

# 电力系统高频通信

[苏]Я. Л. 贝荷夫斯基 К. Я. 卡费耶娃

成都工学院  
华东电力设计院 翻译小组译

13.3

水利电力出版社

TN913.3

8

3

# 电力系统高频通信

[苏]И.И.贝荷夫斯基 К.Я.卡费耶娃

成都工学院  
华东电力设计院 翻译小组译

CBZ-19



水利电力出版社



△ 543054

# 目 录

|      |                                    |     |
|------|------------------------------------|-----|
| 第一章  | 高压输电线高频通信的应用.....                  | 1   |
| 第二章  | 输电线通信的理论基础.....                    | 4   |
| 第三章  | 波道和高频通路的计算.....                    | 12  |
| 第四章  | 高压输电线上的高频杂音和无线电干扰.....             | 33  |
| 第五章  | 避雷线通信.....                         | 51  |
| 第六章  | 分裂相绝缘导线通信.....                     | 62  |
| 第七章  | 高压输电线路上的多路通信系统.....                | 71  |
| 第八章  | 超高压交流和直流输电线路及电力电缆线路中<br>信息的传输..... | 85  |
| 第九章  | 提高通信通道抗扰性和可靠性的方法.....              | 93  |
| 第十章  | 结合与加工设备 .....                      | 105 |
| 第十一章 | 高压输电线高频通信的展望 .....                 | 142 |
| 参考文献 | .....                              | 147 |

## 第一章 高压输电线高频通信的应用

近几十年里，高压输电线高频通信技术得到很大发展。这种特殊通信形式的高度可靠性和经济性，促进了理论和实践性研究的进展。在苏联和国外，这些研究，约开始于20年代初(苏联克希拉——莫斯科第一条110千伏线路上的高频电话通道是在1922年建成的)。然而，在战后时期，特别是在50年代，才开始真正大量运用高压输电线高频通信。

50年代中期全苏电能科学研究所（ВНИИЭ）和无线电制造工业部（МРП）所属企业生产了用于400—500千伏线路的高频通信成套设备，其中有ЭПО-400高频载波机、ПВЗ-400保护收发信机、ТДО-400和ТМДП-400远动装置、ВЗ-2000/400阻波器和专门的测量仪表（ИУУ-ЛЗП，ГУН-400等）。

在60年代，制造出了新型的半导体高频设备ВЧА-1、ВЧА-3、ТМТП、МП、ПВЗП。

由于电力系统高频通道需要量的增加，全苏电能科学研究所研制了ПЧВ变频设备和将三路及十二路长途通信系统接上输电线路的МПУ-12设备。

罗斯托夫实验工厂对高频通信设备和МК-58、МК-60、КП-59、КМК-64、АРС远动装置，以及配电网加工设备进行了研制并系列化生产。

在高压输电线高频通信设备结构完善的同时，一系列问题的理论研究有了发展，所研究的这些问题不仅涉及高压输

电线上高频信号传播的特性，而且包括寻求高频设备对具有换位、分支以及对该种通信形式具有其它特殊特点的多导线高压线路的最佳耦合方式，其中利用绝缘避雷线以及应用有绝缘支架的分裂相导线通信，都是这些研究取得的成果。

在60年代，列宁格勒工学院（ЛПИ）、直流输电研究所（НИИПТ）、全苏电能科学研究所、电气机械研究所（ИЭМ）和技术改进局（ОПРЭС），拟定并运用了精确的方法，在电子计算机上计算输电线的高频参数。

在发展苏联的设计和计算方法的同时，也研究了国外高压输电线高频通信发展的经验。

目前，在苏联电力系统中，处于运行中的几万条高频通道总长度大于1百万公里。这种通信方式如此广泛的分布，使之获得了很高的技术经济指标。

运行的经验指出，在采用了高度可靠的半导体元件制成的现代高频设备时，基本上只是线路上的缺陷会引起高压输电线高频通道的故障，如：衰耗增加、干扰电平升高、高压输电线路事故。后者发生得相当少（100公里长的高压输电线每年约发生一次）。变电站附近所有三相或工作相断线的可能性也非常少。所以，霜和冰的存在是高压输电线高频通道的衰耗增加的主要原因。目前，能够减小冰对高频通道工作的影响的方法和设备已产生并正在发展。

