

中等专业学校教材

# 电力线高频通信学基础

徐 华

中国工业出版社

中等专业学校教材



# 电力綫高頻通信学基础

徐 福 华

中国工业出版社

本书第一章概述电力线高频通信的基本问题和原理。第二至第六章分别介绍关于解决第一章所列问题的基本知识,即:电力线的高频传输特性、旁路影响和加工设备、结合设备的电路和特性、电力线上的杂音干扰、电力线高频通路间的跨越衰减等。第七章则结合电力线高频通路设计与计算基础的概述,对前六章的某些内容作了小结和补充。

本书可作为中等专业学校电力系统通信与运动专业的试用教科书,也可供有关工程技术人员参考。

## 电力线高频通信学基础

徐 福 华

\*

水利电力部办公厅图书编辑部编辑(北京阜外月坛南街)

中国工业出版社出版(北京德胜门内大街10号)

北京市书刊出版业营业许可证出字第110号

五三五工厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

\*

开本 $850 \times 1168^{1/8} 2$ ·印张 $6^{5/8}$ ·字数150,000

1965年5月北京第一版·1965年5月北京第一次印刷

印数0001—3,910·定价(科四)0.85元

\*

统一书号: K15165·3905(水电-509)

## 序 言

我国解放后，电力系统的通信工作得到了蓬勃的发展。特别是1958年以来，在总路线、大跃进、人民公社三面红旗的光辉照耀下，在自力更生精神的鼓舞下，电力系统通信专业职工意气风发，在建立设备制造基地、提高运行维护水平、培养技术人材和开展试验研究等各个方面，取得了巨大的成绩。

在这种情况下，编写电力线高频通信学方面的教材，以满足教学需要和供有关技术人员参考，已是一个迫切的任务。本书就是为此目的，根据我们五、六年来的教学心得，参考有关资料而写成的。写作工作于1962年下半年开始，首先是以讲义形式写出，在班级试用和征求意见，然后再根据试用经验和审阅意见，对讲义进行修改补充。

本书在内容取材上力求贯彻“少而精”的原则，在讲述方式上力求贯彻启发式。但是限于作者水平，这些都未能较好地做到。另外，考虑到目前有关电力线高频通信理论基础的资料比较缺乏和零散，为了便于从事本专业的技术人员参考，对有些从教学上看来本可精简的公式推导，书中还是或详或略地进行了讲述。这一部分内容，对于中技学生来说，可以少讲或不讲。凡属这类公式，都在其序号的右上角加注了符号“\*”。

读者在阅读本书之前，主要应具备电工学基础、有线传输原理以及无线电技术基础等知识。

在写作过程中，承水利电力部技术委员会郭其俭同志不断给予协助，并审阅了全稿；部技术改进局彭淳韶同志、东北电业管理局黄思群同志和华北电力设计院刘祖丰同志，对书稿也都提出了许多宝贵意见。在写讲义和班级试用的过程中，我校施育华、

