

# 低压电力线通信信道特性

房曙光

(无锡商业职业技术学院电子工程系, 江苏 无锡 214153)

**摘要:** 低压电力线作为通信线路, 其信道特性对通信质量具有重要影响, 对低压电力线信道特性和信道建模问题做出分析, 以期对电力线通信研究提供一定的理论依据。基于对国内外科学资料的分析归纳, 得出电力线信道输入阻抗随频率的升高而呈上升趋势, 电力线信道噪声由各种特定性质的噪声源叠加而成的, 电力线信号的衰减是距离的函数并与频率有关, 以及建立定量模型的可行性。通过该文研究低压电力线通信应建立在合适的通信频段并应采用具有强抗干扰措施的调制方式。

**关键词:** 低压电力线; 信道特性; 阻抗特性; 噪声特性; 信号衰减特性; 信道建模

## Characteristics of low voltage power line communication channels

FANG Shu-guang

(Electronic Engineering Department, Wuxi Institute of Commerce, Wuxi 214153, China)

**Abstract:** Using low voltage power line as communication channel, its channel characteristics will affect the quality of communication greatly. This paper analyses low voltage power line channel and channel modeling, in order to supply theoretical foundation for power line communication study. Based on the analysing and generalizing scientific data, this paper concludes that power line channel input impedance presents ascend trend following frequency arising, power line channel noise is repeated addition by varied noise sources, power line signal attenuation is the function of distance and related to frequency, and quantity modeling is impossible. Depending on the study of this paper, low voltage power line communication should select proper frequency channel and adopt modulation system possessing strong anti-interference characteristics.

**Key words:** low-voltage power line; channel characteristics; resistance characteristics noise characteristics; signal attenuation characteristics; channel modeling

中图分类号: TP274; TM76 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)22-0053-04

## 0 引言

通信技术的高速发展需要通信线路布线的同步, 同时也为通信线路建设带来了很大的挑战, 特别是对一些老建筑物的通信线路布线更是困难, 但只要有建筑物就会有电力线, 利用低压电力线作为通信线路可以减少投资和对线路的维护成本, 然而, 低压电力线并非专用通信线路, 这就要求我们对低压电力线信道特性有全面深入了解, 在此基础之上合理选择调制解调方式及通信协议实现可靠数据通信。

## 1 阻抗特性

低压电力线的输入阻抗是信号发送装置和信号接收装置驱动点上电力网的阻抗, 它直接影响了信号耦合的效率, 是低压电力线传输特性的重要参数。

研究输入阻抗, 对于提高发送机的效率, 增加网络的输入功率有重大意义。1973年, J.R.Nicholson 和 J.A.Malack 就公布了他们对美国36个未滤波的商业电源  $115V_{AC}, 1\phi; 220V_{AC}, 1\phi; 208V_{AC}, 3\phi$  等所进行的阻抗测量结果, 并与一个典型  $5\mu H$  阻抗平衡网络提供的阻抗进行了对照, 结果表明商业电源阻抗随频率升高有上升的趋势(平均从  $2\Omega$  到  $100\Omega$  左右变化), 在  $150kHz$  到  $25MHz$  频率范围内, 一个  $5\mu H$  阻抗平衡网络可以很好地描述商业电力线阻抗的平均值。1976年 J.A.Malack 和 J.R.Engstrom 公布了在相同的频率范围内, 对6个欧洲国家的86个商业电源  $220V_{AC}, 1\phi/3\phi; 110/220V_{AC}, 3\phi; 220/380V_{AC}, 3\phi; 380V_{AC}, 3\phi$  等所进行的阻抗测量结果, 表明欧洲各国之间商业电源的阻抗值变化不是很大, 并且在整个 LF~HF 频段上 ( $20kHz\sim 30MHz$ ) 与在美国商业电源上测得的阻抗值相似, 而