高压输电线高频通道杂音电平的增高，首先是由高压输电线的电晕引起的。除了高压输电线路的结构特点外，电晕还与天气条件和其它因素有关。

在50年代和60年代，苏联在研究实际高压输电线路的电晕杂音电平，和设计中的超高压线路的杂音计算方法方面，曾经进行了大量的工作。

目前，建立最重要的高频通道应计算到即使在结冰严重和电晕很强的情况下，也不致使通道工作中断。

当传送远方跳闸信号和其它快速动作设备的信号时，还必须考虑到由于雷电过电压和操作过电压所引起的短时脉冲干扰。

在许多情况下，超过容许值的杂音电平还可能由于绝缘避雷线放电器的电火花，设备的损坏，高压输电线路绝缘处于预击穿状态，也都会使杂音电平超过容许值，但是，这些故障常被高压输电线路本身的维护人员迅速地发现和排除，与通信通道的运行无关。

因此，可以认为，输电线高频通道的可靠性几乎与电缆通信线路通道的可靠性一样，而修建和运行的投资要少得多。

作为例子，可以比较敷设长度为800公里、复用24路通信通道的单电缆干线，和同样长度、用输电线路避雷线组织24路高频通道的费用。前者需要投资总共为3307千卢布，而年运行费为528千卢布；此时考虑折旧系数15%，每年总费用为 $3307 \times 0.15 + 528 \approx 1026$ 千卢布。后者这些费用相应为1785，202和470千卢布。每年的经济效益为 $1025 - 470 = 555$ 千卢布。

只有在个别情况下，和距离较短时才在输电线相导线上组织多路系统。在电力系统实际中，费用不大的少路通信系统得到了更广泛的发展。例如，长约1000公里，具有三个中间站的500千伏输电线路组织八个通道（两个三路两个单路）需要的投资约250千卢布，此时年运行费约50千卢布，而每年总的费用为 $250 \times 0.15 + 50 = 88$ 千卢布。

上面引出的数字表明，利用输电线高频通信对国民经济有巨大的效益。

近几年来，除继续完善输电线高频通信技术外，在理论与实践方面出现了一系列新的成就——完善了用电子计算机计算高频通路和杂音的精确方法，在相导线、避雷线和分裂相绝缘导线上采用多路通信系统，高压输电线高频加工设备适合现代化要求，设想利用《阻波环》阻塞高频电流，同时连结冰凌信号器发送装置。电力网的高频复用，已在其它工业部门开始应用：为了通信利用电力电缆，电车线和照明线路，研制新的高频保护，远方跳闸，遥调和数据传送装置，以及线路维护通信装置和输电线及避雷线冰凌发信装置。

利用音频和50赫谐波拟定了电力网信号系统。在高频通信的应用方面，正在研究利用输电线路作为波导或将高频通信通道与输电线路通道结合在一起。

如果认为，已有资料充分地阐明了高压输电线路高频通信设备和通道传统的计算、设计和维护方法，则在本书中，我们主要讨论介绍国内外经验证明了的新的或很少了解的方法及解答。

## 第二章 输电线通信的理论基础

高频电流沿输电导线传播，可用所谓电报方程式来描述，因而，可以根据线路始端或末端的电流和电压的大小，确定每一导线任一点处的电流和电压。

线路的导线愈多，不均一性愈大，则方程式和它的解答就愈复杂。线路的不均一性是指负载不匹配，有分支和有换位等。

单导线的线路，即以大地作返回的线路，是最简单的单波系统。这种线路可以用一个传输常数 $\gamma = \alpha + j\beta^*$ 和一个波阻抗 $Z_c$ 来表示它的特性。当负载匹配时， $Z_e = Z_c$ ，单导线线路上任何一点的电流和电压可用下式表示。

$$\left. \begin{aligned} U_x &= U_0 e^{-\gamma x} ; \\ I_x &= I_0 e^{-\gamma x} ; \\ \frac{U_x}{I_x} &= \frac{U_0}{I_0} = Z_c . \end{aligned} \right\} \quad (2-1)$$

线路的二次参数 $\gamma$ 和 $Z_c$ 与一次参数 $R$ 、 $L$ 、 $G$ 和 $C$ ，即与线路单位长数的电阻、电感、绝缘电导和电容有关，如下两式：

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} ; \quad (2-2)$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} , \quad (2-3)$$

