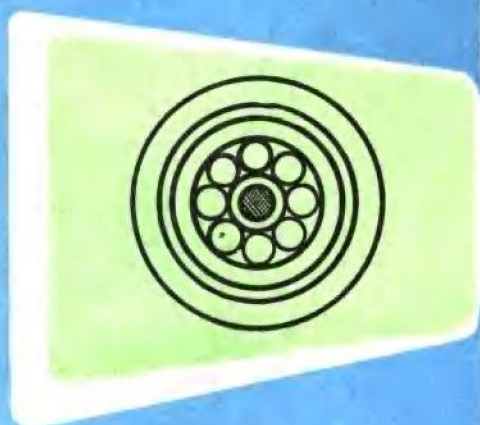


电子元件应用丛书



吴元生 钱祖清 主编

国防工业出版社

信息传输线及应用

内 容 简 介

信息传输线是电子设备和系统所不可缺少的元件。本书主要介绍电线电缆、波导管、光纤光缆等信息传输线的结构、性能参数、品种及其用途, 还就配用的连接器、光无源器件及系统作了简要的介绍, 以便读者掌握选用的原则。

本书注重实用, 可供中等以上文化程度、使用传输线的整机单位的科技人员、技术工人、领导干部阅读, 对于有关专业的师生、本专业的技术人员、科技管理人员和工人也有一定的参考作用。

电子元件应用丛书 信息传输线及应用

吴元生 钱祖清 主编
责任编辑 杨其眉

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₃₂ 印张8¹/₂ 185千字

1985年10月第一版 1985年10月第一次印刷 印数: 0,001—3,670册

统一书号: 15034·2854 定价: 1.60元

前 言

电子技术的广泛应用是现代技术进步的重要标志，是经济振兴的必要条件和重要措施。电子元件是电子整机的基础。由于电子整机线路及结构要求的不同，需要各种类型的元件，如：阻容元件、机电组件、敏感元件及传感器、混合集成电路、石英晶体、电子陶瓷与压电、铁电器件、传输线、微特电机以及新型的声光及表面波器件等。它们在电子线路中有控制、传输、耦合、转换、隔离、显示等各种不同的特定功能，满足电子整机的各种要求。随着电子设备日益提高的精确性、可靠性和多功能要求而使线路更复杂，组装密度也更高，因此对电子元件的选用变得越来越重要了。只有合理地选用电子元件，才能充分发挥它们在电子线路中应有的作用，保证和提高电子线路的精确效能和整机的可靠性。

中国电子学会电子元件学会为了宣传和推广电子元件的广泛应用，组织编写了一套科普性质的电子元件应用丛书，此丛书为广大整机工作者、应用电子元件的科技人员、无线电业余爱好者乃至家用电器使用者介绍各种电子元件的一般机理、性能、结构、用途，提供合理选用的科学知识，以减少由于选用不当造成的不必要的故障和损失，进一步提高电子整机的性能和质量水平，取得更高的经济效益。

首批陆续出版的有以下十一册：

怎样选用电容器；

怎样选用电阻器；

怎样选用电位器；
怎样选用继电器；
压敏电阻器及应用；
厚薄膜混合集成电路及应用；
石英谐振器及应用；
结构陶瓷及应用；
信息传输线及应用；
电子变压器及应用；
家用微电机。

根据情况今后将增加新的书目，满足各方面读者的需要。

编辑出版电子元件应用丛书是一次尝试，缺乏经验，望广大读者提出宝贵意见，以便改进。

中国电子学会电子元件学会
主任委员 陈克恭

编 者 的 话

各种形式的信息传输线在现代科学技术中起着十分重要的作用，是构成电子系统所不可缺少的元件。为了普及信息传输线的基础知识，便于读者正确而合理地选用，特撰写了本书。

全书除绪论外，共分八章。第一章介绍载波通信电缆的概况和应用；第二章介绍射频电缆的结构、性能及产品概况；第三章介绍几种最常见的特种电缆的概况；第四章介绍上述电缆配用的连接器概况及选用要点；这四章可反映出目前最主要的信息传输线——电线电缆及其配件的总的情况。第五章介绍信息传输线的另一分支——波导的结构和应用；第六、七、八章则介绍新兴的信息传输方式——光纤通信的概貌。其中第六章介绍光纤光缆，它代表信息传输线发展的最新动向；第七章介绍光纤通信系统用的各种无源器件；第八章介绍光纤通信系统的简况。

