

中等专业学校教材

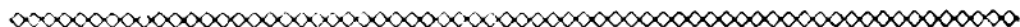


电力载波通道

南京电力专科学校 施育华 主编



中等专业学校教材



电力载波通道

南京电力专科学校 施育华 主编

水利电力出版社

中等专业学校教材

电力载波通道

南京电力专科学校 施育华 主编

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 12.5印张 277千字

1992年11月第一版 1992年11月北京第一次印刷

印数0001—6690册

ISBN 7-120-01622-9/TM·436

定价3.05元

(京)新登字115号

内 容 提 要

本书全面系统地阐述了电力载波通道的基本理论、计算、设计及调整测试方法。全书共分九章，内容包括载波信号在双导线和电力线上的传播理论与计算，结合加工设备，电力载波通道间的串音，电力线路的杂音，载波通道的设计、测试、维护等。

本书为中等专业学校电力系统通信专业的教材，也可供从事电力载波通信的技术人员、工人及有关学校的师生参考。

前 言

《电力载波通道》是根据能源部中等专业学校电力系统通信专业电力载波通道课程的教学大纲编写的。初稿曾在系统内有关学校的通信专业试用过多年。

本书内容有通信线路的传输特性、载波信号在电力线路上的传播、结合设备、加工设备、电力线路上的杂音干扰、电力载波通道间的串音衰耗、电力载波通道的质量指标及其测试、电力载波通道的设计和载波系统频率分配等。为使读者便于掌握重点内容和频率分配设计方法，书中编有实例；为加强实践性环节，书中结合工程现场的实际介绍了有关通道部件和全通道的调整测试方法，并尽量给出一些实用数据。

全书共分九章。第一、二、三、八、九章由南京电力专科学校施育华同志编写，第四、五、六、七章由沈阳电力专科学校储敏同志编写。本书由施育华同志任主编，由西安电力学校蔡德厚同志主审。

由于编者水平有限，书中不妥之处，恳请使用本教材的老师、同学和广大读者批评指正。

编 者

1991年3月

目 录

前 言

第一章 绪论	1
第一节 电力系统通信	1
第二节 电力线路结构概述	3
第三节 电力线载波通道的组成和特点	6
习题与思考题	8
第二章 通信线路的传输特性	9
第一节 架空明线线路的结构和一次参数	9
第二节 电缆线路的结构和一次参数	14
第三节 电磁波在无限长均匀线上的传输	20
第四节 均匀线的波阻抗和传播常数	24
第五节 电磁波在有限长均匀线上的传输	28
第六节 均匀线的输入阻抗	32
第七节 通信回路间的相互干扰	34
习题与思考题	40
第三章 载波信号在电力线路上的传输	41
第一节 引言	41
第二节 对称分量法	41
第三节 模分量法的基本概念	46
第四节 模分量法	47
第五节 模分量的物理特性及其参数	55
第六节 电力线载波通道衰耗的计算	57
第七节 电力线载波通道衰耗计算实例	75
第八节 电力线载波参数的测试	81
第九节 线路故障和不良气候条件对通道衰耗的影响	91
习题与思考题	92
第四章 结合设备	94
第一节 引言	94
第二节 耦合电容器	94
第三节 宽带结合滤波器	96
第四节 分频滤波器和高频搭接网络的应用	107
习题与思考题	111
第五章 加工设备	112
第一节 引言	112

