

陈维千 主编

电力线 载波通道

水利电力出版社

电力线载波通道

陈维千 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

水利电力印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 10.5印张 231千字 1插页

1983年12月第一版 1983年12月北京第一次印刷

印数 00001—10130 册 定价 1.10 元

书号 15143·5278

内 容 提 要

本书结合我国三十多年来科研成果和实际经验,较全面地阐述了电力线载波通道的基本理论、设计和计算方法。内容包括高频信号沿电力线模式传输的理论,电力线高频参数,高频通道的跨越衰耗,高频通道的杂音,结合、加工设备以及通道的测量、运行与维护等问题。另外,还介绍了最近发展起来的分裂导线通道、绝缘地线通道的基本知识。

本书可供从事电力载波通信和高频保护的专业人员阅读,也可供大中专院校的有关专业的师生参考。

前 言

实现电力线载波通信，需要处理信息的终端设备，如载波机、继电保护用高频收、发讯机等，还需要传输信息的通道，即通常所说的载波通道（高频通道）。早在三十年代，国外即开始了高频通道的研究。从五十年代开始，国内、外有关电力线载波通信工作者，运用有线传输理论、概率论、矩阵代数和电子技术等成果，进一步深入开展了高频通道的理论研究和研制、改进了许多相应的通道设备，逐渐使高频通道发展成为一门综合性技术。五十年代中期，我国引进了苏联与东欧一些国家的载波设备和结合加工设备，并广泛开展了通道测量和有关通道设备的研制工作。七十年代，我国各省、区电力线载波通信网逐渐形成，促进了载波频率分配，相分裂和绝缘地线通信，模式分析，杂音的统计特性以及新型结合加工设备等问题的研究工作，近年来这方面已取得了许多可喜的成果，并极大地促进了电力线载波通信在电网中的应用。目前，全国已拥有电力线载波通信电路十七万多话路公里。用于35、110、220、330和500千伏各种电压等级线路上的载波机和通道设备已有数以万计。这些载波电路，除用于电话通信以外，还越来越多地被用来传输远动、自动和继电保护等重要信息，从而使电力线载波通道对电网的安全、可靠运行，具有更重要的意义。

电力线载波通道技术，主要研究复用电力线路组成高频通道的方式，以及相应的结合、加工设备；高频信号沿不同类型电力线路的传输规律；通道衰耗与杂音电平的计算、测

量和运行监测；由许多通道组成的电力线载波通信网的设计等内容。载波通道的有关特性，不仅直接影响载波电路本身的组成，而且是设计与制造载波机等终端设备的重要依据。

本书为适应我国电力线载波通信进一步发展的需要，总结了我国三十年来这方面研究成果和实际经验。为了帮助读者了解国外有关情况，书中引用了IEC的推荐标准以及苏联近年来在载波通道方面取得的新成果。考虑到现场工作的需要，书中所论述的问题，尽量给出实用数据和应用例题。本书可供从事电力系统通信、高频保护和远动等专业工作的工程技术人员、技术工人及有关高等院校、中等专业学校的师生参考。

