

自动定向式变电站局部放电监测定位方法研究

李杰¹, 王磊¹, 王应芬¹, 续所良¹, 杨志华¹, 沈晨²

(1. 云南电网有限责任公司红河供电局, 云南 蒙自 661100; 2. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 局部放电监测对发现绝缘缺陷与减少设备绝缘击穿故障均有重要意义, 但是目前基于固定天线阵列装置的局部放电信号监测定位方法还不能实现空间上多维度、大范围的高准确度监测。为此设计了一种包含机械结构与天线阵列的自动定向装置, 并提出适用的局部放电监测定位方法。所述局部放电监测定位系统首先根据信号特征通过 $N-Q-\Phi$ 等图谱判别局部放电信号, 再从空间几何关系角度确定输送给机械结构的控制信号, 从而控制定向装置不断调整天线阵列指向, 并在闭环调节下使信号时间差最终控制在预设阈值以内。此时阵列中央的激光头所指即为局部放电源位置, 完成了局部放电源的监测定位。之后建立局部放电监测定位实验系统, 并对上述方法进行测试。结果表明, 实验系统能有效发现局部放电信号, 并能准确快速地定位局部放电源位置, 这对实现局部放电大范围监测与定位有重要意义。

关键词: 多维度监测; 自动定向; 特高频法; 局部放电

Research on partial discharge monitoring and localization method in an automatic directional way in substations

LI Jie¹, WANG Lei¹, WANG Yingfen¹, XU Suoliang¹, YANG Zhihua¹, SHEN Chen²

(1. Honghe Power Supply Bureau of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Mengzi 661100, China; 2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing 400044, China)

Abstract: The partial discharge(PD) monitoring is of great significance for the discovery of insulation defect and the reduction of equipment insulation breakdown fault. However, recent PD monitoring and localization methods based on fixed antenna array still cannot achieve multi-dimensional, large-scale and high-precision monitoring. Therefore, an automatic directional equipment including a mechanical structure and an antenna array is designed and a monitoring and localization method suited to the equipment is proposed. First, the PD monitoring and localization system distinguishes PD signals according to characteristics of signals by $N-Q-\Phi$ and other graphs. And then the control signals delivering to the mechanical structure can be determined from the perspective of spatial geometric relationships. Thus the orientation of the antenna array can be adjusted through the mechanical structure. Gradually the time difference will be controlled within a preset threshold under the closed loop regulation. At this time where the laser pointer in the center of this array pointed is the PD source. Finally the monitoring and localization of the PD source is completed. Then a monitoring and localization experiment system is established to test the above method. The results show that the experiment system can detect the local discharge signal effectively and locate the PD source accurately, which is of important meaning for the realization of large-scale PD monitoring and localization.

Key words: multi-dimension monitoring; automatic orientation; ultra-high frequency method; partial discharge

0 引言

设备若存在绝缘缺陷且不及时检修,最终会导致绝缘击穿、设备突然断电,从而导致电力中断,造成较大的损失。有数据表明,90%的电力故障最初就是源于不同原因的绝缘缺陷^[1],而所有缘由的绝缘缺陷都会发生局部放电。因此,对运行设备进行局部放电监测,及时发现局部放电信号,尽早对缺陷进行检修处理,可以有效避免绝缘击穿故障的发生^[2]。

近些年来,所提出的局部放电现象的监测方法主要:通过光纤传感器检测电弧光实现^[3],基于声发射(Acoustic Emission, AE)法实现^[4];应用较多的通过检测局部放电辐射的超高频段(300~3 000 MHz)电磁波信号来监测局部放电的特高频法(Ultra High Frequency, UHF)实现^[5-7],均有研究证明其具有较好的监测效果^[8]。在线监测常采用“到达时间差(Time Difference of Arrival, TDA)”法进行局部放电定位^[9]。其主要思路为:比较安装于不同位置的传感器接收到信号的时间来确定局部放电发生的位置,研究的不同点在于传感器的安装位置以及如何获得,处理所获得的时间差信号来定位局部放电源。相关学者提出将四通道的天线阵列作为传感器,再采用牛顿迭代法、搜格法等方法求解时差方程^[10]。其中,通过搜格法与粒子群优化算法求解时差方程的实质是求解相应误差方程最小值,并在预设范围内搜寻相应的坐标,但是此种方法计算效率较低^[11]。平面相交定位法同样可用于局部放电定位:首先通过插值互相关法获得天线阵列之间的时差,再通过平面相交法求解时差方程,将统计选择定位结果中出现概率最高的位置作为最终结果。但是此方法实现较高准确度监测应满足一定限定条件,即局部放电源与天线阵列的间距与夹角均需较小^[12]。

