


电线电缆技术丛书

# 通信电缆 结构设计

主 编 倪艳荣  
副主编 郑先锋 田丰

**TONGXIN DIANLAN JIEGOU SHEJI**

 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



电线电缆技术丛书

# 通信电缆结构设计

倪艳荣 主 编  
郑先锋 田 丰 副主编



机械工业出版社

本书从通信电缆的基本理论出发,逐步阐明通信电缆的结构设计、生产工艺及测试方法。同时也对通信电缆回路间的相互干扰特性、外界电磁场对它们的影响以及对这些影响的防护作了介绍。其主要内容包括通信电缆的电气特性,对称电缆、射频同轴电缆、串音及串音防卫度,电缆的生产工艺及测试等。

本书既可作为高校相关专业的教材,也可作为电缆行业及相关行业技术人员的参考用书。

## 图书在版编目(CIP)数据

通信电缆结构设计/倪艳荣主编. —北京:机械工业出版社,2012.10  
(电线电缆技术丛书)

ISBN 978-7-111-40230-5

I. ①通… II. ①倪… III. ①通信电缆-结构设计 IV. ①TM248

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第257263号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:林春泉 责任编辑:赵任 版式设计:闫玥红  
责任校对:申春香 封面设计:鞠杨 责任印制:乔宇  
北京机工印刷厂印刷(三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2013年1月第1版第1次印刷184mm×260mm·14.5印张·357千字  
3001—4000册

标准书号:ISBN 978-7-111-40230-5

定价:38.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203 封面防伪标均为盗版

# 前 言

现代电气通信，既可以采用无线传输，又可以采用有线通信线路来传输。虽然无线通信建设较快，灵活方便，维护简单，但是由于有线通信在长距离传输中稳定、可靠、保密性强，同时又可获得大量的通信路数，因此形成了现代通信网是有线通信和无线通信的综合体。其中，骨干网和中继网都以光纤光缆有线传输为主，用户接入网是有线和无线传输共存的局面。

用于现代有线通信的传输线种类繁多，但就其传输的性质来说可归纳为三种类型，即横电磁波（Transverse Electromagnetic Wave, TEM）传输线、波导及光纤。限于篇幅，本书主要介绍横电磁波传输线，通常称为通信传输线缆。

本书从通信电缆的基本理论出发，逐步阐明通信电缆的结构设计、生产工艺及测试方法。同时也对通信电缆回路间的相互干扰特性、外界电磁场对它们的影响以及对这些影响的防护作了介绍。其主要内容包括：

## 1. 通信电缆的电气特性

本部分在分析通信电缆的基本传输理论的基础上，主要讲述了电缆线路的电气参数，包括一次传输参数、二次传输参数、工作衰减、输入阻抗等的计算及影响因素分析，指出这些电气参数最终由电缆的结构尺寸、材料及所传输信号的频率所决定，这为我们进行电缆结构设计提供了依据。

## 2. 对称电缆、射频同轴电缆

本部分主要对对称通信电缆及射频同轴电缆进行了介绍，首先介绍了对称电缆及射频同轴电缆的结构元件及类型，让读者了解它们的组成及用途，其次在分析它们的电气特性的基础上给出了其传输参数的计算公式，以供读者参考。同时也对电缆的波阻抗不均匀性进行了分析。

## 3. 串音及串音防卫度

串音也就是干扰，是影响通信电缆传输质量的重要因素，本部分首先介绍了串音机理，然后分别对对称电缆和同轴电缆回路间存在电磁耦合进行了分析，给出了串音参数，包括一次串音参数和二次串音参数的计算方法。

## 4. 电缆的生产工艺及测试

通信电缆的制造包括绝缘线芯的制造、线组的绞合、同轴对的制造、成缆、护层的制造等，本部分对以上各工艺进行了详细的介绍。同时对通信电缆特有的电性能测试进行了介绍，主要包括通信电缆一次和二次传输参数测试、对称电缆工作电容的测试、电容耦合和电容不平衡测试、串音测试、同轴电缆驻波比的测试及屏蔽性能测试等。

本书由倪艳荣担任主编，郑先锋、田丰担任副主编，参加编写的还有张静、夏博爱、卢宇等。在编写过程中，王卫东、张开拓等老师提供了很多资料，在此向他们表示衷心的感谢！

由于编者学识疏浅，水平有限，书中难免存在不妥之处，恳请读者批评指正！

编者  
2012年8月

# 目 录

## 前言

## 第 1 章 绪论 ..... 1

- 1.1 电气通信及其通信线路 ..... 1
- 1.2 通信网的基本组成 ..... 2
- 1.3 现代通信网分类 ..... 3
  - 1.3.1 电话网 ..... 4
  - 1.3.2 数据通信网 ..... 6
- 1.4 通信电缆的发展过程 ..... 7
  - 1.4.1 世界通信电缆的发展 ..... 7
  - 1.4.2 我国通信线路的发展 ..... 10
- 1.5 通信电缆的型号 ..... 10
  - 1.5.1 产品型号与结构的关系 ..... 10
  - 1.5.2 各部分代表符号的意义 ..... 11

