



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
普通高等院校计算机类专业规划教材·精品系列
总主编 谭浩强

计算机网络 (第五版)

JISUANJI WANGLUO

黄彦 主编

中国铁道出版社有限公司
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE CO., LTD.



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

普通高等院校计算机类专业规划教材·精品系列

总主编 谭浩强

计算机网络

黄彦◎主 编

张建勋◎副主编

安淑芝◎主 审

内 容 简 介

计算机网络是计算机及相关专业的一门重要的专业课程。有关计算机网络的教材种类繁多、各具特色。本书的特点在于既注重计算机网络基础理论的讲解，又注重实践和应用，并充分考虑内容的前瞻性。

全书共分为10章。第1章讲解了计算机网络的基础知识及体系结构；第2~6章按照TCP/IP体系结构的层次对各层的相关内容进行了较详细的讲解；第7~10章介绍了无线网络、网络安全、多媒体网络和网络前沿技术等内容。书中包含重难点的讲解视频，以二维码的形式供读者扫描观看；每章后附有习题。附录中按照字母顺序给出了全书出现的缩略词，并注明了书中第一次出现的章节，以方便读者查阅。配套教材《计算机网络实验指导及习题集》包含各章实验、习题指导和综合实验，供读者加强实践和练习。

本书适合作为普通高等学校网络工程专业、计算机专业、信息技术专业、电子商务专业以及其他相关专业的网络课程教材，也可以作为广大网络管理人员及技术人员学习网络知识的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

计算机网络/黄彦主编. —5版. —北京: 中国铁道出版社有限公司, 2020.4

普通高等教育“十一五”国家级规划教材 普通高等院校计算机类专业规划教材.精品系列

ISBN 978-7-113-26727-8

I. ①计… II. ①黄… III. ①计算机网络-高等学校-教材
IV. ①TP393

中国版本图书馆CIP数据核字(2020)第045853号

书 名: 计算机网络
作 者: 黄 彦

策 划: 周海燕
责任编辑: 周海燕 刘丽丽 徐盼欣
封面设计: 刘 颖
责任校对: 张玉华
责任印制: 樊启鹏

编辑部电话: (010)51873090

出版发行: 中国铁道出版社有限公司(100054, 北京市西城区右安门西街8号)

网 址: <http://www.tdpress.com/51eds/>

印 刷: 三河市宏盛印务有限公司

版 次: 2004年1月第1版 2020年4月第5版 2020年4月第1次印刷

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16 印张: 20.75 字数: 507千

书 号: ISBN 978-7-113-26727-8

定 价: 54.00元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书, 如有印制质量问题, 请与本社教材图书营销部联系调换。电话: (010) 63550836

打击盗版举报电话: (010) 51873659

前 言

PREFACE

网络发展突飞猛进,《计算机网络》第五版在谭浩强老师、浩强工作室、中国铁道出版社有限公司以及广大读者的支持下出版了。第五版在第四版的基础上拓展了理论知识的深度和广度,同时更加重视实验和练习,因此将《计算机网络实验指导及习题集》作为配套教材出版。第五版做了较大调整,由第四版的11章调整为10章。同时考虑计算机网络技术的新发展并根据读者的要求和反馈建议,对原书内容做了相应的补充和修改。

本版结构调整之处:

- ① 将第四版的第1、2章合并为第五版的第1章“计算机网络概述”。
- ② 将第四版的3、4章内容整合后,再拆分为第五版的第2章“物理层”和第3章“数据链路层”。
- ③ 删除了第四版的第10章。
- ④ 删除了第四版各章的实验以及第11章综合训练。
- ⑤ 增加了第9章“多媒体网络”和第10章“网络前沿技术”。

本版新增加的内容:

- ① 在第1章“计算机网络概述”中,增加了“计算机网络的评价指标”的内容。
- ② 在第2章“物理层”中,增加了“脉冲编码调制”和“物理层协议”的内容。
- ③ 在第3章“数据链路层”中,增加了“点对点协议”和“十万兆位以太网”的内容。
- ④ 在第4章“网络层”中,增加了“ICMPv6”、“三层交换机”、“多播路由协议”和“多协议标签交换”的内容。
- ⑤ 在第5章“传输层”中,增加了“套接字”、“TCP流量控制”和“基于Socket的网络编程”的内容。
- ⑥ 在第6章“应用层”中,增加了“动态主机配置协议”和“基于Web的网络编程”的内容。
- ⑦ 在第7章“无线网络”中,增加了“无线体域网”、“无线城域网”、“第5代移动通信系统”、“移动Ad Hoc网络”和“无线传感器网络”的内容。
- ⑧ 在第8章“网络安全”中,增加了“网络安全的攻防体系”、“网络安全的层次体系及等级保护制度”、“因特网的安全协议”和“入侵防御”的内容。
- ⑨ 增加了第9章“多媒体网络”和第10章“网络前沿技术”的内容。

本版修改之处:

- ① 全书以5层模型——物理层、数据链路层、网络层、传输层和应用层组织,替代了第四版的4层模型组织方法。
- ② 考虑方块检验、高级数据链路控制协议和令牌总线网等在目前的计算机网络中已少有应用,因此将其删除;考虑网络层拥塞控制、网关、简单网络管理协议、卫星接入和居民宽带网等内容限于篇幅难以阐述透彻,因此将其删除;考虑组建家庭网络的内容过于简单,亦将其删除。
- ③ 使用术语“网络核心”和“网络边缘”替代了传统的“通信子网”和“资源子网”,同时将数据交换技术以及客户机/服务器、对等连接模型的内容移至第1.1.2节,以阐述两个重要概念。
- ④ 在数据链路层和传输层都强调了可靠传输的实现技术,并注重阐述了二者的衔接关系。
- ⑤ 强化了IPv6的相关内容。

⑥ 应用层协议的实现方式阐述得更为深入。

⑦ 无线网络一章重新组织了架构。

除此之外，书中凡与时间相关的内容都更新为当前内容。

作者在本书写作时力求体现如下特点：

① 考虑到既要便于学生理解网络的基本概念又要注重实际应用，所以本书在介绍网络基本概念时主要以7层协议模型为主，在介绍网络应用技术时则以5层协议模型为主。

② 网络技术发展和其他信息技术一样突飞猛进，所以本书在介绍计算机网络基础知识的同时，注意跟踪网络发展的最新技术。

③ 在介绍基础理论的同时，用了较大篇幅介绍实践和应用的知识。

④ 本书还包含重难点的讲解视频，以二维码的形式供读者扫描观看。既拓宽了本书的知识容量，又可以帮助读者深入理解相关的理论和技术。

⑤ 由于计算机网络技术是实践性非常强的一门技术，本书每一章末都附有一定量的习题。认真解答习题对于理解概念、综合运用知识十分重要。

⑥ 配套教材《计算机网络实验指导及习题集》包含与本书对应的各章实验、习题指导以及综合实验，进一步加强了本书的实践性和应用性。

全书共分为10章，其中第1~6章讲解了计算机网络的基础知识，第7~10章介绍了计算机网络应用技术。考虑到本教材的特点，网络应用技术部分占了较大的篇幅。

① 第1章在介绍计算机网络基本概念的基础上，讲解了主流的网络体系结构——OSI/RM和TCP/IP。

② 第2~6章按照当前应用最广泛的TCP/IP体系结构，对各层的相关理论、技术和协议作了详细的讲解。

有关计算机网络应用技术的内容分为四部分：

① 第7章介绍了无线网络。

② 第8章介绍了网络安全。

③ 第9章介绍了多媒体网络。

④ 第10章介绍了网络前沿技术。

本书凝聚了作者多年网络教学、科研的经验，非常适合作为普通高等学校网络工程专业、计算机专业、信息技术专业、电子商务专业或其他相关专业的网络、网络技术与应用等课程的教材，也可以作为广大网络管理人员及技术人员学习网络知识的参考书。

本书参考了很多优秀教材、论文、报告以及网站资料，在此对所引用文献的作者表示衷心的感谢。同时，感谢谭浩强老师多年来的帮助，感谢中国铁道出版社有限公司多年来的合作与支持。

本书由黄彦任主编，张建勋任副主编，杨晓辉、桂莹、崔麟、鲍英、梁睿、王伟参与编写。其中第1章由黄彦和桂莹编写；第2章由桂莹编写；第3章由梁睿和王伟编写；第4章由黄彦编写；第5章由王伟和杨晓辉编写；第6章由杨晓辉编写；第7章由崔麟编写；第8章由鲍英编写；第9章和第10章由张建勋编写。全书由黄彦、张建勋统稿，安淑芝教授主审。