#### IV

葛家駒等同志对书稿也都随时提出不少宝贵的意見。在此，特对以上各位同志，致以謝意。此外，在編写时还参考了若干資料等，书末未逐一列出。

由于水平的限制，加以电力系统通信专业是一个新专业，尚无現成的教材可供参考，所以本书的缺点和錯誤一定难免，深望讀者多加指教。

徐 福 华

# 目 录

## 序 言

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 第一章 电力线高频通信的组成原理 .....           | 1   |
| 1-1 对电力系统调度通信的基本要求 .....         | 1   |
| 1-2 电力线路的复用 .....                | 2   |
| 1-3 单向单路通信的组成原理 .....            | 7   |
| 1-4 单向多路通信的组成原理 .....            | 11  |
| 1-5 双向多路通信的组成原理 .....            | 14  |
| 第二章 电力线路的高频传输特性 .....            | 18  |
| 2-1 几种基本的研究方法 .....              | 18  |
| 2-2 电力线路传输衰减的分析 .....            | 26  |
| 2-3 分配阻抗和输入阻抗 .....              | 32  |
| 2-4 电力线路传输衰减的基本公式 .....          | 38  |
| 2-5 传输方程式和传输常数、特性阻抗的计算 .....     | 43  |
| 2-6 电力线路的一次参数和大地损失、天气条件的影响 ..... | 51  |
| 2-7 主要参数的测量方法、经验数据和经验公式 .....    | 59  |
| 第三章 旁路影响和加工设备 .....              | 68  |
| 3-1 表征变电站和分支线影响的等效电路和等效阻抗 .....  | 68  |
| 3-2 变电站和分支线的介入衰减 .....           | 74  |
| 3-3 对高频阻波器的基本要求 .....            | 81  |
| 3-4 单频阻波器 .....                  | 84  |
| 3-5 多频阻波器 .....                  | 93  |
| 3-6 宽带阻波器 .....                  | 96  |
| 3-7 线路故障与检修时的影响和携带式接地阻波器 .....   | 103 |
| 第四章 结合设备 .....                   | 107 |
| 4-1 对结合设备的基本要求和耦合电容器 .....       | 107 |
| 4-2 单频和双频结合设备 .....              | 110 |

## V

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 4-3 寬帶結合濾波器 .....            | 111 |
| 4-4 天线耦合 .....               | 123 |
| 4-5 高频桥路 .....               | 127 |
| 第五章 电力綫上的杂音干扰 .....          | 130 |
| 5-1 最低允許杂音防卫度 .....          | 130 |
| 5-2 电力綫上杂音干扰的类型和大小 .....     | 138 |
| 5-3 电力綫載波机的最低允許接收电平 .....    | 146 |
| 第六章 电力綫高频通路間的跨越衰减 .....      | 149 |
| 6-1 电力綫高频通路間的总跨越衰减 .....     | 149 |
| 6-2 同一母綫电力綫路相間跨越衰减的分析 .....  | 154 |
| 6-3 同一电力綫路的相間跨越衰减 .....      | 160 |
| 6-4 变电站的跨越衰减和傳輸衰减 .....      | 164 |
| 6-5 計算实例 .....               | 168 |
| 6-6 增加电力綫高频通路間总跨越衰减的方法 ..... | 174 |
| 第七章 电力綫高频通路的設計与計算基础 .....    | 179 |
| 7-1 电力綫高频通路設計的基本概念 .....     | 179 |
| 7-2 电力綫載波机发送电平的确定 .....      | 181 |
| 7-3 电力綫高频通路总衰减的計算 .....      | 185 |
| 7-4 电力綫高频通路中中間增音机的設置 .....   | 188 |
| 参考資料 .....                   | 196 |

# 第一章 电力綫高频通信的組成原理

## 1-1 对电力系统調度通信的基本要求

安全地供应优质电力，是工农业生产以及其他方面用戶，对电力生产的基本要求。为了以最經濟的方式滿足这一要求，必須采取一种适宜的生产組織和管理形式。这就是必須将分散在广大地区內的发电厂、各級輸、变电設備及用电設備，联接成一个整体——电力系统，并成立担任生产的組織和指揮任务的調度机构，以便合理地分配与調整各发电厂、变电站的发、供电任务，实行严格的操作管理，采取迅速統一的行动，以防止和处理事故。

为此，調度机构必須掌握系統中諸設備的运行及检修情况，并向发电厂、变电站发出調度命令。这就要求有一个相应的通信系統<sup>①</sup>。

在电力系統中进行着的是能量的变换与傳輸过程，而在由通信系統和調度員（或专用电子計算机）等所构成的完整系統中，則进行着信息的变换、傳輸、儲存与加工的过程。前一过程只有在后一过程的制約下，才能正常进行〔參33〕。

所謂相应的通信系統，就是能够滿足以下两个基本技术要求的通信系統，

1) 质量上：迅速、可靠。这是由电力系統的运行特点所决定的。例如，电力是不能儲存的，生产量与消耗量之間必須時刻平衡，这就要求調度員及时进行頻率調整。再如，电力系統中所

● 本书根据現代通信理論的观点，对通信一詞作广义的理解，即指任何形式的信息傳輸，例如：电话、电报、运动或高频保护等形式的信息傳輸。



有发、供电设备，在运行过程中是一个统一的联动体，任何一台设备发生事故，处理稍有迟延或不当，就会在瞬间内波及全系统，引起大片地区的停电或贵重设备的损坏，而造成很大的甚至不可估计的损失。这些都要求有迅速可靠的通信。

