

基于矢量拟合下的电缆半导体层测量及其建模方法的研究

近些年来交联聚乙烯电缆由于诸多优点在配电网中的用量越来越大。局部放电信号的检测及定位技术是电力电缆中绝缘状态监测的重要环节，而电缆半导体层对于电缆检测及定位的影响也受到了更多的重视，因此研究电缆半导体层的参数特性十分重要。给出电缆半导体层的测量方法及其参数特性，为了进一步分析半导体层对电缆检测及定位的影响，首先采用矢量拟合算法，得出参数在拟合结果的基础上，提出了电缆半导体层的等效电路参数模型，基于该仿真模型电缆中半导体层对电缆中参数特性的影响进行了对比分析。计算结果表明：电缆半导体层等效模型可以很好地表征电缆中半导体层的特性，经过对比研究可以得出，与忽略半导体层的情形相比，电缆含有半导体层时的衰减变大，波速也变慢。

杨宇琦 李园萌/国网陕西省电力公司西安供电公司
李洪杰/西安交通大学电气工程学院

0 引言

相比于架空线路及油纸绝缘电缆，交联聚乙烯（XLPE）电缆具有绝缘性能好、易于安装制造、有利于美化城市和优化厂矿布局等诸多优点。近些年来我国10 kV及35 kV电压等级的电力电缆尤其是XLPE电缆在配电网中的用量越来越大，其可靠运行对于提高供电系统的可靠性和改进供电质量至关重要。国内外运行经验和研究成果表明：XLPE电力电缆绝缘性能取决于其绝缘介质的树枝状老化，而局部放电测量是定量分析树枝状劣化程度的有效方法之一^[1-3]。因此，对XLPE电力电缆绝缘的局部放电进行检测对电力系统的安全稳定运行有着重要意义。

研究局部放电脉冲在电缆及其附件

中的传播规律对于进一步提高电缆中局部放电检测和定位的准确度与准确性意义重大，国内有学者对局部放电在XLPE电缆中的传播进行了仿真与实验研究，对电缆中的局部放电信号的传播有了一定规律性的总结，然而并没有对电缆的半导体层进行深入的探索研究。大量研究表明半导体层对电力电缆中高频信号的传播有着极大的影响^[4-5]，国外则有学者先后在实验室中开展了对电缆中半导体层特性测量工作，结果表明半导体层的复介电常数是频域的复杂函数^[6-10]。因而在对半导体层测量基础上所获得的XLPE电缆传输线模型将难以在时域进行求解，限制了传输线模型在电缆局部放电检测和定位技术中的应用^[11-13]。

矢量拟合（VF）方法自20世纪末开始被广泛用来拟合测量或者计算的频域响应，近些年，该方法在电磁暂态分析中的应用也越来越多，而且基于该方法的拟合模型可以由无源元件构成等效电路^[14-16]，为在时域中求解XLPE电缆的频变模型提供了途径。

本文在时域分析电缆半导体层时，使用测试系统对电缆半导体层进行了测试，引入了VF方法进行等效，在此基础上得到了电缆半导体层的等效模型，并使用该模型进行求解，仿真分析了电缆半导体层对电缆中特性参数的影响。

1 XLPE电缆半导体层特性的测量

从线芯数目上来考虑，电缆一般可分为单芯电缆与三芯电缆两大类，对于



杨宇琦/工程师

关键词/Keywords

交联聚乙烯电缆 ·
半导体屏蔽层 ·
建模仿真 ·
矢量拟合 ·

现在广泛使用在配电网中的三芯XLPE电缆,为了改善其电场分布一般在每相的电缆线芯外面加装接地电缆金属屏蔽层,而从传输线的角度来看,此类三芯电缆也可以视为单芯电缆,因此本文以单芯XLPE电缆的半导体层为研究对象,对其基本特性作一定的理论及实验研究。

1.1 电缆半导体层的基本频变结构

电缆的内、外导体表面通常是不光滑的,若与绝缘层直接接触会留有大量气隙,使得接触面的电场产生畸变,进而产生局部放电。因此在高压电缆的导体与绝缘层的接触面填充有半导体屏蔽层,它与被屏蔽的导体等电位且与电缆绝缘层良好接触,大幅改善了电缆内部的电场畸变,从而避免产生局部放电而损伤电缆绝缘。

