

# 低压电力线载波通信中信道模型的研究

张有兵, 何海波, 吴昕, 周拥华, 程时杰

(华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 将低压电力线用作通信信道具有其特有的优势,但同时它又具有阻抗低、噪声强、信号衰减大和时变性等缺点,为了保证其通信质量和提高通信速率,有必要研究合适的信号调制、编码、传输和解调方法,在进行这些研究时,信道是必不可少的。该文通过各种测量结果的分析 and 噪声模型及信号传播模型的研究,认为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相当困难,甚至不可能,但建立一个能反映通道基本特征的近似模型却是可能的,也是有必要的,它的建立可为低压电力线载波通信研究提供有效的手段。

**关键词:** 低压电力线; 载波通信; 信道模型; 噪声特性; 阻抗特性; 衰减特性

**中图分类号:** TM73      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1003-4897(2002)05-0020-05

## 1 引言

随着配电网自动化程度的提高,低压电力线作为通信信道的需求变得日益突出。同时,Internet的突破进展带来了更大带宽的需求<sup>[1]</sup>,而电信和电力市场的开放为电力公司介入飞速增长的Internet业务提供了契机,若能够把配电网升级为宽带接入网,将具有巨大的应用前景。

由于低压电力线上负荷的多样性和时变性,以及复杂的网络结构,低压电力线载波信道表现出低阻抗、高噪声、信号衰减大和时变性等特点。因此,对于这样的通道,要保证通信质量和提高通信速率,必需选择合适的专用通信系统。而为了选择合适的信号调制、编码、传输和解调方法,就需对通道特性有详细的了解,因此,建立低压电力线载波通信信道模型变得尤为重要。

## 2 输入阻抗特性的研究

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。

早在1973年,J. R. Nicholson和J. A. Malack<sup>[2]</sup>就公布了他们在20kHz到30kHz范围的25个离散频率下,对美国36个未滤波的商业电源115V<sub>AC</sub>,1 $\phi$ ; 220V<sub>AC</sub>,1 $\phi$ ; 208V<sub>AC</sub>,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的升高有上

升的趋势(平均从2到100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<sup>[3]</sup>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<sub>ac</sub>,1 $\phi$ ,3 $\phi$ ; 110/220V<sub>ac</sub>,3 $\phi$ ; 220/380V<sub>ac</sub>,3 $\phi$ ; 380V<sub>ac</sub>,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~30MHz)与文[2]中报道的在美国商业电源上测得的阻抗值相似,而在MF~HF频段上(300kHz~30MHz)则两者完全一致。

1985年,R. M. Vines等人<sup>[4]</sup>进行了在5~20kHz频率下的低压电力线上的阻抗测量,并针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,得出了如下结论: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40kHz以上,这使得配电网的阻抗在高频时比在低频时(5~20kHz)更加不可预测,这样的谐振常常是由容性负载(如电视(0.1 $\mu$ F))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,其效果是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。

所有研究表明低压配电网的输入阻抗随频率的

基金项目: 中华电力教育基金会许继奖教金资助项目。

升高而呈上升趋势,在 100kHz 频率以下的阻抗值一般很低,单个住户的阻抗在 9~95kHz 频率下已经低到 2<sup>[5]</sup>,这就要求信号发送装置具有低输出阻抗 (<1)。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,阻抗值均可能发生较大的改变。从这一点来说,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,不过这样可能会产生由容性负载引起的谐振和大的信号衰减。

### 3 噪声模型的研究

#### 3.1 噪声的测量

早在 1972 年, A. A. Smith 就提出了低压电力线的噪声频谱测量问题<sup>[6]</sup>,他给出了从美国城市商业办公大楼到乡村农场的六个地点的电力线噪声水平的测量结果,测量信号耦合到 50 的接收装置上,测量时间是在工作日的上午 8:00 到下午 5:00 之间。从测量结果可以看出,城区办公大楼的噪声最高,乡村的噪声水平最低,两者相差近 30dB。并且随着频率的升高噪声水平呈显著降低的趋势,比如,城区办公大楼的噪声功率谱密度,在 10kHz 时为 20dB(参考值为 1μW/MHz),在 100MHz 时为 -80dB,下降率约为 -20dB/十倍频(详见文[6]中的图 1)。