## 第 2 章 通信电缆的电气特性 ..... 12

- 2.1 均匀电缆传输线理论 ..... 12
  - 2.1.1 均匀电缆传输线的等效回路 ..... 12
  - 2.1.2 均匀电缆传输的基本方程 ..... 13
  - 2.1.3 终端负载阻抗匹配的均匀线路 ..... 15
- 2.2 电缆线路的二次传输参数 ..... 16
  - 2.2.1 波阻抗及传播常数的物理意义 ..... 16
  - 2.2.2 波阻抗的计算公式 ..... 16
  - 2.2.3 传播常数的计算公式 ..... 18
  - 2.2.4 电磁波沿电缆线路的传播速度 ..... 20
- 2.3 传输电平和通信距离 ..... 21
  - 2.3.1 传输电平 ..... 21
  - 2.3.2 通信距离 ..... 24
- 2.4 均匀电缆线路的输入阻抗与工作衰减 ..... 25
  - 2.4.1 输入阻抗及其表达式 ..... 25
  - 2.4.2 不同负载情况下的输入阻抗值 ..... 25
  - 2.4.3 长线路的输入阻抗 ..... 26
- 2.5 非均匀电缆线路的性质 ..... 27
  - 2.5.1 非均匀电缆线路 ..... 27
  - 2.5.2 反射系数 ..... 27
  - 2.5.3 线路终端为不同负载时的反射系数 ..... 28
- 2.6 信号的失真 ..... 28

2.6.1 振幅失真 ..... 29

2.6.2 相位失真 ..... 29

2.6.3 由于波阻抗  $Z_c$  随其频率变化而引起的失真 ..... 30

2.6.4 非线性失真 ..... 30

2.7 耐电压强度 ..... 31

## 第 3 章 对称通信电缆 ..... 32

- 3.1 对称通信电缆的结构元件 ..... 32
  - 3.1.1 对称电缆的导电线芯 ..... 32
  - 3.1.2 对称电缆的导电线芯的绝缘 ..... 32
  - 3.1.3 对称电缆的线组 ..... 34
  - 3.1.4 对称电缆的缆芯 ..... 35
  - 3.1.5 通信电缆的护层 ..... 36
- 3.2 对称通信电缆的类型 ..... 38
  - 3.2.1 全塑市内通信电缆 ..... 38
  - 3.2.2 铁路数字信号电缆 ..... 48
  - 3.2.3 高速数据对绞电缆 ..... 49
- 3.3 对称通信电缆传输参数的计算 ..... 52
  - 3.3.1 对称电缆的有效电阻 ..... 52
  - 3.3.2 对称电缆的电感 ..... 57
  - 3.3.3 对称电缆的电容 ..... 58
  - 3.3.4 对称电缆的绝缘电导 ..... 61
  - 3.3.5 对称电缆等效介电常数和等效介质损耗角正切值的计算 ..... 62
  - 3.3.6 对称电缆二次传输参数的计算 ..... 63
- 3.4 对称通信电缆的设计 ..... 63
  - 3.4.1 对称电缆结构的选择 ..... 63
  - 3.4.2 对称电缆参数计算与最佳结构 ..... 65

## 第 4 章 射频同轴电缆 ..... 67

- 4.1 同轴电缆的型号和用途 ..... 67
  - 4.1.1 同轴电缆的定义 ..... 67
  - 4.1.2 同轴电缆的型号 ..... 67
  - 4.1.3 同轴电缆的应用 ..... 68
- 4.2 射频电缆的分类 ..... 70
- 4.3 射频同轴电缆的结构元件 ..... 71
  - 4.3.1 内导体 ..... 72
  - 4.3.2 绝缘 ..... 73

4.3.3	外导体	75	直径比	105
4.3.4	护套	76	4.11.4 额定平均功率最大时的最佳直径比	105
4.3.5	铠装	76	4.11.5 同轴射频电缆波阻抗的取值	105
4.4	射频同轴电缆的结构与类型	77	4.12 波阻抗不均匀性及驻波	106
4.4.1	一般用途的射频电缆	77	4.12.1 波阻抗不均匀性的概念	106
4.4.2	大功率射频电缆	77	4.12.2 波阻抗不均匀性的种类和原因	107
4.4.3	微小型射频电缆	78	4.12.3 不均匀性对传输质量的影响	107
4.4.4	电视电缆	78	4.12.4 射频下波阻抗不均匀性的特点	108
4.4.5	低噪声电缆	79	4.12.5 阻抗偏差、驻波系数和反射衰减	109
4.5	漏泄同轴电缆	79	<b>第5章 通信电缆回路间的串音</b>	111
4.5.1	漏缆的工作原理	80	5.1 对称电缆回路间的串音机理及串音参数	111
4.5.2	漏缆的主要性能指标	80	5.1.1 等效电路及一次串音参数	111
4.5.3	漏缆的种类	81	5.1.2 二次串音参数	112
4.6	同轴电缆的特点及电气过程	83	5.2 制造长度对称电缆回路的串音衰减和防卫度	114
4.6.1	理想同轴电缆的电磁场	83	5.2.1 制造长度对称电缆串音衰减的确定	114
4.6.2	内、外导体中的电流分布	84	5.2.2 串音防卫度	116
4.6.3	透入深度	86	5.3 对称电缆电磁耦合的分析与计算	117
4.7	射频同轴电缆的一次传输参数计算	86	5.3.1 电容耦合 $k$	117
4.7.1	射频同轴电缆回路的有效电阻	86	5.3.2 介质耦合 $g$	118
4.7.2	同轴电缆的电感	88	5.3.3 电感耦合 $m$	118
4.7.3	同轴回路的电容	89	5.3.4 导电耦合 $r$	119
4.7.4	同轴回路的绝缘电导	89	5.4 电磁耦合系数及频率的关系	120
4.7.5	一次参数与频率及结构尺寸的关系	90	5.4.1 $N$ 、 $F$ 对串音衰减的影响	120
4.8	射频同轴电缆的二次传输参数计算	91	5.4.2 耦合系数与频率的关系	122
4.8.1	波阻抗	91	5.5 长对称电缆线路中的串音衰减	124
4.8.2	衰减	93	5.5.1 近端串音衰减	125
4.8.3	相移	96	5.5.2 远端串音衰减	126
4.8.4	工作电压	96	5.5.3 远端串音防卫度	127
4.9	同轴射频电缆的传输功率	97	5.6 对称电缆内任意回路间的电磁耦合	127
4.9.1	额定峰值功率	98	5.7 回路间的间接干扰	129
4.9.2	额定平均功率	98	5.8 线路的交叉或绞合对防止和消除回路间干扰的作用	130
4.10	同轴射频电缆的最高使用频率	103	5.8.1 线路交叉减少干扰的基本原理	130
4.10.1	衰减指标对最高使用频率的限制	103	5.8.2 电缆绞合的基本情况	131
4.10.2	同轴射频电缆的截止频率	103	5.9 同轴电缆回路间的相互干扰	136
4.10.3	绝缘结构对最高使用频率的限制	104	5.9.1 同轴回路中干扰的基本原理	136
4.11	同轴射频电缆的最佳结构	104		
4.11.1	衰减最小时的最佳直径比	104		
4.11.2	额定电压最大时的最佳直径比	104		
4.11.3	额定峰值功率最大时的最佳直径比	105		

