

載波通信原理

高等学校函授教材

载波通信原理

毛恩启 戚宇林 编

天津科学技术出版社

津新登字(90)003号

责任编辑:王定一

审稿编辑:苑兰芝

高等学校函授教材

载波通信原理

毛恩启 戚宇林 编

*

天津科学技术出版社出版、发行

天津市张自忠路189号 邮编 300029

华北电力学院印刷厂印刷

*

开本 787×1092毫米 1/16印张 19.5 字数 468 000

1993年7月第1版

1993年7月第1次印刷

印数:1—1 200

ISBN 7-5308-1296-3/TN·17 定价:8.90元

内 容 提 要

本书是电力系统“通信工程专业”载波通信原理课程的高等函授教材。主要包括电力系统载波通信的基本原理，载波电路的质量指标，差动系统，呼叫系统，调幅器，载供系统，自动电平调节系统，压缩扩张器和载波通路中的杂音计算。全书共十章。

本书还适用于电力系统普通高等院校“通信工程专业”学生使用，亦可供有关专业的技术人员参考。

前 言

《载波通信原理》一书是根据能源部1990年制定的电力类高等函授教材出版规划,作为高等函授“通信工程专业”载波通信原理课程的教材而编写的。

本书内容包括电力系统载波通信及其主要部件的基本原理,以及载波通信系统的杂音计算与电路质量指标等。在具体内容取材时,既着重考虑国内电力系统载波通信的基本情况,又注意反映该领域内新技术、新成果的应用。

本书共分十章,第四、五、八章由戚宇林编写,其余各章由毛恩启编写,毛恩启任本书主编。

本书由北京动力经济学院杨维娜主审,她对本书的修改提出了书面意见,在此表示衷心的感谢。

本书在编写时,考虑了电力系统高等院校“通信工程专业”对载波通信原理教材的需要,因此也适用于日校学生使用,同时还可供有关技术人员参考。

由于编者水平有限,本书中一定存在不少缺点和错误,恳请读者批评指正。

编 者

1992年3月1日

目 录

第一章 绪论	(1)
--------	-------

第一节 通信系统的组成	(1)
第二节 载波通信的类型	(2)
第三节 载波通信的应用	(6)
第四节 载波通信的发展	(9)
本章小结	(10)
本章思考题	(11)

第二章 载波通信的基本原理	(12)
---------------	--------

第一节 频率复用的原理	(12)
2.1.1 频率搬移与边带传输方式	(12)
2.1.2 多级变频和群变频	(14)
2.1.3 多路信号的传输	(15)
第二节 载波通信的传输方式	(20)
2.2.1 双频带二线制传输方式	(20)
2.2.2 单频带四线制传输方式	(22)
第三节 频分多路通信系统	(23)
2.3.1 明线12路通信系统	(23)
2.3.2 对称电缆载波通信系统	(34)
2.3.3 ZW60/120载波设备的变频过程	(35)
第四节 电力线载波通信系统	(37)
2.4.1 电力线载波通信的原理和组成	(37)
2.4.2 电力线载波机的构成和特点	(39)
2.4.3 电力线载波通信的方式	(42)
2.4.4 电力线载波机实例介绍	(43)
本章小结	(48)
本章思考题	(49)
本章习题	(49)

第三章 载波电路的质量指标	(51)
---------------	--------

第一节 传输电平	(51)
3.1.1 机内传输电平	(51)
3.1.2 电力线载波机各通路发信电平的分配	(53)