在 MF~HF 频段上 (300 kHz~30 MHz) 则两者完全一致。1985 年, R. M. Vines 等人对 5~20 kHz 低压电力线上的阻抗进行了测量, 并对决定低压配电网阻抗的配电变、线路 (包括引入电缆和室内线) 和电气负荷分别进行了阻抗的测量, 得出如下结论: 配电变二次侧阻抗类似一个 RL 电路阻抗, 阻抗值随频率升高而增加, 并有较大的相角移动; 在低压配电网发生的谐振 (并联时为低频, 串联时为高频) 一般在 40 kHz 以上, 这使得配电网的阻抗在高频时比在低频时 (5~20 kHz) 更加不可预测, 这样的谐振常常是由容性负载 (如电视 (0.1 μF)) 引起的; 连接线的电感试图隔离网络中的各元件, 并在高频时消除远方连接负荷的影响; 连接房屋和配电变的线路对阻抗的影响一般较小, 但如果配电线没有扭绞在一起, 可能会有比较大的影响; 在各种负荷中, 电阻性供热负荷在低频时会引起较大的阻抗变化, 这是因为在电路回路中并入了电阻和电感, 感应电机负载不会改变千赫兹级频率下的阻抗, 这是因为负载本身的电抗很大。

研究表明低压配电网的输入阻抗随频率的升高而呈上升趋势, 在 100 kHz 频率以下的阻抗值一般很低, 单个住户的阻抗在 9~95 kHz 频率下已经低到 2 Ω, 这就要求信号发送装置具有低输出阻抗 (<1 Ω)。由于随机负荷的影响, 低压配电网的输入阻抗变得不可预测, 在不同时间或不同位置, 阻抗值可能发生较大的改变。基于这点采用高频率载波是有利的, 它可以消除远方负荷的影响, 使低压配电网的输入阻抗相对稳定, 不过这样可能产生容性负载引起的谐振和大的信号衰减。

## 2 噪声特性

低压电力线的噪声强度在不同电网上有所区别, 并且具有时变性, 文献 [3] 指出即使在同一栋住宅公寓大楼, 其平均噪声水平在 24 h 内的变化也可高达 6 dB, 因此, 很难直接定量地表示其大小。但噪声也具有一定的规律性, 比如, 噪声随频率的增高而呈下降趋势, 并且无论噪声多么复杂, 它都是由各种特定性质的噪声源叠加而成的。

### 2.1 噪声分类

#### 2.1.1 具有平滑频谱的噪声

该类噪声的功率谱密度 (power spectral density) 相对较低, 是频率的衰减函数, 它主要是由线路上与电力系统频率不同步的各种负载所产生的, 其功率谱密度随时间变化较慢, 常常在几分钟或几小时内保持平稳变化, 在短时间内变化不大, 可以看作是背景噪声。

#### 2.1.2 与系统频率无关的窄带噪声

这类噪声大多数为带调制幅值的正弦干扰信号。它主要是由引入电力线的广播频带信号引起, 它在夜间有最高幅值, 白天相对较低。

#### 2.1.3 与系统频率同步的周期脉冲噪声

这主要是由可控硅整流 (SCR) 引起的噪声, 它每 50 Hz 周 (美国为 60 Hz) 要切换一定次数, 引起在时域上的一系列噪声脉冲, 或在频域上的工频的更高次谐波噪声。文献 [4] 测得白炽灯灯光调节器由于可控硅或其它整流元件的快速通断产生 60 Hz 谐波噪声, 对于 400 W 的白炽灯, 在 10 kHz 其噪声水平可以达到比正常背景噪声高 40 dB, 而且在更高频率上产生的噪声甚至会更高。

#### 2.1.4 与系统频率无关的单事件脉冲噪声

电网中有各种各样的开关操作, 会在电网中产生突发噪声。测量结果显示, 这种脉冲噪声的持续时间为几微秒到几毫秒, 脉冲噪声的出现时间具有随机性, 其频度平均每秒远远少于一个, 它按微秒和毫秒级单位时变, 在这样的脉冲发生时, 噪声的功率谱很高, 可引起数据传输中发生位或串的突发性错误。

