

高攸纲 张乘风 赵国谦 赵树荣 编

邮电高等学校教材

通信电缆工程

人民邮电出版社

邮电高等学校教材

通 信 电 缆 工 程

高攸纲 赵国谦 编
张乘风 赵树荣

人 民 邮 电 出 版 社

登记证号(京)143号

内 容 提 要

本书是邮电高等院校的教学用书。

全书分10章。第1章扼要说明了通信线路的发展和应用。第2章论述了各种通信电缆线路的传输特性,包括传输线上的脉冲特性。第3、4两章分别论述了对称电缆及同轴电缆的串扰理论及防护措施。第5章介绍了本地电话线路网,对市话网的传输标准及配线方式作了较多的介绍。第6、7及8章重点介绍了接地及屏蔽等基础理论并详尽地论述了各种外界电磁场对通信线路的影响及相关防护措施。第9章介绍了电缆测试技术,而第10章则对通信线路维护的一项重点工作——电缆充气维护进行了专门介绍。

本书为邮电高等院校教材,也可供通信线路工程技术人员学习参考。

邮电高等学校教材 通 信 电 缆 工 程

高牧纲 赵国谦 编
张乘风 赵树荣

人 民 邮 电 出 版 社 出 版

北京东长安街27号

人民邮电出版社河北印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各 地 新 华 书 店 经 售

开本: 850×1168 1/32 1993年6月第 一 版
印张: 17 4/32页数: 274 1993年6月第1次印刷
字数: 453 千字 印数: 1—2000 册

ISBN 7-115-04834-7/G·212

定 价: 9. 80 元

前 言

新中国建立以来，先后出版了不少有关通信电缆工程的书籍。然而这些书籍都已显陈旧，很难适合高等院校电信工程专业教学的需要。为此，编者针对上述情况，合编了“通信电缆工程”一书，力求理论结合实际，物理概念与数学理论推导紧密结合，并考虑国内实际情况，多介绍国内工程中积累的实际经验。鉴于数字化通信是今后的发展方向，本书将介绍这方面的传输基础理论。由于输电线电压等级不断升高，电气化铁道不断增加，高压线进入大城市市区，通信线路受到电磁感应及地电位影响日益严重，加之通信设备正向小型化，集成化发展以及核电电磁脉冲弹的出现，通信设备面临的外界电磁环境更加恶劣，防护技术不容忽视。目前还有一个错觉，认为光缆可不受外界电磁场的影响，但实际情况并不那么简单，一般光缆中如存在金属线（远供、信号或业务联络用），则仍会受到强电线及雷击的危险影响，可以击毁光缆。此外，当前大多数光缆为了保证一定的机械强度，仍多采用金属护套及金属加强芯等，这里同样会出现外界电磁场引起的影响，严重时也会损毁光缆，中断通信，因此国际电报电话咨询委员会（CCITT）已将光缆防护技术列入科研课题，进行研究。本书在第七章及第八章有意识地加强这方面的内容。至于光通信本身作为一项新技术，不属于本书范围，故不再赘述。

本书由高攸纲担任主编，第1、3、4及5四章由张乘风主笔，第2章由赵国谦主笔，第6、7及8三章由高攸纲主笔，第9及10两章由赵树荣主笔。北京有线电厂刘晓晔工程师为本书绘制了大量附图，特此致谢。

欢迎读者对本书提出宝贵意见。

编 者 1992.3

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 通信线路的发展和应用	(1)
第二节 通信电缆线路的种类和结构	(8)
第二章 通信电缆线路的传输特性	(18)
第一节 均匀传输线基本方程	(18)
第二节 传输线的二次传输参数	(30)
第三节 传输线上的脉冲	(41)
第四节 对称回路的场结构及传输特性	(60)
第五节 同轴回路的场结构及传输特性	(77)
第六节 加感电缆线路的传输特性	(92)
第七节 内屏蔽电缆的传输特性	(98)
第八节 超导传输线	(109)
第三章 对称电缆回路间的串音和防串音措施	(115)
第一节 串音的物理过程和干扰参数	(115)
第二节 近端和远端串音特性分析——耦合矢量和曲线	(123)
第三节 对称电缆芯线组(对)扭绞的基本原理和应用	(137)
第四节 集总平衡和其它措施	(140)
第五节 市话电缆回路间的串音分布规律	(154)
第六节 串音衰减(或防卫度)值的估算和应用	(159)