式中  $\omega$  —— 角频率 ( $\omega = 2\pi f$ )。

对高频来说，因  $j\omega L \gg R$ ，和  $j\omega C \gg G$ ，这些公式可以简化成

$$\gamma = \frac{R}{2\sqrt{\frac{L}{C}}} + \frac{G}{2}\sqrt{\frac{L}{C}} + j\omega\sqrt{LC} ; \quad (2-4)$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} . \quad (2-5)$$

输电线路导线绝缘很好，因而绝缘电导 $G$ 很小，(2-4)式第二项可以略去，则(2-4)式可表示为

$$\gamma = \frac{R}{2Z_c} + j\omega\sqrt{LC} = \alpha + j\beta . \quad (2-6)$$

(2-6)式的实数部分表示线路单位长度(通常指1公

---

\* 原文为 $\gamma = \beta + j\alpha$ 。——译注

里)的损耗。虚部  $j$  后的系数为单位长度的相移角。

每公里损耗

$$\alpha = \frac{R}{2Z_0}; \quad (2-7)$$

相移系数

$$\beta = \omega \sqrt{LC}, \quad (2-8)$$

因为  $\beta = \omega/v$ ,  $v$  为传播速度, 则

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (2-9)$$

如果线路末端的负载不匹配,  $Z_L \neq Z_0$ , 就要发生波的反射, 于是可用下式确定线路各点的电流和电压:

$$\left. \begin{aligned} U_x &= U_0 \cosh \gamma x - I_0 Z_0 \sinh \gamma x; \\ I_x &= I_0 \cosh \gamma x - \frac{U_0}{Z_0} \sinh \gamma x. \end{aligned} \right\} \quad (2-10)$$

(2-10) 式中若以  $Z_L$  代替  $Z_0$ , 则得 (2-1) 式。

由 (2-10) 式, 可以得出线路末端计算线路始端的电压和电流的电报方程为:

$$\left. \begin{aligned} U_0 &= U_L \cosh \gamma l + I_L Z_0 \sinh \gamma l; \\ I_0 &= \frac{U_L}{Z_0} \cosh \gamma l + I_L \sinh \gamma l. \end{aligned} \right\} \quad (2-11)$$

线路的输入阻抗为

$$Z_{\text{bx}} = \frac{U_0}{I_0} = Z_0 \frac{Z_L + Z_0 \tanh \gamma l}{Z_0 + Z_L \tanh \gamma l}. \quad (2-12)$$

从上式看出, 当  $Z_L = Z_0$  时,  $Z_{\text{bx}} = Z_0$ 。

线路的电容和电感数值实际上都为常数, 所以在高频段, 波阻抗  $Z_0$  和传播速度  $v$  的变化都不大。

公里损耗  $\alpha$  与电阻  $R$  有关, 而  $R$  随频率升高而增加, 由于集肤效应, 导线电阻与  $\sqrt{f}$  成比例增加。所以, 距离大