电缆半导体层材料是由填充有炭黑颗粒的聚合物构成的,炭黑颗粒形成了导电网络,该网络被填充的聚合物所阻断。炭黑颗粒之间的距离很小,通常只有几埃(10^{-10} m),一些高能电子会穿过此间距而形成导电通道,这是半导体层低频下导电的主要原因。图1为半导体屏蔽层的等效分子结构,由两个炭黑颗粒构成的电极和聚合物介质构成,聚合物间隙可由一个大电阻并联电容进行等效,各个空间方向上的等效分子构成了整个的半导体层网络。

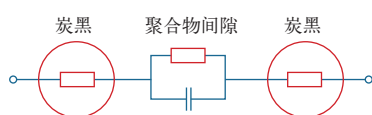


图1 半导体层的等效分子结构

依据上述等效电路,电缆半导体层的频变导电机理可解释为:①低频下的电导率由炭黑颗粒之间的电子通道决定,电导率直至1 MHz几乎是常数;②高于1 MHz后随着频率的增加,间隙电容的影响越来越大,整个等效电路的阻抗逐渐减小,因此半导体层的电导率也逐渐增加。

1.2 电缆半导体层的特性检测方法及其装置

为准确估计半导体层参数,如图2所示,首先使用Concept80宽带介电谱测试系统对所研究的10 kV与110 kV配电电缆半导体层的复介电常数进行了测

量。分别将两电缆外半导体层样品制作成半径为6 mm的圆形切片,厚度约为0.6 mm,之后首先进行烘干处理,再在其表面喷射金电极,测试范围为1 MHz~1 GHz,测试过程中腔内温度大致为室温,可以得到材料的复介电常数与电导率结果如图3~图6所示。



图2 宽介电谱测试系统Concept80装置图

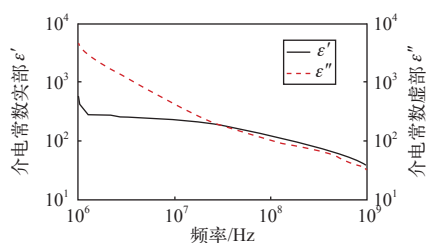


图3 10 kV电缆外半导体层的复介电常数测量结果

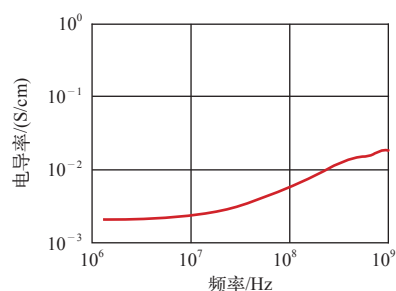


图4 10 kV电缆外半导体层的电导率测量结果

测量结果显示两种电压等级的电缆外半导体层虽然参数不相同,但是大致特性却近似。且均表明电缆半导体层复介电常数与电导率是随着频率的变化而变化的,这就意味着,不同频率分量的信号脉冲在电缆中传播时,会存在不同的波速与波阻抗,从而会对电缆中信号的检测有极大的影响。

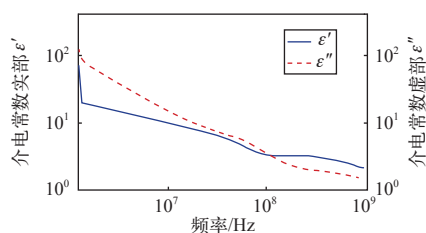


图5 110 kV电缆外半导体层的复介电常数测量结果

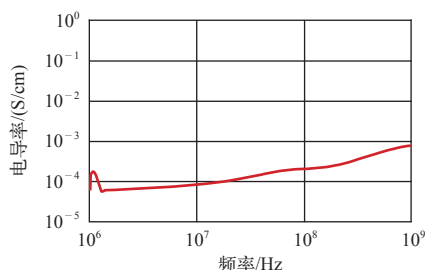


图6 110 kV电缆外半导体层的电导率测量结果

2 电缆半导体层模型分析

2.1 电缆传输线模型

基于传输线理论，电缆的高频模型可由串联阻抗 Z 和并联导纳 Y 组成，两者都是频率的函数，因此整个电缆模型也与频率相关的。G. Stone 和S. Boggs最早于1982年提出了XLPE电缆的高频传输线模型，后续研究在其基础上不断进行细化和发展^[17-19]。其集总参数的等效电路模型如图7所示。

