

适用于电力线载波通信的同轴电缆建模研究

电力线载波通信技术因其良好的经济性和便利的应用性而成为智能电网通信的重要手段之一。通信网络元件高频模型的建立是电力线载波通信技术研究应用的基础。首先从同轴电缆的物理结构出发,建立了同轴电缆的一次参数包括单位长度的电容 C_0 、电感 L_0 和电阻 R_0 的高频参数模型;然后利用分布参数理论建立同轴电缆的高频传输参数的模型;最后通过开、短路测试法验证模型的有效性和正确性。同轴电缆高频模型的建立为设计智能配电网中电力线载波通信技术的调制方式,提高电力线载波通信技术的实用化程度提供必要的理论依据和分析方法。

蔡 伟/国网电力科学研究院

杨志淳/国网湖北省电力公司电力科学研究院

0 引言

智能电网的研究和建设,使得配电网应用电力载波通信(PLC)技术面临历史性机遇和重大挑战^[1-3]。传统电力载波通信应用研究主要围绕信道衰减特性^[4-6]、多径干扰^[7-8]、输入阻抗特性^[9-10]和噪声特性^[11]等展开。而在智能电网建设过程中,基于电力电子技术的负荷与各种分布式电源应用的增多,使元件阻抗模型发生较大变化,同时这些新的网络拓扑结构、智能配电网特有的运行方式也将使得上述各种特性出现了新的特点。

实现电力线载波通信信道建模的前提是建立准确网络组成元件高频模型,输电线路是最重要的网络元件之一,同轴电缆为现在城市供电线路的首选。针对以上实际应用意义,首先分析同轴电缆的物理结构,建立高频一次参

数模型;然后利用试验测得电缆的二次参数,进而根据试验参数推导出电缆一次参数,并与建立的模型对比,验证电缆高频参数建模的正确性。

1 同轴电缆模型

同轴电缆截面示意图如图1所示^[12-13],最里面为实心导体,半径为 r ,导体材质为铝或铜。实心导体外为绝缘介质层。介质层外层为很薄的金属屏蔽层,距离同轴圆心的半径为 R 。最外层为绝缘防护层。

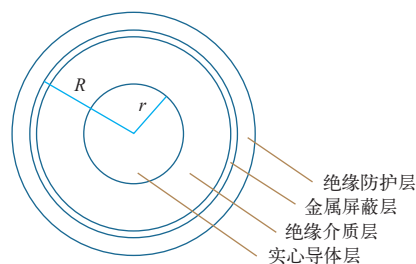


图1 同轴电缆截面图

同轴电缆的一次参数包括单位长度的电容 C_0 、电感 L_0 、电阻 R_0 和电导 G_0 。电缆线间电导 G_0 很小,可以忽略。下面分别建立单位长度的电容 C_0 、电感 L_0 和电阻 R_0 的参数模型。

1.1 单位长度电容 C_0

同轴电缆内导体和外屏蔽层构成通信回路。根据安培环路定律可得,同轴电缆外部磁场强度为

$$H_{\text{外}} = \frac{I_{\text{内}} - I_{\text{外}}}{2\pi r} \quad (1)$$

式中, $I_{\text{内}}$ 和 $I_{\text{外}}$ 分别为内导体和外屏蔽层上流过的电流; r 为磁感线离开同轴电缆



蔡 伟/工程师

关键词/Keywords

智能电网 ·
电力线载波通信 ·
信道特性 ·
同轴电缆 ·
高频模型 ·

国家自然科学基金项目(51007065)。

中心处的距离。由于内导体与外屏蔽层上流过的电流大小相等,方向相反,则可得同轴电缆外部磁场强度为零。

同轴电缆外部磁场为零,则同轴电缆的工作电容就为内导体与外屏蔽层间的电容。由圆柱形电容器的电容公式可以得到单位长度同轴电缆电容 C_0 (单位:F/m)为

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon}{\ln \frac{R}{r}} \quad (2)$$

式中, r 为内导体的半径; R 为外屏蔽层的内半径; ϵ 为中间绝缘介质层的等效介电常数,等于中间绝缘介质层的相对介电常数 ϵ_r 与真空介电常数 ϵ_0 的乘积。