地相当远的双导线线路，导线—导线系统的通道衰耗也与  $\sqrt{f}$  成比例。

由于大地电阻随频率升高而迅速增加，在导线—（图2-1）大地系统中，衰耗增加很快。

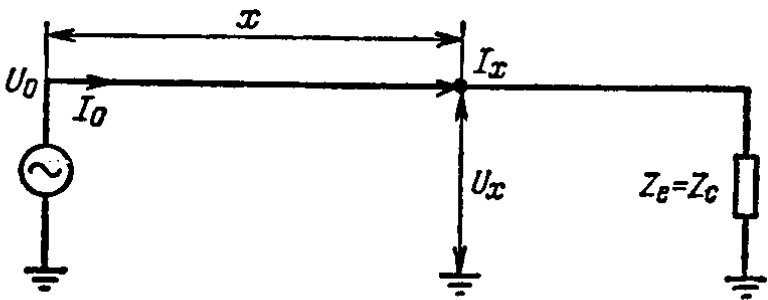


图 2-1 负载匹配的单导线线路

能量沿双导线线路传播有两条途径（波道）：即导线—导线和双导线—大地。有些结合方式只利用上述波道之一。

图 2-2 表示双导线对称线路，表示其特性的几何尺寸为  $d$ 、 $s$  和  $h$ （图2-2a）。在图2-2b中，波只在导线—导线间

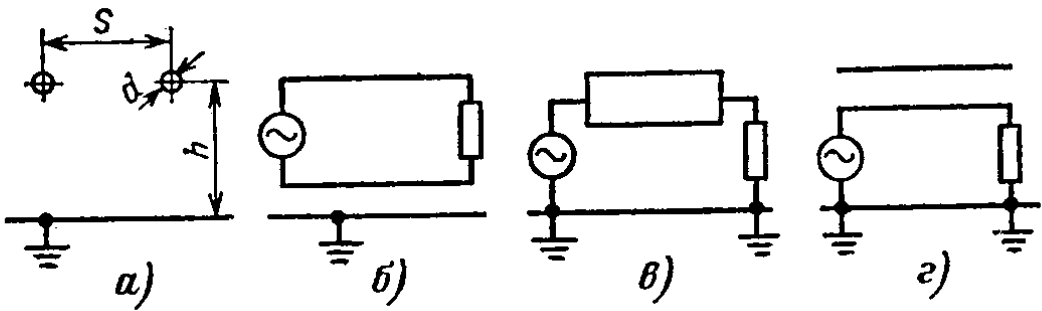


图 2-2 双导线对称线路

a—线路尺寸； b—导线-导线方式； c—双导线-大地方式； d—单导线-大地方式

（相间波）传播。而在图2-2c中，波则在双导线—大地间（零序波）传播。而在图2-2d中，则存在两种波，它们都与第二根导线两端是否断开或接地无关，也与第二根导线的一端或

两端是否有负载阻抗无关。要精确计算这种最简单的双波系统也是相当复杂的。因为首先要计算这两种波道的参数（损耗、传播速度和波阻抗）。然后，在发送端应把电流和电压分解为两种波道的分量，在接收端要考虑终端的条件，把它们合并起来。

地中的损耗不只影响零序波，而且也影响相间波的损耗和传播速度。可以根据卡尔松和法诺提出的理论来计算大地的影响[文献 1、2]，在许多文章中[文献 6、8]介绍了卡尔松公式和曲线。为了近似计算相间波的损耗，可以用[文献 7]的公式，它是根据卡尔松公式得到的。

对相间波，大地中的损耗电阻

$$R = \frac{fs^2 \Delta P}{250 D^2}, \text{ 欧/公里}, \tag{2-13}$$

式中  $f$  ——频率，赫； $s$  ——导线之间的距离，米；  
 $D$  ——导线到另一导线镜像的距离； $D = \sqrt{(2h)^2 + s^2}$ ，米； $\Delta P$  ——卡尔松差函数，它与参数  $r = D^2 f / \rho \times 10^6$  有关；  
 $\rho$  ——大地的电阻率，欧·米。

当  $r = 2$  时  $\Delta P$  出现最大值， $\Delta P = 0.058$ 。

不同  $r$  时的卡尔松差函数  $\Delta P$  为：

|                   |       |       |       |       |       |       |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $r \cdots$        | 0.01  | 0.1   | 1     | 10    | 100   | 1000  |
| $\Delta P \cdots$ | 0.008 | 0.026 | 0.054 | 0.049 | 0.025 | 0.008 |

下面讨论双线线路按图 2-26 接线时损耗和线间距离的关系，这种线路只有相间波传播能量，双导线线路的公里损耗为：

$$\alpha = \frac{R}{2Z_c}, \text{ 奈/公里, 或 } 8.686 \frac{R}{2Z_c}, \text{ 分贝/公里}, \tag{2-14}$$

式中  $R$  ——两根导线的电阻,欧/公里;  $Z_c$  ——波阻抗,欧;

$$Z_c = 120 \ln \frac{2s}{d} \quad (2-15)$$

如果不考虑大地的损耗 (即假设  $s \ll h$ ), 则从(2-14)和 (2-15) 式可见, 在频率一定的情况下, 随着导线之间的距离  $s$  的加大, 会使  $Z_c$  增加和  $\alpha$  值减小。

当  $s$  的数值和  $h$  差不多时, 大地的损耗成为重要因素, 随着  $s$  的加大,  $\alpha$  也要增加。

在一般情况下

$$R = 2R_f + R_s, \quad (2-16)$$

式中  $R_f$  ——频率  $f$  时, 1 公里长线段的电阻;  $R_s$  ——大地的损耗, 由 (2-13) 式计算, 欧/公里。

对铝线

$$R_f = 3.4 \sqrt{f} / d, \text{ 欧/公里。} \quad (2-17)$$

以铝线为例, 直径  $d = 10$  毫米, 当  $f = 100$  千赫、 $h = 10$  米、 $\rho = 100$  欧·米时,  $R_f = 3.4$  欧/公里。