第二节	变电所对载波信号的分流影响	112
第三节	对线路阻波器的基本要求	115
第四节	单频阻波器	117
第五节	双频阻波器	122
第六节	宽带阻波器	124
第七节	无调谐阻波器	128
第八节	阻波器的过电压保护	130
第九节	线路阻波器的调整和测试	133
	习题与思考题	135
第六章	电力线路上的杂音干扰	136
第一节	电力线上的杂音及其特点	136
第二节	平滑杂音对通信质量的影响	139
第三节	杂音的测量	143
	习题与思考题	146
第七章	载波通道间的串音衰耗	148
第一节	引言	148
第二节	串音衰耗的计算	150
第三节	邻近线路间的电磁影响	154
第四节	复杂载波通道串音衰耗的计算	156
第五节	串音防卫度	157
	习题与思考题	158
第八章	载波通道的质量指标及其测试	159
第一节	载波通道的质量指标	159
第二节	变电所输入阻抗的测试	160
第三节	简单载波通道工作衰耗的测试	162
第四节	有中间桥路的载波通道工作衰耗的测试	163
第五节	串音衰耗及并机衰耗的测试	165
第六节	电力载波通道实测数据介绍	167
第七节	通道故障的分析和处理	171
	习题与思考题	173
第九章	载波通道的设计和系统频率分配	174
第一节	载波通道的类型	174
第二节	载波通道的设计依据和顺序	177
第三节	载波频谱的分配方法和原则	180
第四节	载波系统频率分配设计举例	184
	习题与思考题	190
参考文献		191

第一章 绪 论

第一节 电力系统通信

一、电力系统通信

电力系统通信,是为电力生产调度与管理服务的专业通信的总称。它担负着电力系统内各种信息的交换和传递的重要任务,是电力系统内必不可少的联络手段,有着“千里眼”、“顺风耳”的美名。

大家知道,电力系统是由电力线路将各发电厂(包括火电厂和水电厂)、变电所、用户连接起来的发供电网络的总称。由于交流电能不能存储,系统中的产、供、销是同时进行的,因而,电力系统就必须有一个和它相适应的电力调度和管理机构——电力调度局(所),以保证电力系统内安全优质地发供电,及时地组织和指挥电能的生产,合理地分配电能,确保电能的质量,迅速地处理系统内的事故等。

电力调度机构为了准确迅速地完成任务,必须有一套得心应手的通信设施为其服务,这就是电力系统通信。目前,电力调度已建成四级调度机构——电网调度局、省调度局(所)、地区调度所和县调度所,所以,电力系统通信也相应地设立了各级通信机构——通信科、通信组等。

到目前为止,我国已建成七大电网和几个小独立电网。七大电网是华北、东北、华东、华中、西北、西南和南方电网;独立小电网是四川、山东、福建、新疆、西藏等省和自治区电网。在大电网内实行四级调度,在省、区电网内实行三级调度。调度员可以通过各种通信设施进行有效地调度,确保各地电网的安全优质地发供电。同时,各级行政部门也可通过这些设施进行垂直领导和管理,同时开展横向的业务联系。

虽然全国电力联合调度中心没有成立,但是能源部调度通信局早在70年代初就已成立,它成为中央与全国各大中小电网联系的纽带和桥梁。目前它已能通过各种通信设施对全国各电网进行电话、传真、图象、数据、文字等信息交换,使中央能及时了解全国各地的发供电状况,发布各项命令和下达各项政策,召开全国电力系统的电话会议等。

现今电力系统通信主要采用有线通信、无线通信和卫星通信等方式,组成各级各地乃至全国的电力通信专用网。有线通信方式中以电力载波为主,以有线载波和光纤通信为辅;无线通信方式中以数字微波为主,以模拟微波、无线电台、特高频、散射等方式为辅;卫星通信用于中央与边远地区之间的通信。由这三种通信方式组成了全国、大区、省、地区、县等电网内的一个稳定可靠、迅速及时的多级专用通信网。

二、电力载波通信

电力载波通信是电力系统通信有线方式中的主要通信方式,它的信息传输媒质是各种电压等级的电力线路。在电力线路上传输高于工频的40~500kHz载波信号,可以省去昂

贵的线路投资，而且线路和杆塔是极其稳定可靠的，所以，电力载波通信在世界各国都广泛采用，并正大力地加以开发和利用。

我国，电力载波通信主要耦合在110、220、330kV等级的交流电力线路上，近年来已扩展到500kV和35kV交流电力线路上和直流500kV线路上。国外，有些发达国家已扩展到750kV乃至1150kV交流电力线路和1500kV直流线路上。