上述特高频法的局部放电监测方法中,传感器安装采用的大多为固定的天线阵列,装置

只可实现天线阵列所在平面内的监测,限制了局部放电的监测范围,这也导致一些较优质的算法需在一定前提下才可实现高准确度的局部放电监测。

为此本文提出一种自动定向的局部放电监测定位装置,由舵机与步进电动机实现天线阵列的多维度信号监测,并提出装置适用的UHF信号判别算法与局部放电源定位算法,实现自定向、高准确度和大范围的局部放电监测及定位,最后通过实验验证了所述方法的可行性。

1 局部放电监测装置设计

图1为变电站局部放电监测定位装置的示意图。图1中, $t_1 \sim t_4$ 为局部放电源发出的电磁信号被四支天线接收所需的时间。舵机、步进电动机与天线阵列是自动定向装置的主要组成部分。当变电站内的电气设备产生局部放电时,辐射出的UHF信号可被天线阵列的四支天线接收到。信号采集控制器同步采集经信号放大、滤波处理后的四通道信号,并将采集所得的电磁波信号转换为相应数字化波形,再进行UHF信号识别,并在识别到缺陷产生的UHF信号时,信号采集控制器控制报警电路发出警报。根据同一局部放电信号到达各天线的时差,利用局部放电监测定位算法得到传输给步进电动机与舵机的控制信号,使天线阵列旋转至正对局部放电源的位置,并利用激光头指示局部放电源的方位,实现局部放电直接定位的功能,装置结构框图如图2所示。

步进电动机与舵机是实现天线阵列多方位检测UHF信号的关键机械结构。步进电动机可以实现360°的旋转,固定于步进电动机输出轴的舵机本身可以随步进电动机输出轴旋转。通过在舵机的摆臂上加接一个机械杆,舵机可以实现纵向180°的转向。此二者的旋转在三维坐标系上的体现如图3所示。步进电动机实现 xOy 平面上 α 角度的旋转($0^\circ < \alpha < 360^\circ$),舵机则实现 xOz 平面上 β

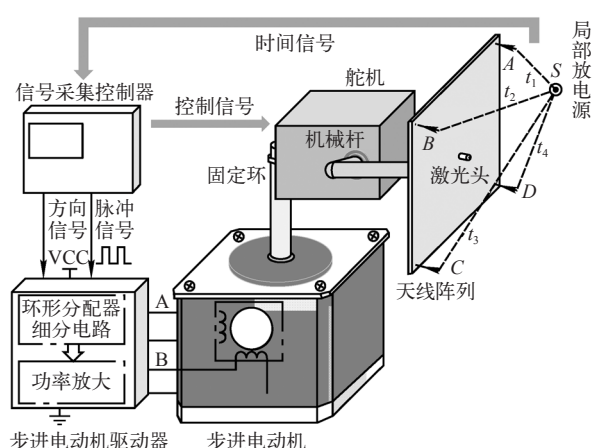


图1 变电站局部放电监测定位装置结构图

Fig. 1 Structure diagram of the partial discharge monitoring and localization equipment in substations

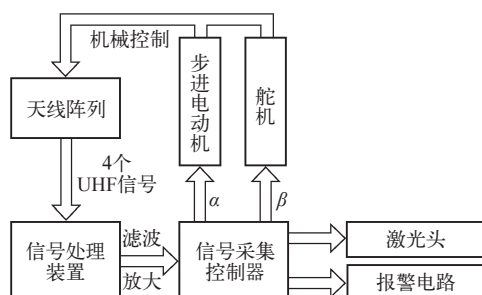


图2 变电站局部放电监测定位装置结构框图

Fig. 2 Structure block diagram of the partial discharge monitoring and localization equipment in substations