第四章 同轴电缆线路的干扰和防干扰措施	(174)
第一节 同轴回路中的阻抗不均匀性及其影响.....	(175)
第二节 阻抗偏差值的估算和质检分析.....	(177)
第三节 减小阻抗不均匀性的措施.....	(196)
第四节 同轴回路间的串音特点.....	(199)
第五节 同轴回路间的串音衰减和串音防卫度.....	(210)
第六节 同轴电缆线路的防串音措施.....	(220)
第五章 本地电话线路网	(227)
第一节 国内电话网结构简介.....	(227)
第二节 电话网的传输标准.....	(229)
第三节 市话电缆线路网的配线方式及其应用.....	(236)
第六章 接地装置	(258)
第一节 概述.....	(258)
第二节 接地体的基本理论和计算.....	(259)
第三节 降低接地电阻的方法.....	(278)
第四节 接地电阻的测量.....	(281)
第七章 屏蔽理论	(284)
第一节 屏蔽的基本原理.....	(284)
第二节 高频屏蔽体的屏蔽特性.....	(288)
第三节 金属管线对低频磁场的屏蔽作用.....	(321)
第四节 架空地线的静电屏蔽作用.....	(336)
第八章 外界电磁场对电缆线路的影响及防护措施	(339)
第一节 外界场源的特性.....	(339)
第二节 并行回路间的电磁感应影响.....	(349)

第三节	阻性耦合影响及地电位·····	(398)
第四节	由杂散电流引起的腐蚀·····	(408)
第五节	防雷·····	(409)
第六节	核电磁脉冲对通信的影响·····	(418)
第七节	无线电台的影响·····	(421)
第八节	大地导电率的确定·····	(422)
第九章	电缆测试·····	(432)
第一节	直流测试·····	(432)
第二节	工作电容及电容耦合系数的测试·····	(437)
第三节	通信电缆传输特性参数的测试·····	(440)
第四节	电缆回路间串音的测试·····	(454)
第五节	同轴回路结构均匀性及端阻抗的测试·····	(471)
第六节	电缆线路障碍测试·····	(483)
第十章	电缆充气维护·····	(500)
第一节	概述·····	(500)
第二节	电缆气压维护中常用量的基本单位和空气干燥标准·····	(502)
第三节	充气维护的基本要求和维护制式·····	(506)
第四节	自动充气设备·····	(509)
第五节	自动充气测试设备·····	(519)
第六节	气压查漏·····	(529)

第一章 绪 论

第一节 通信线路的发展和应用

一、通信线路的发展及其特点

通信线路从明线发展到电缆以及目前正推广应用的光缆，是社会经济发展和科技进步的重要标志之一。由于人们在各领域相互联系的信息流量的增加，架空明线结构的容量有限，性能不稳定，很不适应城市建设和通信发展的要求。采用通信电缆或光缆结构则所占空间很小，既可满足高质量和较大的信息流量传输，其外护层还具有防腐蚀和防护外界电磁干扰影响的作用。采用的建筑方式能因地制宜，可选用架空、或地下（管道、直埋）及水底敷设等多种形式，故广为应用。

从通信线型和线路结构分析，反映各种传输线的线型和建筑方式的变革很大。如通信回路的线型是从双线转变为单线，线质由金属转变为介质，线径也大大地变小（由毫米级减小到微米级）。线路的建筑方式大部分由暴露型趋向隐闭型敷设，既有利于增大通路容量，也安全可靠，又符合城建美化的要求。各种传输线型和建筑方式汇总列入表1-1中。