这种要求，对孤立的发电厂来说，是未曾被强调过的。它与人们对普通长途通信的要求相比，也是高得多的。

2) 数量上，通路相当多、距离相当长。由于电力系统的组织特点，受调度机构指挥的厂、站数目相当多，分布相当广，而调度机构应与所有这些厂、站都建立通信联系。因此，通信电路（以下简称通路）的数目应相当多，距离相当长。

只有尽量满足上述的技术要求，才能充分发挥电力系统这种生产组织形式的优越性。

随着工业、农业、国防和科学技术的日益发展，对供电的安全和质量方面的要求将愈来愈高。同时，电力的生产与建设，又必须坚持经济原则。这就必然导致电力系统本身的不断发展，运行水平日益提高，系统结构日益复杂。从而，对电力系统调度通信的技术要求，也将愈来愈高。

在设计和改进通信系统时，如果仅仅考虑到技术要求，问题将是比较简单的。但是，实际上还必须考虑到经济要求（尽可能减少初建费和维修费等）；而经济要求与技术要求之间又往往是有矛盾的，需要寻求最佳解决方案，问题就比较复杂了。

## 1-2 电力线路的复用

现在进一步研究怎样满足对调度通信的技术-经济要求，也就是说，怎样解决技术要求与经济要求之间的矛盾。

首先必须指出，由于对调度通信的技术要求很高，电力部门必须为此拥有专门的通信系统，设置专门的通信组织，而不能依靠邮电部门。

究竟应该选择怎样的专门通信系统，才能满足对调度通信的技术-经济要求呢？

一般说来，通信系统就是将信号由发信者传递到收信者的传输系统。因此，它首先必须包括传输信号的物理介质，即所谓的通信线路。通常，这是一对导线，或是发信机与收信机之间的无线电波传播空间。同时，在发信端发信者所发的信号，其形式一般并不适宜于在所用的通信线路上传输，必须进行适当的变换。这一变换由发信机来完成。在收信端，则为了适宜于收信者接收，信号必须进行相应的逆变换；这由收信机来完成。

由此可见，通信系统应由通信线路、发信机和收信机三部分组成，如图1-1所示〔参40第3页〕。其中通信线路是通信系统的主要组成部分，它的形式对通信系统的结构起着决定性的作用。因此，通信方式往往也就按通信线路的形式来命名。

可以说，应该选择怎样的通信系统的問題，主要就是应该选择怎样的通信线路的問題。

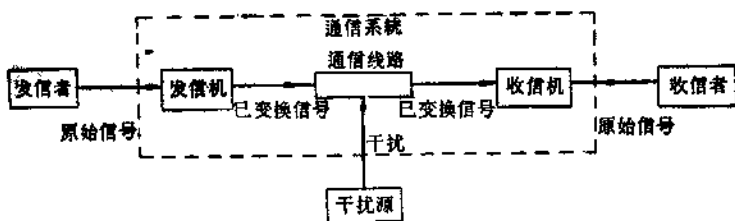


图 1-1 通信系统的方框图

选用无线电波的传播空间，作为通信线路，对调度通信说来，一般并不适宜。这是因为无线电通信一般具有干扰电平较高、工作不够稳定、通路数目较少和保密性较差等缺点。

应该指出，超短波无线电接力通信，却是一个例外，它没有

上述缺点，故在电力系统中正在日益得到广泛的应用。

不过，从经济观点来看，超短波通信仅宜用于以下几种情况，即：1）需要通路数量较多的主干路；2）系统中心调度所对系统中的主要电源或负荷的集中地；3）受某些特殊限制（如地形、气象等）的地区。

选用一对导线作为通信线路，可使调度通信具有很高的稳定性和良好的保密性，并获得大量的通路。

但若选用普通的架空明线，则将在线路设备上花费很大的初建费用及维修费用，并且由于它的机械强度和绝缘水平并不太高，很难在恶劣的天气条件下（一般，这正是最需要调度通信的时候），保证可靠的通信。