角度的旋转 ($0^\circ < \beta < 180^\circ$)，从而使天线阵列可以指向任意方向。

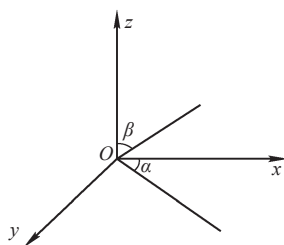


图3 步进电动机与舵机的旋转效果图

Fig. 3 Rotation renderings of the stepping motor and the steering gear

2 局部放电监测定位算法

系统定位算法流程如图4所示。信号采集控制器将经信号放大与信号滤波处理后的信号转换为数字波形，并对四通道数字波形的时间差进行分析判断。若任意两个数字波形间的时间

间差均为零，此处所述的零为理想情况下的时间差，实则控制于误差允许范围内即可，在此预设阈值 T 。若时间差均在 T 以内，可以说局部放电信号在误差允许范围内同时抵达四支天线，则此时打开激光头，激光所照处即为局部放电发生处；若时间差大于 T ，信号采集控制器传输控制信号，令步进电动机、舵机分别转动 $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\beta$ 角度，驱使局部放电源的位置近似正对天线阵列的正中央。经过重复采样、分析、计算和输送控制信号直至UHF信号时间差在 T 以内。此时控制激光头开启，指向局部放电所在位置，实现局部放电源的定位。

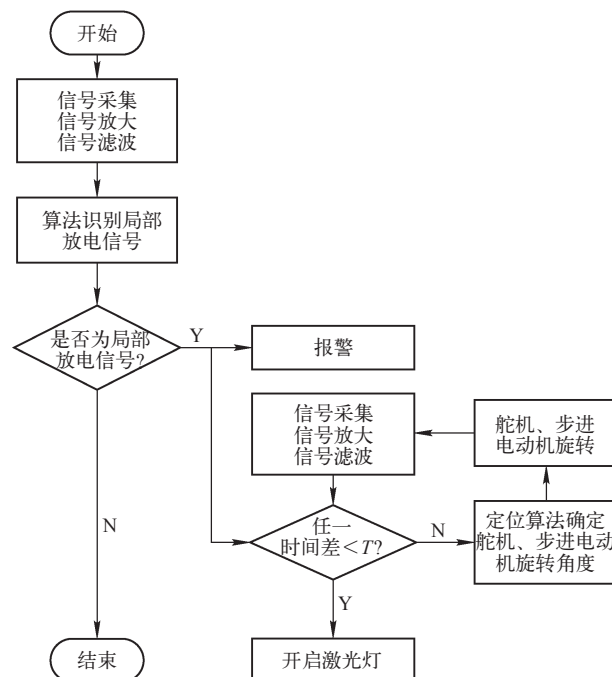


图4 变电站局部放电监测定位装置工作流程图

Fig. 4 Route chart of the partial discharge monitoring and localization equipment in substations

2.1 UHF信号识别

由于天线阵列采集的脉冲型随机干扰信号较难区分消除，在局部放电图形分析模式下，选择以图形的方式充分展现多种干扰信号，并根据各种干扰和真正局部放电脉冲的特征区分两者^[13-14]。信号判断流程如图5所示，信号采集控制器将四支全向天线采集到的电磁波信号转换为各个数字化波形，通过分析、比较图形与必要的处理，判断采集到的脉冲信号是否

为局部放电信号：对于具有固定相位的脉冲干扰，通过分析信号的脉冲幅值在每个正弦周波上的分布，在 $N-\Phi$ 、 $N-Q-\Phi$ 的统计上展现出单个的次数峰值，在 $Q-\Phi-t$ 上展现出整齐的排列；对于与正波电压相位有时间相关规律的干扰脉冲，分析相位、时间的关系，在 $Q-\Phi-t$ 三维图谱上呈现出椭圆形、圆形、S形和斜线形等有规律的图形；对于随机出现的干扰脉冲，由于出现的相位、幅值和次数的不确定性，图形往往相位杂乱，可通过 $N-Q-\Phi$ 三维图谱区分。