这些不同线型的演变及其所对应的各个传输频带的对比情况列入表1-2中。

可见通信线路就是为适应宽带、大容量的信息传输和社会发展及科技进步的要求而不断改进的。限于篇幅，本书主要讨论通信电

表 1-1

各种传输线型和建筑方式

传 输 线 型	结 构	双 线					单 线							
		对 称 型		同 轴 型			光 纤							
							多 模		单 模					
		明 线	电 缆		中	小	微	阶 梯 跃 度	阶 跃	W 型	△ 型	四 包 层		
			对 扭 式	星 绞 组										
线	金 属 线										介 质 线			
质	铁、铝、铜		铝、铜		铜		铜 (超 导)							
线	1.6~4.0		0.32~1.22		6/9.5		1.2/4.4		0.7/2.9		50~60/ 125		6~10/125	
径	(mm)		(mm)		(mm)		(mm)		(mm)		(μm)		(μm)	
线路建		架 空		架空、地下(直埋、管道、隧道)、水底										
筑方式		暴 露 型			隐 闭 型									

缆线路。

世界上出现第一条通信电缆约在19世纪中叶，是采用马来胶绝缘的多股扭合成2mm径的单芯电报电缆。由于马来胶的成本高，相对介电常数大，以后又使用过橡皮、油蔴和油纸等作绝缘的电报电缆。其外护层是用铅皮包封，再捲以钢带或钢丝，以适用于陆地或水底敷设。

本世纪初，因市内电话用户增多而密集，才制造出细线径（如0.5mm）的铜芯纸绝缘对绞式铅包市话电缆，适用于6km以下的短距离电话传输。在1920年以后，相继出现了1.2~1.4mm径纸绳纸带绝缘的复对绞铅包电缆，电容和衰减都比上述市话电缆要小得多。若接入加感线圈构成电话回路，传输距离可延伸到100km左右。日后增音机的发明和电子技术的新成就，以及电缆制造技术、通路设计和电缆安装施工技术的改进，60年代就实现了高频对称电缆复用到800kHz（180路）的长距离传输系统。利用同轴电缆线路

表 1-2

不同传输线型及各自的占用频带

传 输 线 型			传 输 的 最 高 频 率					
			10kHz	100kHz	1MHz	10MHz	100MHz	1GHz
对 称 型	架 空 明 线	铁 线	30kHz					
		铜 线	150kHz					
	市 纜 (对 扭)		5 MHz					
	高频对称电缆(星绞组)		34MHz					
同 轴 型	中(2.6/9.5)型		1 GHz					
	小(1.2/4.4)型		560MHz					
	微(0.7/2.9)型		34MHz					
	细 导(0.4/1.36)		> 1 GHz					
光 纤 模	多 模	阶 跃	8 Mbit/s					
		梯 度	34Mbit/s					
	单 模	阶跃(单包层)	140Mbit/s					
		W 型	> 1 Gbit/s					
		△ 型	> 1 Gbit/s					
		四 包 层	> 1 Gbit/s					

是在1930年以后,最早传送 L_1 型——3MHz(600路)传输系统,到70年代已发展建成了60MHz(万路)以上的传输系统,或传送几路电视节目。西欧各国过去已敷设的高频对称电缆线路较多,也有部分同轴电缆线路。而北美境内,则采用同轴电缆干线线路。这些电缆干线网迄今仍是当前世界各国有线通信系统中的主要传输媒介。

近十年来,利用光导纤维构成的光缆已先后在世界各国建立了为数甚多的短波长($0.85\mu\text{m}$)、长波长($1.3\mu\text{m}$)多模梯度(GI)

和 $1.3\mu\text{m}$ 单模(SM)光纤通信系统,应用于市内和长途线路。这项新技术发展之快,在现代通信科技中是罕见的。今后对光纤光缆的推广应用将是传输技术研究的新起点。

我国的通信电缆线路,解放前仅有少数城市用于市话线路;长途电缆干线则仅在东北、华北地区有几段低频线路。近年来,有的电缆干线已改造扩容成60路高频传输系统。

如今,全国各大城市以及部分中、小城市都已建立了较完整的市内电话线路网,其它城镇和大、中型厂矿企业所在地域也都设有规模不等的公用网或专用线路网。

长途通信电缆线路建设起始于50年代末的高频对称电缆线路工程,1976年我国第一条中同轴电缆线路也正式投产使用,以后又陆续兴建了若干高频对称电缆线路及若干中、小同轴电缆线路,其中某些电缆线路通过挖潜改造,又进一步扩大了容量。