参加本书编写的有陈维千、李庚旸、王忠治、刘祖丰、管春和、施育华、谢尚林和胡桂兰同志。全书由陈维千、李庚旸同志整理，最后由陈维千同志定稿。

本书经彭淳绍高级工程师审阅。在编写过程中还得到了陈道元高级工程师的大力帮助，在此一并致谢。限于编者水平，文中一定会存在不少错误和疏忽之处，欢迎广大读者批评指正。

编 者

83.4

目 录

前 言

第一章 概论	1
第一节 引言	1
第二节 传输电平	3
第三节 常用术语	7
第四节 线路、高频通道、电路的组成及其含义	11
第二章 高频信号在电力线上的传输	14
第一节 引言	14
第二节 高频信号在不考虑大地影响的双导线线路上的 传输	16
第三节 高频信号在考虑大地影响的双导线线路上的传输	19
第四节 高频信号在三相电力线上的传输	25
第五节 电力线高频参数的计算	42
第六节 对称线路高频参数的计算	47
第七节 非对称线路高频参数的计算	53
第八节 非对称、无换位、导线水平排列线路的高频参 数计算	59
第九节 非对称、有换位线路高频参数的计算	69
第三章 电力线高频参数的测量	75
第一节 引言	75
第二节 对称线路高频参数的测量	75
第三节 对称线路高频参数测量结果的分析	84
第四节 非对称线路高频参数的测量	90
第五节 非对称线路高频参数测量结果的分析	98

第四章 高频通道的跨越衰耗	102
第一节 引言	102
第二节 跨越衰耗的计算	106
第三节 线路之间的电磁干扰和总的跨越衰耗	116
第四节 总跨越衰耗的调整与运用	120
第五章 电力线上的高频杂音	123
第一节 引言	123
第二节 电晕杂音及其特性	126
第三节 杂音电平的计算	134
第四节 杂音电平的测试	139
第五节 杂音电平的统计特性及其分布规律	144
第六节 实测结果的分析	153
第六章 结合设备	156
第一节 引言	156
第二节 耦合电容器	156
第三节 结合滤波器的基本电路	162
第四节 结合滤波器的基本特性和一些产品的技术指标	169
第五节 结合滤波器的设计与计算	184
第六节 结合滤波器的测试和保护	191
第七节 高频电缆	197
第七章 加工设备	214
第一节 引言	214
第二节 单频阻波器	217
第三节 双频阻波器	223
第四节 定K型滤波器式阻波器	230
第五节 高通滤波器式阻波器	234
第六节 无调谐阻波器	236
第七节 阻波器的保护、调整与测量	240
第八章 载波通道的设计与计算	251

第一节 引言	251
第二节 设计的依据和条件	252
第三节 通道的组织和计算	254
第四节 频差曲线及其应用	261
第五节 频率分配	270
第九章 高频通道的测量、运行及维护	273
第一节 引言	273
第二节 变电站或开关站输入阻抗的测量	276
第三节 高频桥路衰耗测量及调整	278
第四节 全通道工作衰耗的测量	287
第五节 通道故障原因的分析及检查方法	290
第十章 绝缘地线及分裂导线载波通道	293
第一节 引言	293
第二节 绝缘地线通道的参数测量和计算	296
第三节 地线通道的结合设备与增音段的计算	304
第四节 相分裂导线通道	308
附录	317
附表1 标准正态积分表	317
附表2 绝对电平、功率、电压换算表	320
主要参考文献	325

第一章 概 论

第一节 引 言

目前，我国已建成的35、110、220、330和500千伏电力系统，虽然采用了微波、特高频、散射、有线和电缆等通信方式，但电力线载波通信仍然是电力系统生产调度和行政联络的主要通信方式。近年来随着电力系统的发展，远动装置、自动装置、高频保护等得到广泛采用，电力线高频通道日益显得重要，同时也对它提出了更高的要求。为了正确的设计和管理电力线高频通道，使通道能稳定可靠、经济地运行，本书较详细的在理论分析和实际测量以及运行经验上作了系统的介绍，尽量作到深入浅出，阐明物理概念并将一些单位取得的成果和经验包括进去。

电力线是用来传送工频电能的，所以在电力线的结构设计上不可能考虑高频通信技术的特殊要求。电力线上带高电位不能直接接触，线路上杂音电平也很高，给组织高频通道带来一定的困难。但是电力线导线粗，结构坚固，对高频信号提供了衰耗小，可靠性高的传送通路，而且通信、远动、自动装置的服务对象以及高频保护的收发信机都在电力线的两端，经济地利用现成的可靠的线路作为通道是无可争议的优点。为此电力载波通信在35~500千伏电力系统中得到了广泛的应用和迅速的发展。