1.2 单位长度电感 L_0

同轴电缆的电感由两部分组成:导体内部磁场产生的内电感 $L_{内}$ 和内外导体间空间磁场产生的外电感 $L_{外}$ 。内电感又分为内导体的内电感和外屏蔽层的内电感。但是同轴电缆通以高频信号时,由于高频信号的趋肤效应,内导体的电流集聚到靠近外屏蔽层的表面,加之邻近效应使得外导体的电流集聚到靠近内导体的表面,故同轴电缆可以只考虑外电感 $L_{外}$ 。

内导体电流为 $I_{内}$,则距离轴心为 x 的同心圆处中间绝缘介质层的磁感应强度为

$$B = \frac{\mu I_{内}}{2\pi x} \quad (3)$$

式中, μ 为绝缘介质磁导率。则同轴电缆内导体与外绝缘体间的绝缘介质中总磁通为

$$\Phi = \int_r^R B dx = \int_r^R \frac{\mu I_{内}}{2\pi x} dx = \frac{\mu I_{内}}{2\pi} \ln \frac{R}{r} \quad (4)$$

则同轴电缆单位长度电感为

$$L_0 = \frac{\Phi}{I_{内}} = \frac{\mu}{2\pi} \ln \left(\frac{R}{r} \right) \quad (\text{H/m}) \quad (5)$$

可以看出,同轴电缆的电感由电缆的物理结构尺寸和材质决定。

1.3 单位长度电阻 R_0

同轴电缆的电阻由内导体的电阻和外屏蔽层电

阻组成。由于同轴电缆的电阻推导公式非常复杂,直接给出同轴电缆的电阻(单位: Ω/m)表达式,即

$$R_0 = \frac{\rho_1}{\pi r^2} + \sqrt{\frac{f}{\pi}} \left(\frac{\sqrt{\rho_1 \mu_1}}{r} + \frac{\sqrt{\rho_2 \mu_2}}{R} \right) \quad (\Omega/\text{m}) \quad (6)$$

式中, r 、 R 分别为内导体和外导体的半径; ρ_1 、 ρ_2 分别为内导体和外屏蔽层的电阻率; μ_1 、 μ_2 分别为内导体和外屏蔽层的磁导率; f 为频率。

建立电缆的一次参数模型。根据传输线基本理论可以得到,其特性阻抗 Z_C 和传播常数 γ 可以分别表示为

$$Z_C = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}} \quad (7)$$

$$\gamma = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0)(G_0 + j\omega C_0)} = \alpha + j\beta \quad (8)$$

式中, α 、 β 分别为衰减常数和相位常数。

而信号在高频传输下, $R_0 \ll \omega L_0$, $G_0 \ll \omega C_0$ 。电缆线间电导 G_0 很小,可以忽略不计。则同轴电缆的特性阻抗 Z_C 为

$$Z_C \approx \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} \quad (9)$$

对式(8)利用泰勒级数展开,省略高次项可得传播常数 γ 为

$$\gamma \approx \frac{R_0}{2} \sqrt{\frac{C_0}{L_0}} + \frac{G_0}{2} \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} + j\omega \sqrt{L_0 C_0} = \alpha + j\beta \quad (10)$$

即衰减常数 α 和相位常数 β 分别为

$$\alpha \approx \frac{R_0}{2} \sqrt{\frac{C_0}{L_0}} + \frac{G_0}{2} \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} \approx \frac{R_0}{2} \sqrt{\frac{C_0}{L_0}} \quad (11)$$

$$\beta \approx \omega \sqrt{L_0 C_0} \quad (12)$$

2 电缆二次参数测试方法

电缆二次参数测试方法分为开、短路法和谐振法两种。开、短路方法的测量原理是分别测量电缆在末端开路 and 末端短路状态下的输入阻抗,然后利用二次参数与开、短路输入阻抗之间的关系求出电缆的二次参数。

根据电力传输线理论可知,电缆两端的电流电压满足如下关系式,即

$$\begin{cases} U_1 = U_2 \cosh \gamma l + Z_C I_2 \sinh \gamma l \\ I_1 = \frac{U_2}{Z_C} \sinh \gamma l + I_2 \cosh \gamma l \end{cases} \quad (13)$$

式中, l 为电缆的长度; Z_C 为电缆特性阻抗; γ 为电缆的传播常数。假设电力线末端连接阻抗为 Z_L 的负载, 则从电缆首端看进去, 其输入阻抗为

$$Z_{in} = Z_C \frac{Z_L + Z_C \tanh(\gamma l)}{Z_C + Z_L \tanh(\gamma l)} \quad (14)$$