原有的市话电缆,大多数是40年代流行的铅包纸绝缘的分层式结构,已不适应当前电信业务发展的需要。目前,全塑的单位式电缆已经在国内推广使用。在农村,全塑的农话电缆线路也在经济发达的省、市和沿海开放地区敷设使用。1975年建成中日海缆(FDM-600系统)。此外,在沿海岛屿和陆地之间敷设有小容量海缆线路,用于省内通信。

光缆线路从1979年开始,先后在北京、武汉、上海等地区建立了实验中继光缆线路。至1988年底,全国已有36个城市电话网采用了光纤通信技术,在八个省内兴建了长途通信光缆线路。已敷设的光缆总长度大于五千皮长公里,其中3/5是公用网的,其余的归属铁道、电力等专用网。

我国使用的通信电缆,基本上是自给的,光纤、光缆也有国产品。

二、通信电缆线路的多路复用方式

利用铜质传输线的通信线路设备费用占通信系统总投资费用的

50~89% [1-12]；新建的光纤传输系统，国外的光缆线路费用约占2/3，国内同类费用约占1/2。可见，降低有线通信系统的投资费用的有效方法，在于提高通信线路的复用率。这就是把多组信号设法叠加在同一个信道上的传输方式。

现已应用在有线传输系统中的多路复用制式，计有空分制（SDM，space-division-modulation），频分制（FDM，Frequency-division-modulation），时分制（TDM，Time-division-modulation）和波分制（WDM，wavelength-division-modulation）四种，可以按实际需要和技术条件组合在同一信道中实现多路复用。

空间分割多路复用制式就是按空间线对位置来安排各信道的传输方式。在有线传输系统中的线对位置，如通信电缆中的每一芯线或对同轴管，光缆中的每一根光纤都可以构成一信道。所以，在电缆或光缆中能容纳的线对数或管数或纤芯数，都是属于典型的空分多路复用系统。

频率分割多路复用制式就是把传输频带划分为多个频段，每一话路群占用其中的一个频段，这样，就可以在同一对线上传输多路电话。此即模拟载波通信方式。

时间分割多路复用制式就是将多个话路在时间上相互错开，然后组织到同一对线上传输，例如脉码调制（PCM），即数字通信方式。由于它比频分制（FDM）方式优越，是通信的发展方向。

波长分割多路复用制式就是将多路数字信息或电视（或其他图象）的电信号，经过不同光波波长调制的、两个以上的光载波，同时利用一根光纤的传输方式。

利用一条通信电（光）缆传输系统构成的大信道，能收容的话路数（ N ）计算式如下：

当传输系统传送数字信号时，

$$N = n_f \cdot n_b \cdot n_t$$

或传送模拟信号时，

$$N = n_f \cdot n_p \cdot n_\lambda$$

式中 n_f ——同一电缆中的线对数，或同轴管数，或光纤芯数。

n_p ——数字信号传输系统中的话路数。

n_p ——模拟信号传输系统中的话路（或图象、电视节目）数。

n_λ ——不同波长的光波数。

采用多路复用不仅节省建设费用，还减少了耗铜量。譬如中同轴电缆线路，从1800路系统改造扩容为4380路系统，增加了通路容量，其投资费用是新建相同容量电缆工程的30%，施工工作量为其5%，有色金属消耗仅为其0.4%，工程造价由48元/话路·公里下降到5.6元/话路·公里。充分说明现有传输线路进行技术改造扩容的优越性。

如何在通信线路上实现多路复用，保证线路传输质量，这是有关传输方式的问题。

1. 二线制与四线制

当利用一对金属传输线组织双向通信时，称之为二线制通信。如本地网中的用户环路，图1-1例示的频分传输方式和图1-2例示的时分传输方式。单管中同轴电缆线路，也是采用二线制传输方式，来、去话路群（或信息）分别占用不同的高、低频带，因此又称为双频带二线制。