由于时间仓促，编者水平有限，书中的不足和疏漏之处在所难免，恳请读者给予批评指正。我们也会在适当时间进行修订和补充，并发布在中国铁道出版社有限公司网站：<http://www.tdpress.com/51eds/>相关栏目中。

编者

2019年11月

第 1 章 计算机网络概述	1
1.1 计算机网络简介	1
1.1.1 计算机网络的产生和发展	1
1.1.2 计算机网络的定义	6
1.2 计算机网络的分类	9
1.2.1 按地理位置分类	9
1.2.2 按网络拓扑结构分类	10
1.2.3 其他分类	12
1.3 计算机网络的组成	12
1.3.1 计算机网络的硬件组成	13
1.3.2 计算机网络的软件组成	14
1.4 计算机网络的评价指标	16
1.4.1 计算机网络的性能指标	16
1.4.2 计算机网络的非性能指标	18
1.5 计算机网络体系结构	19
1.5.1 网络体系结构	19
1.5.2 开放系统互连参考模型	25
1.5.3 TCP/IP 参考模型	29
小结	34
习题	34
第 2 章 物理层	36
2.1 数据、信号和编码	36
2.1.1 数据和信号	36
2.1.2 数字调制	38
2.1.3 数字编码	41
2.1.4 脉冲编码调制	43
2.2 传输介质和物理层设备	45
2.2.1 传输介质	45
2.2.2 物理层设备	49
2.3 数据传输技术	51
2.3.1 数据传输类型	51
2.3.2 同步技术	52

2.3.3	数据传输方式	53
2.3.4	多路复用技术	54
2.4	物理层协议	56
2.4.1	物理层协议概述	56
2.4.2	EIA-RS-232 接口标准	56
	小结	58
	习题	58
第 3 章	数据链路层	59
3.1	数据链路层概述	59
3.1.1	数据链路层的地位	59
3.1.2	数据链路层的术语和概念	60
3.2	差错检验	60
3.2.1	奇偶检验及检验和	61
3.2.2	循环冗余检验	61
3.3	可靠传输	63
3.3.1	停-等协议	63
3.3.2	连续 ARQ 协议	66
3.4	点对点协议 PPP	67
3.4.1	PPP 协议简介	68
3.4.2	PPP 协议的帧格式	69
3.4.3	PPP 协议的工作原理	70
3.5	数据链路层设备	72
3.5.1	网卡	72
3.5.2	网桥	73
3.5.3	交换机	74
3.6	局域网	76
3.6.1	局域网概述	76
3.6.2	共享介质局域网	78
3.6.3	交换式局域网	83
3.6.4	以太网	85
3.6.5	虚拟局域网	90
	小结	92
	习题	92
第 4 章	网络层	94
4.1	网络层概述	94
4.1.1	网络层提供的服务	94

4.1.2	网络层功能	94
4.1.3	网络层编址	95
4.2	网际协议 IP	96
4.2.1	IPv4	96
4.2.2	IPv6	104
4.2.3	IPv4 过渡到 IPv6	109
4.3	地址解析协议和逆向地址解析协议 ARP/RARP	109
4.3.1	ARP	110
4.3.2	RARP	111
4.4	因特网控制信息协议 ICMP	111
4.4.1	ICMP	111
4.4.2	ICMPv6	113
4.5	路由算法和路由协议	116
4.5.1	路由算法	116
4.5.2	路由协议	120
4.6	网络层设备	122
4.6.1	路由器	122
4.6.2	三层交换机	126
4.7	IP 多播	127
4.7.1	IP 多播的基本概念	127
4.7.2	因特网组管理协议 IGMP	129
4.7.3	多播路由协议	131
4.8	多协议标签交换 MPLS	133
4.8.1	标记交换	133
4.8.2	MPLS 工作原理	134
	小结	136
	习题	136
第 5 章	传输层	138
5.1	传输层概述	138
5.1.1	进程之间的通信	138
5.1.2	传输层协议	139
5.1.3	传输层地址	140
5.1.4	套接字	141
5.2	用户数据报协议 UDP	142
5.2.1	UDP 的特点	142
5.2.2	UDP 用户数据报格式	143
5.3	传输控制协议 TCP 原理	144