3.1.3	通路净衰减·····	(55)
3.1.4	测试与电平换算·····	(56)
第二节	通路净衰减频率特性·····	(57)
3.2.1	电话通路的有效传输频带·····	(57)
3.2.2	通路净衰减频率特性要求·····	(57)
3.2.3	净衰减频率特性的测试·····	(59)
第三节	通路稳定度·····	(60)
3.3.1	通路稳定度的定义·····	(60)
3.3.2	通路稳定度的要求与测试·····	(61)
第四节	通路振幅特性·····	(61)
3.4.1	振幅特性的意义·····	(61)
3.4.2	振幅特性的要求·····	(62)
3.4.3	通路振幅特性的测试·····	(62)
第一~四节小结	·····	(63)
第一~四节思考题	·····	(63)
第五节	载频同步·····	(64)
3.5.1	载频同步的意义和要求·····	(64)
3.5.2	载频同步的方法·····	(64)
第六节	通路的杂音·····	(65)
3.6.1	杂音的影响和杂音防卫度·····	(65)
3.6.2	杂音的杂音计值和有效值·····	(66)
3.6.3	杂音指标及测量·····	(69)
第七节	通路的串音·····	(70)
3.7.1	意义·····	(70)
3.7.2	要求与测试·····	(70)
第八节	回音与群时延·····	(72)
第九节	振铃边沿·····	(72)
3.9.1	意义和要求·····	(72)
3.9.2	测试·····	(73)
第十节	乱真输出和选择性·····	(73)
3.10.1	乱真输出·····	(73)
3.10.2	选择性·····	(75)
第五~十节小结	·····	(76)
第五~十节思考题	·····	(77)
本章习题	·····	(77)

第四章 差动系统····· (79)

第一节	作用和要求·····	(79)
第二节	混合线圈·····	(80)

4.2.1 混合线圈的工作原理.....	(89)
4.2.2 等臂混合线圈.....	(89)
第三节 平衡衰减.....	(88)
本章小结.....	(92)
本章思考题和习题.....	(92)
第五章 呼叫系统.....	(95)
第一节 呼叫系统的作用和要求.....	(95)
第二节 带内呼叫系统.....	(96)
5.2.1 带内呼叫系统的组成和工作原理.....	(98)
5.2.2 带内呼叫系统的防误动措施.....	(99)
5.2.3 带内呼叫系统实际电路介绍.....	(104)
第三节 带外呼叫系统.....	(104)
5.3.1 带外呼叫系统的类型和原理.....	(106)
5.3.2 带外呼叫系统的防误动措施.....	(107)
5.3.3 带外呼叫系统实际电路介绍.....	(110)
第四节 载波机与交换机的接口设备.....	(110)
5.4.1 小出接口.....	(110)
5.4.2 小入接口.....	(112)
5.4.3 调度接口.....	(113)
5.4.4 程控交换机与载波机的接口.....	(114)
第五节 自动交换系统.....	(115)
5.5.1 自动交换系统的作用和组成.....	(116)
5.5.2 自动交换系统动作简述.....	(117)
5.5.3 自动交换系统中的特殊用户.....	(118)
本章小结.....	(119)
本章思考题.....	(120)
第六章 调幅器.....	(121)
第一节 基本要求和分析方法.....	(121)
6.1.1 作用和要求.....	(121)
6.1.2 分析方法.....	(122)
第二节 环形调幅器.....	(124)
6.2.1 调幅器在理想情况下的原理和性能.....	(124)
6.2.2 调幅器在实际情况下的工作分析.....	(128)
6.2.3 环形调幅器设计举例.....	(139)
第一、二节小结.....	(143)
第一、二节思考题.....	(143)
第三节 无源晶体三极管调幅器.....	(143)

6.3.1 电路与工作原理	(143)
6.3.2 工作衰减和阻抗	(145)
6.3.3 载漏	(146)
第四节 有源晶体三极管调幅器	(147)
6.4.1 有源调幅器的基本原理	(147)
6.4.2 双平稳有源调幅器	(149)
第三、四节小结	(152)
第三、四节思考题	(153)
第五节 集成电路调幅器	(153)
6.5.1 电路组成和原理	(153)
6.5.2 变频增益和阻抗	(155)
第五节小结	(156)
本章习题	(157)
第七章 载频供给系统	(158)
第一节 载供系统的构成和要求	(158)
7.1.1 载供系统的构成	(158)
7.1.2 对载供系统的技术要求	(162)
第二节 主振器和导频稳幅电路	(164)
7.2.1 主振器	(164)
7.2.2 导频稳幅电路	(166)
第三节 谐波发生器	(167)
7.3.1 对谐波发生器的基本要求	(167)
7.3.2 磁饱和线圈谐波发生器	(168)
第四节 锁相频率合成技术的应用	(177)
7.4.1 正弦信号的频率与相位	(177)
7.4.2 锁相环路的工作原理	(178)
7.4.3 取样锁相环载供电路	(188)
7.4.4 数字锁相式频率合成器	(194)
本章小结	(204)
本章思考题	(205)
本章习题	(205)
第八章 自动电平调节系统	(207)
第一节 作用及要求	(207)
8.1.1 引起传输电平波动的因素	(207)
8.1.2 技术要求	(209)
第二节 构成及原理	(210)
8.2.1 调节系统的构成与分类	(210)