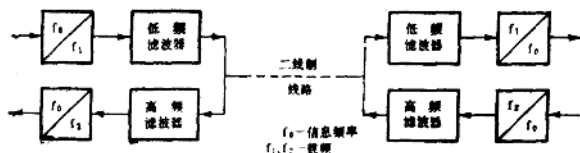


图 1-1 二线制频分传输方式

当利用两对金属传输线组织双向通信时，称之为四线制通信。在这种传输方式中，来、去方向的话路群（或信息）分别使用不同的线对，但占用的频带或码速相同，如图1-3例示的电缆数字传输

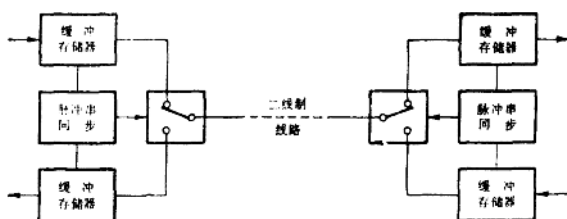


图 1-2 二线制时分传输方式

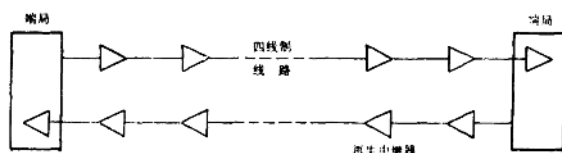


图 1-3 电缆数字传输系统

系统。

2. 单电缆制和双电缆制

现在的高频通信电缆线路，无论应用在TDM或FDM方式，多采用四线制，来、去话路群的传输频带（码速）相同。如果这两对线都是设置在同一电缆中，称为单电缆制。如市话电缆中利用部分线对收容短距离PCM传输系统，如图1-4所示。还有内屏蔽对称电缆和同轴电缆线路都是采用这一种传输方式。

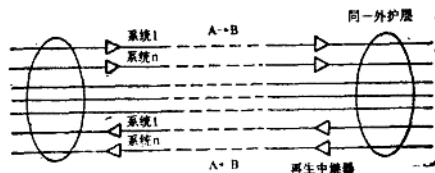


图 1-4 单电缆制

如果传输多路载波系统的两对线收容在两条电缆内，则称之为双电缆制。在收容多路载波通信的长途高频对称电缆线路中，广泛采用双电缆制，如图1-5所示。有时，市话电缆线路中利用部分线对收容短距离载波系统，也可以采用这一方式。

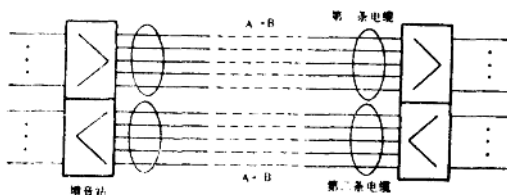


图 1-5 双电缆制

第二节 通信电缆线路的种类和结构

一、通信电缆线路的分类

通信电缆线路是把相互绝缘的芯线包裹在外护套里，按敷设方式分架空、地下、水底电缆，能因地制宜；它结构紧凑，可提供较多的通信回路。架空电缆是用钢绞线支托电缆架挂在电杆上；地下电缆是将电缆敷设在地面下，若直接埋设于地沟中的称直埋式，长途通信电缆一般采用这种敷设方法；若把电缆敷设于地下管道里则为管道式，大、中城市的长、市话中继电缆和用户主干电缆多采用这种敷设方法。大楼建筑物内的通信电缆，既可预埋暗管敷设，也可以架挂在墙壁上设置。水底电缆线路简称水线，它是将特种结构的通信电缆敷设于水底而成，通过江河湖海的通信线路，一般都要使用水底电缆。

二、通信电缆的结构

电缆线路是由电缆本身，附属设备和线路建筑物三部分组成。

其中附属设备包括接续套管、分线箱（盒）与加感箱等连接电缆或终端装置。线路建筑物是指地下管道、人（手）孔、进线室（槽）和水线房等支托与安装电缆的建筑物。本节侧重介绍电缆结构。