在负载开路的情况下, 负载阻抗 Z_L 为无穷大, 则输入阻抗表示为

$$Z_{inoc} = Z_C \coth(\gamma l) \quad (15)$$

在负载短路的情况下, 负载阻抗 Z_L 为 0, 则输入阻抗表示为

$$Z_{inoc} = Z_C \tanh(\gamma l) \quad (16)$$

则由式 (15) 和式 (16) 可得

$$\begin{cases} Z_C = \sqrt{Z_{inoc} Z_{inoc}} \\ \gamma = \frac{1}{l} \arctan h \sqrt{\frac{Z_{inoc}}{Z_{inoc}}} = \alpha + j\beta \end{cases} \quad (17)$$

因此, 只需知道电缆短路和开路状况下的输入阻抗 Z_{inoc} 和 Z_{inoc} , 即可根据式 (17) 求出电缆的二次参数: 特性阻抗 Z_C 和传播常数 γ 。再根据式 (18) 可以求出电缆一次参数, 即

$$\begin{cases} R_0 = \operatorname{Re}(Z_C \gamma) \\ L_0 = \operatorname{Im}(Z_C \gamma) / \omega \\ G_0 = \operatorname{Re}(\gamma / Z_C) \\ C_0 = \operatorname{Im}(\gamma / Z_C) / \omega \end{cases} \quad (18)$$

3 试验验证

电缆短路和开路的输入阻抗测试原理图如图 2 所示。将待测试的电缆接入网络分析仪的一个端口, 然后将短路接头和开路接头分别接入测试电缆的末端, 测试出不同频率下电缆终端开路 and 短路的时候的输入阻抗 Z_{inoc} 和 Z_{inoc} 。

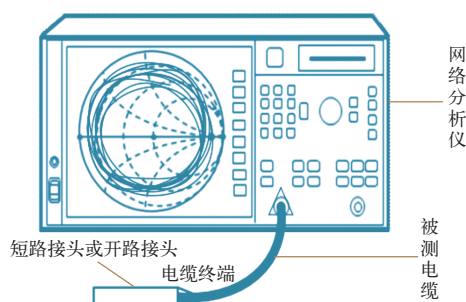


图2 测试原理图

再根据式 (17) 求得电缆的特性阻抗 Z_C 和传播参数 γ , 并利用式 (18) 推导出电缆的一次参数 C_0 、 L_0 、 R_0 和 G_0 。利用网络分析仪 HP8753D 分别对 RG316 和 SYV75-4 两种同轴电缆进行试验。电缆参数如表 1 所示。

表1 同轴电缆参数

电缆型号	RG316	SYV75-4
内导体材质	铝	铜
内导体直径/mm	0.5	0.59
绝缘层相对介电常数	2.27	2.39
绝缘层相对磁导率	1	1
屏蔽层材质	铝	铜
屏蔽层直径/mm	2.0	3.7

利用网络分析仪测量出电缆的开路输入阻抗和短路输入阻抗, 再根据式 (17) 求得电缆的特性阻抗 Z_C 和传播常数 γ 。利用式 (18) 推导出电缆的一次参数。与通过式 (9) ~ (12) 计算出的特性阻抗 Z_C 和传播常数 γ 、式 (2)、式 (5) 和式 (6) 所推导出的电缆一次参数进行比较。

RG316 型同轴电缆的对比结果如图 3 ~ 图 5 所示。频率范围为 0 ~ 30 MHz。图 3 为 RG316 型同轴电缆特性阻抗测量值与理论计算值比较图, 可以看出, RG316 型同轴电缆的特性阻抗在 50 Ω 附近, 与参数手册给出的 50 Ω 的值很接近。图 4 为 RG316 型同轴电缆传播常数的比较图, 图 5 为一次参数比较图。可以看出, 测量结果与理论计算结果有较好的一致性, 验证了同轴电缆建模方法的有效性和实用性。