5.3.1	TCP 特点	144
5.3.2	TCP 段格式	144
5.3.3	TCP 连接管理	146
5.4	TCP 可靠传输	147
5.4.1	TCP 滑动窗口	148
5.4.2	超时重传时间的选择	151
5.5	TCP 的流量控制和拥塞控制	152
5.5.1	TCP 流量控制	152
5.5.2	TCP 拥塞控制	153
5.6	基于 Socket 的网络编程	154
5.6.1	网络应用程序体系结构	154
5.6.2	基于 Socket 的网络编程	156
	小结	157
	习题	158
第 6 章	应用层	159
6.1	应用层概述	159
6.1.1	应用层的任务	159
6.1.2	应用层协议	160
6.1.3	统一资源定位器与统一资源标识	161
6.2	域名系统 DNS	163
6.2.1	DNS 的概念	163
6.2.2	DNS 的查询过程	165
6.2.3	域名的注册	166
6.3	超文本传输协议 HTTP	167
6.3.1	万维网 WWW	167
6.3.2	HTTP 协议的基本原理	168
6.3.3	有状态协议与无状态协议	170
6.3.4	HTTP 的持续性连接与非持续性连接	170
6.3.5	HTTP 的请求类型与实施方法	171
6.3.6	HTTP 的报文格式	172
6.3.7	HTTP 的会话跟踪机制	174
6.4	文件传输协议 FTP	175
6.4.1	FTP 的连接	175
6.4.2	FTP 的数据通信	176
6.4.3	简单文件传输协议 TFTP	177
6.5	电子邮件协议	178
6.5.1	电子邮件的发送和接收	178

6.5.2	邮件消息格式	179
6.5.3	简单邮件传输协议 SMTP	182
6.5.4	邮局协议 POP3	184
6.5.5	因特网邮件存取协议 IMAP4	185
6.6	其他常用网络应用协议	186
6.6.1	动态主机配置协议 DHCP	186
6.6.2	远程终端协议 Telnet	187
6.7	内容分布	188
6.7.1	Web 缓存	188
6.7.2	内容分布网络 CDN	189
6.7.3	P2P 文件分发	190
6.8	基于 Web 的网络编程	192
	小结	194
	习题	195
第 7 章	无线网络	196
7.1	无线网络概述	196
7.1.1	无线网络的特点	196
7.1.2	无线网络的分类	197
7.2	无线通信介质和设备	198
7.2.1	无线通信介质	198
7.2.2	无线网络连接设备	204
7.3	无线通信的主要技术	205
7.3.1	多址技术	206
7.3.2	双工技术	208
7.3.3	多输入多输出/智能天线技术	209
7.4	无线体域网和无线个域网	209
7.4.1	无线体域网	210
7.4.2	无线个域网	211
7.5	无线局域网	214
7.5.1	无线局域网拓扑结构	214
7.5.2	无线局域网协议	215
7.5.3	网络设备接入方案	218
7.6	无线城域网	219
7.7	蜂窝移动通信系统	220
7.7.1	第 1 代移动通信系统	221
7.7.2	第 2 代移动通信系统	221
7.7.3	第 3 代移动通信系统	222

7.7.4	第 4 代移动通信系统.....	223
7.7.5	第 5 代移动通信系统.....	224
7.8	移动 Ad Hoc 网络和无线传感器网络	225
7.8.1	移动 Ad Hoc 网络	225
7.8.2	无线传感器网络	227
小结	231
习题	231
第 8 章	网络安全	232
8.1	网络安全概述.....	232
8.1.1	计算机网络面临的安全威胁	232
8.1.2	网络安全的攻防体系.....	233
8.1.3	网络安全的层次体系及等级保护制度	234
8.2	数据加密技术.....	237
8.2.1	数据加密技术基础	237
8.2.2	传统加密算法	240
8.2.3	数据加密标准 DES	243
8.2.4	公开密钥加密算法 RSA.....	245
8.2.5	数据加密技术的应用.....	247
8.3	因特网的安全协议	249
8.3.1	网络层安全协议	249
8.3.2	传输层安全协议	253
8.3.3	应用层安全协议	254
8.4	防火墙	256
8.4.1	防火墙的概念	256
8.4.2	防火墙技术	257
8.5	入侵检测和入侵防御	260
8.5.1	入侵检测	260
8.5.2	入侵防御.....	262
小结	264
习题	265
第 9 章	多媒体网络	266
9.1	多媒体网络概述	266
9.1.1	多媒体网络的定义	266
9.1.2	多媒体网络的特征	267
9.1.3	多媒体网络协议栈	267
9.1.4	多媒体网络应用的分类.....	269