本书由吴元生、钱祖清主编、负责组织编写和技术审查。第一章由唐翠南编写；第二章由汪祥兴编写；第三章由华纪平编写；第四章由王健初编写；第五章由高忠钧编写；第六章由钱祖清编写；第七章由宋金声编写；第八章由潘镜敏编写。全书文字、符号由高学民统编。

本书承蒙徐鲤庭审稿，在此表示衷心感谢！

本书力求深入浅出，通俗易懂，具有知识性、趣味性。但由于我们水平有限，书中难免有不足和错误之处，敬请批评指正。

目 录

绪论	1
第一章 载波电缆	4
§ 1.1 概述	4
§ 1.2 载波电缆的结构	6
§ 1.3 载波电缆的性能	12
附录 典型产品结构性能概表	24
第二章 射频电缆	33
§ 2.1 概述	33
§ 2.2 射频电缆的结构简介	36
§ 2.3 射频电缆的性能	49
§ 2.4 射频电缆主要产品系列	62
第三章 特种线缆	77
§ 3.1 带状电缆	77
§ 3.2 低噪音电缆	85
§ 3.3 脉冲电缆	91
§ 3.4 耐辐照耐高温线缆	99
第四章 连接器	107
§ 4.1 概述	107
§ 4.2 连接器设计原则介绍	112
§ 4.3 选用连接器的原则	122
§ 4.4 连接器装接简介	135
第五章 波导管	144
§ 5.1 概述	144

§ 5.2	矩形波导·····	145
§ 5.3	圆波导·····	160
§ 5.4	椭圆波导·····	166
§ 5.5	带状线·····	170
第六章	光纤与光缆 ·····	175
§ 6.1	概述·····	175
§ 6.2	光纤传输的基本原理·····	177
§ 6.3	光纤的传输特性·····	185
§ 6.4	光纤的结构及分类·····	192
§ 6.5	光纤及光缆的制造·····	198
§ 6.6	光纤特性测试·····	204
第七章	光器件 ·····	210
§ 7.1	概述·····	210
§ 7.2	有源器件·····	214
§ 7.3	连接器·····	218
§ 7.4	无源器件·····	223
第八章	光纤通信及其应用 ·····	239
§ 8.1	概述·····	239
§ 8.2	光发送机·····	242
§ 8.3	检测器和光接收机·····	247
§ 8.4	光中继器·····	250
§ 8.5	系统设计·····	255

绪 论

信息传输线是将各种形式的信息（例如声音、音乐、电视、图片、数据及控制信号等）从一处传到另一处所用的传输线，它好比是人体的神经或血管，在各种电子设备中起着连接或输送信息的作用，是不可缺少的重要元件。随着人类社会的进步以及科学技术的发展，信息传输线的应用日益广泛。

信息传输线的发展，首先是和通信技术紧密相关。最原始的通信可以追溯到公元前我国的周朝，当时所使用的烽火台报警是最早出现的通信方式，由于它利用大气层传输可见光，当然不必使用传输线。最早的传输线是架空明线，在1837年电报发明时开始出现，起初是单根铁线或铜线架空敷设，并利用大地构成回路来传输直流电报。直到1850年左右，它发展成双线形式的架空明线来传输长途电报。为了解决跨海的大陆之间的电报通信，又出现了海底电报电缆，这是最早的通信电缆。它在1851年成功地敷设在英国多佛到法国加莱之间的海峡里，此电缆采用铜线芯以及马来胶绝缘。

1876年电话的发明大大地促进了通信技术的发展，最初仍采用架空明线来传输电话，但随着通话量的不断增长，它不再能满足需要，因而在1882年开始出现纸绝缘多对电话电缆，逐步取代了架空明线。1906年电子管的发明以及载波技术的兴起，进一步推进了通信技术的发展。由于一对线芯可以同时开通多路电话，从而大大增加了通信容量，提高了传