目前，电力载波不但用来传送话音和数据信号，而且已大量地用来传送载波保护（即常说的高频保护）信号、图片和文字信息。

电力载波通信分为载波机和载波通道两部分，其最简单的又是常用的相地耦合方式的设备连接如图1-1-1所示。图中A点到B点的部分为电力载波通道部分，它包括载波电缆、结合设备、线路阻波器和电力线路等。

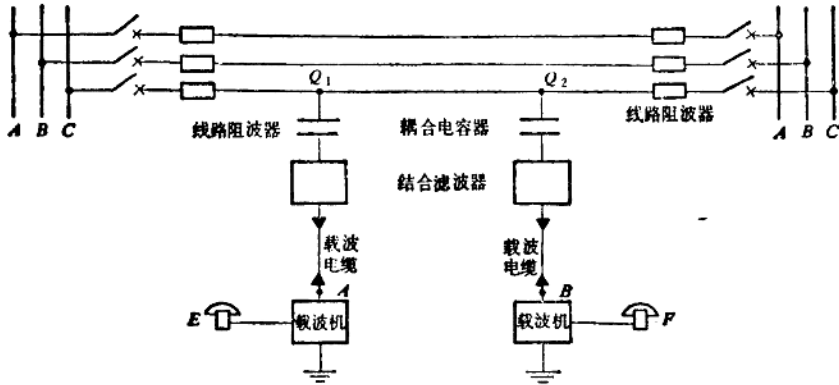


图 1-1-1 相地耦合方式的设备连接示意图

电力载波通信的耦合方式有相地耦合、相相耦合、三相全耦合等，它们的示意接线图如图1-1-2所示。其中以相地耦合方式应用最广。

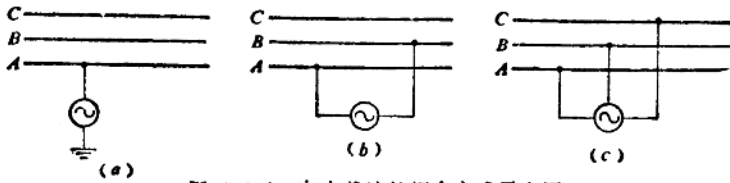


图 1-1-2 电力载波的耦合方式示意图
(a)相地耦合；(b)相相耦合；(c)三相全耦合

此外，还有相分裂导线和绝缘避雷线的载波通信，它们的耦合方式接线示意图如图1-1-3和图1-1-4所示。

回顾40年来电力载波通信的发展过程，可以分为三个发展阶段。

第一阶段是50年代的萌芽时期。当时只有少量引进的前苏联和东欧少数国家的电力载波机及日本留下来的几台电力载波机在110kV和35kV线路上运行，技术人员极少。

第二阶段是50年代末到70年代末的成长和发展阶段。研制和生产了几种电力载波机、结合加工设备；开展了电力载波通道传输特性的测试和传输理论的研究，并在70年代中期开展了电力载波系统频率分配方法的研究；成立了专门的生产工厂、研究机构 and 通信专业；翻译了很多国外资料和教材，引进了模分量法理论。

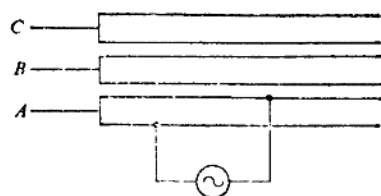


图 1-1-3 相分裂导线载波通信

第三阶段是趋向成熟和稳定发展的阶段。随着改革开放的步伐，70年代末期起引进了一些国外的先进电力载波设备、结合加工设备和设计思想，我国的电力通信技术人员在吸收国外先进技术和工艺的基础上，研制成了符合国际标准的电力载波机、结合加工设备；开发了电力载波通道参数的软件程序和频率分配程序；实现了500kV系统相分裂导线的载波通信；健全了各级的通信机构和颁发了各种技术规程等。