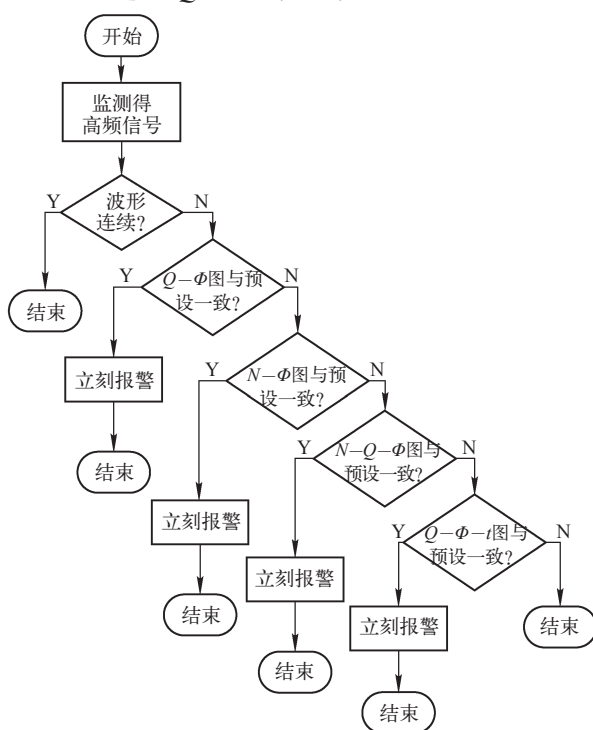


图5 信号判断流程图

Fig. 5 Route chart of the signal discrimination

2.2 舵机旋转角度的确定

以舵机旋转角度 $\Delta\beta$ 的计算为例进行说明，步进电动机旋转角度 $\Delta\alpha$ 的计算同理。纵向投影图如图6所示。图6中，实线表示当前时刻的投影位置关系； b 为局部放电源 S 与天线阵列 AB 边的投影距离； a 为局部放电源 S 距天线阵列 CD 边的投影距离；虚线图表示天线阵列纵向旋转 θ 角度后局部放电源位于中心时的投影图，此时局部放电源与天线阵列中心的连线应垂直于阵列投影，且局部放电源距天线阵列 AB 边与 CD 边的投影距离 m 应相等，记天线阵

列边长为 L ，具体计算如下。

根据几何关系， b 、 a 分别为 $\triangle SAB$ 、 $\triangle SCD$ 的高，可由海伦公式求出 $S_{\triangle SAB}$ 、 $S_{\triangle SCD}$ ，计算公式为

$$P = (L + ct_1 + ct_2) / 2$$

$$S_{SAB} = \sqrt{P(P-L)(P-ct_1)(P-ct_2)} \quad (1)$$

$$P = (L + ct_3 + ct_4) / 2$$

$$S_{SCD} = \sqrt{P(P-L)(P-ct_3)(P-ct_4)} \quad (2)$$

式中， c 为电磁波的传播速度， $c = 3 \times 10^8$ m/s。

则 a 、 b 计算公式为

$$a = \frac{S_{\triangle SCD}}{L}$$

$$b = \frac{S_{\triangle SAB}}{L} \quad (3)$$

由于 a 、 b 的变化率相同，且 $a+b=2m$ ，则局部放电源至阵列中心的投影距离 h 计算公式为

$$h = \sqrt{\left(\frac{L}{2}\right)^2 + m^2} = \sqrt{\left(\frac{L}{2}\right)^2 + \left(\frac{a+b}{2}\right)^2} \quad (4)$$

根据余弦定理可得

$$a^2 = h^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2 - 2h\frac{L}{2}\cos(\theta + 90^\circ)$$

$$b^2 = h^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2 - 2h\frac{L}{2}\cos(90^\circ - \theta) \quad (5)$$

将两式相减即可得转动角度 θ 的表达式为

$$\theta = \arcsin\left(\frac{a^2 - b^2}{2hL}\right) \quad (6)$$

角度 θ 即为舵机顺时针方向上所需旋转的角度，即 $\Delta\beta = \beta - \beta_0 = -\theta$ ，其中 β_0 为舵机当前旋转的角度； β 为舵机旋转后的期望角度。