## 2.2 噪声模型

针对以上噪声基本分类, 下面根据相关文献资料对用某些特性参数描述噪声的模型做出介绍。

### 2.2.1 背景噪声

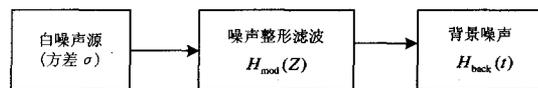


图 1 背景噪声的生成

Fig.1 Background noise generated

背景噪声可按图 1 用白噪声源经过滤波生成, 噪声整形滤波的传递函数  $H_{\text{mod}}(Z)$  可描述为:

$$H_{\text{mod}}(Z) = \frac{B(Z)}{A(Z)} = \frac{1 + \sum_{i=1}^m b_i z^{-i}}{1 + \sum_{i=1}^n a_i z^{-i}} \quad (1)$$

其分子  $B(z)$  表示的是移动平均 (MA) 部分, 其分母  $A(z)$  表示的是自回归 (AR) 部分, 模型参数由噪声源的方差和滤波器系数组成。通过使用 AR 处理模型, 即:  $B(z)=1$ , 参数可以由用 AR 频谱分析仪测量的噪声信号确定。

#### 2.2.2 窄带干扰

窄带噪声部分可通过如下  $N$  个独立的正弦函数叠加来描述:

$$N_{\text{narrow}}(t) = \sum_{i=1}^n A_i(t) \sin(2\pi f_i t + \phi_i) \quad (2)$$

其中:每一个分量由它的频率  $f_i$ 、幅值  $A_i(t)$  和相位  $\phi_i$  来描述。幅值  $A_i(t)$  在时间上既可以是常数,也可以是对 AM 广播信号更好近似的调制幅值。载波相位可以在区间  $[0, 2\pi]$  上用随机数选择,并独立于时间。噪声既可在时域中合成,也可先在频域合成,再通过快速傅立叶反变换(IFFT)得到。

### 2.2.3 脉冲噪声

脉冲噪声对低压电力线通信的危害十分严重,其对数据传输的影响主要是由脉冲的幅度、脉宽和间隔时间决定。1989年 Chan. M. H. L 提出了脉冲噪声的幅度、脉宽和间隔时间的概率分布估计,根据测量结果得出结论:脉冲噪声强度一般比背景噪声水平高 10dB,有时可以超过 40 dB,脉冲强度与噪声源的强度及噪声源与接收装置的距离有关;主要脉冲系列的脉冲频率(由脉冲间隔时间决定)一般为 120 Hz,它与 60 Hz 电源电压的正负周期同步;对于 120 Hz 脉冲噪声,其脉宽变化达到几个百分点;脉宽与所选定的幅度水平  $T$  有关,一般来说,脉冲宽度随  $T$  增加而减小;有些噪声源将增加背景噪声功率(如真空吸尘器),其它一些将增加脉冲噪声功率(如复印机以 0.01 的概率产生高于背景噪声 27 dB 的 120 Hz 周期脉冲,灯光调节器以同样的概率产生高于背景噪声 40 dB 的脉冲噪声)。

考虑到脉冲为随机事件的事实,其特性用随机变量来描述,可以通过分割马尔科夫链对脉宽和脉冲间隔时间进行模拟。假定把噪声状态分成两组  $A(i=1,2,\dots,\nu)$  和  $B(i=1+\nu,2+\nu,\dots,n)$ ,  $A$  中的  $\nu$  个状态表示没有脉冲事件发生的情况,  $B$  中的  $\omega=n-\nu$  个状态表示有脉冲事件发生的情况。则脉冲宽度大于某个宽度  $t_\omega$  的概率,用离散时间  $k$  表示为:

$$P_\omega(k) = \sum_{j=1}^{\omega} g_{\omega+1,j} \cdot g_{jj}^k \quad (k=1,2,\dots) \quad (3)$$

