

电力无线专网电磁场传输特性研究

钱君霞¹, 杨承潘², 王 亮¹, 刘 铨², 颜 伟²

(1.江苏科能电力工程咨询有限公司, 江苏 南京 211102)

(2.南京师范大学南瑞电气与自动化学院, 江苏 南京 210023)

[摘要] 针对国家电网智能变电站建设中的通讯问题,对电力无线专网的研究显得十分重要.分析无线 4G 的电磁场传输特性,能够更好地掌握无线 4G 传输的范围以及传输的特点,以及更好地解决传输过程中受到的干扰的问题.通过严谨的理论分析和天线的辐射特性仿真,为进一步认识实际运用中的天线电磁辐射特性提供必要的前提.

[关键词] 变电站无线 4G,电磁场传输特性,偶极子天线,信号强度

[中图分类号] TN92 [文献标志码] A [文章编号] 1672-1292(2019)04-0026-06

Research of Electromagnetic Field Transmission Characteristics of Electrical Wireless Network

Qian Junxia¹, Yang Chengpan², Wang Liang¹, Liu Quan², Yan Wei²

(1.Jiangsu Keneng Power Engineering Consulting Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

(2.School of NARI Electrical and Automation, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: In view of the communication problems in the construction of intelligent substation of State Grid, the research on electrical wireless network is very important. We analyze wireless 4G electromagnetic field transmission characteristics to better grasp the scope of wireless 4G transmission and transmission characteristics, and to better solve the transmission interference problems. In this paper, rigorous theoretical analysis and simulation of the radiation characteristics of the antenna provide the necessary prerequisites for further understanding of the electromagnetic radiation characteristics of the antenna in practice.

Key words: substation wireless 4G, electromagnetic field transmission characteristics, dipole antenna, signal strength

随着智能电网的发展和科技进步,变电站自动化已经成为变电站的主要工作模式.变电站的无线 4G 通讯本质上属于智能电网的一部分.先进的信息技术和无线通信技术是智能电网建设的基础,同时也是实现变电站自动化的必要条件^[1-3].配电网络具有面积广、节点多等特点,所以配电网络的管理十分复杂和困难.无线通信技术在变电站自动化的广泛应用使得变电站系统的管理更加科学化和规范化.有效的通信方式是变电站实现高度自动化的关键.变电站无线 4G 通讯形式上也掺杂了物联网的工作模式.在过去的几十年里,无线通信主要在“人联网”中得到广泛的应用,人联网可以理解为无线通讯网络使不同空间上的人联系在一起.按照无线网络进程的发展,今后必定是“人联网”与“物联网”互通的时代.5G 时代所要实现的就是“人与人”、“人与物”、“物与物”之间的互通,不过这些理念现在仍处于理论假设和实验室测试阶段.基于现行技术的发展和可实现性等因数,变电站无线 4G 通讯的研究仍然有十分重要的意义^[4].无线 4G 技术现在已经相当的成熟,就三大运营商而言,截止 2017 年 6 月,中国移动已有 177 万 LTE 基站(全球第一大 LTE 网络)、中国联通 77 万 LTE 基站、中国电信(105 万 LTE 基站).即使 5G 时代的到来,现行的通信基础设施仍然可以继续使用.2/3G 时代,虽然能提供少量的数据业务,但他们主要提供的还是语音服务.早期的 LTE 网络只能能够传送数据包,不具有语音功能,语音功能通过切换至传统的 2/3G 网络来实现.虽然现在 4G 也有了 VOLTE 来实现语言的传输,但大部分语音服务仍然采用传统的 2/3G 网络来实现.

现行变电站通信技术可分为站内的无线通信技术和站外的无线通信技术两种情况.变电站站内的无

线通信技术主要采用近距离无线接入技术,如:无线局域网(Wireless Fidelity, WIFI)、蓝牙、ZigBee 技术. 这些站内的技术相对比较简单,经济性好,但它们都有着自己的缺陷. 从频段的选择上来说,他们都采用工业科学医疗频段,我国工业科学医疗频段采用的是 2.4 GHz 频段^[5-6]. 由于在这个频段使用的设备太多,如微波炉和一些医疗设备,在这个频段下工作很容易受到其他设备的干扰,可靠性相当低. 另外,国家对发射功率也做了明确的限制,例如在城市环境下发射功率不能超过 100 mW,本来这些技术的覆盖范围就小,功率的限制使得它们的覆盖范围不可能过多地增加. 站外无线通信技术,现在主要还是采用的蜂窝制式的方式,如拥有 2.5G 之称的 GPRS 技术和 CDMA 技术^[7]. 站外无线通信的技术主要用于无人值守的变电站远程巡视系统. 现行电力系统自动化领域有着唯一的全球通信标准 IEC61850 标准. 这个通信协议也是智能变电站运作的规范,它的目的也在于实现不同厂商的设备之间的互操作性,即不同厂商之间的设备可以交换信息,主要实现的是对全站的一次、二次设备进行监视、控制以及与远方控制中心实现通信. 但是这种通信模式也只能局限于电力系统内的输电和配电的设备与工作人员进行通信交流,不能实现用户与电网的联系. 变电站无线 4G 的运用,可以使得用户和电网、电网内部(如变电站内和变电站之间)形成一定的联系,这样使得电网的运行更加灵活、实时和准确. 无线 4G 通信的关键技术有正交频分复用技术、多输入输出技术、软件无线电技术、智能天线技术、基于 IP 的核心网络技术、调制与编码技术、高性能的接收机、多用户检测技术^[7-10]. 天线的选址、选型和架设方式等都对无线 4G 通信的通信质量有着直接的影响. 无线 4G 通信中采用的天线也很多样,根据使用的场地和用途选取的天线. 通信天线大多是偶极子天线,本文重点对半波偶极子天线进行研究^[10-16].