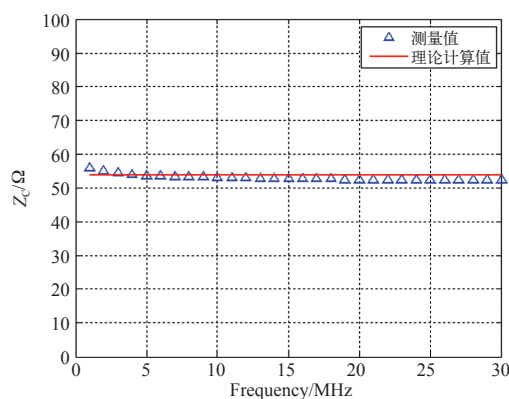


图3 RG316型电缆特性阻抗测量值与理论计算值

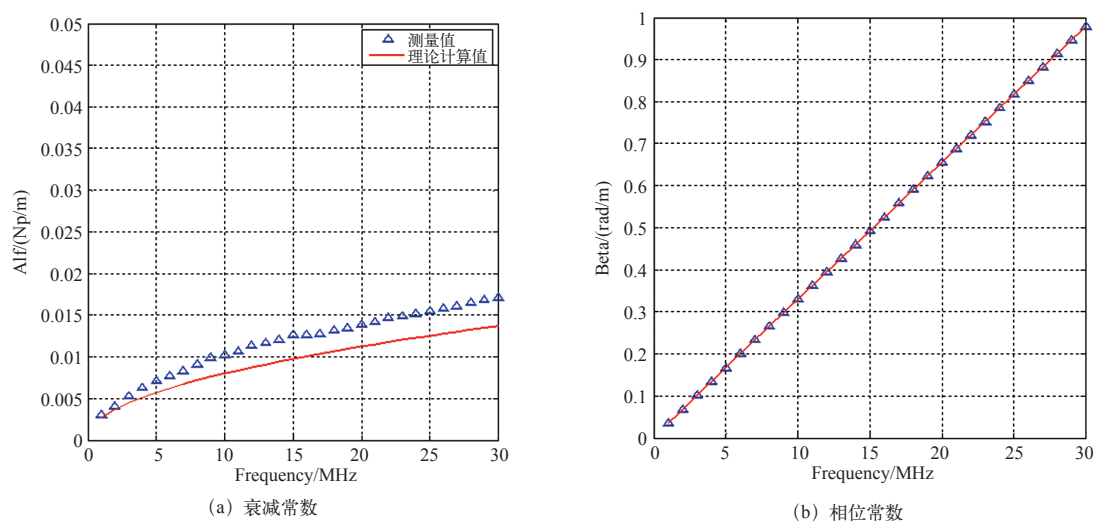


图4 RG316型电缆传播常数测量值与理论计算值

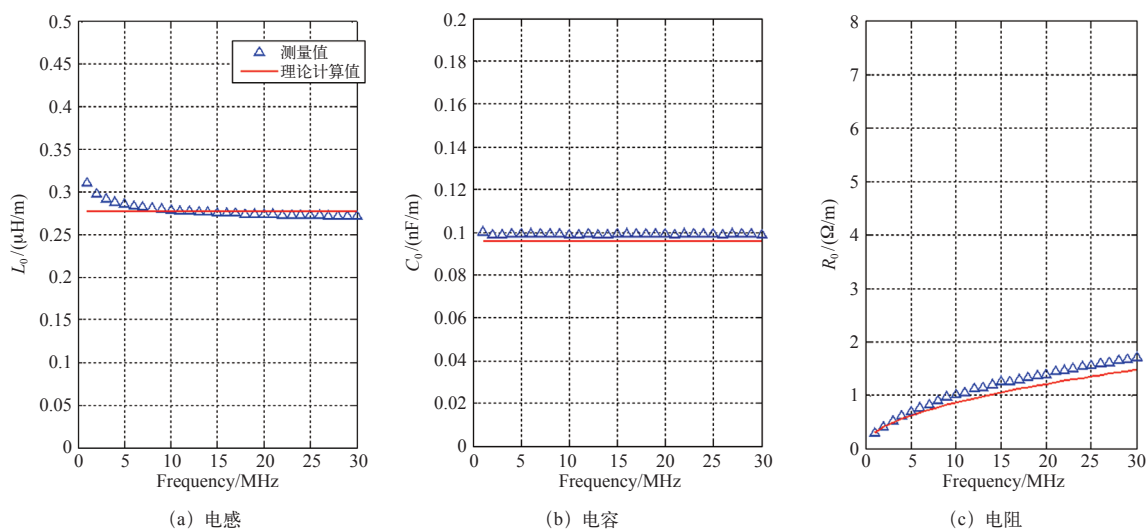


图5 RG316型电缆一次参数测量值与理论计算值

SYV75-4型同轴电缆的对比结果如图6~图8所示。频率范围为0~30 MHz。图6为SYV75-4型同轴电缆特性阻抗测量值与理论计算值比较图,可以看出,SYV75-4型同轴电缆的特性阻抗在75 Ω 附近,与同轴参数手册给出的75 Ω 的值接近。图7为SYV75-4型电缆传播常数的比较图,图8为SYV75-4型电缆一次参数比较图。测量结果与理论计算结果有较好的一致性。