输线的利用率，同时也促使其工作频率向高频发展，加速了传输线技术的进步。早期的载波电缆使用对称线对；每对可同时通 3、12、24 路电话，以后又发展成通 60、120、180 路电话。为了进一步满足通话容量增长的需要，本世纪三十年代出现了同轴电缆载波通信系统。1941 年贝尔实验室的 L1 系统，每对同轴对可通 480 路电话，工作频率上升到数兆赫。随着电子技术的进步，同轴电缆通信系统日臻完善，工作频率也不断升高。1974 年贝尔实验室建成 L5 系统，使用了多达 22 对同轴对组成的同轴缆，工作频率高达 60 兆赫，一根电缆可开通 108000 路电话。这一发展过程尚在进行之中，目前正在研究 180 兆赫同轴电缆通信系统以满足现代化大容量通信的需要。

1966 年光学纤维通信的发明，则为上述有线通信技术开辟了崭新的领域。1970 年制成第一根衰减低于 20 分贝/公里的光纤，为光纤通信这一新技术的应用打开了大门。光纤通信使用激光来载送信息，其频率高达 10^{14} 赫，这是任何其它有线通信方式所不可比拟的，它与传统的同轴电缆通信相比，具有通信容量大、传输衰减低、不产生干扰、抗干扰能力强、节省宝贵的铜材资源，以及尺寸小、重量轻等显著优点，是八十年代最有发展前途的通信方式。

信息传输线不仅在有线通信领域发挥重大作用，在无线通信技术方面也很重要，各种无线电通信设备的内部连接以及其天线的馈电都必须使用信息传输线。无线电通信、微波中继通信以及卫星通信的发展，导致了射频电缆、波导以及微带传输线等各种类型的信息传输线的出现。航天事业的发展以及外层空间的开发则开辟了宇宙通信的新领域，为适应宇宙中恶劣环境的要求，各种耐辐照、耐高温的特种线缆也

相继出现。无线电通信技术的发展，还要求在地下、隧道等特种环境内也能保持稳定可靠的移动通信。为了克服无线电波在这些环境中不能自由传播的困难，出现了有线和无线相结合的新型漏泄通信系统，为此发展了各种形式的漏泄电缆和漏泄波导等新型传输线。

信息传输线的应用并不局限于通信，在现代电子技术中还有着其它的领域。其中突出的例子是电子计算机。以电子计算机为中心的数据处理和传输网络将使用越来越多的传输线，其中带有屏蔽层的对称扭绞线对可用于数据率不高的第一、二代系统，而同轴电缆、带状电缆及光缆则可用于较高速率的更高级的数据系统。在目前阶段，由于带状电缆具有性能优越、布线整齐、节省体积、使用方便等显著优点，在各种微处理机上得到最广泛的应用。

除了上述应用之外，现代电子技术的其它重要领域，例如广播、电视、雷达、导航、电子对抗、遥测遥控、仪器仪表、核电子学以及医用电子学等方面都必需使用各种信息传输线。因此，随着电子技术的飞跃发展，信息传输线也必然有着极其广阔的发展前景。

第一章 载波电缆

§ 1.1 概 述

一、用途和分类

在通信电缆中用来传输载波频段信号的电缆称作载波电缆，电缆传输信号的频率一般从十几千赫到几十兆赫。

通信网是现代社会的神经，载波电缆是通信网的重要组成部分，是信息传递的重要媒质。随着社会的发展，信息交换日趋频繁，我国幅员广大、人口众多，对现代化通信更提出迫切要求。载波电缆通信与其他通信方式相比，虽然初建价格较高，又需一定的建设时间，但一旦建成后通信质量好、对大气以及外界的干扰具有很高的防卫度、稳定可靠、保密性强、寿命长、使用维护方便，所以是当前通信手段中的重要部分。在载波电缆通信系统中，投资的 70~80 % 花在线路上，因此，载波电缆性能的好坏、成本的高低极大地影响通信系统的建设。