8.2.2 群导频调节系统.....	(214)
8.2.3 调节系统的工作过程.....	(215)
第三节 热电式调节系统.....	(216)
8.3.1 ZM305型机调节系统的构成和原理.....	(216)
8.3.2 电力线载波机调节系统.....	(226)
第一~三节小结	(230)
第一~三节思考题	(230)
第四节 调节系统的静态特性.....	(230)
8.4.1 系统的静态特性及其分析方法.....	(230)
8.4.2 各元、部件的传递系数.....	(232)
8.4.3 系统的静态误差.....	(235)
第五节 系统的动态特性.....	(236)
8.5.1 各部件(元件)的传递函数.....	(237)
8.5.2 调节系统的动态特性分析.....	(238)
第四、五节小结.....	(244)
第四、五节思考题.....	(245)
本章习题.....	(245)
第九章 压缩扩张器.....	(247)
第一节 作用与特性.....	(247)
9.1.1 压扩器的特性.....	(247)
9.1.2 压扩器通路杂音的抑制.....	(251)
第二节 压扩器的工作原理.....	(252)
9.2.1 压扩器的组成.....	(252)
9.2.2 压扩器的工作原理.....	(253)
9.2.3 实际电路介绍.....	(258)
第三节 瞬态特性与指标.....	(261)
9.3.1 压扩器的瞬态特性.....	(251)
9.3.2 其它组合技术指标.....	(263)
本章小结.....	(264)
本章思考题和习题.....	(265)
第十章 载波通路中的杂音计算.....	(266)
第一节 杂音的类型和定额.....	(266)
10.1.1 杂音的类型.....	(266)
10.1.2 杂音的定额.....	(267)
第二节 干扰杂音.....	(270)
10.2.1 明线载波的干扰杂音.....	(270)
10.2.2 电力线载波通道的干扰杂音.....	(274)

第三节 固有杂音.....	(277)
10.3.1 热杂音的均方值.....	(277)
10.3.2 杂音系数.....	(277)
10.3.3 热杂音的累积.....	(281)
第四节 非线性杂音.....	(283)
10.4.1 单个放大器的非线性杂音.....	(283)
10.4.2 非线性杂音的累积.....	(292)
第五节 线性串音.....	(293)
10.5.1 串音产生的原因.....	(294)
10.5.2 串音的计算.....	(295)
10.5.3 提高串音防卫度的措施.....	(297)
本章小结.....	(297)
本章思考题.....	(298)
本章习题.....	(299)
本书参考书目.....	(300)

第一章 绪 论

内 容 和 要 求

本章介绍了载波通信系统的组成，载波通信的类型和应用；同时对载波通信的发展也作了概括介绍。

通过学习，要求掌握通信系统的组成；各种有线信道的传输特性和阻抗；各类传输信号的特点和频带。了解载波通信的现状和发展。

第一节 通信系统的组成

通信的目的是为了交换信息。虽然信息有多种形式（例如语声，图像或文字等），但是一般通信系统的组成都可以概括地用图1.1.1来表示。



图1.1.1 一般通信系统的组成

这里信源是指信息的产生来源，按信息的特点可分为：可闻信息和可视信息。这些信息都是非电信号，要转换为电信号，就要一种变换器，我们把它叫做输入设备。例如：电话机、电报机、摄像机等。

交换设备是沟通输入设备与发送设备的接续装置。有了它可以经济地使用发信设备，提高发信设备的利用率。

发送设备的任务是将各种信息的电信号经过处理（例如调制、滤波、放大等）使之满足信道传输的要求，并经济有效地利用信道。在载波通信中，载波机的发信部分就是一种发送设备。