电缆线路固然极为可靠，但却过于昂贵。

这就促使人们考虑选用电力线路兼作通信线路，即复用电力线路的问题。下节将说明，为了复用电力线路，必须采用相当高的信号频率。因此，这种通信方式，特称为电力线高频通信。

复用电力线路的主要优点在于：

1）经济方面：根本不需要专门的线路初建费用。当然，它比普通有线通信，在每一终端，要多一笔设备投资。不过，由于调度通信的距离长，这笔投资比线路的初建费用要少得多。

另外，不需专门的线路维修费用。

2）技术方面：对电力线路说来，绝缘水平很高，杆塔的机械强度很大，导线很粗。因此，即使在大风、暴雨或冰冻的情况下，通信也很难中断，可靠性极高。

但是，复用电力线路，在技术上也存在着下列主要缺点：

1）通常，电力线路是不对称的多导线系统。考虑到双回路和架空地线时，其导线可多达8根。并且通信设备一般也是按不对称方式（相-地结合方式）接入的。另外，电力线路导线之间的距离与导线对地距离相差不大，地中电流起着重大的作用。所

有这些特点，使得高频电流沿电力线路的传输，情况复杂，规律特殊，需要进行专门的研究，而不能直接搬用一般有线传输原理的理论成果。

2) 电力设备和分支线对高频电流的传输，起着极为不利的旁路作用等影响（以后简称为电力通路的旁路作用），而这些影响很难加以彻底克服。

3) 电力线上存在着强大的电力电流，它有串入通信设备中损害人身和设备的危险。这可看作复用电力线路时所遇到的特有的干扰（以后简称为电力干扰）。

4) 由于电量现象和绝缘子放电等原因，在很宽的频谱内存在着很高的杂音电平。同时，在音频范围内，也存在着由于工业频率的强电流的谐波所产生的很强的杂音。这就给克服杂音形式的干扰，带来特殊的困难。

5) 相邻的电力线路是通过变电站母线而联系起来的，对高频电流来说，它们之间的跨越衰减是不大的，并且是难于掌握与控制的。这就给克服邻近通路信号的影响，即所谓串音干扰，带来特殊的困难。

所有这些缺点，都是由电力线路的主要用途（传输工业频率的强电流），以及为此用途而采用的系统结构所决定的。

尽管如此，与上述的各种通信线路相比，总的说来：只要能采取有效的技术措施，克服上述缺点，电力线路的复用，还是比较适合于对调度通信的技术-经济要求的。因此，到目前为止，在国内外的电力系统中，电力线高频通信是主要的通信方式。

为了最大限度地满足对调度通信的技术-经济要求，必须充分复用电力线路。所谓充分复用，全面地看应包括广度和深度两个方面，

1) 广度方面：力争各种类型的电力线路，不管其结构多么复杂，不管其距离多么长，都能兼作通信线路之用。这就要求克

服严重的杂音干扰，克服严重的电力设备和分支线的旁路作用等影响。自前已普遍复用了220千伏和110千伏电压的线路，并在复用更高和更低电压的线路方面，成功地进行着试验推广工作。

2) 深度方面：力争在同一条电力线路上，建立足够数量的通路（即多次复用），以供电话、远动、高频保护以及其它形式的信息传输之用。这就要求克服两种形式的干扰：多路通信时出现的邻近通路信号的影响，即所谓的串音干扰；双向通信时出现的反方向通路信号的影响，这似可称为反向干扰。此外，尚需克服邻近通路的旁路影响<sup>①</sup>。

这样，采用电力线高频通信，虽然解决了前面提及的对调度通信的技术要求与经济要求之间的矛盾，但是由于紧接着又提出了对电力线高频通信的技术要求，即克服电力、杂音、串音和反向等形式的干扰，克服各种旁路影响，以保证信号传输的正确性，同时又应坚持经济要求，所以又出现了新的技术要求与经济要求之间的矛盾。

看来，电力线高频通信学，就是研究高频信号沿电力线路传输的特殊规律，研究抑制各种特有形式的干扰作用和旁路影响的原理和方法，以及研究如何据此采取最有效的技术措施，来合理解决特有的技术要求与经济要求之间的矛盾的一门学科。它正在大量的科学实验和理论研究的基础上，逐步形成。从某种意义上说，它是长途电信学的一个新兴的分支。

