ADSL 接入时我们会再次提到 PPP，并且将它和广播方式的以太网相关协议组合使用，解决 ADSL 接入时的认证鉴权等问题。

统计复用技术来源于数据网，支持双向对称、双向不对称、单向等各类业务，会因为多个信号竞争使用一条电路，因竞争而劣化传输质量，电路忙时利用率会比较高。

任何商品房都是“确定复用”的，任何人与房地产开发商签署合同后，唯一地享有该楼房的产权；而任何公路都是“统计复用”的，只要交了养路费，任何人的车都可以占用道路，道路不属于任何一辆车或者一个车队，而是被全社会共同使用。当然，别以为这里的“抢占”就是互相厮杀各不相让，和交通类似，通过通信协议，这些“抢占”都表现得很“文明”。

通信技术符合哲学规律。竞争会节约成本，但也会牺牲性能。这世界上事，鱼和熊掌，很难“兼得”。

“排兵布阵”有讲究——网络拓扑浅析

根据每种网络所提供服务的不同，可以采用合适的拓扑结构。在节约投资的基本要求下，合理的拓扑结构会帮助尽可能多的用户从尽可能近的地方、尽可能快地获取尽可能丰富的信息。一个城市的道路，拥有自己的拓扑结构。立交桥、红绿灯、斑马线、城市快速路、高速路、环岛、备用道、单行道等，如果设计得充分合理，不但能够降低交通事故的发生率，提高整个城市的运输效率，还能够让城市更加整洁和规范。当然，从人的因素讲，还能减少因堵车而带来的牢骚。网络拓扑就是对网络各个部件进行“排兵布阵”。合理的网络“阵法”，能够提高线路利用率、减少拥塞发生、延长通信设备的使用寿命，并易于扩展。

传统的电信网，都会分为核心层、汇聚层和接入层。在上述每个层次中，它们的“布阵方法”又千差万别。如总线型、星形、网状、环状、树形、双子星形等，如图 6-3 所示。每一种类型都不能用“好”和“不好”来评价，而只能以“合理”和“不合理”来衡量。对于各个站点信息发布比较均匀的业务，总线型更能满足需求，并且效率会很高；对于每个站点都需要向中心频繁发送信息的情况，星形结构将会是更好的选择；网状结构适合于各个站点信息量大体一致、信息交互比较频繁的情况；而信息处理呈现传递型结构的，或者要对信息路径采取保护措施，一般采用环状结构更加合理；若是复杂的多层管理机构，信息网络采用树形结构会更加有助于管理。

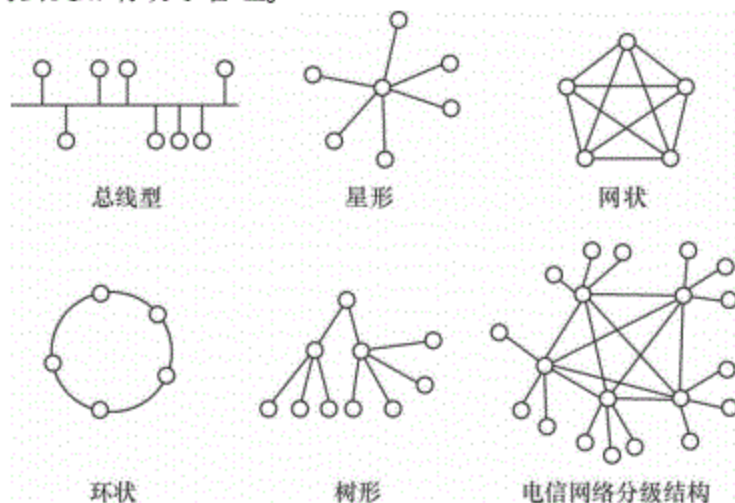


图 6-3 总线型、星形、网状、环状、树形网络拓扑

在这里注意，很多初学者把网络拓扑和线路拓扑混淆在一起。实际上，线路拓扑的形状并不能代表网络拓扑的形状。举例说明，城市里的光纤一般都呈环状分布，SDH 设备在环的几个节点处放置，由于 SDH 要进行线路倒换，因此 SDH 网络一般也呈环状分布。