信道是信息传输的媒介，概括地讲分有线信道和无线信道。在有线通信中，普遍使用的有架空明线，对称电缆、同轴电缆等。

另外，信号在传输过程中，还会受到来自系统内部噪声和外界各种无用信号的干扰，例如：半导体器件产生的噪声，宇宙空间各种干扰造成的噪声等。在图1.1.1中，各种形式的噪声集中在一起用一个噪声源表示。

接收设备和输出设备的作用与发送设备和输入设备作用相反，它们是接收线路传输

的信息，并把它恢复为原始信息形式，完成通信。

根据以上分析，可以把载波通信系统理解为一种具体的通信方式，其组成如图1.1.2所示。



图1.1.2 载波通信系统的组成

目前，载波通信系统传输的大量信息是语声信号，因此以电话信号传输的过程来描述载波通信系统的组成。图1.1.2中的用户是表示用户话机。在发信端，它代表着信源与换能的输入设备。例如：电话机的送话器将语声转换成音频电流，音频电流是随时间连续变化的模拟信号。而收信端用户则代表着输出设备与受信。它将音频电流转换成语声信号，送往收信者。交换机是接通电话用户的交换接续设备，分人工与自动接续两种。目前，电力系统通信中均采用自动接续，例如布控式交换机和程控交换机等。载波机相当于通信系统中的发送与接收设备，它的作用是把语音信号频率变换到适合线路传输的频率，或者把线路传输的高频信号解调还原成语音信号。

长途线路是传输信息的媒介，在当前电力系统的有线传输系统中，主要指高压输电线路，架空明线，对称电缆；近几年来才发展起来的光纤和复合电缆也已在电力系统中开始使用。增音机的作用是补偿信号在线路上传输时所受到的衰减。增音机的数量与通信距离的长短和信道的类型有关。通信距离越长，载波机传输的路数越多，两地通信间的增音机越多。

根据课程内容的划分，本课程只讨论载波通信的基本原理，载波机的构成原理以及载波通路的传输质量问题。

第二节 载波通信的类型

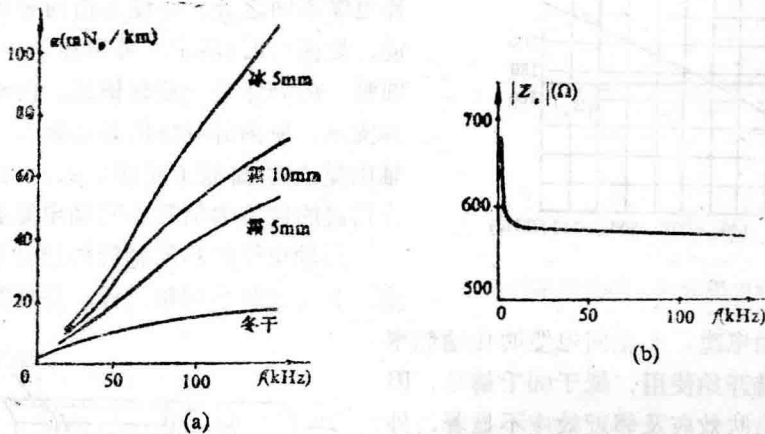
在载波通信系统中，根据传输媒介的不同，载波通信可以分成以下几种类型。

一、架空明线载波通信

架空明线是指用电杆架设在空中的金属线，分为铜线和铁线类，它们的线径有4.0、3.0和2.5毫米等，按具体情况选用。以架空明线作为信道的载波通信称为架空明线载波通信。

架空明线暴露在空中，受气候影响很大。图1.2.1是线径为3.0毫米铜线的衰减频率特性和阻抗频率特性。由图1.2.1(a)可见，明线的衰减频率特性随气候变化而变化。并且频率越高这种变化越大。例如，频率为143千赫在冬季干燥气候的衰减为19.75毫奈/公里，而在霜厚10毫米时的衰减约为69.9毫奈/公里。这时线路对143千赫的衰减变化每公里达50.15毫奈，若甲乙两地通信距离为100公里，衰减变化就达5奈左右，因此要求明线载波机能够适应各种气候而保证电路畅通。铜线的阻抗频率特性随频率升高趋于稳定值。见