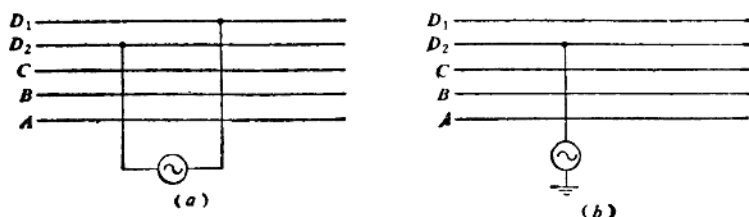


图 1-1-4 绝缘避雷线载波通信示意图
(a) D_1-D_1 耦合；(b) D_1 —地耦合

据不完全统计，我国目前已有电力载波电路58万多话路公里，电力载波机4万多台，技术人员和通信工人近2万人。

第二节 电力线路结构概述

一、导线的排列方式

架空电力线路分为单回路、双回路架设。由于电压等级的不同和线路回路数的差异，导线在杆塔上的排列方式也不同。单回路电力线路，导线排列方式有三角形、垂直形、水平形三种方式。双回路电力线路，导线排列方式有伞形、倒伞形、干字形、六角形等。图1-2-1所示为导线在杆塔上的七种排列方式。

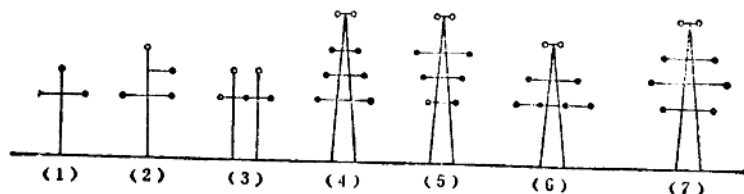


图 1-2-1 电力线路的排列方式

(1)三角形；(2)垂直形；(3)水平形；(4)伞形；(5)倒伞形；(6)干字形；(7)六角形

二、相分裂导线

通常将35kV及其以下电压等级的线路称为配电线路，将110、220kV的线路称为高压线路，将330kV及以上等级的线路称为超高压线路。

为了增大线路的电容和降低线路的电感，以达到增加线路自然功率的目的，超高压线路一般采用相分裂导线结构。所谓相分裂导线，就是每根相导线由2~8根“子导线”组成的导线。相分裂导线——2、4分裂导线的水平形排列如图1-2-2所示。一般来说，330kV的电力线路采用二分裂导线，500kV的电力线路采用四分裂导线。

三、导线的截面积

各电压等级的电力线路，现今均采用钢芯铝导线。其截面积是由线路所传输的工频电流大小、电晕限值、线路所在地区的气象条件及造价等因素决定的。图1-2-3为钢芯铝导线的断面图，表1-2-1为钢芯铝包线和铝包钢线的规格表。

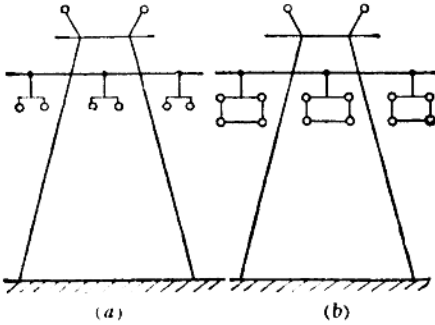


图 1-2-2 相分裂导线的排列方式
(a)二分裂导线；(b)四分裂导线

图1-2-3为钢芯铝导线的断面图，表1-2-1为钢芯铝包线和铝包钢线的规格表。



图 1-2-3 钢芯铝导线的断面图

表 1-2-1 钢芯铝包钢线和铝包钢线规格表

型 号	铝 包 钢 线 股数/直径(mm)	钢 芯 线 股数/直径(mm)	计 算 外 径 (mm)	直 流 电 阻 20℃(Ω/km)
LGJ-75	7/3.8(3.0)	1/3.8	11.4	0.432
LGJ-120	28/2.8(2.3)	7/2.0	15.2	0.255
LGJ-240	28/4.0(3.2)	7/2.8	19.0	0.163
LGJ-400	37/4.0(3.2)		40.7	0.1235
LGJ-500	37/4.4(3.2)		44.0	0.0958
GLGJ-80	4/3.8(3.0)	3/3.8	11.4	0.959
GLGJ-150	9/4.0(2.8)	7/2.6	15.8	0.548
GLGJ-325	16/3.7(3.0)	19/3.2	23.4	0.2822
GLGJ-560	38/3.7(3.0)	19/3.2	30.8	0.135
GLGJ-580	34/4.1(3.2)	1/3.2+18/3.0	31.6	0.126