5.9.2 影响干扰的因素 .....	136	7.5 射频同轴对的制造 .....	171
5.9.3 “透入深度”与涡流系数之间的 关系 .....	137	7.5.1 物理发泡绝缘工序 .....	171
5.10 同轴电缆的串音防卫度 .....	138	7.5.2 焊接轧纹工序 .....	177
5.10.1 耦合阻抗 $Z_{12}$ .....	138	7.5.3 护套工序 .....	178
5.10.2 无屏蔽同轴回路间的串音衰减及 防卫度 .....	139	7.6 成缆工艺 .....	178
5.10.3 同轴对外导体上有屏蔽体时的 串音衰减及防卫度 .....	140	7.6.1 成缆机的分类 .....	178
5.10.4 串音衰减与传输频率和电缆长度 的关系 .....	141	7.6.2 层式绞合成缆机的构造 .....	179
<b>第6章 通信电缆的屏蔽</b> .....	143	7.6.3 层式绞合工艺 .....	182
6.1 屏蔽的基本原理 .....	143	7.7 干燥 .....	183
6.2 同轴对的屏蔽 .....	146	7.8 压铅 .....	184
6.2.1 单层外导体的屏蔽作用 .....	146	7.8.1 立式压铅机的工作特点及结构 .....	184
6.2.2 多层屏蔽的效果 .....	146	7.8.2 压铅工艺 .....	185
6.3 对称电缆的屏蔽 .....	147	7.9 压铅和轧纹 .....	187
6.3.1 主串线对在中心的单层屏蔽体的 屏蔽效果 .....	147	7.9.1 压铝的工艺特点 .....	187
6.3.2 低频时防护作用系数(或屏蔽 系数) .....	148	7.9.2 $2 \times 1600t$ 双筒压铝机的压铝 工艺 .....	188
6.3.3 主串线对偏心对屏蔽效果的 影响 .....	149	7.9.3 轧纹的目的和原理 .....	188
6.4 电缆金属套的屏蔽作用 .....	149	7.10 通信电缆的挤制外护套工序和铠装 工序 .....	189
6.4.1 固有屏蔽系数 .....	149	<b>第8章 通信电缆传输特性测试</b> .....	190
6.4.2 实际屏蔽系数 .....	152	8.1 通信电缆一次和二次传输参数测试 .....	190
<b>第7章 通信电缆的制造</b> .....	153	8.1.1 设备组成 .....	190
7.1 导体制造 .....	153	8.1.2 适用范围 .....	191
7.1.1 单线拉制 .....	153	8.1.3 测试精度 .....	191
7.1.2 线芯绞制 .....	154	8.1.4 测试中的注意事项 .....	191
7.2 绝缘挤制 .....	157	8.1.5 测试系统 .....	192
7.2.1 挤塑机的基本结构 .....	157	8.1.6 开短路法的基本原理 .....	192
7.2.2 模具 .....	160	8.1.7 谐振法基本原理 .....	195
7.2.3 挤塑的一般工艺流程 .....	162	8.1.8 试验要求 .....	196
7.2.4 影响挤塑质量的几个主要因素 .....	162	8.1.9 测试结果及计算 .....	196
7.2.5 常见质量问题 .....	164	8.2 对称电缆工作电容测试 .....	198
7.3 对称电缆元件的星绞 .....	165	8.2.1 比较法测试电缆的工作电容 .....	198
7.3.1 立式星绞机 .....	165	8.2.2 电桥法测试工作电容 .....	199
7.3.2 星绞工艺 .....	166	8.2.3 试验设备 .....	199
7.4 同轴对的制造 .....	168	8.2.4 试验结果及计算 .....	200
7.4.1 垫片式 2.6/9.4 同轴对的制造 工艺 .....	168	8.3 电缆电容耦合和电容不平衡测试 .....	200
7.4.2 同轴对的准备 .....	168	8.3.1 测试原理 .....	200
		8.3.2 试验设备 .....	202
		8.3.3 试验步骤 .....	202
		8.3.4 测试结果及计算方法 .....	203
		8.4 通信电缆的串音测试 .....	203
		8.4.1 基本原理 .....	203
		8.4.2 试验设备 .....	204