随着电力线电压等级的提高和送电容量的增加，为减少线损，电压在330千伏以上的线路均采用相分裂导线，并有使地线绝缘和双金属化的趋势。近年来开始了绝缘相分裂导

线和绝缘地线通信的研究并已取得了可喜的成果。这为电力线高频通道充分的利用展示了美好的前景。

电力线与通信线比较有很多特点，除导线粗，杆塔坚固之外，更主要的特点是它的线间距离大，不能忽略大地的影响，这为有线传输原理简单地在电力线高频信号传输中应用带来了困难。

电力线有单回路和双回路之分，同杆架设两条电力线的叫双回路（多用在110千伏线路以下），单杆架设一条电力线的叫单回路（多在220千伏线路以上）。从导线对地布置的结构来讲，又可分为三角排列、垂直排列和水平排列三种。为防护电力线免遭雷害，在电力线上方架有一根或二根避雷地线。

强电要求电力线工频参数尽可能对称，这就要求线路经过一定距离后，进行导线换位，这些因素直接或间接的为组成电力线高频通道带来一定的问题。这些问题在本书将逐步得到论述。

电力线带着高电位，为了人身和设备的安全，载波机是不能直接与电力线相连接的。为此人们寻求各种方式以达到隔开工频，通过高频的目的。通常把采用的这些方式叫做耦合。曾经用过的有电容耦合、天线耦合、变压器耦合三种方式。如图1-1所示。

电容器耦合效率高是多年来采用的主要耦合方式。天线架设方便、经济，但因耦合效率低，一般只在携带型线路检修通信和线路较短的低压系统中应用。至于变压器耦合方式，只在1千伏以下的配电网中应用。

电容耦合，从接线方式上来分，目前各国常用的有单回路的相-地、相-相接，双回路不同线路的相-相接三

种方式，如图1-2所示。

相-相接线较相-地接线高频传输衰耗小，稳定性高，但因相-地接线所用的结合和加工设备比相-相接线要少一倍，

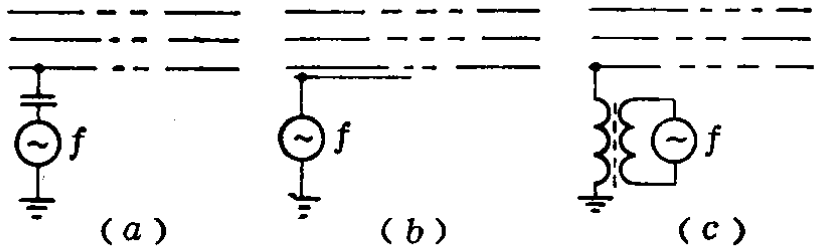


图 1-1 各种耦合方式接线图

(a)电容耦合；(b)天线耦合；(c)变压器耦合

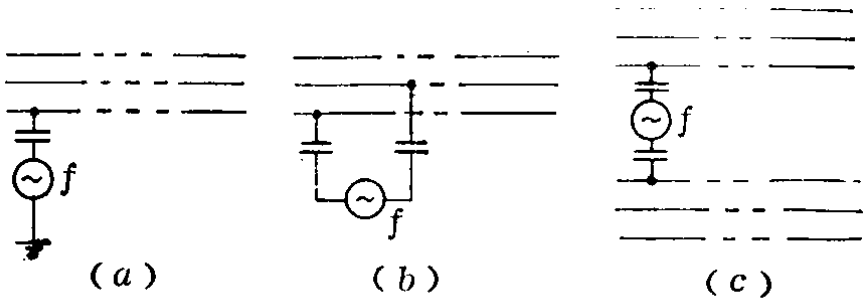


图 1-2 电容耦合几种常用的接线方式

(a)相-地接线；(b)相-相接线路；(c)不同线路相-相接线路

且在一条线路上可以组织较多的通道，所以我国目前绝大多数通道采用相-地接线方式。

近年来由于电力线电压等级提高，距离加长，站间通道衰耗值已临近最大允许衰耗值。为保证重要通道的可靠性，国外已采用了相-相接线方式，国内也开始了应用这种接线方式的研究。