1. 对称电缆的结构

对称电缆是由若干扭绞成对（或组）的绝缘芯线组合成缆芯，外面再包裹护层的一个整体。

导电芯线必须具有良好的导电性，柔软性和足够的机械强度。目前，最常用的是软铜线，也有采用半硬铝线。常用的线径：长途电缆是0.9mm和1.2mm铜线，有的用1.8mm和2.0mm铝线；市话电缆是0.32、0.4、0.5、0.6和0.8mm的软铜线；农话电缆是采用1.2mm铜线或1.6mm的铝线（传输最高频率是123kHz或252kHz），以及0.7mm的低频对绞线。

绝缘层是为保证芯线之间和芯线与护层之间具有良好的绝缘性能，在每根导线外包裹绝缘纸带，或聚苯乙烯、或聚烯烃塑料层，一般要求有很高的、稳定的介质特性，较好的柔软性和一定的机械强度。纸绝缘芯线的结构，如图1-6所示。塑料绝缘层的结构，如图1-7所示。

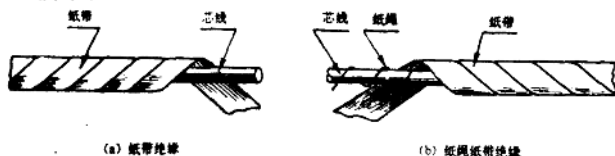


图 1-6 对称电缆芯线的纸隔绝缘型式

纸隔绝缘结构包含有空气和纸层的混合绝缘性质，具有较好的介质特性、价格便宜。但是，纸层容易受潮，在高频带的介质损耗较大。近代的通信电缆多采用高分子聚合物塑料作绝缘材料。

聚苯乙烯绝缘材料的介质损耗角正切（ $\text{tg}\delta$ ）和介电常数（ ϵ ）值都很小，机械强度和结构稳定性较好。所以，应用在高频域的效果比纸绝缘要好得多，其结构与图1-6(b)相类似。

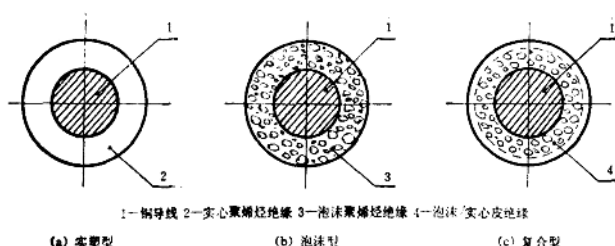


图 1-7 对称电缆芯线的塑料绝缘型式

全塑电缆所用的绝缘材料是聚烯烃，早期的多做成实塑型（图 1-7(a)）使用，近期的做成泡沫绝缘层（图 1-7(b)），使其内部含有很多小气泡。后者与前者相比其介电常数(ϵ)值减小 1/3，如实塑型的相对介电常数为 2.3，则泡沫型的为 1.4~1.5。最新的复合绝缘结构如图 1-7(c)，靠近导线的内层为泡沫，外层为实心皮。其优点如下：①介电强度高；②可减少或防止各种填充剂的渗入；③绝缘层的针孔故障概率小；④只对塑表皮着色，既减少颜料消耗，又减小了因颜料引起的电容变化和颜料与发泡剂的相互作用；⑤避免由铜导线与着色泡沫绝缘接触而引起聚烯烃寿命的缩短；⑥这种绝缘芯线的表面质量好，外径均匀。

对扭组和星绞组——前者是两根绝缘芯线绞合成一对线，如图 1-8(a)；后者是用四根绝缘芯线绞合成一线组，如图 1-8(b)所示，其中两相对位置的芯线构成一对线，见图中的 a-b 和 c-d。

目前，我国的市话电缆多采用对扭式，长途电缆多采用星绞组，农话电缆收容高频载波通信的多采用星绞组或含有对扭式和星绞组的综合型结构。收容 PCM 传输系统的对称电缆，常采用对扭式结构。

电缆芯线的扭绞，可以减小在同一条电缆内的对扭回路间或不同星绞组的两线对之间的串音和外界电磁场对回路的干扰；当电缆弯曲时，可以使各绝缘芯线受到相同的位移，从而保证每个回路的