注 1. GLGJ——钢芯铝包钢线；
LGJ——铝包钢线。
2. 括弧内数字为钢芯直径(mm)。

四、导线的相间距离和对地高度

根据线路的工作电压、操作过电压、雷击过电压等条件确定的各导线间的距离、对地高度分别如表1-2-2、表1-2-3所示。

表 1-2-2

相 导 线 间 的 最 小 距 离

线路电压(kV)	35	110	220	330	500
线间距离(m)	3	4	6	8	

表 1-2-3

导线与地面的最小距离(m)

线路电压(kV)	35~110	220	330	500
线路经过地区				
居民区	7.0	7.5	8.5	
非居民区	6.0	6.5	7.5	
交通困难地区	5.0	5.5	6.5	

五、导线的换位

不管线路各相导线如何排列，由于沿线地形地物的影响，各相的电气参数总不会完全相同，它们之间的电导差必然会导致电为系统中的不平衡电压和电流。这种不平衡电压和电流引起的负序分量将使系统内部的电机过热，引起的零序电流若超过某定值，在中性点不接地系统中会使灵敏度较高的接地继电器误动作，在直接接地系统中则将加剧对弱电通信的干扰。为了消除不平衡的电压和电流，常采用线路换位的方法。所谓换位，就是线路经一定距离后各相按一定规律进行相序排列的变更。图 1-2-4 示出了 1~3 次换位时的图形。

经换位的电力线路，不但能减小相同的不平衡电压和电流，而且还能大大地减小电力线路对通信线路的干扰影响。

一般说来，35kV 线路较短，由几公里到几十公里，通常不换位；110kV 及以上电压等级的线路在 100km 以上就需换位，视线路的总长度情况可进行一次或多次换位。

六、避雷线、分支线和出线

杆塔上除相导线之外，在其上方还装有避雷线（俗称地线）。避雷线的作用是防止相导线遭受雷击伤害和防止电力系统因雷击而发生事故。通常，35kV 线路在变电所或发电厂附近的几档杆塔上装设避雷线，不全线架设，110、220kV 线路，均全线架设避雷线。对于 330kV 及其以上电压等级的线路，不但需全线架设避雷线，而且有的线路（如 750kV 及其以上等级线路）还将避雷线分裂为几根，成为分裂避雷线。

为了减少避雷线上的电能损失和开设避雷线载波通信，当今各国已将部分高压线路和全部超高压线路的避雷线用绝缘子绝缘起来，成为绝缘避雷线。由于绝缘子上有放电间隙，所以，绝缘后的避雷线仍有避雷作用。

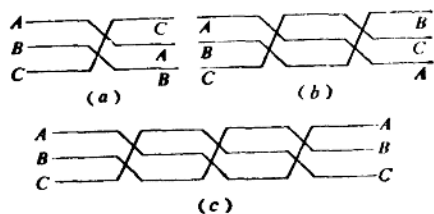


图 1-2-4 电力线路的换位

(a) 一次换位；(b) 二次换位；(c) 三次换位

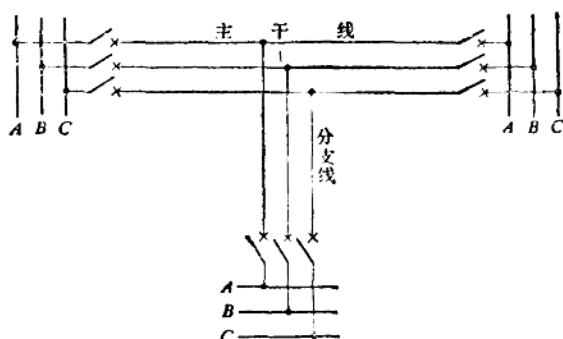


图 1-2-5 主干线和分支线示意图

当两变电站间的电力线路建好后，沿线附近又开设了工厂，需要用电。此时，往往在主干线上再接一条分支线，如图 1-2-5 所示。这种分支线往往是很短的，约几公里，而且其终端变电站的容量也是较小的。