图1.2.1(b)，一般讲，铜线的阻抗依据线距、线径和线质的不同约为545欧~620欧。



(a) 衰减频率特性 (b) 阻抗频率特性

图1.2.1 3mm铜线（线距20cm衰减和阻抗频率特性）

对于铁线，由于导体的材料不同，所以无论是衰减还是阻抗频率特性都比同线径的铜线差。因此在一定的衰减情况下，铁线的最高传输频率就比铜线低得多。一般情况下，铁线的最高传输频率是30千赫左右，特性阻抗约为1400欧。而铜线的最高传输频率通常可用到150千赫。

架空明线载波通信在我国长途通信中，占有相当大的比重。在电力系统中，主要用于较短距离的地区通信系统。架空明线多用来作为三路和十二路载波通信系统的信道。

二、对称电缆载波通信

对称电缆是埋在地下的一种电缆，其构造分为缆芯和护层两部分，缆芯是若干对铜导线，护层为铅皮、电缆纸和钢带铠装，以适用于埋在地下。例如HEQ₂-252型4×4×1.2+2×0.9对称电缆，其中HE表示长途对称电缆，Q表示铅包，2表示钢带铠装麻被，252表示最高使用频率为252千赫；4×4×1.2表示线径为1.2mm的四个四线组，2×0.9则表示一对线径为0.9mm的信号线。我们将以对称电缆为信道的载波通信称为对称电缆载波通信。

对称电缆的衰减频率特性及阻抗频率特性如图1.2.2所示。由图可见，在10千赫频率以下，其衰减和阻抗随频率的变化很大，不宜用作载波通信，所以一般从12千赫开始用。目前对称电缆的传输频带一般为12~252千赫，可以传输60路电话信号。若使用12~52千赫频段，可传递120路电话信号。

对称电缆的阻抗受线径和绝缘的影响，通常在125欧~180欧之间。一般取中间值150欧作为对称电缆的特性阻抗。

对称电缆载波通信在我国长途通信中占主导地位。在电力系统中，通常用于距离较短的地区通信系统。

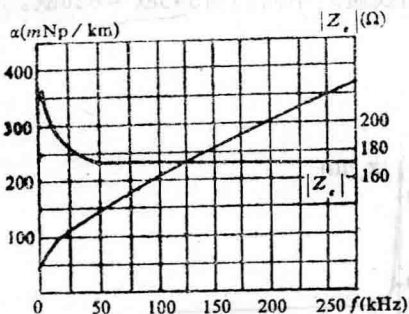


图1.2.2 对称电缆衰减、阻抗频率特性

同轴和小同轴电缆。小同轴电缆的传输频率一般由60千赫开始使用，低于60千赫时，因同轴导线的集肤效应及邻近效应不显著，外导线的屏蔽作用较差，受外界干扰较大，故不宜使用。中同轴电缆的传输频率一般要高于300千赫以上，这是由于在频率300千赫以下，中同轴电缆的衰减及阻抗随频率变化较大，如图1.2.4所示。目前中同轴电缆的最高传输频率已达60兆赫以上，载波机容量最大的可通13200路电话信号，

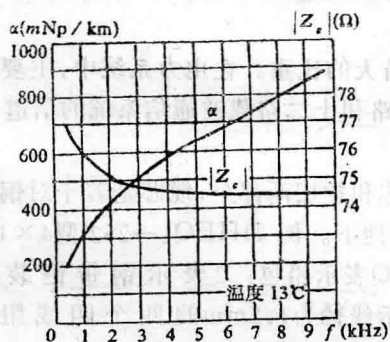


图1.2.4 中同轴电缆衰减、阻抗频率特性

目前，我国一般采用相地结合的高频通道来实现载波通信。

输电线的衰减频率特性与线路的电压等级、导线型号、导线在杆塔上的排列以及使用相别有关，但总的规律基本类似于架空明线，即频率越高，其衰减上升的越陡。图1.2.5是某条按三角排列，长度为162.5公里的220千伏输电线路的衰减频率特性。显然相地结合比相相结的高频通道衰减要大。考虑信号传输频率过低将受到50赫工频电流的干扰，同时又为了避免进入广播频率和防止线路衰减过大，因此输电线路的传输频带一般为40~500千赫。