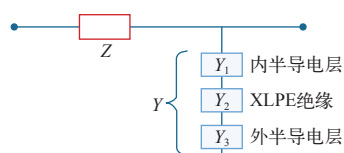


图7 XLPE电缆高频模型结构图

电缆的并联导纳部分具体由内、外半导体层和XLPE绝缘层构成（见图7），即

$$Y(\omega) = \frac{1}{\sum_{i=1}^3 \frac{1}{Y_i}} \quad (1)$$

且有

$$Y_i(\omega) = j\omega \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_i^*}{\ln(r_i/r_{i-1})} \quad (2)$$

式中， ϵ_0 为真空中的介电常数； r_i 和 r_{i-1} 分别为第 i 层的内、外半径； $\epsilon_i^* = \epsilon_i' - j\epsilon_i''$ 为第 i 层的复介电常数。

对于XLPE主绝缘来说，其复介电常数在频率小于1 00 MHz范围内都可视为常数^[17-19]，本文中取 $\epsilon' = 2.3$ ， $\epsilon'' = 0.001$ 。而半导体层的复介电常数与频率相关，为探究其频变特性，有学者在实验室中对XLPE电缆的半导体层切片进行过频域测试，发现其介电常数是频率的函数，具体可以由“Cole-Cole”或“Debye”等模型表征^[19-20]。然而，无论电缆模型中的复介电常数采用何种形式表示，其在时域中难以求解。

2.2 VF及其等效模型

VF方法是一种在频域中进行有理逼近的数值方法。对于单端或多端输入输出系统，该方法都可直接得出其频率响应的状态空间模型^[4]。

假定 $F(\omega)$ 为一频变系统的频率响应，可以如下式进行有理化拟合，即

$$F_m(\omega) = j\omega \left(\sum_{i=1}^M \frac{r_i}{j\omega - p_i} + h \right) + d \quad (3)$$

式中， r_i 和 p_i 分别是拟合表达式的留数和极点，可以是实数或者是共轭复数； h 和 d 为实数。式（3）中的所有系数均可通过VF方法求得。

对于式（3）所示的系统，可以由无源元件构成的等效电路表示。为了简化分析，本研究中将XLPE电缆模型径向参数中的内、外半导体层作为整体进行建模，用 $Y_{sc}(\omega)$ 表示。对 $Y_{sc}(\omega)$ 使用VF方法，将被改写为与式（3）类似的形式。

图8为半导体层的总导纳 $Y_{sc}(\omega)$ 的等效电路，且有： $G_0 = d$ ， $C_0 = h$ ， $G_i = r_i$ （ $i = 1 - M$ ）。另外， G_0 分别为直流下的相关参数。

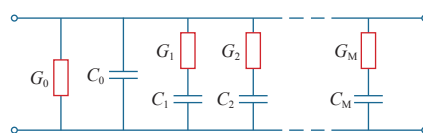


图8 半导体层拟合模型的等效电路

3 矢量拟合模型参数

本部分将结合上述模型，对10 kV电缆半导体层模型参数进行拟合。所研究电缆半导体层的具体数据分别来源于110 kV高压电缆和10 kV配电电

缆,在后文中分别将两种半导体层记为 SC_1 、 SC_2 ,相关测量结果显示其各自的半导体层的复介电常数表达式分别使用了“Cole-Cole”和“Debye”函数进行表征。其表达式分别为

$$\varepsilon^*(\omega) = \frac{A_1}{1 + (j\omega\tau_1)^{1-\alpha_1}} + \frac{A_2}{1 + (j\omega\tau_2)^{1-\alpha_2}} + \frac{\sigma_{dc}}{j\omega\varepsilon_0} + \varepsilon_\infty \quad (4)$$

“Debye”函数如下式

$$\varepsilon^*(\omega) = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} + \varepsilon_\infty \quad (5)$$