1988 年,日本学者塔那卡(Tanaka)在 10k~100MHz 频率范围内,对日本某大学的一座六层高的约 5000m<sup>2</sup> 的实验研究大楼的配电线上的噪声功率谱进行了测量<sup>[7]</sup>。结果表明,10~100kHz 的噪声水平较高,平均为 -20~-40dBm(毫瓦分贝);同样,噪声随频率的增加而降低,频率在 100k~1MHz 的范围变化时,噪声功率在 -40~-80dBm 范围内变化,衰减率达到 -40dB/十倍频;当频率升高到 1~100MHz 时,噪声功率谱降到测量的底限 -90dBm 以下。冬夏两季的最大噪声水平相差 30~50dB,作者认为这是因为夏天旋转机械,如电扇和空调增加了噪声功率所致。另外,对住宅区的五层公寓楼的噪声功率谱进行了测量,结果是高频率范围内的噪声比科研大楼的低。文[7]所得出的最大噪声功率谱比文[6]中的大 10dB 以上。

以上所述以及其它文献[5]、[8]、[9]、[10]中的噪声测量结果均表明,低压电力线上的噪声强度在不同电网上是有区别的,并且具有时变性,文献[10]报道,即使同一栋住宅公寓大楼,其平均噪声水平在 24h 内的变化也可高达 6dB,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。所以进行噪声的分类分析可望对噪声特性有一个透彻的了解。

#### 3.2 噪声分类<sup>[5][9][11]</sup>

##### 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。

##### 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。文[5]测得电视水平回扫频率(15.625kHz)的高次谐波强度为 -80dB(W)左右,在其它频率(25,30,49,55,58,75 和 82kHz),该类型噪声的强度为 -60 到 -90dB(W),这可能是由开关电源引起的。

##### 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 50Hz 周(美国为 60Hz)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[9]测得白炽灯光调节器由于可控硅或其它整流元件的快速开通与关断产生 60Hz 谐波噪声,对于 400W 的白炽灯,在 10kHz 其噪声水平可以达到比正常背景噪声高 40dB,而且,在更高频率上产生的噪声甚至会更高(12480Hz 扩展频谱的各谱线的幅值均达到了 80mV)。

##### 4) 与系统频率无关的单事件脉冲噪声

由于电网中有各种各样的开关操作,可以想象它们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,脉冲噪声出现的时间具有随机性,其频度平均每秒远远少于一个。

以上噪声中,类型 1) 在短时间内变化不大,可以看作是背景噪声,类型 3) 和 4) 是按微秒和毫秒级单位时变的,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猝发错误。

#### 3.3 噪声模型

在用仿真的方法研究低压电网载波通信时,建立用某些特性参数描述噪声的模型非常必要。若针对以上的基本分类进行模块化建模,则任一种复杂噪声情况都可以通过基本模块模型的叠加来表

示<sup>[11]</sup>。

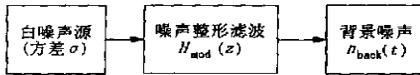


图1 背景噪声的生成

### 1) 背景噪声

背景噪声可按图1用白噪声源经过滤波生成,噪声整形滤波在 $z$ 平面上的传递函数 $H_{\text{mod}}(z)$ 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<sup>2</sup>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) 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,也可先在频域中合成,再通过反快速傅立叶变换(IFFT)得到。

### 3) 脉冲噪声

脉冲噪声是低压电力线通信的严重有害源,其对数据传输的影响程度主要是由脉冲的幅度、脉宽和间隔时间决定。文[8]提出了噪声脉冲的幅度、脉宽和间隔时间的概率分布估计,根据测量结果得出了如下结论:脉冲噪声强度一般比背景噪声水平高10dB,有时可以超过40dB,脉冲强度与噪声源的强度和噪声源离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120Hz,它与60Hz电源电压的正负周期同步;对于120Hz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 and 搅拌机),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27dB的120Hz周期脉冲,灯光调节器以同样的概率产生高

于背景噪声40dB的脉冲噪声)。

考虑到脉冲为随机事件的事实,其特性可以用随机变量来描述,这里通过一个分割马尔可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 $A(i=1, 2, \dots, v)$ 和 $B(i=1+v, 2+v, \dots, n)$ , $A$ 中的 $v$ 个状态表示没有脉冲事件发生的情况, $B$ 中的 $w=n-v$ 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 $t_w$ 的概率,用离散时间 $k$ 表示为:

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

其中, $g_{w+1,j}$ 表示从 $B$ 中的某个状态 $j$ 向临界状态 $w+1$ 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:

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

其中, $u_{v+1,j}$ 表示从 $A$ 中的某个状态 $j$ 向临界状态 $v+1$ 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。