---

8.4.3	试验步骤 .....	205	8.6.2	试验设备 .....	215
8.4.4	试验结果及计算 .....	205	8.6.3	试验步骤 .....	217
8.5	同轴电缆的衰减测试 .....	207	8.6.4	试验结果及计算 .....	217
8.5.1	测试原理 .....	207	8.7	通信电缆屏蔽系数的测试 .....	220
8.5.2	测试仪器 .....	208	8.7.1	测试原理 .....	220
8.5.3	测试步骤 .....	210	8.7.2	测试设备 .....	220
8.5.4	试验结果及计算 .....	213	8.7.3	注意事项 .....	222
8.6	同轴电缆均匀性测试 .....	214	8.7.4	试验结果及计算 .....	222
8.6.1	测试原理 .....	214	<b>参考文献</b> .....		<b>224</b>



# 第 1 章 绪 论

## 1.1 电气通信及其通信线路

通信就是信息的传递，是指由一地向另一地进行信息的传输与交换，其目的是传输消息。自古以来，人类为了互通信息想过很多方法，历史上曾有驿站、飞鸽传书、烽火报警、符号、身体语言、眼神、触碰等方式进行信息传递。然而，随着社会生产力的发展，人们对传递消息的要求也越来越高。今天，随着科学水平的飞速发展，相继出现了无线电、固定电话、移动电话、互联网甚至视频电话等各种通信方式。在各种各样的通信方式中，利用“电”来传递消息的通信方法称为电气通信，这种通信具有迅速、准确、可靠等特点，且几乎不受时间、地点、空间、距离的限制，因而得到了飞速发展和广泛应用。

现代电气通信，既可以采用无线传输，又可以采用有线通信线路来传输。两种传输方式各有其优缺点。无线通信建设较快，维护简单，在经济上比较有利，但易受到干扰，特别是要受到大气条件的影响，使用稳定性差，保密性差。在无线通信中，还有无线中继通信（或称为微波接力通信），它能提供较多的通信路数，并可满足长距离通信的要求，因此无线通信发展较快。有线通信方式在长距离传输中稳定、可靠、保密性强，同时又可获得大量的通信路数。但有线通信线路设备初建费用大，而且建设时间较长。用于现代有线通信的传输线种类繁多，但就其传输的性质来说可归纳为三种类型。

### 1. 横电磁波传输线

这是由两根（或两组）导线所组成的传输线，横切面上的电场力线就是终止于这两根（或两组）导线上。TEM 波是没有截频而能传输零频的波形，是一种结构比较稳定的模式。由于传输较高频的高次型模式时传输衰减太大而不被采用，它一般用来传输较低的频段。

架空明线是对称导线组成的古老的 TEM 波传输线，它是在电杆上架设一对或多对导线，其中一对导线就构成一个通信回路。由于它的电磁场是开放式的，极易受外界干扰和产生相互干扰，频率越高干扰越严重，这就使它只能传输极低的频率。

对称通信电缆和架空明线一样，也是用一对导线组成一个通信回路。其回路是两根参数相同的绝缘线芯绞合在一起，它的电磁场基本被限制在金属护套内，但回路间的干扰还是频率越高越严重，所以传输频率仍然不高。

同轴线是用一根铜导体作为内导体，一管状铜导体（或铝导体）作为外导体，中间隔以绝缘。它的结构从根本上解决了频率越高串音越严重的问题，多用于高频传输。

### 2. 波导

波导是由单根空管（或导体）所组成的传输线。它不能传输 TEM 波，只能传输 TE 波、TM 波或极耦合波。波导的类型很多，有金属的、介质的、开放式的和封闭式的。从形状上分，有圆形的、矩形的或其他形状的。长途通信时其传输衰减随频率升高而下降，其传输频率可达到  $10^{11}$  Hz 左右。

### 3. 光纤

通信光缆传输元件是光纤（光导纤维），它是一种特制的玻璃纤维，特点是使光波在其内部向前传输，光波实际上就是一种频率极高的电磁波。

在电气通信中，对通信质量的要求是：衰减小、失真小、串音小。因此，为使通信系统具有高传输质量，不仅要有良好的通信设备，还要有高质量的通信电缆线路。因此，通信电缆的设计制造应满足以下几点要求：

- 1) 能满足实际需要的通信距离进行通信，就是说在宽频带内电缆的衰减应该尽可能小；
- 2) 由线路产生的失真要小；
- 3) 电缆回路对相互干扰及外界干扰的防卫度高；
- 4) 电气参数稳定；
- 5) 整个通信体制要经济。