一个大中型变电站往往有几个电压等级的经变压器连接起来的电力线路。图 1-2-6 为一台三

电压等级的变压器，有 35、110、220kV 三个电压等级的进出线示意图。假如该站是升压站，则 35kV 为进线电压，110、220kV 为出线电压；假如该站是降压站，则 220kV 为进线电压，110、35kV 为出线电压。

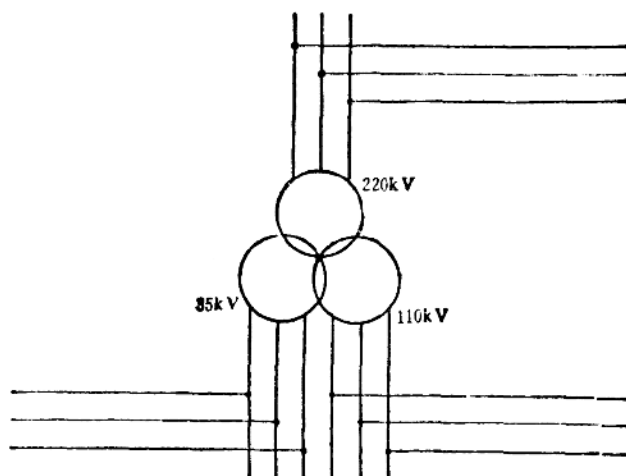


图 1-2-6 大中型变电所的出线示意图

第三节 电力线载波通道的组成和特点

一、电力线载波通道的组成

图 1-3-1 所示为相地耦合方式的电力线载波通信电路单线示意图。图中 Q_1 、 Q_2 两点间的部分称为线路；A、B 两点间的部分称为载波通道，它包括载波电缆、结合设备、加工设备和电力线路。E、F 两点间的部分称为电路，它包括话机、音频线路、载波机和载波通道。

这里应当指出：在电力线路上开设载波通信后，线路上既有工频信号，又有载频信号，这种线路就称为“复用线路”。对于复杂的载波通道，还包含载波桥路和分支线，在

桥路站和分支线的终端也可装设结合加工设备和载波机,实现载波通信。

为了叙述方便,常将加工设备和结合设备统称为载波通道的终端设备。这样,载波通道就包括载波终端、载波电缆和线路三部分。

二、电力线载波通道的特点

电力载波信号由于其主要的传输

介质是电力线路,而线路又不是为载波信号的传输而设计的,是为工频电流传输而设计的,因而,载波信号的传输就会遇到很多困难,这些困难多数是由电力线路和变电所终端设备的特点所引起的。针对着这些特点,采取了各种合理的方法和措施,实现了电力载波通信。同时,也就构成了“电力线载波通道”课程的主体。大体地说,电力线路和变电所设备对载波信号而言有以下五大特点。

(1) 电力线路是一个不对称的多导线系统。现有的电力线路多数是水平形的,导线间的距离和导线对地的距离都是不完全相同的,所以线路是不对称和不平衡的。同时,导线间距和导线对地距离又可比拟,这样,大地对信号的传输影响就很大。因而,在研究载波信号在电力线路上传输时,就不能套用成熟的有线传输理论,而要用模分量传输理论。

(2) 变电所的各种电力设备(如电压互感器、电流互感器、母线、变压器等)和分支线,对载波信号起着严重的分流作用。为确保载波信号的正常传输,需采用加工设备——线路阻波器。

(3) 电力线上传输着电压很高的工频电流,它严重地威胁着载波设备和人身安全。为了阻隔工频传通载频,必须采用结合设备——以耦合电容器为主体的结合滤波器。

(4) 变电所的出线很多,有的平行,有的成一定夹角;有的接于同一母线,有的接于不同母线。但相互间都有着密切的电气联系,因而,各载波通道间的电磁耦合和串音影响就很强烈。对此,须采用频率分割方法和载频阻塞电路来减小相互间的影响。

(5) 电力线上有着高电压电晕放电引起的电晕杂音和绝缘子放电引起的脉冲杂音,严重地影响着载波信号的传输和接收质量。为了提高载波信号的传输和接收质量,就必须研究这两种杂音的特性并采取有效的措施。