## 4 信道模型的研究

### 4.1 衰减特性的测量

由于低压配电网结构的复杂性和负载的多样性与时变性,高频信号在低压电力线上的传输必然会有衰减,并且该衰减特性难以预测,这就给低压电力线载波通信带来了困难。

据文献[10]报道,传输信号在100kHz以下的衰减相对稳定,在100kHz到200kHz之间以0.25dB/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(multi-modal cancellations),这引起网络中某些特定点出现窄带衰减,实验结果表明,频率低于100kHz,距离小于400m(即小于0.12个波长)时,传输线效应的影响较小。

文献[12]提出了配电变副方两回路之间的导纳参数模型,并对六台配电变在20~30kHz的频率范围进行了测量,结果表明配电变副方两回路之间的信号传输衰减随频率增加而增加,通常连接在两回路之间的负荷能增进跨回路的信号传输,只要该负荷的等效导纳大于配电变副方两回路的互导纳。

文献[13]提出了在20~240kHz的频率下,对五

种不同类型建筑物的室内信号衰减的测量,结果表明室内电力线的信号衰减一般会超过 20dB;一般来说,发送装置和接收装置同相时的信号衰减一般比非同相时的低,而且信号衰减随频率的增高有增加的趋势;电气负荷对室内电力线信号衰减影响很大,在任何给定频率下负荷随时间的变化可能导致信号衰减的剧烈变化(变化常达 20dB)。

文献[7]给出了在 10k ~ 20MHz 频率下,对日本建筑物内低压电力线信号衰减特性的实地测量,发送和接收点距离为 10、20 和 30m 时(接收点处的终端阻抗为 5 Ω),其变化范围分别为 - 3 ~ - 30dB, - 3 ~ - 40dB 和 - 10 ~ - 55dB,频率低于 400kHz 时每种距离的衰减随频率变化不大(稳定在 - 3 ~ - 25dB 之间),在 400kHz 以上衰减变化则很快,并且变化范围很大。

以上的测量分析说明,电力线上的信号衰减随频率增长有增加的趋势,并且频率越高传输线效应越明显,发生谐振的可能性越大,导致在某些频率下衰减会迅速增加。跨相传输时信号衰减比同相传输时大,这可以通过在相间加电容耦合来消除。由于各种配电网结构以及负荷不同,很难找到简单的数学关系,可从各种室内电力线上得到的信号衰减数据进行具有普遍意义的描述。

#### 4.2 信道模型的建立

尽管以上测量表明无法建立一个通用的精确模型来模拟所有的低压配电网通道情况,但是建立一个能反映通道基本特征的近似模型却是可能的,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[2]提出了一个简单的电力线通信通道模型,如图 2 所示。

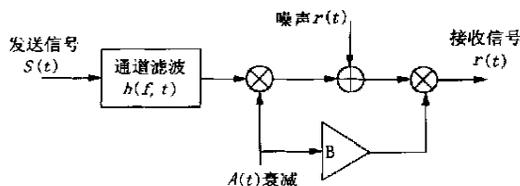


图 2 低压电力线通道模型

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 120Hz 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的有关信息的了解。

文献[14]采用自顶向下的方法,把通信通道看作一个黑匣子,并用一个传递函数来描述它的传递

特性,实际上是把图 2 中的  $A(t)$  并入到  $H(f, t)$  中。考虑到低压配电网实质上是由无数个‘T’形结构组合而成,通过推导,得到了低压电力线传递函数的多径信号传播模型:

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

式中  $j$  为路径号,也可表示信号经过不同路径到来的先后次序,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,  $t_j = d_j / v_p$ ,  $t_j$  表示路径  $j$  的时延。通过对一个已知结构的示例网络和未知结构的实际网络,在 500kHz 到 20MHz 频率范围进行了测试,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  $t_j$  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通道情况非常困难,甚至是不可能的,但建立一个能反映通道基本特征的近似模型却是可能的,也是有必要的。当然这样做的基础是大量的测量统计数据,而这正是我国低压电力线载波通信研究工作所缺乏的。

#### 参考文献:

- [1] Bostoen T, Wiel O V. Modelling the Low - Voltage Power Distribution Network in the Frequency Band from 0.5 MHz to 30 MHz for Broadband Powerline Communications (HLC) [J]. Proceedings of International Zurich Seminar on Broadband Communications, 2000.
- [2] 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, EMC - 15:84 - 86.
- [3] Malak J A, Engstom J R. R. F. Impedance of United State and European Power Lines[J]. IEEE Trans on Electromagnetic Compatibility, 1976, EMC - 18(1):36 - 38.
- [4] Vines R M, Trussel M J, Shuey K C, et al. Impedance of Residential Power - Distribution Circuit [J]. IEEE Trans on Electromagnetic Compatibility, 1985, EMC - 27(1):6 - 12.
- [5] Hooijen O G. A Channel Model for the Residential Power Circuit used as a Digital Communications Medium[J]. IEEE