4 结束语

有效地建立载波通信信道模型是高速电力线载波通信技术发展的前提和基础。本文主要的工

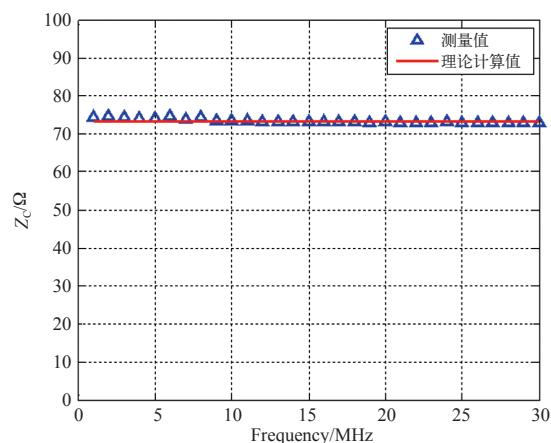


图6 SYV75-4型电缆特性阻抗测量值与理论计算值

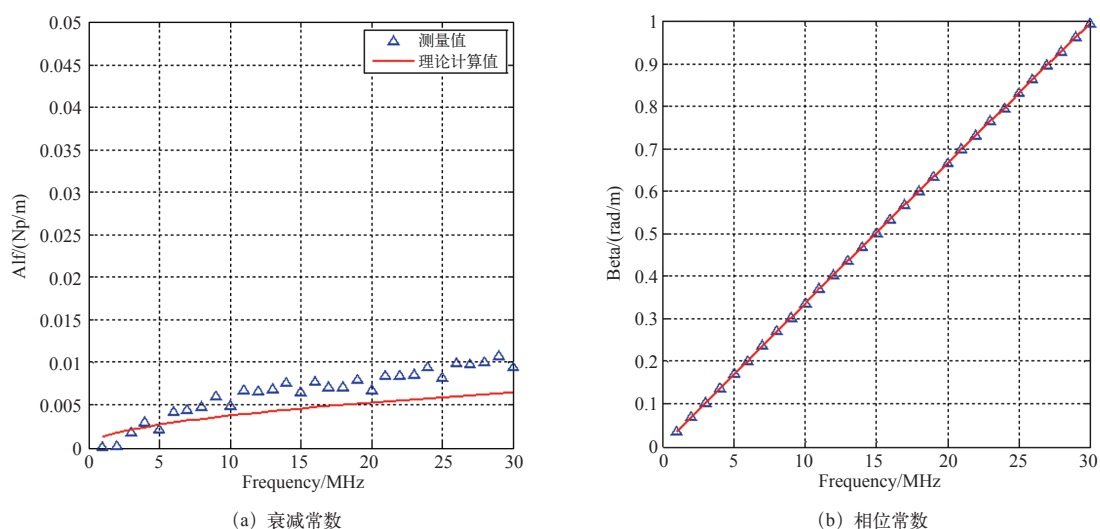


图7 SYV75-4型电缆传播常数测量值与理论计算值

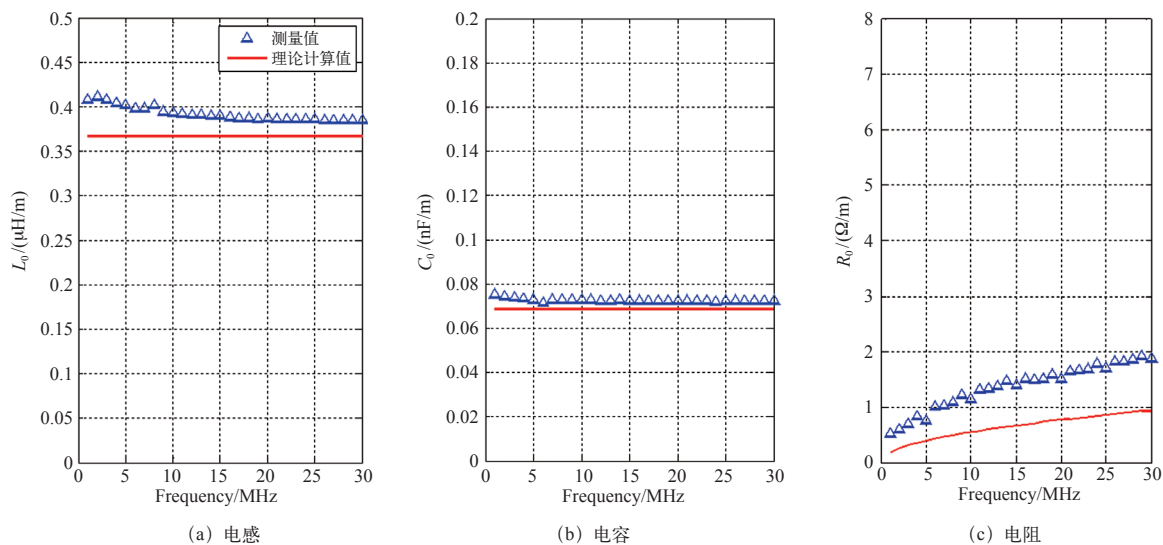


图8 SYV75-4型电缆一次参数测量值与理论计算值

作和结论有:

1) 从同轴电缆的物理结构出发,建立了同轴电缆高频特性下的一次参数模型。进而根据传输线理论,建立在同轴电缆高频阻抗特性和传播特性等二次参数的模型。

2) 基于开、短路测试法,通过网络分析仪实测得到同轴电缆的开路阻抗和短路阻抗,验证了所提出的建模方法的正确性和有效性。

3) 影响电力线载波通信信号传输特性的因素不仅包括同轴电缆的高频模型,配电网中各类电力负荷的高频特性同样会有所影响,如各类空调器、

新能源负荷等,这也是本文后续工作的所在。

参考文献

- [1] Athanasios G, Panayiotis G. Transmission characteristics of overhead medium voltage power-line communication channels [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24 (3): 1164-1173.
- [2] 何海波,周拥华,吴昕,等. 低压电力线载波通信研究与应用现状 [J]. 继电器, 2001, 29 (7): 12-16.
- [3] 齐淑清. 电力线通信 (PLC) 技术与应用 [M]. 北

- 京：中国电力出版社，2005.
- [4] 蔡伟，乐健，靳超，等. 电力线载波通信信道建模技术综述 [J]. 电力系统保护与控制，2012，40 (10)：149-154.
- [5] 黄银龙，蔡伟，毛涛，等. 具有格状网的电力线载波通信信道特性的分析 [J]. 电力系统保护与控制，2014，44 (11)：1-6.