输电线路的特性阻抗基本取决于载波通道采用的结合方式，如表1.2.1所示。通常

三、同轴电缆载波通信

同轴电缆也是埋在地下的一种电缆，与对称电缆不同之处，是缆芯由内导体和外导体组成，如图1.2.3所示。外导体是一个金属空心圆管，内导体是一根硬铜线。内导体用绝缘垫片支承，使内外导体的轴心重合，所以称为同轴电缆或同轴管（见图1.2.3）。以同轴电缆为信道的载波通信称为同轴电缆载波通信。

同轴电缆按其同轴管的尺寸可分为大同轴、中同轴和小同轴三种。目前常用的是中

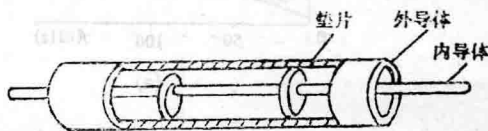


图1.2.3 同轴电缆示意图

小同轴和中同轴电缆的特性阻抗在所规定的传输频带内约为75Ω。

同轴电缆载波通信在国际上发展很快，它的优点是通信容量大，抗干扰能力强，并有较强的保密性。在我国电力系统中也有少量的应用。

四、输电线载波通信

输电线载波通信是以高压输电线路作为传输媒介。由于输电线路一般有三相电路和一个地通路，所以用来传输通信高频信号的通道有两种方式，即相地结合和相相结合高频通道。

相相结合方式时以600欧计算，而相地结合方式以400欧计算。

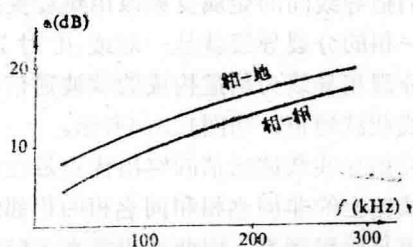


图1.2.5 220kV输电线衰减频率特性

传输的导线 (每相)	特性阻抗(欧)	
	相-地	相-相
单线	350~500	650~800
多股线(两线)	250~400	500~600
多股线(四线)	250~350	420~500

输电线载波通信是电力系统通信中最早使用的载波电话。这种通信方式的突出的优点是，经济价值较高（不需要线路投资及日常维护）和安全可靠（输电线的杆塔机械强度高，导线粗）。但是，由于受到强大的电力电流的影响，杂音干扰较大，通信质量较低。目前输电线载波通信是我国电力系统中一种主要的通信方式。

五、架空地线载波通信

在输电线路系统中，为防止相导线遭受雷击，通常在电力线路的上方架设一根（G）或两根（G₁、G₂）避雷线，如图1.2.6所示。这些避雷线在杆塔上经地线可靠接地，所以亦称架空地线。

架空地线与电力线平行排列，将在架空地线上感应电压。因此地线上有大量的电流流入大地，造成很大的电能损耗。为了减小电力线路的线损，人们将架空地线不直接接地，而经过每个杆塔上的避雷器再接地，这样不仅可以保证架空地线的防雷性能，而且使架空地线对地绝缘，从而为在绝缘架空地线上实现载波通信提供了可能。

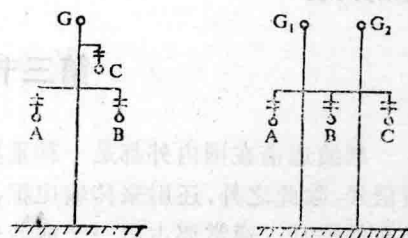


图1.2.6 电力线相导线与架空地线的排列

架空地线目前多为铝包钢线。利用架空地线实现载波通信时，同电力线载波通信一样也分有线-线耦合和线-地耦合两种方式。在一般线路结构中，架空地线单线对地的特性阻抗为500欧；平衡线对的特性阻抗为900欧。图1.2.7是各类架空地线的衰减频率特性的典型值。与输电线路相比，线路传输衰减要小，并且杂音电平也低。另外架空地线载波通信不受电力线电压等级的影响，从而不仅大为简化了线路耦合设备，而且架空地线的载波频率可降低到5~8千赫。由于上述优点，架空地线可以构成更长距离和多路的载波通信。据有关文献，前苏联在750千伏的架空地线上，当单路载波机在100千赫频率以下工作时，其距离可达700公里；在40~150千赫的频率内开通12路载波机，其增音段长度可达250公里。