本书第二章主要研究与克服上述的第一个缺点有关的问题；第三章——第二个缺点；第四章——第三个缺点；第五章——第四个缺点；第六章——第五个缺点。

---

① 从理论上讲，各种形式的旁路作用，也可看作一种特殊形式的干扰。从而，所有通信技术问题，都可以归结为抗干扰问题。不过在研究技术措施时，本书仍将它与干扰当作两个不同的对象。

### 1-3 单向单路通信的組成原理

为了便于分析，首先研究复用电力线路以实现单向单路通信的原理。

在上节中已经指出，电力通路对电力线高频通信的影响有三：

- 1 ) 强大的杂音干扰；
- 2 ) 危险的电力干扰；
- 3 ) 很大的旁路作用。

为了抑制电力干扰和旁路作用，必须赋予信号电流某种特有的物理标志，以便与电力电流相区别，并采用相应的划分设备，使它根据物理标志，对需要的电流起反应，而对不需要的电流不起反应，从而使得：(1) 在电力设备或分支线中，仅有电力电流通过，而无信号电流漏入；(2) 在电信设备中，仅有信号电流通过，而无电力电流串入。

理论上，任何一种电流特性，例如，频率、时间或波形等，都可用作物理标志。但是对实现上述划分任务来说，频率是比较适宜的标志。滤波器（高频阻波器和结合滤波器）是相应的划分设备。这也就是长途电信技术中最常用的频率划分法。

电力电流的频率为50赫，原始信号的频率与它之间的差别，一般不够显著。例如，对电话来说，传输的频谱一般为300~2700赫，与50赫相差不大，不利于划分。因此，必须在发信端由发信机进行频率变换，以使沿电力线路传输的信号电流具有相当高的频率；而在收信端则由收信机进行频率的逆变换。

以后将会看到，由于多种因素的限制，对于35~500千伏的架空电力线路来说，将信号频率选择在30~500千赫范围内，是比较适宜的。

收、发信机与电力线路之间的可能结合方式是多种多样的

(图1-2)。其中相-地结合方式应用最广，其具体连接情况如图1-3所示。

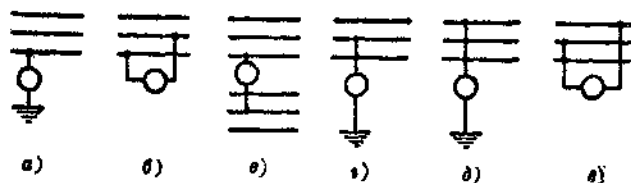


图 1-2 高频设备与电力线路間各种可能的結合方式

a—相-地；b—相-相；c—不同线路的相-相；d—两相-地；e—三相-地；f—两相-相

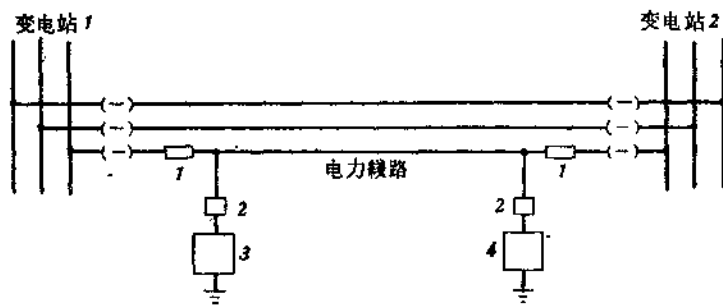


图 1-3 最简单的高频通路的设备连接示意图

1—高频滤波器；2—結合设备；3—最简单的发信机；4—最简单的收信机

为了便于组成原理的分析研究，对图1-3所示的设备连接情况，特引入另一种表示方法（图1-4, a）。复用音频通信线路，以进行单向单路通信的简化方框图，如图1-4, b所示。

由此可见，在抑制所复用的线路上原来电流的干扰和其它无关设备的旁路作用上，复用工频电力线路与复用音频电信线路时所用的原理和方法基本相同。所谓結合加工设备和线路滤波器，都不过是频率划分设备。