载波电缆使用广泛，种类繁多。按结构可分为对称电缆和同轴电缆两大类；按用途可分为省内通信电缆、长途干线电缆、配线电缆、引出电缆（尾巴电缆）等；按使用条件可分为野战电缆、埋地电缆、海底电缆等。此外，也可以根据电缆的绝缘结构、护层结构、防护性能等来进行分类。例如：纸绳纸绝缘电缆、泡沫绝缘电缆、橡皮绝缘电缆；铅护套电缆、铝护套电缆、塑料护套电缆；防雷电缆、防鼠电缆、防霉电缆等。

二、国内外动态

最早的通信线路为架空明线，由于初建费用低，建筑维护方便，直到现在仍大量使用。我国目前长途通信业务的90%还是靠明线。其上一般开通音频电话、3路或12路载波电话。

随着通信业务量的增大，明线干扰问题突出，采用对称电缆线路有助于解决这个问题。目前对称线路上一般开通12、24、48、60、120路载波电话，性能比明线好得多。但是当传输频率再高时，回路串音及传输衰减均急剧变坏，开通大容量话路有困难，因此大多数对称线路的使用频率为252千赫（60路）、552千赫（120路）。目前有些国家还在挖潜，研究在对称电缆线路上开通300路、1020路载波电话。我国用于60路载波系统的纸绝缘高频对称电缆在全国已敷设了上万公里，运行多年，质量良好。我国还研制过聚苯乙烯绳带绝缘、聚乙烯绳管绝缘、泡沫聚乙烯绝缘全铝单四线组电缆等型式的对称高频电缆，其中有些品种已大量投入使用。

三十年代同轴电缆问世，由于其结构特点，电磁场被包围在内外导体之间，抗干扰能力大大增强，使用频率大大扩展。目前国外已建成中同轴10800路、13200路，小同轴2700路、3600路的载波通信系统。我国中同轴1800路（9兆赫），小同轴300路（1.3兆赫）载波电缆通信系统也都早已投入运行。中同轴4380路，小同轴960路载波电缆通信系统正在建设之中。

对称电缆由于各个线对分占着电磁场的空间，音频和低频时在相同的传输损耗下尺寸比同轴电缆要小，因此在话路少的场合使用对称电缆较经济；相反在高频大话路的场合使用同轴电缆较为经济。

近年来, 数字传输发展很快, 数字网中的传输媒介, 或者使用模拟网中原有的对称电缆、同轴电缆, 或者专门为数字网设计新的对称电缆和同轴电缆, 使其性能符合数字网的要求且制造更方便、价格更便宜。数字传输中所使用的电缆, 结构尺寸比以往的电缆虽小一些, 但使用的频带却大大加宽。对称电缆可用于中等比特率系统, 可能带宽可达几十兆赫。同轴电缆可用于中等、高、甚高比特率系统, 可能带宽可达几百兆赫。电缆上传输的信息, 除数字化电话外, 还可以是用户电报、数据、电视数据、电子信函等其他型式。

海底电缆是载波电缆的一个重要分支, 从1851年在英吉利海峡敷设第一根海底电缆以来, 海缆通信系统发展很快。跨洋海缆载波话路从1956年的48路发展到现在的5000路, 电缆的结构尺寸在不断扩大。海缆用原材料的性能精益求精, 结构型式不断更新, 目前与通信卫星一起成为洲际通信的重要手段。我国海底电缆从1958年以来经历了从仿制到自行设计的发展阶段, 逐步形成从对称海底电缆到同轴海底电缆, 从小尺寸到大尺寸, 从音频、3路、24路到120路载波电缆的海底电缆系列。在我国沿海已敷设了上万公里各种型式的海缆, 为大陆与岛屿之间、岛屿与岛屿之间的通信作出贡献。

§ 1.2 载波电缆的结构

载波电缆按电缆结构可分为两大类: 对称电缆和同轴电缆。这二类结构均由缆芯部分和护套部分组成。缆芯部分是电缆的电气回路部分。当组成电气回路的二根绝缘芯线对地是对称的(亦即对地的分布电容相等)则称为对称电缆; 当组成电气回路的导体是由二个同心套置的金属柱体与套管组成时则称同轴电缆, 最常见的同轴电缆为圆形。护套部分对