对不同的  $s$  值, 用(2-13)~(2-15)式, 可以求得  $R_s$ 、 $Z_c$  和  $\alpha$ 。计算结果见表2-1和图2-3。

表 2-1      线路的有功损耗和衰耗与导线之间的距离的关系

| $s$ , 米 | $Z_c$ , 欧 | $R_f$ ,<br>欧/公里 | $R_s$ ,<br>欧/公里 | $R$ ,<br>欧/公里 | $\alpha$ , 毫奈/公里 |        |
|---------|-----------|-----------------|-----------------|---------------|------------------|--------|
|         |           |                 |                 |               | 不计大地             | 计及大地影响 |
| 0.1     | 360       | 3.4             | 0               | 6.8           | 9.45             | 9.45   |
| 0.6     | 574       | 3.4             | 0               | 6.8           | 5.94             | 5.94   |
| 1.0     | 636       | 3.4             | 0.037           | 6.337         | 5.35             | 5.40   |
| 5.0     | 830       | 3.4             | 0.92            | 7.72          | 4.1              | 6.40   |
| 10.0    | 912       | 3.4             | 3.2             | 10            | 3.73             | 7.25   |
| 20.0    | 996       | 3.4             | 10.00           | 16.8          | 3.42             | 13.45  |

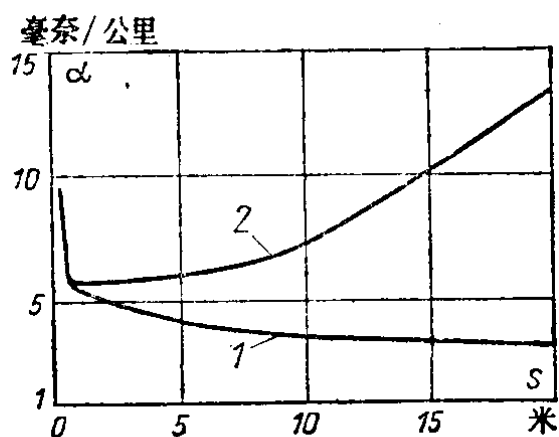


图 2-3 双导线线路每公里衰减与线间距离的关系

Al  $d = 10$  毫米;  $h = 10$  米;  $\rho_s = 100$  欧·米;  
 $f = 100$  赫;  $s = 0.1 - 20$  米  
 1—不计地中损耗; 2—考虑地中衰减

在所举例中,  $s/h < 0.1$ , 实际上不存在大地损耗的影响, 因而  $\alpha$  将随  $s$  的增加而减小。但再增大  $s$ , 大地的损耗就开始发生影响。同导线距地面相当远或  $\rho = 0$  (或  $\rho = \infty$ ) 的情况相比,  $s = h$  时的  $x$  值要增大一倍, 而  $s = 2h$  时, 衰减值增大 4 倍。

由(2-13)式和表2-1可见, 对相间波来说, 大地的损失由许多因素决定: 有线路的结构 ( $D$ 、 $s$  和  $d$ ) 频率  $f$  和大地导电率  $\rho$ , 但在一些具体情况下, 能比较简单地求得。

如220千伏的线路, 当  $D = 25 - 26$  米和  $s = 8 - 9$  米: 若  $\rho = 100$  欧·米和  $83$  千赫  $< f < 1460$  千赫, 或  $6.8 < \rho < 122$  而  $f$  约在100千赫时,  $R_s = 0.025 f$ 。

对零序波作类似的计算表明: 其地电阻比相间波的要大 30 倍, 而公里衰减约大 20 倍。

双导线或三导线线路, 按导线一大地方式(图2-2a, 2-4)接线, 则能量以两种波传播, 但若线路长度超过20—30公里, 因零序波的衰减太大, 到接收端就只有相间波了。进入全部导线一大地波道的这部分能量, 决定附加衰减, 即所谓终端衰减。

高频通路 (высокочастотный тракт) 的总衰减由下式计算

$$a = \alpha_{\phi} l + 2a_{\kappa}, \quad (2-18)$$

式中  $\alpha_{\phi}$ ——相间波的公里衰减;  $l$ ——线路的长度;