## 1.2 通信网的基本组成

现代通信以既快又准确可靠的电信号和光信号来传递信息，如今的“通信”大部分是指用这种光电信号传输的电子通信。用电信号或光信号传递信息的系统，称作通信系统。通信系统有模拟通信系统和数字通信系统两大类，前者传输的是模拟信号，后者传输的是数字信号。构成通信系统的最基本模型如图 1-1 所示，其基本组成包括信源、变换器、信道、噪声源、反变换器、信宿等部分。

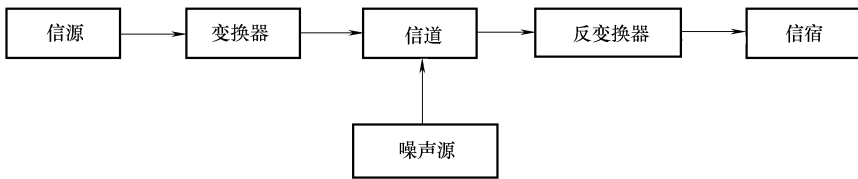


图 1-1 通信系统的基本构成模型

在这里重点强调一下信道。信道是信号的传输媒介。信道按传输介质的种类可以分为有线信道和无线信道。在有线信道中电磁信号被约束在某种金属传输线（如架空明线、电缆）上传输，光信号被约束在光纤中传输；在无线信道中电磁信号沿空间（大气层、对流层、电离层）传输。其通信特点如 1.1 节所述。

图 1-1 所示的只是一个最基本的单项的通信系统，实际的通信系统必须是双向的乃至多个通信方的，即多点通信，构成一个通信网。通信网可以描述为由一定数量的节点（包括交换设备和终端设备）互为有机地组合在一起，实现两个或多个规定节点间信息传输的通信体系。

从通信网的定义可以看出，通信网在硬件设备上的构成要素是终端设备、交换设备和传输链路。为了使全网协调合理地工作，还要有各种规定，如信令方案、各种协议等，均属于软件。

图 1-2 所示是一个由两个交换中心组成的通信网的基本形式。端局至汇接局的传输设备

一般称为中继电路，端局至用户的传输设备称为用户线路。端局用户既可以通过端局交换设备与本局范围内的用户相互连续，也可以通过端局和汇接局交换设备与本地区任一端局的用户完成连续。一般这种类型的网称为汇接式的星形网。目前，通信网的基本结构有网形网、星形网、总线型网和复合形网，它们各有特点，各有应用场合。

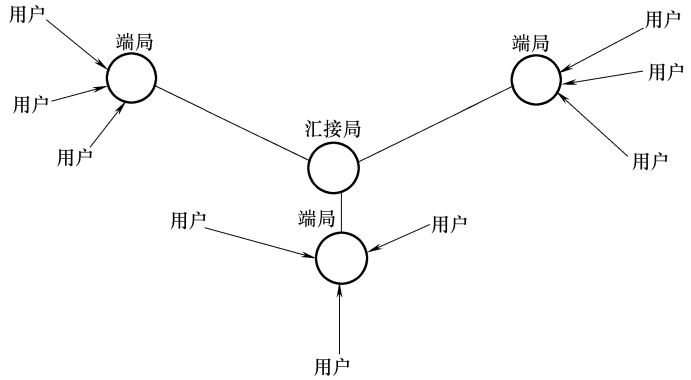


图 1-2 通信网的基本形式

### 1.3 现代通信网分类

现代通信网的分类有很多种，按照功能、作用、性质及其服务范围，可以分为各种不同的网络。其分类见表 1-1。

表 1-1 通信网的分类

按运营方式划分	按业务范围划分	按适用范围划分
国内公用通信网	电话网	市内电话网 农村电话网 本地电话网 长途电话网
	数据网	局域网 城域网 计算机互联网
	传真网	本地传真网 地区性传真网 全国性传真网
	移动通信网	本地移动通信网 漫游移动通信网
	综合业务数字网	本地 ISDN (Integrated Services Digital Network, 综合业务数字网) 全国 ISDN
	有线电视网	本地有线电视网 地区性有线电视网 全国性有线电视网

需要说明的是，以上网络除了有线电话的接入网部分和部分有线电视网传输的还是模拟信号，属于模拟网的范畴外，其余通信网都已数字化，属于数字通信网。随着通信的发展，

上述各种网络的功能分界已越来越模糊，我国正大力提倡多网融合，一网多用。

### 1.3.1 电话网

电话网是最早发展起来的，一般覆盖面积广，是其他通信网的基础，主要是为语音业务的传送、转接而设置的网络。电话网一般主要以光缆 SDH（Synchronous Digital Hierarchy，同步数字系列）系统干线传输和中继传输为主，以数字程控交换机（交换）为语音信号的转接点而设置等级结构。我国的电话网可分为长途电话网、市内电话网、本地电话网和农村电话网。

#### 1. 本地电话网

本地电话网是指在一个长途编号区内，由若干端局（或端局与汇接局）、居间中继线、长市中继线及端局用户线组成的自动电话网。本地电话网的主要特点是在一个长途编号区内只有一个本地网，同一个本地网的用户之间呼叫只拨本地电话号码，而呼叫本地网以外的用户则需按长途程序拨号。本地电话网用户多，密度大，交换局的数目一般比较多。局间连接多以网形网方式。大城市需要设置连接局，形成等级网，汇接局与它所属的端局是星形连接，而汇接局间采用网形网连接，如图 1-3 所示。