如果在 SDH 设备旁边各放置一台路由器，路由器则可能做环状分布、星形分布、树形分布等，如图 6-4 所示。

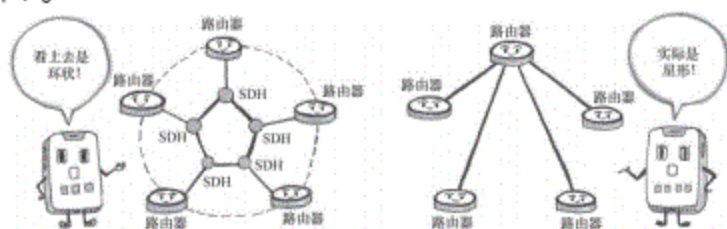


图 6-4 ATM 交换机环状分布、星形连接的例子

开车还是坐地铁？——面向连接和非面向连接

传送信息所占用的通道，究竟是传送前就通过信令建立起来的，还是在传送过程中一站一站地向前推进而没有所谓的“连接”，根据这两种不同方式把通信分为“面向连接”和“非面向连接”。

1.面向连接

在一次通信过程中，信令在需要通信的双方或者多方之间呼叫，利用网络资源建立起一条通道，并在这条通道上传递信号，在通信结束后关闭这一通道，这就是面向连接。应用最广泛的面向连接的技术体制是传统的 PSTN；接着，在数据网中也被广泛应用，如帧中继、ATM、MPLS 等都是面向连接的传送。这就好比城市中的道路，如果有国际马拉松比赛在北京举办，最常见的方法是通过交警通知相关道路执勤民警，在赛程所经道路上实行“交通管制”，这种基于预先设定好的道路进行通信的方式就是“面向连接”的。

有连接的电路，电路拓扑确定、传输时延确定并可控。如果哪位读者断章取义，说实时性强的业务就用有连接的电路，那可就不妥了。让我们讨论完非面向连接的技术再下结论吧。

2.非面向连接

在一次数据传送过程中，数据包逐节点传递，在每个网络节点上，根据数据包中的目的地址，借助于网络节点的路由信息，选择通往下一个节点的通道。由于在数据传送前并没有预约带宽，因此在每个节点上，都需要进行“竞争”接入，并最终到达目的地。这就是非面向连接，也叫作无连接操作。

无连接的操作来源于传统数据网，传输时延不确定，传递过程不需要外界控制，如果不限制传输最大时延，只要尚存一条通道，数据包就能到达目的地。最典型的无连接网络是经典 IP 网络和广播电视网。

3.对两者的分析

其实，面向连接的操作就像是城市的轨道交通，地铁、轻轨、有轨电车，车辆在出发前就已经预设好所有的路线，并严格按照这个路线走，由于速度可控、线路确定、不存在堵车情况，因此到达时间可控，如图 6-5 所示。

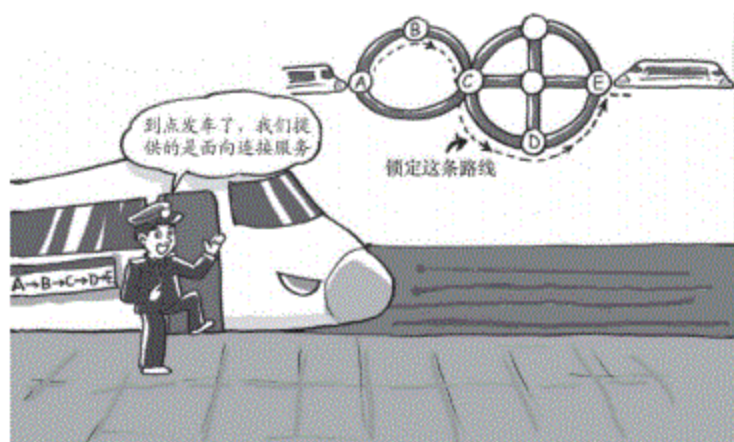


图 6-5 面向连接的操作

而无连接的操作则更像城市的公路交通，如图 6-6 所示。车辆在每个十字路口、丁字路口、岔路口都要判断如何行驶，左转、右转还是直行？它需要根据路标行进，而每个路口的路标都有通往任何目的地的指示。这些路标只会告诉你这个路口应该如何走而不会告诉你完整的到达目的地的路径。从出发地到目的地，路线长度未知，有可能存在等待红绿灯的情况，因此到达时间不可控，但是只要有一条路线存在，这辆车就能到达目的地。