9.2	流式存储音视频	270
9.2.1	UDP 流	270
9.2.2	HTTP 流	271
9.2.3	DASH 流	272
9.3	交互式 IP 语音	272
9.3.1	IP 语音概述	272
9.3.2	IP 语音的基本原理	273
9.3.3	IP 语音的通话质量	274
9.4	交互式会话应用的协议	276
9.4.1	实时传输协议 RTP	276
9.4.2	会话发起协议 SIP	277
9.5	网络服务质量	281
9.5.1	Best-Effort 模型	281
9.5.2	IntServ 模型	281
9.5.3	DiffServ 模型	282
9.5.4	基于 DiffServ 模型的 QoS 业务	282
	小结	283
	习题	283
第 10 章	网络前沿技术	284
10.1	云计算技术	284
10.1.1	云计算概述	284
10.1.2	云计算的应用	286
10.1.3	云计算的发展趋势	288
10.2	边缘计算技术	289
10.2.1	边缘计算的兴起	290
10.2.2	边缘计算的定义	290
10.2.3	边缘计算的平台	291
10.2.4	边缘计算的典型应用	292
10.2.5	边缘计算的挑战	294
10.2.6	边缘计算、雾计算与云计算模式的比较	295
10.3	软件定义网络技术	296
10.3.1	SDN 的设计思想	296
10.3.2	SDN 的层次架构	296
10.3.3	SDN 的工作流程	297
10.3.4	SDN 的应用场景	299
10.3.5	SDN 的研究发展	300
10.4	数据中心网络	301

10.4.1 传统数据中心网络架构	301
10.4.2 数据中心网络的演进	302
10.4.3 数据中心网络的发展趋势	306
小结	307
习题	307
附录 A 缩略词	308
参考文献	317

本章从计算机网络的产生和发展入手，依次介绍了计算机网络的定义、结构、分类、组成以及评价指标等基本知识，读者从中可以了解到计算机网络是一个十分复杂的系统。将一个复杂过程分解为若干容易处理的部分，然后逐个分析处理，这种结构化设计方法是工程设计中经常使用的手段。对于计算机网络，分层是系统分解的最好方法之一。本章介绍了网络分层的方法以及两种主流的网络分层体系结构。

1.1 计算机网络简介

计算机网络（Computer Network）的产生和发展，实质上是计算机技术和通信技术相结合并不断发展的过程。

1.1.1 计算机网络的产生和发展

众所周知，研制计算机的初衷是进行科学计算，但随着计算机技术的飞速发展和计算机的普及，计算机之间信息交换的需求也随之增长，因此人们将计算机技术与通信技术相结合而产生了计算机网络。计算机网络的发展历程大致可分为 4 个阶段。

1. 第 1 阶段：面向终端的计算机通信网络

早期的计算机网络产生于 20 世纪 50 年代初，它是将一台计算机经通信线路与若干台终端直接相连，如图 1-1（a）所示。其典型代表是美国的半自动地面防空系统（Semi-Automatic Ground Environment, SAGE），它把远距离的雷达和其他测控设备的信号通过通信线路传送到一台旋风计算机进行处理和控制，首次实现了计算机技术与通信技术的结合。

20 世纪 60 年代初，面向终端的计算机通信网络有了新的发展，在主机和通信线路之间设置了通信控制处理机，专门负责通信控制。在终端聚集处设置了集中器，用低速线路将各终端汇集到集中器，再通过高速线路与计算机相连，如图 1-1（b）所示。这样不但将计算机承担的通信控制交由通信控制处理机完成，减轻了主机负担，而且降低了通信线路的成本。这种结构的典型代表是美国的航空公司飞机订票系统——半自动商务研究环境（Semi-Automated Business Research Environment, SABRE），这一系统通过电话线，将位于纽约的一台国际商业机器公司（International Business Machines Corporation, IBM）的计算机和超过 65 个城市的终端连接在一起，处理飞机座