- Trans on Electromagnetic Compatibility, 1998, EMC - 40 (4) :333 ~ 336 .
- [6] Smith A A. Power line noise survey[J]. IEEE Trans on Electromagnetic Compatibility, 1972, EMC - 14(1) :31 - 32.
- [7] Tanaka M. High frequency noise power spectrum, impedance and transmission loss of power line in Japan on intrabuilding power line communications [J]. IEEE Trans on Consumer Electronics, 1988, 34(2) :321 - 326.
- [8] Chan M H L, Donaldson R W. Amplitude, Width, and Interarrival Distributions for Noise Impulses on Intrabuilding Power Line Communication Networks [J]. IEEE Trans on Electromagnetic Compatibility, 1989, 31(3) : 320 - 323.
- [9] Vines R M, Trussell H J, Gale L J, et al. Noise on Residential Power Distribution Circuits[J]. IEEE Trans on Electromagnetic Compatibility, 1984, EMC - 26(4) :161 - 168.
- [10] Van Der Gracht P K, Donaldson R W. Communication Using Pseudonoise Modulation on Electric Power Distribution Circuits[J]. IEEE Trans on Communications, 1985, COM - 33(9) : 964 - 974.
- [11] Zimmermann M, Dostert K. The Low Voltage Power Distribution Network as Last Mile Access Network - Signal Propagation and Noise Scenario in the HF - Range[J]. AEU International Journal on Electronics and Communications, 2000, 54(1) :13 - 22.
- [12] O'Neal J B. The Residential Power Circuit as a Communication Medium [J]. IEEE Trans on Consumer Electronics, 1986, CE - 32(3) : 567 - 577.
- [13] Chan M H L, Donaldson R W. Attenuation of Communication Signals on Residential and Commercial Intrabuilding Power - Distribution Circuits[J]. IEEE Trans on Electromagnetic Compatibility, 1986, EMC - 28(4) :220 - 230.
- [14] Zimmermann M, Dostert K. A Multi - Path Signal Propagation Model for the Power Line Channel in the High Frequency Range[C]. Proceedings of 3rd International Symposium on Powerline Communications and its Applications, Lancaster, UK, 1999.

收稿日期：2001-09-20

作者简介：张有兵(1971 - )，男，博士研究生，主要研究方向为电力通信；何海波(1976 - )，男，硕士研究生，主要研究方向为电力通信；吴昕(1980 - )，女，硕士研究生，主要研究方向为电力通信。

### Modelling of the channel for low voltage power line carrier communication

ZHANG You-bing, HE Hai-bo, WU Xin, ZHOU Yong-hua, CHENG Shi-jie  
(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Using low voltage power line as a communication channel has a number of advantages. However, its hostile channel properties such as very low impedance, strong noise pollution, attenuation and time - variance must be considered. As a result, much attention must be done in the aspects of signal modulation, coding, transmission, and demodulation in order to increase the quality and the speed of the communication. Based on the practical measurements, the noise characteristics and signal propagation model are discussed. The following result is obtained from the discussion. Though it is difficult or even impossible to establish a generalized accurate model to represent all kinds of low voltage power communication channels, it is possible to establish an approximate model, which is able to represent the essential properties of the channel. Such kind of model provides us with a powerful tool for the research of low voltage power line signal communication.

**Keywords:** low voltage power line; carrier communication; channel model; impedance characteristics; noise characteristics; attenuation characteristics

## 首届中原电力电工暨新技术新产品展览会在郑州召开

2002年3月21日上午,首届中原电力电工暨新技术新产品展览会在郑州中原国际博览中心开幕。这也是河南省电力电工行业所属企业和产品数十年来首次集体“亮相”。

据悉,本届展览会吸引了国内外的近百家电力电工行业的厂商和科研单位参展。除省内许继集团、平高集团、郑州电缆厂等知名企业外,ABB、穆勒公司等国际知名企业,清华大学、武汉大学、华中科技大学等高等院校,中国电力科学研究院、西北电力科学院等科研单位也在会上展示自己的最新科技成果及产品。

在本届展览会上,作为国内同行业中实力最强的企业,许继集团充分展示了自己最新研制的电力系统变电站综合自动化、配网和调度自动化系统、电力通信载波机、干式变压器、高低压开关、箱式变电站等一系列拳头产品。许继集团公司电力系统保护和输配电设备技术性能先进、价格适中,吸引了省内外众多电力系统用户关注的目光。据主办单位河南省电力行业协会负责人介绍,此次展出的产品和技术,代表了目前国内电力电工行业的最高科技水平。

摘自《许继集团》