当然，面向连接和无连接的操作比道路选择复杂得多。面向连接的操作，在数据包发送前就已经将所有连接建立起来并将其中的网络资源占用了，而熟悉城市地图的人开车，只确定了路线，并没有实质性占用道路资源。

通信技术机制之间的优劣，很多都是面向连接和非面向连接两大机理之间的 PK。从表面看，面向连接的技术听上去更加完美，但是从网络的开放性角度而言，无连接的网络却更胜一筹。通信网发展的实际情况是，传统的语音网和数据网都在相互吸取各自的经验教训，取长补短，直至最后的统一和融合。经典 IP 技术是无连接的，风头盖过了面向连接的 ATM；而 MPLS 的部署，又让新的 IP 网络打上了面向连接的标签。



图 6-6 无连接的操作

这里我们不得不讲一下 TCP/IP 的连接性问题。TCP 作为传输层协议，逻辑上是面向连接的，但其实现，则是由非面向连接的 IP 实现，因为 TCP 的面向连接体现在如果 A 实体传送数据给 B 实体的话，需要握手、需要确认（ACK）。而对于 IP 层的数据包而言，无论是 A 发给 B 的，还是 B 发给 A 的，都是同一类型的包，都用报文的方式无连接地发送，而在 TCP 层就不一样了，如果 ACK 没有收到，A 会认为发包失败，接着重新发送，从而达到面向连接的功能。TCP 需要 3 次握手才能建立连接，而传输层另外一个协议 UDP 就没有这种限制。

我们听到 IP 的频率非常高，感觉它比 TCP 热门得多，但实际上，没有 TCP 在背后的默默支撑，IP 根本无法适应网络互连时链路上的各种复杂环境。也就是说，我们不能过度信任通信链路，它太不可控了。而另一个现实是，对于大部分业务而言，丢包是无法被应用所接受的，TCP 作为距离应用层更近的层次，就需要担负起保障传送的重任。

虽然网络层并没有建立一个完整的链路通道供 IP 包通过，但 TCP 的面向连接就像是在 IP 层上做了一次“到货统计”，它通过 3 次握手建立的逻辑“连接”，在传送数据时给每个包加一个序号，同时序号也保证了传输到接收端实体的包是按照这个序号的顺序接收的。

另外，TCP 连接的每一方都有固定大小的缓冲空间，TCP 的接收端只允许发送端发送接收端缓冲区所能接纳的数据，这将防止较快的主机“淹没”较慢主机的缓冲区，所以 TCP 还提供了流量控制功能。

我们将 TCP 的 3 次握手过程简化描述如下。

第一次握手：建立连接时，客户端发送 SYN 包到服务器，并进入 SYN_SEND（已经发送 SYN）状态，等待服务器确认。

第二次握手：服务器收到 SYN 包，必须确认客户的 SYN，同时自己也发送一个 SYN 包，即 SYN+ACK 包，此时服务器进入 SYN_RECV（已经接收到 SYN）状态。

第三次握手：客户端收到服务器的 SYN+ACK 包，向服务器发送确认包 ACK，这个包发送完毕，客户端和服务器进入 ESTABLISHED（已经建立）状态，完成 3 次握手。之后，客户端与服务器开始传送数据。