(Institute of Electrical and Electronic Engineers, IEEE) 于 1980 年成立了 IEEE 802 局域网络标准委员会, 并制定了一系列局域网标准。其中, IEEE 802.3 标准——以太网 (Ethernet) 成为局域网技术的主流, 并逐渐发展到今天的快速以太网 (IEEE 802.3u)、千兆位以太网 (IEEE 802.3z)、万兆位以太网 (IEEE 802.3ae) 和十万兆以太网 (IEEE 802.3ba)。

1983 年, TCP/IP 被批准为美国军方的网络传输协议。同年, ARPANET 分化为 ARPANET 和 MILNET (Military Network) 两个网络。1984 年, 美国国家科学基金会决定将教育科研网 CSNET (Computer Science Network) 与 ARPANET 合并, 运行 TCP/IP, 向世界范围扩展, 并将此网命名为 Internet。据统计, 20 世纪 80 年代连接到 Internet 上的主机数量已达到 10 000 台。

4. 第 4 阶段: Internet 的迅猛发展

20 世纪 90 年代, 计算机网络得以迅猛发展, 人类自此进入了网络时代。

1993 年, 美国公布了国家信息基础设施 (National Information Infrastructure, NII) 发展计划, 推动了国际范围内网络发展热潮。

1993 年, 由欧洲核子研究组织 (Conseil Européenn pour la Recherche Nucléaire, CERN) 开发的万维网 (World Wide Web, WWW) 首次在 Internet 上露面, 立即引起轰动并大获成功。万维网的最大贡献在于大大方便了非专业人员对网络的使用, 并成为 Internet 用户日后成指数级增长的主要驱动力。英国调查机构 Netcraft 的报告显示, 2018 年 9 月全球站点数量突破 5 亿大关。第 43 次《中国互联网络发展状况统计报告》(2019 年 2 月) 提供的数据表明, 截至 2018 年 12 月, 中国网民规模达 8.29 亿, Internet 普及率为 59.6%。

1992 年, 许多研究人员致力于开发具有图形用户界面 (Graphical User Interface, GUI) 接口的 Web 浏览器, 其中 Andreessen 和他的同事于 1993 年发布了浏览器 Mosaic 的 α 版。到 1995 年, 用户可以使用 Mosaic 和 Netscape 浏览器在 Web 上冲浪。同时许多公司开始运行 Web 服务器并在 Web 上处理商务。微软公司 (Microsoft Corporation) 于 1996 年开始开发浏览器 Internet Explorer, 导致网景通信公司 (Netscape Communications Corporation) 和微软之间的浏览器之战, 并以微软公司的获胜而告终。

20 世纪 90 年代的后 5 年, 许多主流公司和数以千计的后起之秀创造 Internet 产品和服务。到 2000 年末, Internet 已支持数百个流行的应用程序, 包括电子邮件、即时信息和 MP3 的对等文件共享等。

20 世纪 90 年代, 网络研究在路由 (Routing, 即路径选择) 与高速路由器和局域网两个领域取得了重大进展。从技术上努力解决定义和实现实时的 Internet 服务模式问题。

进入 21 世纪以来, 计算机网络的发展主要体现在光通信、住宅宽带接入 Internet、对等网络 (Peer to Peer, P2P)、三网融合、移动通信、移动互联网 (Mobile Internet)、物联网 (Internet of Things, IoT)、大数据 (Big Data) 和云计算 (Cloud Computing) 等多个方面。

今天, 光通信技术已经很成熟, 光纤通信已是各种通信网的主要传输方式。现在光纤的使用已不只限于陆地, 光缆已广泛铺设到大西洋、太平洋海底, 这些海底光缆使得全球通信变得非常简单快捷。同时, 光缆已铺设到房间内, 实现了光纤到办公室 (Fiber To The Office, FTTO) 和光纤到家庭 (Fiber To The Home, FTTH)。未来传输网络的最终目标, 是构建全光网络, 即在接入网、城域网 (Metropolitan Area Network, MAN) 和主干网完全实现“光纤传输代替铜线传输”。而目前的一切研发进展, 都是“逼近”这个过程。