其中:  $g_{\omega+1,j}$  表示从  $B$  中的某个状态  $j$  向临界状态  $\omega+1$  过渡(脉冲开始消失)时的转移概率,  $g_{jj}$  表示  $B$  中的某个状态不发生状态转移(脉冲保持)的概率。脉冲间隔时间超过某一时间跨度  $t_A$  的概率,用离散时间  $k$  表示为:

$$P_A(k) = \sum_{j=1}^{\nu} u_{\nu+1,j} \cdot u_{jj}^k \quad (k=1,2,\dots) \quad (4)$$

其中:  $u_{\nu+1,j}$  表示从  $A$  中的某个状态  $j$  向临界状态  $\nu+1$  过渡(脉冲开始发生)时的转移概率,  $u_{jj}$  表示  $A$  中的某个状态不发生状态转移(无脉冲保持)的概率。

## 3 信号衰减特性

低压电力线一般由铝或其它电的良好导体加工而成,其本身的阻抗很小(视导线的电导率和截面积不同而不同)。对不同频率的信号,其阻抗略有变化且相对稳定。因此,电力线本身的阻抗并不是产生衰减的主要原因。但是电力线上并联的许多负载对信号衰落影响很大。尤其是那些用于调整电网功率因数的大电容,对几百千赫兹的载波通信信号来说,相当于短路。另外,当负载很小时,信号发送装置耦合电路的内阻也不可忽视,它会分去相当一部分的功率。可见,低压电网信号衰减由两部分组成:一是耦合衰减;二是线路衰减。耦合衰减是由载波通信模块与线路输入阻抗不匹配引起的,可以通过适当调整通信模块输出电阻来改善。而线路衰减的主要原因是电网结构复杂,负载具有多样性和时变性,这种衰减特性难以预测。理论上,我们可以将耦合器的内阻做得相当小,这样衰减就主要取决于线路的衰减。试验表明,信号的衰减是距离的函数,一般为 40~100 dB/km。在农村的衰减最大,500 m 就达到 50 dB;在城市,250 m 大约 20 dB;在郊区,250 m 亦能达到 25 dB;但在工业区衰减较小,750 m 长的线路仅为 30 dB。并且信号在 100 kHz 以下的衰减相对稳定,在 100 kHz 到 200 kHz 之间以 0.25 dB/kHz 的比例线性增长,信号衰减与频率有关是由电抗性负载和传输线效应引起的。传输线效应包括反射和多峰抵消,这引起网络中某些特定点出现窄带衰减。频率越高传输线效应越明显,发生谐振的可能性越大。除了衰减较高以外,电力线信道的另一个典型特征是多径衰落,从而产生频率选择性衰落。

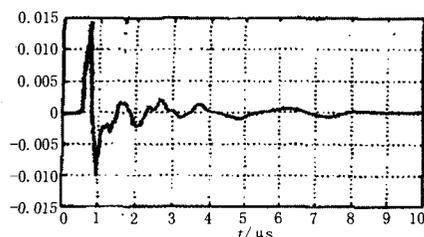


图2 电力线信道的冲激响应

Fig.2 Impulse response of power line channel

图2所示为电力线信道的冲击响应,可以看出电力线信道的冲击响应表现为多个冲击函数的叠加,每个冲击函数的幅值递减,表明电力线信道是一种多径信道。另外,发送和接收装置跨相传输时信号衰减比同相传输时大,可以通过在相间加耦合电容来消除。

## 4 低压电力信道模型

通过以上对电力线信道特性的分析,可知建立一个精确数学模型来模拟低压电力线信道特征存在极大困难,但建立一个能反映信道基本特性的近似模型是可行的,也是有必要的,这对于研究低压电力线载波通信的调制、编码、传输和解调有很重要的意义。文献[5]提出了一个简单的电力线通信通道模型,如图3所示。

通道滤波的频率响应  $h(f, t)$  随电气负荷的改变表现为时变性,衰减  $A(t)$  常常具有 120 Hz 的频率,当然也包括其它周期分量,其对噪声也有衰减作用,噪声衰减和信号衰减的相对比值为  $B$ 。这些参数的确定有赖于对线路和负荷有关信息的了解。文献[6]采用自顶向的方法,把电力线信道看作一个黑匣子,并用一个传递函数来描述它的传递特性,实际上是把图3中的  $A(t)$  并入到  $h(f, t)$  中。