电气回路起机械保护作用，承受拉力、压力等外力作用并抵御各种环境的破坏。此外，载波电缆中常在缆芯内部或缆芯与护套之间加上屏蔽层，用来防卫电磁干扰。

一、对称电缆结构

对称电缆缆芯由二根及二根以上的绝缘芯线组成。导电芯线一般由铜、铝等导电性能良好的金属丝组成，常为单根金属线，有时为了柔软也可由多根细金属丝束绞或层绞而成。在野战电缆中，导电芯线可由数根铜丝和数根钢丝组合绞合而成，也可由多根高强度铜合金线（铬铜、铬镉铜、锆铜、镉铜等）绞合而成。对称电缆导电芯线的外径一般为零点几到几个毫米。对称电缆的绝缘常用纸绳纸带绕包，聚苯乙烯绳带绕包，聚氯乙烯实心绝缘，聚乙烯实心绝缘，聚乙烯绳带绕包，泡沫聚乙烯绝缘等材料和型式。纸绝缘由于价格便宜，抗拉强度大，加工方便，用得很普遍。随着塑料工业的发展，聚乙烯由于其高频电气性能好，加工方便，四十年代起广泛用作通信电缆绝缘。泡沫聚乙烯由于其等效介电常数小，也常用作导线绝缘，以减小电缆尺寸，为改善其防潮性能绝缘表面常由工艺保证有一薄层不发泡的表皮。

对称电缆中，常将二根绝缘线以一定的节距绞合成对绞组，或将四根绝缘线以一定的节距绞合成星形四线组，组成对称电缆结构的基本单元，再由若干个基本单元和信号线、填充物等绞合组成缆芯。各种基本单元都有其结构和性能上的特点，对绞和复对绞结构的工艺方便，但由于外径较大、电容较大，低频时与同外径的星绞四线组相比，衰减也就比较大。但是，当用于数字传输时，由于使用频率高，对绞和复对绞就因邻近效应所引起的附加电阻小、串音可通过节距选择得到改善、接续分辨方便等而显得比较优越。星绞结构

虽然工艺要求比较高，但当四根导电芯线的位置处于正方形的四个顶点时，由对角线上二根导线所组成的二个传输回路之间由于位置对称而干扰小、外径小、电容小、衰减小，所以是常用的对称电缆结构型式。当频率超过300千赫时，由于邻近效应而使附加电阻增大、衰减增大，且组内串音严重，所以用得较少。一些脉码调制通信系统用的电缆的基本单元为对绞组，24路、60路长途电缆、野战电缆、八对音频海底电缆、四芯海底电缆的基本单元为星绞四线组。

二、同轴电缆结构

同轴电缆的基本单元是同轴对，同轴对是由内外导体以及将内外导体隔开的绝缘物所组成。内导体通常为铜或铝的圆导体，也可以是复合导体中的铜管。外导体常用铜带或铝带纵包成管状而成，也可以由若干扁铜线、圆铜丝围绕绝缘而成。绝缘常用高频性能好的聚合物组成，如聚乙烯、聚丙烯等。绝缘型式可以是实心的、垫片式的、内扎绳的、泡沫的等。同轴电缆的尺寸常用内外导体直径比来表示，其比值虽由性能决定可任意选定，但作为电话电缆，一般采用国际电报电话咨询委员会（CCITT）推荐的尺寸：0.7/2.9, 1.2/4.4, 2.6/9.5等。0.7/2.9微同轴电缆，由于其结构简单、价格低廉，常用于数字传输和某些模拟传输中；1.2/4.4小同轴电缆常用作中继线，由于系统的投资低，也用作长途干线电缆；2.6/9.5中同轴电缆又称标准同轴电缆，一般用作长途干线电缆，是世界上用得最为普遍的同轴电缆。在某些要求低衰减电缆的区段也常使用5/18大同轴电缆。