我们用两个枯燥的小对话类比一下面向连接和非面向连接的通信方式。

面向连接，如 PSTN、TCP。

A（面向对方）：您好！听得到我说话吗？

B（面向对方）：您好！听得到！

A（面向对方）：blablabla。

B（面向对方）：tlatlatla。

A（面向对方）：好了，再见。

B（面向对方）：再见。

非面向连接，如 IP、UDP。

A（自顾自地）：blablabla。

对于那些不需要保障传送的业务、丢几个 IP 包无关紧要的，就可以用非面向连接、不需要 3 次握手的 UDP 作为传输层协议。

4. 寻址技术的机理分类

上一章已经讲过通信所研究的第二大课题——寻址网元。在了解了有连接操作和无连接操作后，我们再回过头来看看目前存在的多种寻址技术和网元设备，它们可以按多种方式进行分类。例如，按可用资源分类、按应用场合分类、按实现技术分类或者按实现技术机理分类。其中，影响通信网络属性的是按照技术机理分类。

电信网络按照机理分为“连接操作寻址技术”和“无连接操作寻址技术”。前者是针对那些有连接操作的技术体制，而后者正好相反。我们将这些技术进行简单的罗列，在后面章节讲到每种技术体制时，再分别介绍。

有连接操作寻址技术，最典型的是语音交换网 PSTN 和 MPLS 网，而无连接最典型的是由传统路由器和交换机组成的 IP 网络，如图 6-7 所示。

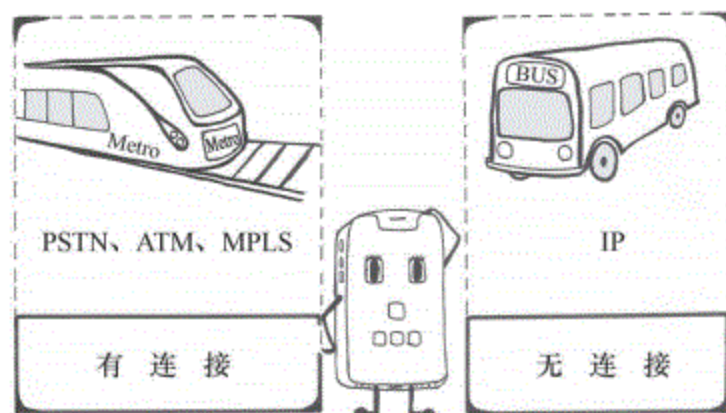


图 6-7 有连接寻址技术和无连接寻址技术

很多读者会好奇，面向连接和无连接的分类，与通信的“优化”课题有何关系？采用面向连接还是无连接方式，这的确是一种网络优化的方案，只是这种方案隐藏在每种技术门类内部，发挥着潜移默化的作用。与复用技术相比，它从另外一个角度节省了通信网络的资源，提高了网络的综合利用率，提高了通信网络的传输和交换效率，并让通信网更加可用、易用。

不可忽视的通信网络“摩擦力”——传输损耗

通信网不仅仅要考虑让电话接通，还要考虑电话打通后，如何让音质更好。传输带来的各种损耗，会给通信网质量造成影响。

为了减少传输的损耗，有必要对传输过程中的各种损耗参量有一个了解。请各位读者一定要记住下面的术语以及这些术语的英文，在通信网工程中，测试仪表就会侦测到下列参数，而每个参数都会对通信网的质量造成影响。

误码 (Error)：接收与发送数字信号之间的单个数字的差异。如把 0 变成了 1，1 变成了 0。

抖动 (Jitter)：数字信号的各有效瞬间相对于其理想时间位置的短时的、非累积性的偏移。如信号的个别迟到随即又恢复的现象。

漂移 (Wander)：数字信号的各有效瞬间相对于其理想时间位置的长期偏移。就好比每天晚来一点点，并得寸进尺，来得越来越晚。

滑动 (Slip)：数字信号连续数字位置不可恢复地丢失或增加。如因时间不一致而造成的“无中生有”或者“丢三落四”。

时延 (Delay)：数字信号的各有效瞬间相对于其理想时间位置的推迟，就是信号的整体“迟到”。对延迟比较大的话音网络，你总感觉说话的人距离里很遥远，你很难插上话；而对于延迟较大的数据网络，网页打开的速度、游戏的动作反应总是比较慢。