式中,静态介电常数 $\varepsilon_s = 2\,700$;高频介电常数 $\varepsilon_\infty = 500$;松弛时间 $\tau = 4.5\text{ ns}$ 。对比两类介电函数可知,Debye模型的表达式比Cole-Cole模型简单,但后者的应用性更强,且其包含了直流电导率,直接决定了图4和图6中电导 G_0 的值。XLPE电缆的具体结构尺寸如表1所示。

表1 XLPE电缆的具体结构尺寸

(单位: mm)

参数	10 kV	110 kV
线芯半径 r_1	5.6	15
内半导体层厚度 t_2	1.1	1.3
主绝缘厚度 t_3	4.5	18
外半导体层厚度 t_4	0.8	1.3
铜屏蔽内半径 r_5	15.8	35.6

使用VF方法在100 MHz~1 GHz的频率范围内计算图8给出的半导体层总导纳的等效 $G-C$ 电路拟合参数,得到两种待研究电缆的等效 $G-C$ 网络参数,如表2和表3所示,并将其中半导体层的参数估计值及相关网络参量代入图8等效电路中并导出相应的传输线特征参数,两种方法导出的结果如图9所示。

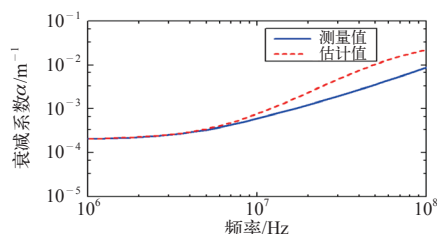
表2 10 kV半导体层的等效 $G-C$ 网络的拟合参数

电容/(F/m)		电导/(S/m)	
C_0	$5.312\,8 \times 10^{-9}$	G_0	$7.906\,6 \times 10^{-1}$
C_1	$1.636\,7 \times 10^{-8}$	G_1	$8.264\,3 \times 10^0$
C_2	$4.022\,0 \times 10^{-8}$	G_2	$1.853\,4 \times 10^0$
C_3	$6.388\,0 \times 10^{-8}$	G_3	$3.428\,8 \times 10^{-1}$
C_4	$1.066\,7 \times 10^{-7}$	G_4	$1.027\,1 \times 10^{-1}$
C_5	$6.122\,6 \times 10^{-8}$	G_5	$1.087\,3 \times 10^{-2}$

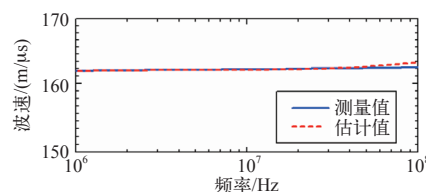
对比图9中的结果可知,由等效模型得出的电缆传输线参数的估计值在整个研究频带范围内都

表3 110 kV半导体层的等效 $G-C$ 网络的拟合参数

电容/(F/m)		电导/(S/m)	
C_0	$1.118\,6 \times 10^{-7}$	G_0	$2.214\,8 \times 10^{-23}$
C_1	$4.921\,7 \times 10^{-7}$	G_1	$1.093\,7 \times 10^2$



(a) 电缆的衰减系数



(b) 电缆的波传播速度

图9 10 kV电缆传输线特征参数的测量值和估计值

基本与测量值计算结果相吻合,但在高频阶段估计值的结果偏高,这可能是由于电缆内、外半导体层的特性参数不一样导致的。尽管测量值与拟合值之间存在一些误差,但无论是数据的幅值还是基本趋势,都基本重合,进一步印证了本文所述的半导体层模型具有较强的实用性。

4 仿真研究

假定待研究XLPE电缆具有上述两种不同的半导体层,使用文献中的测量值并结合矢量拟合方法在0.1 Hz~100 MHz的频率范围内计算图8给出的半导体层总导纳的等效 $G-C$ 电路拟合参数,整个频段内选择40个频率点作为拟合点,经过30次迭代后的等效总导纳拟合结果如图10所示。各自拟合过程所对应的最大均方根误差分别为