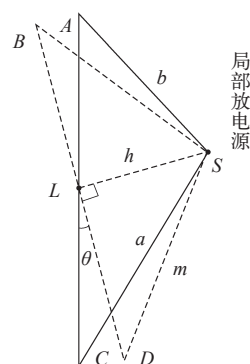


图6 天线阵列与局部放电源的纵向投影图

Fig. 6 Vertical projection of antenna array and partial discharge source

由此即得到了舵机所需旋转的角度,同理可以得到步进电动机所需旋转的角度 $\Delta\alpha$,因此信号采集控制器可以输出控制信号以控制舵机与步进电动机运动,并由舵机与步进电动机协同调节天线阵列的指向,完成一次自动定位操作。

3 局部放电监测模拟实验

为了验证所述局部放电监测装置与方法的可行性,搭建变电站局部放电监测及定位装置实验平台,包括局部放电模拟器、电动机与天线阵列组成的自定向装置和高速示波器等。天线阵列为正方形布置方式,轮廓边长 $L=4\text{ m}$,如图7所示。

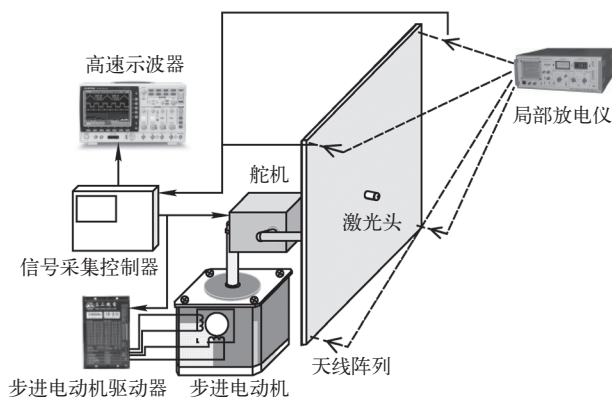


图7 局部放电监测模拟实验装置图

Fig. 7 Device diagram of the partial discharge simulation experiment

在天线阵列四周随意放置局部放电模拟器,利用示波器采集天线接收到的UHF信号,采样率设置为5 GHz。图8为局部放电模拟器发出信号,即局部放电产生且未调整天线阵列指向时,两支全向天线所接收到的UHF信号波形,由波形图可以明显看出两个信号之间存在较大的时间差,需要对天线阵列指向进行调整。在信号采集控制器控制自定向装置完成天线阵列指向的调整,即控制信号时间差在预设阈值 T 以内,两支全向天线所接收的信号波形如图9所示。通过图8和图9的对比可以看出,所述定位方法将493.6 ns的时间差缩短至8.0 ns,明显缩短了信号时间差,实现了使信

号的时间差控制在时间阈值 T 以内,从而使局部放电源正对天线阵列,激光灯的指示可靠,实现了实时准确定位。

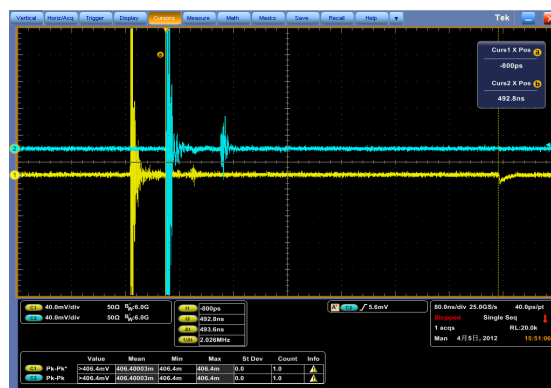


图8 指向调整前两支全向天线接收的信号波形

Fig. 8 The signal waveforms received by two omnidirectional antennas before adjustment

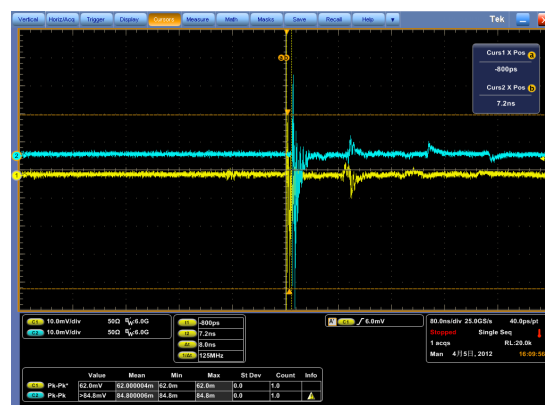


图9 指向调整后两支全向天线接收的信号波形

Fig. 9 The signal waveforms received by two omnidirectional antennas after adjustment