- [6] Hooijen O G. A channel model for the residential power circuit used as a digital communications medium [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1998, 40 (4)：331-336.
- [7] 赵熊文，谢益溪，张业荣，等. 我国频率选择性衰落与多径去极化研究的进展 [J]. 通信学报，1995，17 (3)：8-14.
- [8] 高锋，董亚波. 低压电力线载波通信中信号传输特性分析 [J]. 电力系统自动化，2000，24 (7)：36-40.
- [9] 肖勇，房莹，张捷，等. 低压电力线载波通信信道特性研究 [J]. 电力系统保护与控制，2012，40 (20)：20-25.
- [10] 胡君军，李林霞，孙洪亮，等. 低压配电网载波频率线路阻抗测试研究 [J]. 重庆电力高等专科学校学报，2010，15 (2)：13-15.
- [11] Zimmermann M, Dostert K. An analysis of the broadband noise scenario in powerline networks [J]. IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications, 2000：131-138.
- [12] 郑玉东. 通信电缆 [M]. 北京，机械工业出版社，1982.
- [13] 南京邮电学院. 综合中同轴电缆的电气测试 [M]. 北京，人民邮电出版社，1976.
- (收稿日期：2015-12-03) **EA**

广告 | AD

全新改版

色彩丰富 凸显主题

2017《电气应用》以鲜明色彩和新颖版式呈现精彩内容，力求赏心悦目。

栏目设置 独具风格

坚持继承与开拓并举，以丰富内涵充实经典栏目，持续深化面对面、专家访谈、EA经理人等栏目，密切关注电气技术的发展和应用。

专家点评 精辟深刻

每期都将围绕一个热点话题，隆重推出一场专题讨论的盛宴，共邀知名专家、产品用户和生产厂家汇聚一堂，针对焦点问题作出评析。

行业案例 生动丰富

关注电力、建筑、石化和冶金等电气行业应用，以典型深刻的案例分析、方案设计构建技术互动的空间，促进应用经验交流。

国内邮发代号：82-341 国外发行代号：M1409

每期定价：15.00元 全年定价：360.00元

电气应用

· 电气应用 盛情呈现 ·

2017