根据咨询机构 Ovum 的数据, 2015—2021 年, 全球光通信器件市场规模总体呈增长趋势, 预

期 2020 年收入规模将达 166 亿美元。欧美等发达国家已经把光纤通信置于国家发展的战略地位。

2016 年 12 月，国家工业和信息化部发布《信息通信行业发展规划（2016—2020 年）》，提出要构建新一代信息通信基础设施，包括推动高速光纤宽带网络跨越发展、基本实现行政村光纤通达、推进超高速大容量光传输技术应用、升级主干传输网等。中国的光通信产业正处于发展的高潮，覆盖全国的“八纵八横”光缆主干网络铺设完成标志着我国光通信长途干线网络建设实现跨越式发展。近 10 年，在国家政策引导下，我国移动、联通和电信三大运营商掀起了光网络建设高潮，城域网不断完善，光纤入户建设突飞猛进，接入网线路铺设距离不断延伸。截至 2018 年年末，全国接入网络基本实现光纤化，光缆线路总长度达 4 358 万 km，总长度位居世界第一，全国光网城市全面建成。光纤接入（FTTH/O）用户规模达 3.68 亿户，占固定 Internet 宽带接入用户总数的 90.4%。

住宅宽带接入 Internet 采用数字用户线（Digital Subscriber Line, DSL）和电缆调制解调器（Cable Modem）技术，在世界范围迅速推广，为多媒体应用的发展奠定了良好基础。近年来随着光通信技术的发展和普及，FTTO 和 FTTH 成为现实，最终解决了用户接入网络的“最后一公里问题”。

P2P 是指信息直接在对等方之间传输，而无须通过中心服务器，对等方（用户计算机）一般具有间歇性的连接。目前 Internet 上流行的 P2P 应用主要有 P2P 文件共享、即时通信（Instant Messaging, IM）、P2P 流媒体、分布式存储等。例如，微信就是一款移动即时通信软件，它在亚洲地区拥有最大的用户群体，2019 年一季度活跃用户量已达 11.12 亿。

三网融合是指电信网、广播电视网、Internet 在向宽带通信网、数字电视网、下一代网络（Next Generation Network, NGN）演进过程中，三大网络通过技术改造，其技术功能趋于一致，业务范围趋于相同，网络互联互通、资源共享，能为用户提供语音、数据和广播电视等多种服务。

三网融合是一个渐进的过程。美国、英国、法国和日韩等国家起步较早，已通过立法推动三网融合。我国的三网融合已经上升为国家战略的高度，根据规划，我国三网融合工作分为两个阶段进行，其中 2010—2012 年重点开展广播电视和电信业务双向进入试点，2013—2015 年全面实现三网融合发展。国务院办公厅于 2010 年 6 月 30 日和 2012 年 1 月 4 日先后公布两批试点地区（城市）名单，使得三网融合试点已基本涵盖全国。2015 年 9 月 5 日国务院办公厅印发《三网融合推广方案》，加快在全国全面推进三网融合，推动信息网络基础设施互联互通和资源共享。

在移动通信领域，曾被誉为新世纪“宠儿”的第三代移动通信技术（3rd-Generation, 3G）已淡出了历史舞台，第四代移动通信技术（4th-Generation, 4G）成为目前的主导制式。2018 年全球 4G 以 40% 成为全球占比最高的移动通信技术，支撑了约 33.5 亿的终端用户。截至 2019 年 8 月底，我国三大运营商的移动电话用户总数达 15.96 亿户，其中 4G 用户规模为 12.57 亿户，占移动电话用户的 78.8%。

第五代移动通信技术（5th-Generation, 5G）是最新一代移动通信技术。5G 的性能目标是高数据速率、减少时延（Delay 或 Latency）、节省能源、降低成本、提高系统容量和大规模设备连接。ITU IMT-2020 规范要求速度高达 20 Gbit/s。5G 的研发始于 2013 年，欧盟、美国、日韩和中国是重要的参与者。2018 年 6 月 13 日，首个 5G 国际标准正式颁布，我国企业多项技术方案进入国际核心标准规范。2019 年 6 月 6 日，工信部正式向中国电信、中国移动、中国联通和中国广电发放 5G 商用牌照。其后中国移动、中国联通和中国电信于 11 月 1 日正式上线 5G 商用套餐，标志着中国进入 5G 商用时代。从发展态势看，5G 还处于技术标准的研究阶段，后续 4G 还将保持主导地位并实现持续高速发展。