时延抖动 (Delay Variation)：数字信号的各有效瞬间相对于其理想时间位置的推迟变化幅度，也就是信号“迟到”时间长度的变化区间。

分组 (信元) 丢失 (Packet Loss&Cell Loss)：数据分组或数据信元不可恢复的丢失，就是连续的信号段的完全丢失。

抖动、漂移、滑动、时延、时延抖动、分组丢失如图 6-8 所示。

无论是数据网还是语音网，都会对上面的传输损耗参数制定规范，并提出上述损耗类型的最大可接受值。在工程实践中，通信工程师摸索出了这几种损耗类型在不同范围内所适合的业务类型和带来的不同问题。

传输损耗是永远存在的，就像摩擦力很难完全消除，只能通过优化，尽力减小其对业务的影响，要想百分之百去除任何一种损耗，都是不现实的。一张通信网络可能会在某个时段没有分组丢失，但具有分组丢失的概率，哪怕这种概率只有万分之一：数据包的数量是庞大的，每一万个数据包，平均就会有一个数据包丢失。通过网络优化，可以减小分组丢失的概率。传送相同的业务，采用不同的传送技术，上述参量都不尽相同，而采用何种性价比的传送手段，则是电信工程实施者需要综合考量的问题。

解决传输损耗问题绝不是头痛医头、脚痛医脚，而是通信技术的综合发展，如传输介质、编码格式、校验技术、同步技术等的发展。

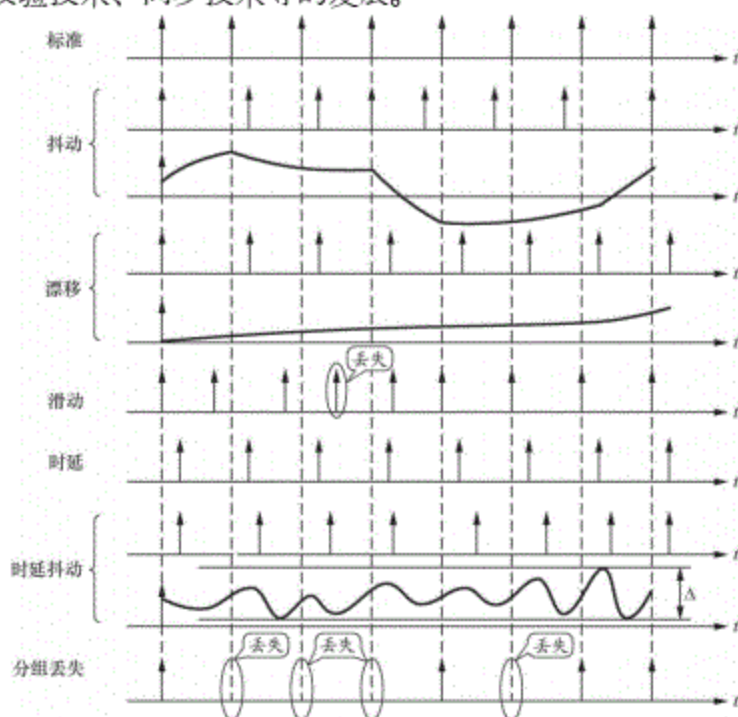


图 6-8 抖动、漂移、滑动、时延、时延抖动、分组丢失

“非诚勿扰！”——网络安全基本概念

安全是人们对通信网更深层次的需求。“安全”何解？避免危险、恐惧和忧虑的程度和状态。那么网络安全呢？老实说，如其他很多电信术语一样，目前没有公认的针对“电信安全”的确切定义。而大部分对“网络安全”的定义，基本都是针对计算机网络而言的，其实质内容多数是指计算机系统安全。这也很正常，最可能发生危险的地方才有对“安全”的讨论，基本不可能发生危险的地方，人们是不会去考虑安全问题的。

无论是军用还是民用，无论是数据还是语音，电信网络的网络安全是永久的生存之道，也有永远谈不完的话题！网络安全更是关系国计民生、关系国家机密和国家安全的重要领域。在一个不安全的通信网络中，黑客可以利用木马、病毒、恶意篡改、二次打包等手段获取非授权信息，给国家、企业、个人造成极大的经济损失。