第二节 传 输 电 平

通信技术中，电信号在电路上传送，我们称为传输。为

了准确的计量电信号在电路中各点的功率、电压、电流等传输变化情况，一般不直接采用瓦特(W)、伏特(V)和安培(A)作为测量单位，而是用“电平”来衡量信号的大小。通常人们所说的“平”是指相对于某一参考值的大小。例如表示高低的可用“水平”面或“地平面”作参考点，以米为单位。为了表示电信号的大小，也需选用一个功率或电压、电流作为基准。所以一个信号的大小就可用相对于这一基准的功率比值、电压比值或电流比值的对数关系来表示，称为传输电平。使用单位是分贝(或奈培)，其代号为dB(或Np)。

传输电平分为绝对电平和相对电平。

1. 绝对电平

取定一毫瓦(1mW)功率作为基准所确定的电平值称为绝对电平。被取定的一毫瓦功率 P_0 称为“零电平”功率。与“零电平”功率 P_0 相对应的不同电阻上电压称为“零电平”电压 U_0 ，流过不同电阻的电流称为“零电平”电流 I_0 。绝对功率电平、绝对电压电平和绝对电流电平分别以 p_m 、 p_u 、 p_i 表示，可用式(1-1)、(1-1)'、(1-2)、(1-2)'、(1-3)、(1-3)' 计算：

$$p_m = 10 \lg \frac{P}{P_0} \quad (\text{dBm}) \quad (1-1)$$

$$p_m = \frac{1}{2} \ln \frac{P}{P_0} \quad (\text{Npm}) \quad (1-1)'$$

$$p_u = 20 \lg \frac{U}{U_0} \quad (\text{dBu}) \quad (1-2)$$

$$p_u = \ln \frac{U}{U_0} \quad (\text{Npu}) \quad (1-2)'$$

$$p_i = 20 \lg \frac{I}{I_0} \quad (\text{dBi}) \quad (1-3)$$

$$p_i = \ln \frac{I}{I_0} \quad (Npi) \quad (1-3)'$$

式中 P ——需计量的绝对功率值(mW);
 U ——需计量的绝对电压值(V);
 I ——需计量的绝对电流值(A)。

2.绝对功率电平与绝对电压电平和绝对电流电平的关系
大家都知道功率与电压和电流有 $P=UI=U^2/R=I^2R$ 的关系,所以“零电平”功率 P_0 与“零电平”电压 U_0 和“零电平”电流 I_0 有如表(1-1)所列的关系:

表 1-1 P_0 与 U_0 和 I_0 的关系					
功 率 $P_0(mW)$	1	1	1	1	1
阻 抗 $Z(\Omega)$	600	400	150	100	75
电 压 $U_0(V)$	0.775	0.632	0.387	0.316	0.274
电 流 $I_0(A)$	0.00129	0.00158	0.00258	0.00316	0.00365
功率电平读数 (dBm)	0	0	0	0	0
电压电平读数 (dBu)	0	-1.76	-6	-7.78	-9

在测试中使用的电平表,一般是按1毫瓦功率为0电平刻度的功率电平表,但也有不少以电压0.775伏为0电平刻度的电压电平表。如果测试点的阻抗是600欧姆,用这两种刻度的表计测量读数是相同的,如果测试点阻抗不是600欧姆用电压电平表测量时,应按式(1-4)进行修正:

$$p'_m = p'_u + 10\lg \frac{600}{Z} \quad (dBm) \quad (1-4)$$

式中 p'_m ——功率电平表读数(dBm);
 p'_u ——电压电平表读数(dBu);
 Z ——测试点阻抗(Ω)。

用电压电平表在不同阻抗上测量一毫瓦功率电平时的修正值见表1-1。

【例1-1】 有一发送机发送的功率是10瓦求其绝对电平？

【解】 根据式(1-1)和式(1-1)'计算得：

$$p_m = 10 \lg \frac{10 \times 1000}{1} = 40 \text{dBm}$$

或
$$p_m = \frac{1}{2} \ln \frac{10 \times 1000}{1} = 4.6 \text{Npm}$$

由式(1-1)、(1-1)'和计算结果可以看出分贝与奈培有如下的关系：

$$\left. \begin{aligned} 1 \text{dB} &= 0.115 \text{Np} \\ 1 \text{Np} &= 8.686 \text{dB} \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

3. 相对电平

用传输单位分贝或奈培来表示的两个功率的相对大小称为相对电平，用 p_r 表示，可用公式(1-6)(1-6)'计算：

$$p_r = 10 \lg \frac{P}{P_x} \quad (\text{dBr}) \quad (1-6)$$

$$p_r = \frac{1}{2} \ln \frac{P}{P_x} \quad (\text{Npr}) \quad (1-6)'$$

式中 P ——表示所讨论的系统某一点上的功率(mW)；

P_x ——表示所选定系统某参考点上的功率(mW)。

通常一个传输系统里既包括有增益也包括损耗，电信号在系统中的各个不同点上有着不同电平。如果选定一个参考点后，相对于这一参考点来描述信号在传输方向上各点电平传输变化情况，用相对电平这一概念是非常清楚的。系统中某点相对电平的数值实际上就等于所讨论的这一点与传输参考点之间所介入的增益和损耗的代数和。只要传输参考点一

经选定下来，各点相对电平值也就被相应确定下来。为了与绝对电平单位相区别用代号 dBr 表示相对电平的传输单位。所选的参考点定义为“零相对电平点”。

【例1-2】在传输系统里测得某一点的功率为2毫瓦，选取的参考“相对零电平点”功率是100微瓦，求相对电平？

由式(1-6)和(1-6)'可计算得：

$$p_r = 10 \lg \frac{2}{0.1} = 13 dBr$$

$$p_r = \frac{1}{2} \ln \frac{2}{0.1} = 1.5 Npr$$

第三节 常用术语

高频通道中除阻波器外，其他各个组成部分都可当作四端网络来研究，如图(1-3)所示。

任何一个四端网络的特性都是用它的输入方向和输出方向的特性阻抗 $Z_{\text{特入}}$ 和 $Z_{\text{特出}}$ 以及传输常数 γ 表示的，特性阻抗可用公式(1-7)表示，

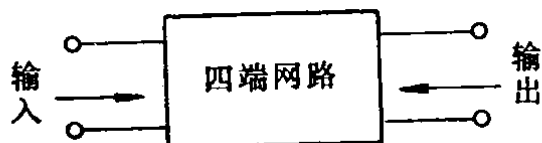


图 1-3 四端网络等效电路图

$$\left. \begin{aligned} \text{即: } Z_{\text{特入}} &= \sqrt{Z_{\text{开出}} \cdot Z_{\text{短出}}} \\ Z_{\text{特出}} &= \sqrt{Z_{\text{开入}} \cdot Z_{\text{短入}}} \end{aligned} \right\} \quad (1-7)$$

式中 $Z_{\text{开出}}, Z_{\text{短出}}$ ——四端网络输出端开路 and 短路时输入端的输入阻抗；

$Z_{\text{开入}}, Z_{\text{短入}}$ ——四端网络输入端开路 and 短路时输出端的输入阻抗。

在负载阻抗 $Z_{\text{负}}=Z_{\text{特出}}$ 时，四端网络输入端和输出端的视在功率比值的常用对数十倍值称为传输常数 γ 。可用公式（1-8）表示，即：