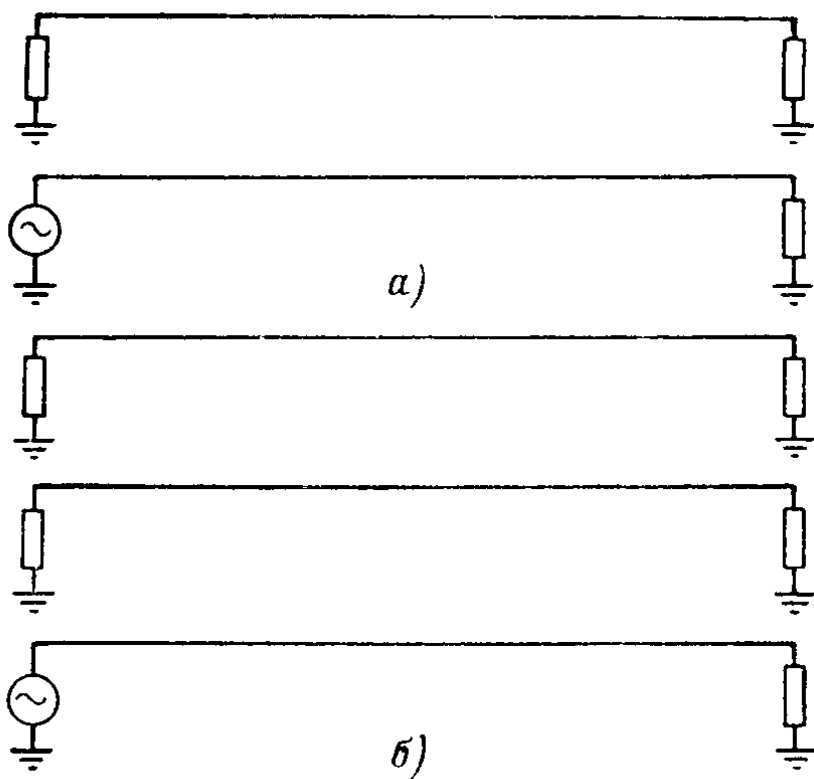


图 2-4 线—地接线图  
 $a$ —双导线线路； $b$ —三导线线路

$a_k$ ——终端衰耗。

$a_k$  的大小与比值  $q = Z_0 / Z_\phi$  和导线所接负载有关。如果线路接地，则  $a_k = 0.1$  奈，但若线路断开，则  $a_k = 0.3$  奈，对 110—330 千伏的线路，计算时取  $a_k = 0.15$  奈，对于 500—750 千伏线路计算时，取  $a_k = 0.2$  奈。

在  $n$  导线线路上，能量沿  $n$  条路径或波道传播，其中之一就是全部导线—地波道（零序波道）。其中对导线作水平排列的三相线路，可分为非对称波道（中间相—两边相），它具有最小衰耗；和对称波道（两边相间）以及 0—波道（三相—地）〔文献 4〕。

这里需要着重指出的是，可以用麦克斯韦方程式表示在垂直于线路的平面内同一点处各导线的电压和电流。可以表

明：损耗本身就是电磁波源，但不同于平面波（事实上各波道间发生联系）。所以，严格说来，应按用行波方程式来考虑损耗，但是，在分析包括修正量的复矩阵时，完全可以假设只存在按指数传播的平面波。

为了计算多导线线路的高频通道，首先要确定各波道的参数（公里衰耗、相移系数或传播速度和波阻抗），然后，再确定在不同接线方式（相一地，相一相等）时，高频通路衰耗和输入阻抗，并要考虑到终端负载情况，有换位和有分支等不均一性。

分析综合复矩阵，其中包含由卡尔松提出的或类似的考虑大地影响的修正方法，是精确计算法发展的重要阶段。为了进行这些计算，必须要有线路结构的数据（悬挂高度，线间距离，导线结构等），大地导电率以及接线方式。由于精确计算多导线线路参数较为困难，可用电子计算机按专用程序计算，但作近似计算则可使用简化公式和图表。

确定高频通道的衰耗  $\alpha$  是计算的重要内容之一，但是，还要求得允许衰耗  $\alpha_{\text{дон}}$  和差值  $\alpha_{\text{дон}} - \alpha$ ，用它来表示衰耗的储备程度。允许衰耗首先与杂音电平有关，这将在第四章讨论。

### 第三章 波道和高频通路的计算

沿地面上一定高度的架空平行导线系统传送单频信号的问题，已由卡尔松用多导线系统电报方程所解决[文献 1、9]。这种解法证明存在所谓波道，其特性用研究的方程组的行列特征根表示。波道的数量由线路的导线数确定。