网络安全包含两方面的含义，一方面是信息安全；另一方面是网络通道的安全。

1.信息安全

“信息安全”是个大范畴，通过各类专家所研究内容的关键词，可以清楚地看到其发展轨迹和技术分类。

最早的信息系统安全问题，是通信和密码的结合。早在第二次世界大战时，作战双方通过截获电信网络传递的信号，窃取电信网络传递的信息。于是，有一批专家专门从事信息自身安全的工作，他们每天念叨着“加密”“解密”“破译密码”。那时候，密码技术成为信息安全几乎唯一的核心技术。在战争年代，破译敌军密码成就了很多“民族英雄”。

在 20 世纪 70 年代后期，计算机系统实现了系统内部的信息处理和数据存储，截获了电信网络传递的信号和计算机系统处理的，就可以窃取、篡改和伪造信息业务系统中的信息。这时信息安全专家队伍分化出一批人，他们是计算机的专家，工作领域逐渐向计算机系统安全扩展。他们每天研究的课题，不外乎几个关键词——“机密性”“完整性”“可用性”“可控性”和“可追溯性”。技术专家的工作就是防范信息安全的隐患，以杜绝高科技犯罪。

20 世纪 90 年代，计算机系统发展成为计算机网络，互联网的边界向大众开放，给网络安全带来了直接威胁，于是信息安全就进入了以边界保护为主的“计算机网络安全年代”。这时，在以互联网为基础的信息基础设施（也就是计算机网络）中，病毒和黑客入侵问题成了人们关注的大问题。这时候，又有一批专家分化出来，专门从事计算机网络安全工作。这时，这些专家们研究的关键词，变成了“保护”“探测”“响应”“控制”和“报告”。

2.通信网络安全

信息安全是指信息内容的保密性，而网络安全是指通信“管道”（信道）本身的安全性。

。

我们看一看各类电信网络的常见安全问题。

●广电网的典型网络安全问题是电视插播问题，很多人都是此类问题的受害者。

●PSTN 和移动通信网的典型网络安全问题：电话骚扰；垃圾短信；通信诈骗；伪基站；推销内容的电话；互联网用户经过拨号上网引入的安全问题；固定电话网用户终端逐步智能化引入的安全问题；网络电话（VoIP, Voice over IP），利用 IP 网络提供语音服务的技术，第 9 章会介绍）中主叫号码被任意设置问题，诸如此类。

●互联网的网络安全问题：数据包目的地地址容易被发现；IP 源地址很容易修改伪造；修改路由器信息可以改变网络传输路径；垃圾邮件（如图 6-9 所示）；黑客可以截取含有管理控制功能的数据包，对通信网的支撑网进行攻击；由于 TCP/IP 网络低层的安全性缺陷导致应用层存在漏洞，如钓鱼网站、分布式拒绝服务（DDoS，第 12 章会介绍）攻击、各种木马程序（连希腊古城特洛伊都被卷进来了）等（如图 6-10 所示）。

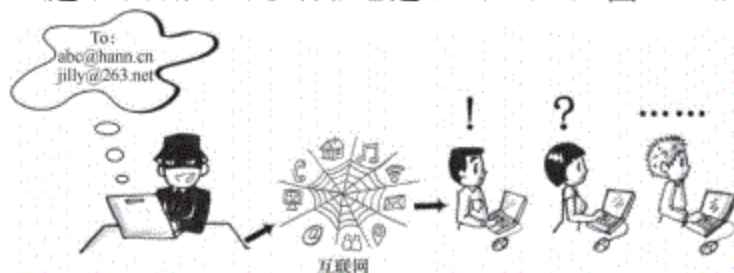


图 6-9 发送垃圾邮件

●无线网络的典型网络安全问题：黑客截取电波信号并解调数据；干扰阻断通信形成拒绝服务攻击（很多会议室安装手机信号屏蔽器就是利用此类技术，当然，技术本身无罪，看应用的场合是否恰当了）；黑客向基站插入命令修改控制信息，或者发送大量连接请求，造成网络拥塞；服务器标示符（SSID）的安全问题，本来 SSID 是无线接入点用于表示本地无线子网的标志，而黑客获得 SSID 就能够对网络实施攻击。