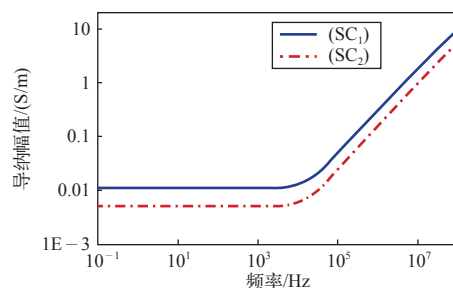


图10 半导体总导纳的矢量拟合结果

1.23×10^{-9} , 9.25×10^{-23} 。

分别对110 kV电缆与10 kV电缆的半导体层进行对比,可以分别得出半导体层的存在对不同电缆特性参数的影响分别如图11~图14所示。

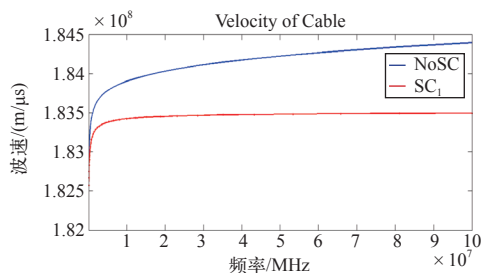


图11 110 kV电缆半导体层对波速的影响

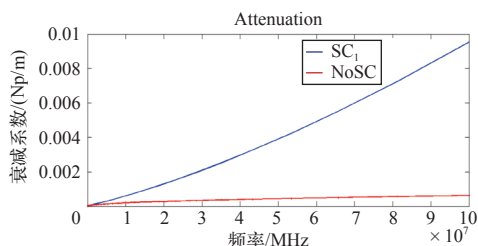


图12 110 kV电缆半导体层对信号衰减的影响

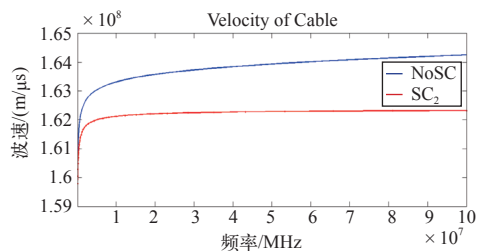


图13 10 kV电缆半导体层对波速的影响

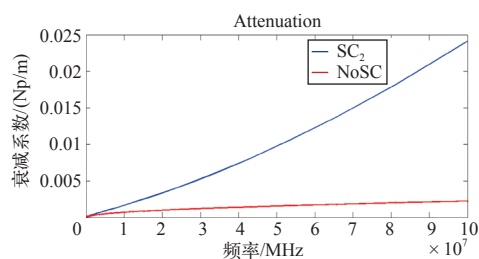


图14 10 kV电缆半导体层对信号衰减的影响

在电缆首端加载模拟局部放电信号,激励源采用高斯型波形。将表2、表3的导纳参数代入状态方程中进行计算,电缆末端的开路电压波形如图15所示。为了进行对比,还给出了电缆不含半导体层(记为NoSC)计算结果。

由对比可以发现半导体层对于电缆中的局部放电脉冲的幅值和传播速度都有着显著影响。与忽略半导体层的情形相比,电缆含有半导体层时

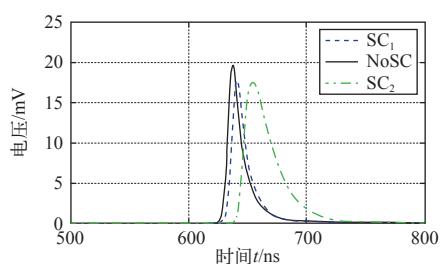


图15 高斯脉冲沿着具有不同半导体层的XLPE电缆传播100 m时的波形

的衰减变大,波速也变慢。而在电缆的局部放电检测和定位中,衰减和波速是至关重要的波传播参量,因此半导体层在电力电缆的高频模型中应当被充分考虑。此外,由于电缆中脉冲信号的频率很高,并且存在趋肤效应等现象,所以对于电缆半导体层的研究显得更为重要。