根据这五大特点来组织本课程的内容,是一种较为传统的方法。其主要内容就是:

- (1) 研究各种电力线路上载波信号的传输规律;
- (2) 研究各种结合加工设备的工作原理和设计方法;
- (3) 分析电力线路上两种杂音的特性及为提高通信质量应采取的措施;
- (4) 研究电力载波通信网的组织和设计;
- (5) 载波通道的特性测试方法和故障处理。

总之,“电力线载波通道”将运用电路分析、线性代数、网络原理、电力载波原理等课程的知识,结合电力载波通信技术的理论和实际,进行深化和提高,为电力载波通信事业的发展培养专业技术人才。

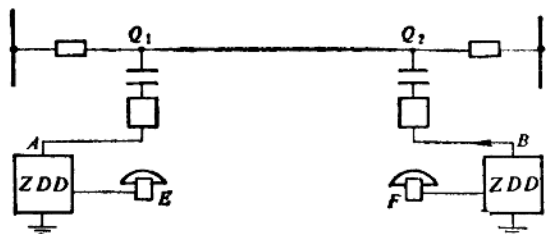


图 1-3-1 电力线载波通信电路的单线示意图

习 题 与 思 考 题

- 1-1 何谓电力系统通信？其作用是什么？
- 1-2 电力调度机构的作用是什么？
- 1-3 电力系统通信采用哪些通信方式？
- 1-4 电力载波通信的耦合方式有几种？相地耦合方式的电力载波通道是怎样组成的？
- 1-5 电力线路的排列方式有几种？分裂线路的作用是什么？线路为什么要换位？
- 1-6 画出一台变压器的升压站的电气接线图，其中一条35kV线路为进线，两条110kV和两条220kV线路为出线。
- 1-7 叙述电力载波通道的特点，为实现电力载波通信，在电力载波通道上应采取哪些措施？

第二章 通信线路的传输特性

第一节 架空明线线路的结构和一次参数

一、架空明线线路的结构

架空明线通信线路有弯钩线路和线担线路两种。线担线路又分为四线担、八线担。有时也构成线担和弯钩合一的线路，称混合型。线路的不同结构，常用不同的杆面程式来表达，图2-1-1为四线担杆面、八线担杆面和混合型杆面。无论哪种线路，都是由回路设备和杆路设备所构成。

回路设备包括导线、绝缘子、直螺脚、交叉支架（或H型钢扳）、线担和撑脚。杆路设备包括电杆、拉线、撑杆和横木等。隔电子是固定导线位置和使导线与大地绝缘的陶瓷制品，是装在直螺脚、弯螺脚或各种交叉

支架上的。H型钢扳和T型交叉支架是线路在电杆上做交叉（以减小回路间串音）用的。线担和弯螺脚固定在电杆上，用撑脚加以固定的。电杆直埋在地面上，埋深视电杆的长度

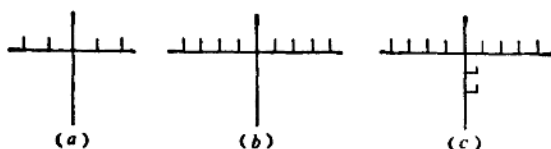


图 2-1-1 架空明线的杆面程式

(a)四线担杆面；(b)八线担杆面；(c)混合型杆面

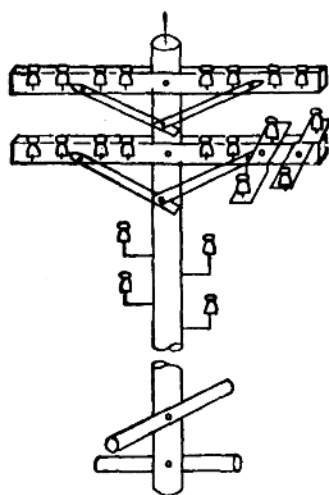


图 2-1-2 架空明线典型装置图

路的一次参数。

1. 电阻 R

导线的电阻 R 包括直流电阻 R_d 和交流电阻 R_a 两部分。

而定，为固定牢靠，地下用横木等加以辅助。有些电杆，如转角杆、耐张杆、分线杆等，为了增加其稳固性，还用拉线或撑木做“帮手”。为了防止雷击，在电杆顶上装设避雷针。图2-1-2为架空明线的典型装置图。