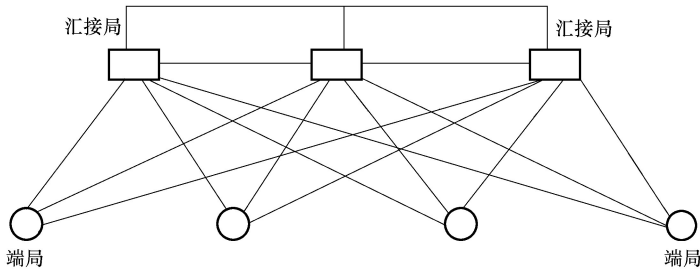


图 1-3 本地电话网的构成示意图

#### 2. 长途电话网

长途电话网由长途交换中心、长途线路和长途中继线构成，其功能是疏通本地网之间的电话业务。一般长途线比较长，但话务量比本地网要少，根据情况，一般采用等级网。长途网设置一、二、三、四级交换中心，分别用  $c_1$ 、 $c_2$ 、 $c_3$  和  $c_4$  表示， $c_5$  为端局，TM 为本地汇接局。

一级交换中心相当于大区交换中心，现在主要设置在我国的大城市（北京、沈阳、西安、成都、武汉、南京、上海、广州）；二级交换中心以省、市为交换中心；三级交换中心相当于地区长途交换中心；四级交换中心为县长途交换中心。各交换中心之间都设置有光缆传输链路，这些传输链路直接与长途汇接局相连。由传输链路组成的是国家一级干线、二级干线及长途中继线。四级长途电话网络结构如图 1-4 所示。

有线通信系统中，除交换和传输设备以外的局外部分称为通信线路。通信线路有长途和市内之分，它们按功能区分如下：

长途线路：连接与长途交换局之间的线路。最早的长途线路是金属架空明线，传输载波模拟信号。我国 20 世纪 60 年代中期开始使用长途对称电缆（包括纸绝缘高低频长途对称电缆、铜芯泡沫聚乙烯高低频长途对称电缆以及数字传输长途对称电缆）。我国从 20 世纪 70

年代中期开始，长途线路使用同轴电缆（包括小同轴、中同轴和微小同轴电缆）线路，开通的模拟载波路数得到更大的提高。20 世纪 90 年代后，长途线路逐渐被光缆取代，现在的有线长途通信线路已经全部被光缆代替。

中继线路：连接与市话交换局之间的线路。早期的中继线路采用的是市话电缆线对，后来在数字程控交换机普及后，局间中继线采用的是有内屏蔽的、低电容线对的 PCM（Pulse Code Modulation）电缆。20 世纪 90 年代后，局间中继线路也已经全部采用光缆。

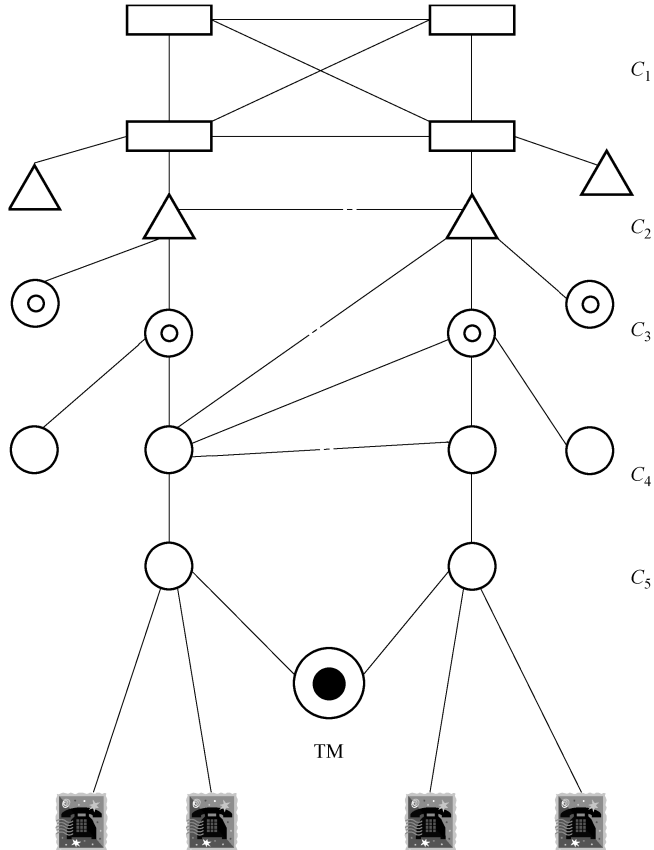


图 1-4 四级长途电话网络结构

用户线路：连接与市话交换局和用户之间的线路。用户线路的长度与用户密度分布、交换区面积、形状、自然地理环境等因素有关。大城市用户密集、用户线短，而农村，用户较稀，用户线长度较长。据统计，我国市话网用户线路的平均长度（端局到用户话机之间的线路长度）为 2.6km，标准偏差为 1.54km，50% 的用户处于 2.0km 范围内，90% 的用户处于 4km 范围内，95% 的用户基本处于离端局 5km 的范围，对于铜电缆，用户线路传输设计应考虑环路电阻和用户电路参考当量限制的要求。我国在 20 世纪 80 年代之前，用户线路主要采用的是铜导体纸浆绝缘铅包护套电缆；80 年代中期开始，全塑市话通信电缆的生产技术逐渐成熟，用户线路开始向全塑市话电缆转变；90 年代中期开始，用户线路中局端设备逐渐向用户靠拢，“光进铜退”已开始成为趋势。21 世纪开始，用户线路中的大对数电缆（馈线电缆）也已大量被光缆代替，小对数的全塑市话电缆只作为接入用户的配线电缆。