4 结束语

针对目前变电站局部放电监测定位装置只可实现一个空间平面内的局部放电监测的不足,本文提出了一种可以实现监测定位三维空间内的局部放电源的自动定向装置。装置通过步进电动机与舵机调节天线阵列指向,使阵列可指向三维空间的任意方位,并在调整后使用激光头指示局部放电源所在位置,从而实现局部放电的监测及定位。另外本文还提出了适用于该装置的局部放电监测定位算法,首先对天线所接收到的信号在 $N-Q-\Phi$ 等图谱中进行判

别以得到UHF信号,再根据空间几何关系分别确定舵机与步进电动机所需旋转的角度,从而输出相应的控制信号,并通过闭环多次反馈调节来提高控制准确度。最后在实验室条件下模拟了局部放电现象,结果表明所述装置和方法可以有效监测到局部放电信号并能实现准确定位,验证了此方法实现局部放电源定位的可行性与可靠性,为局部放电监测的发展提供了一个新思路。

参考文献

- [1] MISHRA D K, SARKAR B, KOLEY C, et al. An unsupervised Gaussian mixer model for detection and localization of partial discharge sources using RF sensors[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2017, 24(4): 2589-2598.
- [2] 延野, 钱勇, 段大鹏, 等. 基于ZigBee的开关柜局部放电在线监测系统[J]. 高压电器, 2018, 54(9): 76-84, 91.
- [3] 杨红平, 罗红丹. 基于光纤传感器的局放监测系统研究[J]. 变压器, 2017, 54(9): 39-42.
- [4] NICOARĂ T, MARINESCU A, PĂTRU I. Partial discharge diagnostics in power and instrument transformer based on acoustic emission method[C]. International Conference on Applied and Theoretical Electricity. IEEE, 2016: 1-6.
- [5] 贾自杭, 李燕青. 智能变电站电缆局部放电在线监测系统研究[J]. 中国电力, 2015, 48(1): 137-141.
- [6] PINPART T, JUDD M D. Differentiating between partial discharge sources using envelope comparison of ultra-high-frequency signals[J]. IET Science Measurement & Technology, 2010, 4(5): 256-267.
- [7] HOU H, SHENG G, JIANG X. Robust time delay estimation method for locating UHF signals of partial discharge in substation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(3): 1960-1968.
- [8] VIOLA F, ROMANO P, MICELI R, et al. Performance of the shape of Partial Discharge signal wireless probes[C]. 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, Istanbul, 2013: 1801-1806.
- [9] ROMANO P, ANDRADE M A, CALAMERA A, et al. Partial discharge detection and localization along medium voltage cables[C]. CEIDP, 2017.
- [10] 郑书生, 李成榕, 何梦. 变压器局部放电复数域牛顿迭代网格搜索定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(9): 155-161.
- [11] MIRZAEI H R, AKBARIA, GOCKENBAACH E, et al. A novel method for ultra-high-frequency partial discharge localization in power transformers using the particle swarm optimization algorithm[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2013, 29(2): 26-39.
- [12] 朱明晓, 刘青, 王彦博, 等. 基于平面相交法的敞开式变电站多源局部放电定位方法[J]. 高电压技术, 2018, 44(9): 2970-2976.
- [13] 刘宇舜, 周文俊, 李鹏飞, 等. 基于广义S变换模时频矩阵的局部放电特高频信号去噪方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(9): 211-220.
- [14] IDESMAN A, DEY B. Optimal reduction of numerical dispersion for wave propagation problems – part 2: application to 2-D isogeometric elements[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2017, 321(1): 235-268.

作者简介



李 杰

李杰(1982-),男,本科,工程师,主要从事变电站运行及管理工作。

沈晨(1996-),女,硕士研究生,主要研究方向为电磁测量与仪器仪表。

(收稿日期:2018-11-15) **EA**