六、分裂相导线载波通信

输电线路随着电压等级的提高，线路容量也相应加大，这时考虑到导线集肤效应和冷却问题，人们想到用两根以上的导线来组成一条相导线，两根导线的间隔为40~60厘米。

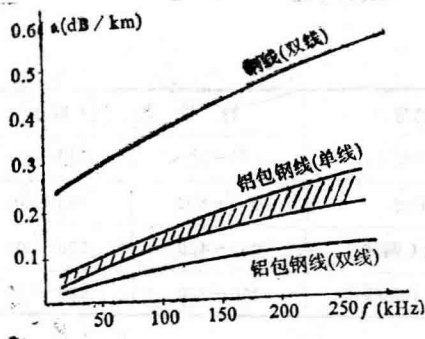


图1.2.7 架空地线的衰减频率特性

率的范围可扩大到500千赫以上,并且可以实现多路载波通信。

与分裂相导线对应的还有分裂地线,即地线用分裂导线,导线间绝缘并通过避雷器接地。利用分裂地线构成的载波通信兼有架空地线载波和分裂相导线载波通信的双重优点,所以是一种很有潜力的载波通信方式。

米,用金属支架固定,这就是分裂相导线。如果我们把导线间的金属支架改用绝缘支架,这样每一相的分裂导线就是一对或几对通信线。由分裂相导线为信道构成的载波通信称分裂相导线载波通信,如图1.2.8所示。

分裂相导线载波通信的突出优点是在同一条输电线路上的非同名相和同名相的相邻线路上可以重复使用频率,因此大大提高了信道容量。另外分裂相导线传输衰减减小,向外界辐射和感应受到的干扰电平也很小。所以,传输频

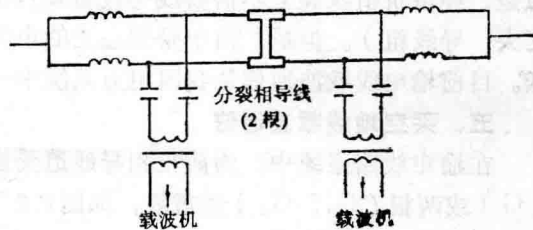


图1.2.8 分裂相导线通信

第三节 载波通信的应用

载波通信在国内外都是一种重要的通信方式。在载波通信中,传输的大量信息是电话信号。除此之外,还用来传输电报、传真、广播、电视和数据等非电话信号。这种非电话信号在传输时,通常要占用一个或若干个电话通路;我们把这种信息传输方式称作载波电话通路的二次复用。

在电力系统中,根据电力生产调度,管理和自动控制的需要,载波通信主要有以下几种应用。

一、传输电话信号

传输电力生产调度和行政管理的电话信号是载波通信的主要应用。

电话信号的原始信息是人的语音,它是声压的函数。当人们在送话器前面讲话时,声波迫使送话器的膜片发生振动,这样就改变了炭精盒中炭精粒所受到的压力,使其接触电阻随声波压力的大小而变化,于是在送话器电路中产生相应变化的交变电流,这就是电话信号。在受话器中,电话信号通过永久磁铁上的线圈,产生相应的吸引力,使膜片振动而还原成声波,如图1.3.1所示。

由于语音是电话通信的原始信息,因此,电话信号的特点便与人的语音特性有关。根据语言学的研究,人的声音由强弱、高低不同的声音组成。它可分为元音和辅音(汉语拼音中称为韵母和声母)两大类。所有元音都是离散频谱,由基频及其谐波组成。其