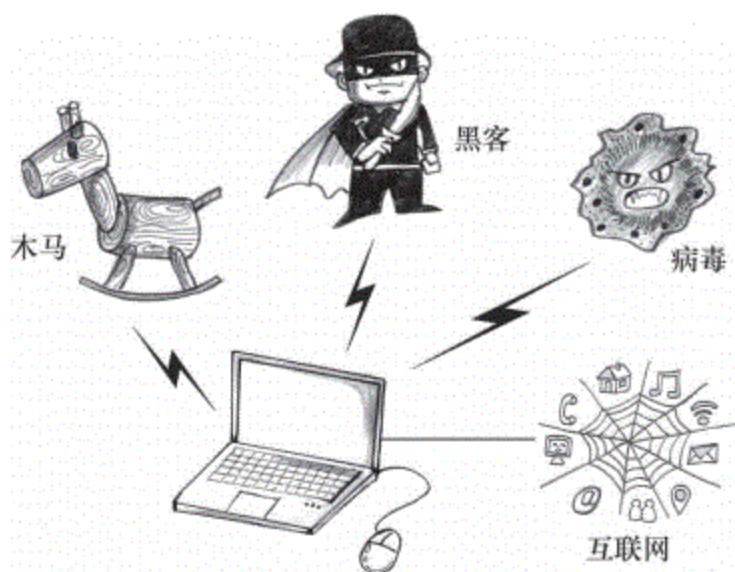


图 6-10 木马、黑客、病毒从网络上攻击计算机

通信网的网络安全问题之所以能够迅速引起国际社会的重视，起因于互联网。现在人们常常提到“网络犯罪”“互联网上病毒传播”等令人不安的模糊概念。其实这是一个因普遍的概念混淆而引入的普遍误解。这里我们要为互联网正名：信息系统由信息基础设施（基础架构）和信息业务系统（内容）组成；信息基础设施由电信网络和计算机系统组成。互联网是一种电信网络。有一个普遍的概念混淆，就是把互联网、以互联网为基础的信息基础设施、以互联网为基础的信息系统，通通称为“互联网”。这样解释太绕嘴，可以这么说：互联网的基础设施是 A，信息系统为 B， $A+B=C$ ，但是现在 A 被称为互联网，B 被称为互联网，C 也被称为互联网！而我们通信行业所提到的互联网，应该是 A，因为 B 和我们的关系不大，内容是由全社会集体提供的，C 的范畴太大，更不是我们所能关心的问题。

然而普遍的误解在于，2003 年以前，以互联网为基础的信息基础设施（也就是 A）和多种多样的信息系统（也就是 B）有效地支持了国际信息化进程，于是人们把一切功劳通通归功于互联网（不管是 A、是 B 还是 C，总之，大家一起“归功于”它们了）。2003 年以后，互联网支持的国际信息化进程出现了安全问题，互联网在被过分应用而出现了力所不及的问题时，人们把一切罪过通通归咎于互联网，甚至指责互联网的发起者“打开了潘多拉的盒子”。

“网络犯罪”的确切提法应当是“在信息系统上的犯罪”，充其量是“在互联网支持下的信息系统上的犯罪”，罪魁祸首是 B。“互联网上病毒传播”的确切提法应该是“在信息系统之间的病毒传播”，充其量是“在互联网支持下的信息系统之间的病毒传播”，那么真正的元凶也应该是 B。而通信行业研究的内容基本都是 A 啊！因此，可以说，互联网不是犯罪和