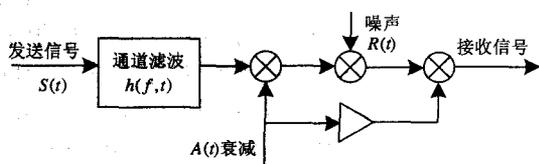


图3 低压电力线信道模型

Fig.3 Model of low power line channel

考虑到低压配电网实质上是由无数个‘T’形结构组合而成,文献中推导得到了低压电力线传递函数的多径信号传播模型:

$$H(f) = \sum_{j=1}^n g_j \cdot e^{-(a_0 + a_1 f^k) d_j} \cdot e^{j 2\pi f \frac{d_j}{v_p}} \quad (5)$$

式中:  $j$  为路径号,也可表示信号经过不同路径到达的先后次序,1 为最短路径。第一项  $g_j$  为路径  $j$  的权系数(考虑路径中的反射和透射系数而定);第二项为衰减部分,其中  $a_0$ 、 $a_1$ 、 $k$  为电力线的衰减参数,  $d_j$  为路径  $j$  的长度;第三项为时延部分,  $v_p$  为波在电力线上的传播速度,  $\tau_j = \frac{d_j}{v_p}$ ,  $\tau_j$  表示路径  $j$

的时延。在 500 kHz 到 20 MHz 频率范围内,通过对一个已知结构的示例网络和未知结构的实际网络进行测试,验证该模型能够反映低压电力线对信号传播的本质特性。在对未知结构的实际系统的测量中,路径的长度  $d_j$  可以由测得的路径时延  $\tau_j$  求得。

## 5 结束语

随着对低压电力线载波通信需求的增加,以及实现技术可行性的提高,研究低压电力线信道特性变得越来越重要。尽管建立一个通用的精确模型来模拟所有的低压配电网信道情况非常困难,甚至是不可能的,但建立一个能反映电力线信道基本特征的近似模型却是可能的,也是有必要的。本论文具体分析了低压电力线信道中阻抗特性、噪声特性、信号衰减特性及信道模型问题,信道输入阻抗随频率的升高而呈上升趋势,电力线信道噪声由各种特定性质的噪声源叠加而成的,电力线信号的衰减是距离的函数并与频率有关,这一切决定了在电力线通信中应合理选择通信频率及采用具有较强抗干扰措施的调制模式。

### 参考文献

- [1] ZHANG You-bing, WU Xin. Modelling of the Channel for Low Voltage Power Line Carrier Communication[J]. Relay, 2002, 30(5).
- [2] GAO Feng, DONG Ya-bo. Signal Transmission Characteristic Analysis in Low Voltage Power Line Carrier Communication[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(7): 36-40.
- [3] Van Der Gracht P K, Donaldson R W. Communication Using Pseudonoise Modulation on Electric Power Distribution Circuits[J]. IEEE Trans on Communications, 1985, 33(9): 964-974.
- [4] Vines R M, Trussell H J, Gale L J. Noise on Residential Power Distribution Circuits[J]. IEEE Trans on Electromagnetic Compatibility, 1984, 26(4): 161-168.
- [5] Nicholson J R, Malak J A. R F Impedance of Power Lines and Line Impedance Stabilization in Conducted Interference Measurements[J]. IEEE Trans on Electromagnetic Compatibility, 1973, 15: 84-86.
- [6] Zimmermann M, Dostert K. A Multi-Path Signal Propagation Model for the Power Line Channel in the High Frequency Range[A]. In: Proceedings of 3<sup>rd</sup> International Symposium on Powerline Communications and Its Applications[C]. Lancaster(UK): 1999.

收稿日期: 2007-03-29;

修回日期: 2007-04-10

作者简介:

房曙光(1970-),男,讲师,工学硕士,研究方向电力载波通信。E-mail: fsg\_99@163.com