$$\gamma = 10 \lg \frac{S_{\lambda}}{S_{\text{出}}} \quad (1-8)$$

式中 S_{λ} ——输入端视在功率， $S_{\lambda}=U_{\lambda}I_{\lambda}$ ；

$S_{\text{出}}$ ——输出端视在功率， $S_{\text{出}}=U_{\text{出}}I_{\text{出}}$ 。

因为输出电压与输入电压，输出电流与输入电流有如下的关系：

$$\left. \begin{aligned} U_{\text{出}} &= U_{\lambda} e^{-\gamma} \\ I_{\text{出}} &= I_{\lambda} e^{-\gamma} \end{aligned} \right\} \quad (1-9)$$

根据 $S_{\text{出}}=U_{\text{出}}I_{\text{出}}$ 和式（1-9）可写出如下的表示式，即：

$$S_{\text{出}}=U_{\text{出}}I_{\text{出}}=U_{\lambda}I_{\lambda}e^{-2\gamma} \quad (1-10)$$

传输常数 γ 是个复数量可用下式表示，即：

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (1-11)$$

式中 α ——实数部分称之为衰耗常数（dB/km）；

β ——虚数部分称之为相移常数（rad/km）。

将式（1-11）代入式（1-10）可得如下的形式，即：

$$S_{\text{出}}=U_{\lambda}I_{\lambda}e^{-2(\alpha+j\beta)} \quad (1-12)$$

表示四端网络相位特性的相移常数 β 是四端网络输入电压（或电流）与输出电压（或电流）的相位差。

表征四端网络衰耗特性一般有以下几种方法：

1. 固有衰耗

当负载电阻和发送机内阻完全与四端网络输出、输入侧特性阻抗分别匹配时，四端网络的输入、输出功率比的常用对数十倍值，称为固有衰耗。可用下式表示，即：

$$A_{\text{回}} = 10 \lg \frac{P_{\text{入回}}}{P_{\text{出回}}} (\text{dB}) \quad (1-13)$$

2. 传输衰耗

发送机加在四端网络输入端的功率 $P_{\text{入传}}$ 与输出端负载电阻所得到的功率 $P_{\text{出传}}$ 之比的常用对数十倍值称为传输衰耗, 可用公式 (1-14) 表示, 即:

$$A_{\text{传}} = 10 \lg \frac{P_{\text{入传}}}{P_{\text{出传}}} (\text{dB}) \quad (1-14)$$

电信号在传输过程中, 因为发送机内阻与四端网络输入端特性阻抗, 以及四端网络输出端特性阻抗与负载阻抗可能失配, 产生附加衰耗, 因此, 一般 $A_{\text{传}}$ 大于 $A_{\text{回}}$ 。当 $Z_{\text{内}} = Z_{\text{特入}}$, $Z_{\text{特出}} = Z_{\text{负}}$ 时, $A_{\text{传}} = A_{\text{回}}$ 。

3. 介入衰耗

发送机直接与负载阻抗相连, 负载阻抗所得到的功率 P'_1 与发送机和负载阻抗间加入四端网络后, 负载阻抗所得到的功率 P'_2 之比的常用对数十倍值称为介入衰耗, 可用式 (1-15) 表示, 即:

$$A_{\text{介}} = 10 \lg \frac{P'_1}{P'_2} (\text{dB}) \quad (1-15)$$

4. 工作衰耗

发送机直接与负载阻抗相连且发送机内阻与负载阻抗相等, 负载阻抗上所得到的功率 P_1 与发送机通过四端网络给任一负载阻抗的功率 P_2 的比值常用对数的十倍值称为工作衰耗。可用式 (1-16) 表示, 即:

$$A_{\text{工}} = 10 \lg \frac{P_1}{P_2} (\text{dB}) \quad (1-16)$$

5. 回波衰耗 $A_{\text{回}}$ (或称反射衰耗 $A_{\text{反}}$)

反射系数 ρ 倒数绝对值的常用对数20倍值, 称为回波衰