电话信号在通信设备和通信线路上传输会产生衰减，影响电话受话者的可懂度，因此国际上对电话信号有清晰度和可懂度的概念，它们和传输线路的衰减特性一起决定了通信线路的使用长度。对于电话传输清晰度的传输标准，我国原邮电部在 20 世纪 60 年代就发布了电话传输损耗传输标准 YDC08—64 和 YDC09—64，这些标准中规定：长度两用户之间对于 800Hz 的最大净损耗为  $3.4N_p$  (29.5dB)，市内电话全程损耗限值为  $2.8N_p$  (24.3dB)，如图 1-5 所示。

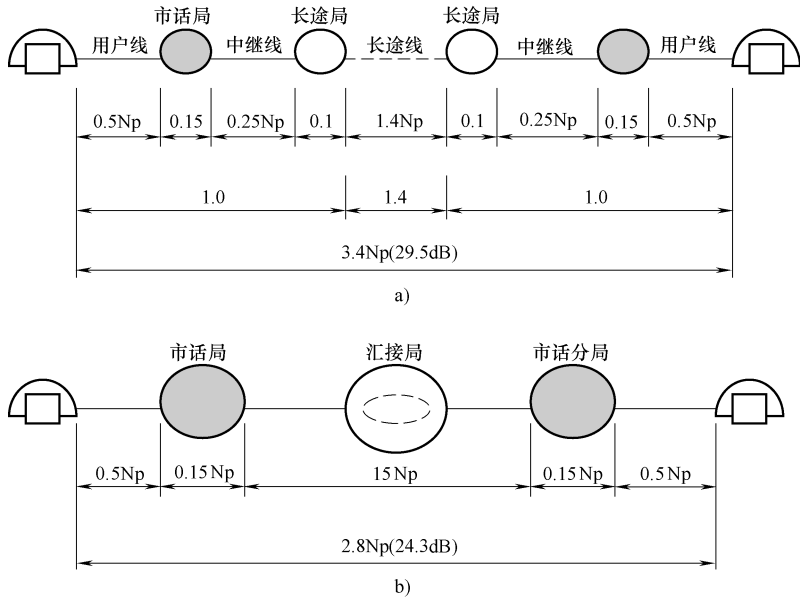


图 1-5 我国颁布的长途电话传输损耗分配图  
a) 长途传输损耗分配图 b) 市话传输损耗分配图

## 1.3.2 数据通信网

### 1. 数据通信网与计算机通信网

随着计算机与通信技术的发展和结合，数据通信作为一种新的通信业务迅速发展，数据通信网或计算机网已成为发展最迅速、应用最广泛的电信领域之一。以 Internet 为代表的计算机网络在世界范围内的普及与应用，正在改变着我们的工作、学习和生活方式。

数据通信是继电报、电话通信之后发展起来的一种新的通信形式，是计算机与通信技术紧密结合的产物。数据通信是指按照一定协议（或规程）完成由数字、字母、符号等表示的具有离散形式信息的传输与交换的一种通信方式。数据用户可使用远地计算机通过数据通信进行远距离实时数据采集或对某一系统进行远距离实时控制。

计算机通信是指计算机与计算机之间或计算机与终端之间为共享硬件、软件和数据资源而协同工作，以实现数据信息传递的通信方式。严格来说，计算机通信和数据通信这两个概念是有区别的，数据通信是计算机通信的基础，它强调的是数据信息的传递；计算机通信除数据信息的传输外，还要分析所传数据的含义，并做出相应的处理。然而，随着技术的发展，数据通信和计算机通信的界限越来越模糊，两者的功能也相互渗透而难以区分，因此，

在不引起误解的情况下，人们将计算机通信和数据通信、计算机网络和数据网相互混用。

## 2. 计算机网络的分类

计算机网络的类型很多，从不同的角度出发，有不同的分类方法。

(1) 按网络的交换方式来分

如按网络中是否有交换设备，可以将其分为交换形网络和广播形网络。

(2) 按网络的拓扑结构分类

按网络的拓扑结构通常可将计算机网络分为网形网、星形网等。

(3) 按网络的覆盖范围分类

按网络的覆盖范围可将网络分为局域网 (Local Area Network, LAN)、城域网 (Metropolitan Area Network, MAN) 和广域网 (Wide Area Network, WAN)。

## 3. 计算机通信网中的传输路线

现代的 Internet 是全球最大的计算机通信网。和全世界的电话网一样，计算机通信网也有长途网、本地网和用户内的局域网，主要传输路线也大都采用室内或室外光缆，只有工作区楼层的水平布线采用的是 5 类或超 5 类或 6 类铜导体对绞线数据电缆。随着技术的发展，光纤逐渐到桌面也是很有可能的。

# 1.4 通信电缆的发展过程

## 1.4.1 世界通信电缆的发展

电报机的发明推动了电报电缆的研发、应用，19 世纪初，丹麦的奥斯特、英国的法拉第、德国的欧姆、美国的亨利等物理学家不断发现和创立了现代电学、电磁学的许多基础理论，为今后的电力、信息传输打开了闸门。