二、架空明线的一次参数

架空明线有四个基本电气参数：电阻 R 、电感 L 、电容 C 和电导 G 。它们主要和导线的材料和线路的结构有关，称为线路的一次参数。这些参数沿线均匀地分布着，而且各处具有相同的电气参数，所以，称为均匀线的分布参数。均匀线的一次参数通常以1km为单位来计算，其等效电路如图2-1-3所示。目前，架空明线都是双线线路，因而下面只讨论双线线

(1) 直流电阻 R 。由导线的材料、截面积、长度和环境温度所决定。当环境温度为 20°C 时, 双导线线路的直流电阻为 R ,

$$R = \rho \frac{8000}{\pi d^2} \quad (\Omega/\text{km}) \quad (2-1-1)$$

式中 ρ —— 20°C 时的电阻系数 ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$);

d ——导线的直径 (mm)。

当环境温度为 $t^{\circ}\text{C}$ 时, 其直流电阻为 R_t ,

$$R_t = R_0 [1 + \delta(t - 20)] \quad (2-1-2)$$

式中 δ ——电阻的温度系数 ($1/^{\circ}\text{C}$)。

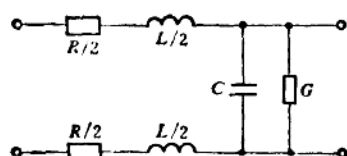


图 2-1-3 架空明线线路的等效电路

表 2-1-1 铜、铝、铁的 ρ 、 δ

金属名称	ρ ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)	δ ($1/^{\circ}\text{C}$)
铜	0.01785	0.0039
铝	0.0291	0.0037
铁	0.139	0.0046

双导线常用铜、铝、铁等材料做成, 它的 ρ 和 δ 分别如表2-1-1所示。

(2) 交流电阻 R_a 是由导线的集肤效应、邻近效应和邻近金属损耗引起的。

所谓集肤效应就是导线中通以交流电时, 随着信号频率的提高, 其电流分布越趋于导线表面而内部中心电流为零的现象。当信号频率越高时, 导线的有效传输截面积越小, 电阻就越大。试验证明, 导线的导磁系数越大, 导线的截面积越大, 其集肤效应越严重。

集肤效应的物理解释如图2-1-4所示。当导线通过交流电流 I_a 时, 在导线的内部和外部都产生磁力线。内部的磁力线穿过导线时, 在导线中产生涡流 I_b 。由楞次定律可知, I_b 产生的磁力线与 I_a 产生的磁力线方向相反, 因而, I_b 的方向在导线的中心部分和 I_a 相反, 在导线的表面和 I_a 相同。这样信号电流就出现内部小而表面大的现象。电流的频率越高, 磁通的变动速度也越大, 导线内的感应反向电动势也愈高。这时, 外部电源的电动势在内部中心会被完全抵消, 使电流为零。



图 2-1-4 集肤效应示意图

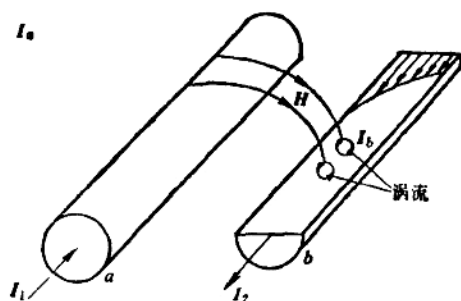


图 2-1-5 邻近效应示意图

所谓邻近效应是指靠近的两导线中通以交流电时, 它们内部的电流分布为相互靠近的一面大而远离的一面小的现象, 如图2-1-5所示。当导线 a 通过交流电 I_1 时, 它所产生的外磁力线在导线 b 中产生涡流 I_b , 其方向是靠近导线 a 的一侧与 I_1 相同, 远离导线 a 的一