5 结束语

本文采用VF方法对电力电缆的频变参数模型进行有理化拟合,在充分验证了电缆半导体模型准确性的基础上,分析了半导体层对不同电缆特性的影响,得出了对于分析电缆中特性的指导意义:①半导体层的特性参数,如介电常数,电导率会随着频率的变化而产生较大变化;②与忽略半导体层的情形相比,电缆含有半导体层时的衰减变大,波速也变慢;③采用VF方法可以很好地表征电缆半导体层的特性参数,并且有着良好的准确性,对于电缆局部放电检测以及定位准确度的提高起到了很好的指导与借鉴作用。

参考文献

- [1] Nikolajevic S V, Stojanovic B B. The influence of water in XLPE cable conductor on XLPE insulation breakdown voltage and partial discharge [C]. Conference Record of the IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Montreal, Canada, 1996: 604-607.
- [2] 罗俊华,马翠姣,邱毓昌. XLPE电力电缆局部放电的在线检测[J]. 高电压技术, 1999 (4): 32-34.
- [3] 段乃欣,赵中原,邱毓昌,等. XLPE电缆中局部放电脉冲传播特性的实验研究 [J]. 高压电器,

- 2002, 38 (4) : 16-18.
- [4] Stone G C, Boggs S A. Propagation of partial discharge pulses in shielded power cable [C]. Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Amherst, MA, USA, 1982: 275-280.
- [5] Weeks W, Diao Y M. Wave propagation characteristics in underground power cable [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1984 (10) : 2816-2826.
- [6] Mugala G, Eriksson R, Gafvert U, et al. Measurement technique for high frequency characterization of semiconducting materials in extruded cables [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2004, 11 (3) : 471-480.
- [7] Jobava R, Heinrich R, Pommerenke D, et al. Efficient FDTD simulation of fields in coaxial cables with multi-layered insulation partially formed by dispersive layers of extremely high permittivity [C]. Proceeding of Viith Int. Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory, 2002: 91-94.
- [8] Ametani A, Miyamoto Y, Nagaoka N. Semiconducting Layer impedance and its effect on cable wave-propagation and transient Characteristics [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19 (4) : 1523-1531.
- [9] Mugala G, Eriksson R, Pettersson P. Dependence of XLPE insulated power cable wave propagation characteristics on design parameters [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14 (2) : 393-399.
- [10] Steinbrich K. Influence of semiconducting layers on the attenuation behaviour of single-core power cables [J]. IEE Proceedings – Generation Transmission and Distribution, 2005, 152 (2) : 271-276.
- [11] Breien O, Johansen I. Attenuation of travelling waves in single-phase high-voltage cables [J]. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1971, 118 (6) : 787-793.
- [12] Paul C R. Analysis of multic onductor transmission lines [M]. 2nd ed. New York: Wiley Press, 2008: 258-262, 487.
- [13] Tozzi M, Cavallini A, Montanari G C, et al. PD detection in extruded power cables: an approximate propagation model [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15 (3) : 832-840.
- [14] Gustavsen B, Semlyen A. Rational approximation of frequency domain responses by vector fitting [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14 (3) : 1052-1061.
- [15] Sarto M S, Scarlatti A, Holloway C L, et al. On the use of fitting models for the time-domain analysis of problems with frequency-dependent parameters [C]. IEEE EMC Int. Symposium, Montreal, Canada, 2001: 588-593.
- [16] Kurokawa S, Yamanaka F, Prado A J, et al. Using state-space techniques to represent frequency dependent single-phase lines directly in time domain [C]. Transmission & Distribution Conference & Exposition, Latin America, IEEE/PES, 2008: 1-5.
- [17] 郭灿新, 张丽, 钱勇, 等. XLPE电力电缆中局部放电检测及定位技术的研究现状 [J]. 高压电器, 2009, 45 (3) : 56-60.
- [18] Shu E W, Boggs S. Dispersion and PD detection in shielded power cable [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2008, 24 (1) : 25-29.
- [19] Mugala G, Eriksson R, Gafvert U, et al. Measurement technique for high frequency characterization of semiconducting materials in extruded cables [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2004, 11 (3) : 471-480.
- [20] 陈璐, 姚林朋, 等. XLPE电缆中间接头局部放电电磁波特性仿真分析 [J]. 高压电器, 2010, 46 (10) : 27-31.
- (收稿日期: 2017-05-05) **EA**