1 偶极子天线的电磁特性

1.1 偶极子天线的电磁特点

偶极子天线以其简单的天线结构、低廉的造价成本、稳定的性能等优势在天线领域内有着举足轻重的地位. 偶极子天线是天线工程师研究的热点,偶极子天线的应用领域不断扩展. 偶极子天线铺设简单、有着极高的效率和信噪比,适合中近程距离通讯的入射仰角,具有接近 8 字形的辐射波瓣,其口径效率可以接近 100%,是使用最普遍的天线. 半波偶极子天线由半波长的振子和同轴线组成,馈电方便,常在 100 MHz~3 GHz 频段内使用,定向性为 1.64(绝对增益为 2.15). 载有正弦电流分布的中馈、细直、半波天线的辐射电阻为 73 Ω,馈端的阻抗为 $Z=73+42.5\text{ }\Omega$,通常为了使馈端的谐振电抗为零,要求天线比半波长略短,同时辐射电阻降为 65 Ω. 半波偶极子天线的其他参数如表 1 所示.

表 1 半波偶极子天线参数
Table 1 Half-wave dipole antenna parameters

天线	辐射电阻 R_r/Ω	最大口径 A_{em}/λ^2	有效高度 h_{max}/m	球面填充 因子	定向性	
					D/dB	D/dBi
直线 $\lambda/2$ 偶极子正弦电流分布	73	0.13	λ/π	0.61	1.64	2.15

1.2 偶极子天线的电磁特性计算分析

在分析偶极子天线的电磁特性时,一般假设天线采用中点由平衡的双导线传输对称馈电,电流按照正弦率分布,天线很细(一般直径小于 $\lambda/100$). 这样正弦电流在细天线上近似为自然分布. 如图 1 所示,其馈电方式为

$$I(Z)=I_m\sin(k(l-|z|)).\tag{1}$$

式中, k 为波数, l 为半波振子的馈点到任意一边的端点的长度.

在偶极子天线的两臂上距离中心馈点处 Z 的距离上取天线单元 d_{z1} 和 d_{z2} ,在远场辐射区的电场和磁场中 $E_\varphi=E_r=H_r=H_\theta=0$, $H_\varphi=E_\theta/Z$,其中 Z 为本征阻抗. 故电场和磁场分量只需要求得一个便知道总的远场的电磁场分布. 由远场偶极子的电场公式得

$$dE_{\theta 1}=j\frac{60\pi I(Z)d_{z1}}{\lambda r_2}\sin\theta_1e^{-jkr_1}.\tag{2}$$

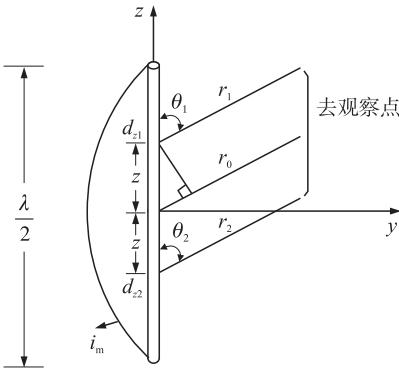


图 1 半波天线图
Fig. 1 Half wave antenna diagram

$$dE_{\theta 2}=j \frac{60 \pi I(Z) d_{z 2}}{\lambda r_2} \sin \theta_2 e^{-j k r_2} . \quad (3)$$

上式中 r_1 和 r_2 分别是两臂上线单元到观察点的距离, r_0 是天线馈点到观察点的距离. θ_1 和 θ_2 分别是两臂上线单元与天线的轴线的夹角.