流毒的“元凶”，只是 A 的存在，给 B 带来了土壤，造成了网络犯罪。在法理上，A 是无罪的。

其实，所有电信网络的天职就是如实地传递信号。执行天职何罪之有？！但是客观上，所有各类通信网络都可能被非法利用，特别是被恶意破坏，这是互联网安全研究的问题。

3.“关爱通信，关注安全”——安全服务举例

专家们根据多年实践，总结出一套安全防范的解决方案，下面所列的是常见的几种，如图 6-11 所示。



图 6-11 安全防范图解

●访问控制服务：防止未授权使用系统资源，或者当网络资源已经饱和，防止新的呼叫进入，如连接接纳控制（CAC，Call Access Control）机制。每个进入鸟巢的观众都要凭票，没有票的人禁止进入；这可以避免因为赛场满员而带来的其他安全问题。PSTN、ATM、MPLS 网络都有相应的 CAC 机制。

●鉴别服务：防止假冒伪劣，我们常见的是盗用其他用户的身份，包括 IP 地址、MAC 地址、无线频率等占用网络资源。就像使用伪造的门票进入体育馆或者电影院，必须予以严厉打击。

●数据完整性服务：防止数据非法修改、插入、删除、中断，如黑客被商家雇用攻击竞争对手的网站这样的行为。

●数据保密性服务：防止泄密、信息流量分布，对保密性信息必须进行数据加密。

●抗抵赖性服务：防止抵赖，应尽可能做到可以追溯历史数据，如有非法用户利用 VoIP 技术对主叫号码进行伪装，从而实现诈骗目的，通信网络必须能够有效检测出非法用户的实际位置并防止该用户抵赖。

●木马检测服务：通信网络中存在大量代理（Proxy），有的是出于安全需要设置的代理，有的是出于特定目的设置的代理，为“敌人”工作的代理就是“木马”。希腊人发明的这个东西摧毁了特洛伊，而黑客利用伪装成实用工具或小游戏的软件，通过即时通信软件、网站进入其他人的计算机系统，从而盗取信用卡密码、用户账号密码，这种事情已经屡见不鲜，成为电子商务的主要防范对象。

4.“打死我也不说”——数据加密技术

人与人的交流，需要私密性。对于政府机构、金融机构、保密机构，大量的信息是对绝大多数人保密的；对于企业，也存在大量的商业机密，这些商业机密的价值就是交给最合适的人并把它利用起来；对于个人，任何人之间的通信都可能带有隐私成分，不希望被第三者听到。

当然，生活中的“保密”包含两方面的内容。一方面，你需要把保密的内容“藏”起来，“存储”到某个保密空间，防止让别人获取，类似于孩子玩的“捉迷藏”游戏。有专门的技术来保证你的保密内容不被偷窃，如最先进的密码锁、你的守口如瓶和最先进的文件存储技术。其中任何一个方面，都不属于我们本书讨论的范围。另一方面，当你需要把这些保密的内容通过特定通道传递出去时，需要保证内容不会外漏。这些方式包括雇用押运车、说悄悄话等。在通信中，则有专门的通信保密技术。当然，雇用押运车也不是我们本书讨论的范围，我们还是要将话题拉回到我们通信的保密技术上来。

最传统的通信保密技术叫作“密电码”技术。我们经常看到战争片有这样的情节：我情报员英勇无畏、智慧过人、战无不胜，成功破译了敌人的密电码，从而获取了敌人的重要情报，并一举粉碎了敌人的阴谋。在战争中，信息交互非常频繁，未经充分加密的信息被敌人获取或破译后，战争局势可能因此而彻底改变。

最简单的保密方式是通信双方拥有一样的明文和密文的对应方式，如图 6-12 所示。比如英文里面 26 个字母，每个字母对应另外一个字母。比如 a 对应为 z、r 对应为 i、e 对应为 v、d 对应为 w。那么，read 就对应为 ivzw，dear 就对应为 wvzi，dare 就对应为 wziv。如果你把 ivzw 通过某个渠道送达要获取信息的人，他也有一个同样的字母对应表，就很容易破译出 read 这个单词来。这种方式，便捷、容易理解和记忆，但是缺点也是明显的：如果你的敌人也获得了同样的字母对应表，加密就变得毫无价值。

即使敌人没有获取字母对应表，这种方式也非常容易被破解出来。专门研究密码的人会从人的使用习惯、经验规律、字母使用频率等角度来破解密码。比如在英文中应用最多