1833 年，高斯和韦伯制成了第一部电磁指针电报机，用于 1km 长的线路上，用了 6 年。

1835 年，美国莫尔斯发明了有线电报机，促进了通信电缆的发展。

1844 年，美国建设的从华盛顿到巴尔的摩的电报线，就是以大地作为回路的单根导线。

1850 年，在法国和英国之间的英吉利海峡敷设了一条电报线，这是世界上第一条传送电报的海底电缆线路。

1876 年，美国贝尔发明有线电话机，最初用来传送电话信号的也是电报线。

1878 年，美国在纽约与波士顿之间开通了第一条长途话缆线路。但后来发现，用这种线路传送的电话噪声很大，以致无法使用，这就迫使人们去改进通信线路并进行新的开发。

1883 年，出现了采用两根架空导线作为回路的线路，使电话通信的噪声大大降低。

电话的迅速发展，使城市上空的电话线密布，显得拥挤不堪。为了解决电话线路拥挤影响市容的问题，人们研发了一种埋于地下的电缆。最早使用的连接布鲁克林和波士顿的地下电缆是用油渍丝包的电缆。后来出现了铅包电缆，这时的缆芯改用纸浆和纸绝缘。为了解决电缆线组回路间的串音问题，出现了扭绞线对的缆芯，这种方式一直沿用至今。

1889 年美国 WE 公司开始大批量生产纸带绕包绝缘铅包市内通信电缆。

1891 年英法海峡敷设最早的海底话缆。

1896 年，市内电话开始使用电缆管道。

1898年英国在伦敦与伯明翰之间敷设了一条长达46km的19个四线组成的长途通信电缆，用至1938年又改为载波通信。

1900年左右，哥伦比亚大学的普平教授发明了“电缆加感”的理论，即采用人工加感，用增加电感的方法来减小衰减。人工加感的方式有两种，即均匀加感和集中加感。均匀加感是在电缆导电线芯上包上一层磁性材料，使回路的电感增大。这种加感电缆生产工艺复杂，应用范围受到限制，故至今未被广泛应用。集中加感是在线路上相隔一定距离接入一个电感线圈来达到加感的目的。这样可使通信距离达到140km。但是人工加感线路也有一些缺点，主要是由于电感线圈的接入，相当于一只低通滤波器或因线圈附加损耗的增加，使传输频率受到限制。

1910年，四线组电缆发明，这种结构的电缆可开通幻路通信。幻路是这样构成的，一个实路的两根导线作为幻路的去线，另一实路的两根导线作为幻路的回线，图1-6所示为幻路的通信示意图。

更长的通信距离是在增音机发明的基础上实现的。增音机实质上就是一个放大器，它把已经衰减到很微弱的信号进行放大。

采用增音机后，一方面能满足实际所需要的通信距离 $L$ （只要沿线路设立适当数量的增音机就可以满足要求，如图1-7所示）；另一方面降低了线路的费用。采用增音机后线路的费用将包括两部分，电缆的费用和增音机的费用。对一定长度的线路来说，电缆的费用随增音站间距离的增加而增加，增音机的费用是随增音站间距离增加而减少，如图1-8所示。从理论和实践上证明，采用增音机后，当电缆导电线芯的直径从2~3mm减少到0.9~1.4mm时，整个线路的费用降为最低。

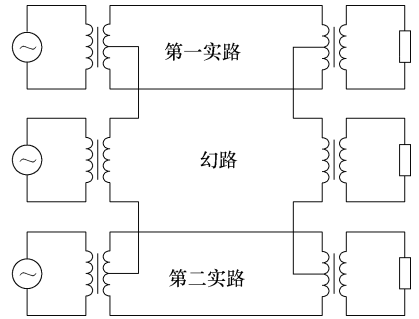


图 1-6 幻路的通信示意图

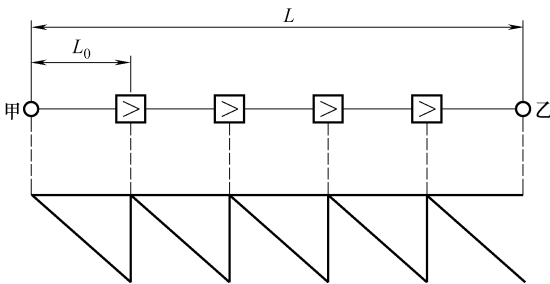


图 1-7 线路增音示意图

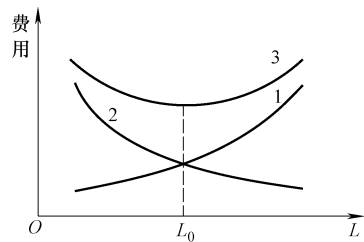


图 1-8 线路费用与增音站之间距离的关系

1—电缆的费用 2—增音机的费用 3—线路的费用

载波通信（信道复用）的发明，促进了通信电缆的进一步发展。所谓载波通信是在一对导线上利用频率分割同时进行很多对用户的通话，而相互没有干扰。这既增加了通话路数，也降低了每个话路的成本。为适应生产的发展而需增加通信路数，这必然要加多载波通信路数，随之要求电缆能传输较宽的频带，这是通信电缆的发展方向。电气通信中要求加宽频带的另一个原因是电视和雷达等宽频带新技术的迅速发展。为了进一步提高线路的利用率，增大通信容量，相应地对电缆提出了更宽频带的要求。