海底同轴电缆是同轴电缆结构中较为特殊的一部分，由于海缆敷于不易维修的海底，所以对海缆系统的可靠性要求高，增音段距离长，电缆衰减小，因此海底同轴电缆不同于

其他的同轴电缆。首先，电缆尺寸大。例如：美国贝尔系统的 1，1.5，1.75 英寸海缆，英国邮局系统的 0.99，1.47 英寸海缆，我国早期仿苏 KΠK5/18 以及后来的 4.2/15.3, 7/25 海缆均比陆上同轴电缆大得多。其次，采用一些陆上同轴电缆不采用的特殊结构。例如：某些海缆为了可靠，内导体由中间一根粗铜线周围缠绕数根细铜丝、外导体由数根细铜线或数根扁铜线组成。这样，即使其中有一根铜线断裂也不至于使整个电缆电路断开。再例如复合内导体结构也是海底同轴电缆独特的结构。敷设于深海的海缆不易受到外力的破坏，并且由于趋肤效应，内导体高频电流趋于外表面薄层。因此可将承受敷设时张力的强度部分放到内导体里面，做成由高强度钢丝绞合成强度部分，其外加上内导体铜管的一种特殊的无铠装电缆的复合内导体结构。这种结构既加大了内导体直径，改善了整个电缆的电气性能，又降低了电缆的重量，提高了电缆的比强度，改善了整个电缆的敷设性能。海底同轴电缆的第三个特点是：由于海底同轴电缆的结构型式相对来说比较成熟，现在降低电缆传输衰减的着眼点主要放在提高原材料的电气性能上，尤其对所用的绝缘聚乙烯要求极为严格。由于海缆长度长、使用频带宽，绝缘的介质损耗对电缆全长的高频衰减有明显的影响，因此要求绝缘介质的介电常数、介质损耗数值小并且在电缆全长中所用的各批原料之间分散性也小。经过多年努力，通过改进添加的抗氧剂、提高聚乙烯密度、降低极性基团浓度、严格控制不纯物等方法，大大提高了聚乙烯的性能。在更高的频率下(如 60 兆赫)正在研究用聚丙烯作为海缆的绝缘。美国贝尔系统海缆所用绝缘聚乙烯的性能及其改进情况如表 1-1。由表可见，后一系统所用聚乙烯的介质损耗为前一系统用料的介质损耗的一半左右。

表1-1 海缆用聚乙烯的电气性能

电 气 性 能	系统名称	SD系统	SF系统	SG系统
	数值	(1964年)	(1970年)	(1978年)
介电常数 ϵ		2.282 ± 0.005	$2.285 \pm_{-0.005}^{+0.002}$	2.300 ± 0.004
介质损耗 $\text{tg}\delta$ $\times 10^{-6}$				
0.1兆赫			45 ± 10	
1兆赫	120 ± 20	61 ± 5	$(47 \pm 6) \times (0.62 \pm 0.14)$	
6兆赫		79 ± 5	$(47 \pm 6) \times (0.77 \pm 0.14)$	
30兆赫			47 ± 6	

三、护层结构

电缆的护层对电缆缆芯进行各种防护。护层的尺寸、重量、价格在整个电缆结构中均占很大的比例，在海底电缆中有时还会超过缆芯部分，所以，不论从性能上还是从经济上看，护层在电缆结构中都是很重要的一部分。由于电缆缆芯结构不同，电缆敷设的地理环境不同，所需的保护不同，护层结构多种多样。

缆芯的绝缘为纸绝缘或缆芯结构中有较多的空隙，进水对电缆的电气性能有较大的影响时，电缆需做成密封型的。密封有二个方面：径向密封和纵向密封。纵向密封由电缆结构综合考虑而径向密封主要在护层结构中考虑。一般选用金属管如铅管、铝管、皱纹钢管等来达到径向密封的目的。铅比较柔软、熔点低、加工方便、护层的耐腐蚀性、防潮性好、寿命长，是使用得较久较多的材料，至今仍用作大对数的对称、同轴干线电缆的护层。铝由于其资源丰富、强度高、比