不过由于工频电力电流是强电流，而音频信号电流是弱电

流，其間有着重大的差別，所以在高頻頻率的选择和划分設備的构造上，都大不相同。

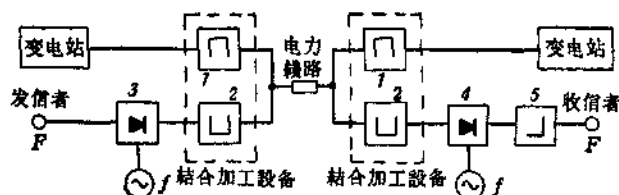


图 1-4, a 图 1-3 所示设备连接的另一种表示法

1—高频阻波器；2—結合设备；3—变频器；4—反变频器；5—低通滤波器

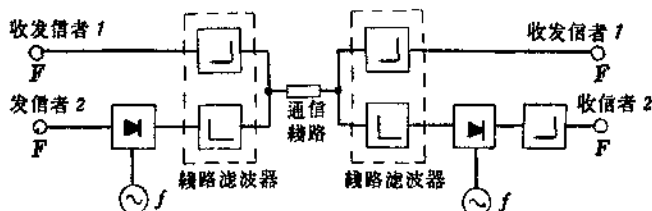


图 1-4, b 复用音频线路时抑制相互干扰和旁路作用的方框图

若在抑制其他形式的干扰和旁路影响上，将电力线高频通信与电信线高频通信作一比较，也能得出类似的结论〔参 2，图 2-1~2-6〕。

以下研究抑制杂音的问题。

实际上，不可能也不必要彻底抑制杂音，只要将它限制在允许的范围內，以便受信者能进行划分就够了。为了定量地表达这点，特初步引入杂音防卫度  $\xi_n$  的概念（在第五章中还要作进一步阐述）。它可定义为：

$$\xi_n = \frac{1}{2} \ln \frac{P_{c, \kappa}}{P_{n, \kappa}} = p_{c, \kappa} - p_{n, \kappa}, \quad (1-1)$$

其中  $P_{c, \kappa}$  和  $p_{c, \kappa}$ ——受信机输入端的信号功率和电平；

$P_{n, \kappa}$  和  $p_{n, \kappa}$ ——受信机输入端的杂音功率和电平。



为了获得满意的通信接收，必须保证：

$$\xi_n \geq K_n \quad (1-2)$$

其中  $K_n$ ——决定于信号、杂音和收信者类型的一个常数。

又因：

$$p_{c,n} = p_{c,u} - b_z,$$

其中  $p_{c,u}$ ——发信机输出端的信号电平；

$b_z$ ——信号由发信机输出端传至收信机输入端所受的总衰减。

将此式代入(1-1)式，得：

$$\xi_n = p_{c,u} - p_{n,n} - b_z. \quad (1-3)$$

由此可见，用数学语言来说，抑制杂音问题，就是保证关系式

$$p_{c,u} - p_{n,n} - b_z \geq K_n$$

成立的问题。

不难看出，解决这一问题的可能途径有三：

1) 增大  $p_{c,u}$ 。实现这点的普通方法是在发信机中设置放大器。

2) 减小  $p_{n,n}$ 。实现这点的普通方法是在收信机中设置滤波器。

3) 减小  $b_z$ 。这主要与减小各种旁路影响和线路衰减有关。

总之，电力线路，与抑制电力干扰、杂音干扰和所述的旁路作用有关的诸设备，以及保证足够音量的放大器等设备的总和(图1-5)，构成了一个完整的单向单路通信电路，保证了信号

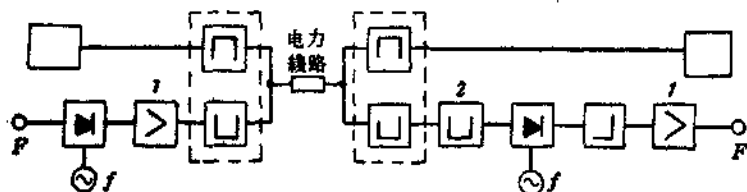


图 1-5 单向单路通信的方框图

1—放大器；2—抑制杂音用滤波器