五十年代前，国外对远距离多导线线路上电磁波传播的理论

的传统研究方法，是分析沿线路电场和磁场强度不变的简化等效电路[文献10—12]。

由麦克斯韦方程近似积分时，得到了问题的解答。

$$\begin{aligned}\operatorname{rot} \dot{H} &= j\omega \varepsilon' \dot{E}, \\ \operatorname{rot} \dot{E} &= -j\omega \mu \dot{H},\end{aligned}$$

式中  $\varepsilon' = \varepsilon - j\sigma/\omega$ ； $\varepsilon$ 、 $\mu$ 、 $\sigma$ ——分别为绝对介电常数，绝对电导率和介质导电率。

从上述方程式确定纵向阻抗和横向导电率，再对由麦克斯韦方程引出的电报方程积分，如卡尔松建议的那样，传播常数由电报方程确定。这一方法相当简单，但不可能精确地估计计算误差和确定各波道传播常数。

1954年建议直接从麦克斯韦方程确定传播常数，解决了单线线路传输问题，考虑了大地影响并估计了各主要假设的误差。[文献4]中此法已应用到导线为水平排列的三导线线路上。为了简单假设每一导线内部轴线周围电流和电荷分布对称时，所得误差并不大。上述工作可认为是在多导线线路上不用等效电路方程，而直接解电磁场方程研究波的过程的首次尝试。

当存在一系列简化条件（其中包括忽略线路的不均一性）时，根据对  $n$  导线线路电报方程的分析，可以认为波道间没有相互的电磁干扰，线路上传输的功率仍可用“迭加原理”[文献13]。

因此电磁能量沿  $n$  导线线路传输过程，看作  $n$  个直射波和反射波传输，每波的电磁能量按各自的波道传播，和其它波道的波过程无关。在线路的不均一点上产生波的折射和反射，各波道间的能量重新分配。线路上传输的全部功率可由下式表示：

$$P = \int_s [EH] ds = \sum_{k=1}^{2n} \int_s [E_k H_k] ds,$$

式中  $E_k$  和  $H_k$ ——相应于  $k$  波道的电场磁场强度。

计算波分量时用卡尔松修正数值计算大地的有限电导[文献14]。

采用矩阵分析，高频通信问题（特别是高压输电线电晕对无线电接收和高频通信通道的干扰）的理论研究方法大大地完善了，因为许多参数可用计算技术计算。

下述波道的分析方法[文献15—18]能确定高频信号沿高压输电线传播的特性。

波道按其波阻抗增大的顺序编号，对单回水平线路，分量 1、2、3 相应于分析工频场时采用的分量  $\alpha$ 、 $\beta$ 、0。

**将高频通路分解成波道。**输电系统的零序、正序和负序电压分量可用三相电压值表示：

$$\begin{vmatrix} U_0 \\ U_1 \\ U_2 \end{vmatrix} = \frac{1}{3} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{vmatrix}, \quad (3-1)$$

或更简单表示为

$$\begin{vmatrix} U_{012} \end{vmatrix} = \frac{1}{3} \begin{vmatrix} a \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} U_{abc} \end{vmatrix}, \quad (3-2)$$

式中  $a$  —— 将对称分量电压  $U_{012}$  变换到相电压  $U_a$ 、 $U_b$ 、 $U_c$  的矩阵。

自终点向一端无限延伸的线路（半无限长线路）可写成下式：

$$U(x, t) = U(0, t)e^{-rx}. \quad (3-3)$$

对无损耗的导线线路，有  $2n$  个方程表示线路任意点  $z$  上电流和电压：

$$\frac{\partial}{\partial z} u_i(z, t) = \sum_j L_{ij} \frac{\partial}{\partial t} i_j(z, t); \quad (3-4)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} i_i(z, t) = - \sum_j C_{ij} \frac{\partial}{\partial t} u_j(z, t); \quad (3-5)$$

式中  $L_{ij}$  和  $C_{ij}$  —— 所研究的  $n$  导线系统导线的自感和互感。

方程 (3-4) 和 (3-5) 可写成矩阵型式：

$|u(z, t)|$  —— 电压  $u_i(z, t)$  列矩阵；

$|i(z, t)|$  —— 电流  $i_i(z, t)$  列矩阵；

$|L|$  —— 电感  $L_{ij}$  方矩阵；

$|C|$  —— 电容  $C_{ij}$  方矩阵。

用上述矩阵符号 (3-4) 和 (3-5)  $2n$  方程简写成：