$d_{z 1}$ 和 $d_{z 2}$ 是天线上的线单元, 取 $d_z=d_{z 1}=d_{z 2}$, 则他们在远区的总辐射场强为

$$dE_{\theta}=dE_{\theta 1}+dE_{\theta 2}=j \frac{60 \pi I(Z) d_z}{\lambda} \sin \theta_1\left(\frac{e^{-j k r_1}}{r_1}+\frac{e^{-j k r_2}}{r_2}\right) . \quad (4)$$

在远场区域, $r_0 \gg \lambda$, 且 r_1, r_2, r_0 可以认为是平行的, 故 θ_1 和 θ_2 相等, 即 $\theta=\theta_1=\theta_2$. 在远场区域对于总的辐射场强, r_1 和 r_2 的差值影响也是很微小的, 故可以近似的认为 $\frac{1}{r_1}=\frac{1}{r_2}=\frac{1}{r_0}$. 但是对于总辐射场强的相位来说必须要考虑行程差.

$$r_1=r_0-z \cos \theta . \quad (5)$$

$$r_2=r_0+z \cos \theta . \quad (6)$$

$$\left(\frac{e^{-j k r_1}}{r_1}+\frac{e^{-j k r_2}}{r_2}\right) \approx \frac{1}{r_0} e^{-j k r_0}\left(e^{-j k z \cos \theta}+e^{j k z \cos \theta}\right)=\frac{2}{r} e^{-j k r_0} \cos (k z \cos \theta) . \quad (7)$$

对于远场的辐射场为

$$dE_{\theta}=j \frac{120 \pi I(Z) d_z}{\lambda r} \sin \theta e^{-j k r} \cos (k z \cos \theta) d_z . \quad (8)$$

整个天线的辐射场为 dE_{θ} 沿偶极子的臂积分, 即

$$d E=j \frac{120 \pi I_m d_z}{\lambda r} \sin \theta e^{-j k r} \int_0^l \sin (l-|z|) \cos (k z \cos \theta) d_z=j \frac{60 I_m}{\lambda r}\left[\frac{\cos (k l \cos \theta)-\cos k l}{\sin \theta}\right] e^{-j k r} . \quad (9)$$

对于半波天线, $2 l=0.5 \lambda$ 则 $\cos \left(\frac{2 \pi}{\lambda} \frac{\lambda}{4}\right)=0$, 于是有

$$E_{\theta}=j \frac{60 I_m}{\lambda r} \frac{\cos \left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right)}{\sin \theta} e^{-j k r} . \quad (10)$$

其方向性函数(波瓣图因子)为

$$f(\theta, \varphi)=\frac{\cos \left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right)}{\sin \theta} . \quad (11)$$

对应方向性图如图 2 所示, 半功率波束宽度为 78° .

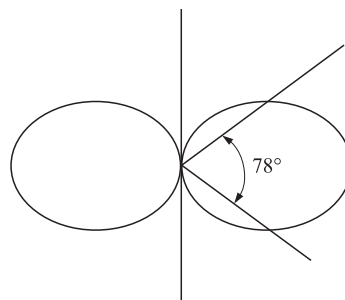


图 2 方向性图

Fig. 2 Directional map

2 无线通信的频带和制式

从 20 世纪 80 年代的模拟蜂窝技术开始, 人类正式跨入了无线通信的大众时代. 蜂窝技术也被后续的 2G、3G、4G 技术所采用. 移动通信技术经历的主要时代如图 3 所示. 现行的 4G 技术以 LTE(Long Time Evolution)为主要的制式, LTE 又可按照工作的方式分为 FDD(Frequency DievrSION Duplexing)和 TDD(Time Diversion Duplexing), 且这两种方式都有比较广的实践应用, 技术都相对成熟. 两种方式各有优缺点, FDD 通信虽然节省时间, 会更快, 不过占用信道比较大. TDD 虽然占用信道少, 不过传输速率和效率上比 FDD 差. 所以不能简单地评价某一种方式的优越性. 对于技术的发展, 两种方式都能促进技术的发展.

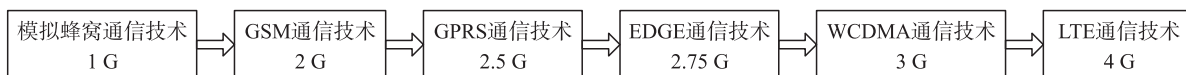


图 3 移动通信技术演进的大致过程

Fig. 3 The general process of mobile communication technology evolution

三大运营商的不同时代的制式、频段占有情况, 具体如表 2.

表 2 三大运营商 4G 网络下的不同制式对比

Table 2 Comparison of different standards under the three major operators 4G networks

运营商	上行频率/MHz	下行频率/MHz	频宽/MHz	4G 的制式
中国移动	1 880~1 890	1 880~1 890	130	TD-LTE
	2 320~2 370	2 320~2 370		
	2 575~2 635	2 575~2 635		
中国联通	2 300~2 320	2 300~2 320	40	TD-LTE
	2 555~2 575	2 555~2 575	10	FDD-LTE
	1 755~1 765	2 850~2 860		
中国电信	2 370~2 390	2 370~2 390	40	LD-LTE
	2 635~2 655	2 635~2 655	15	FDD-LTE
	1 765~1 780	1 860~1 875		

通信过程中,天线发射出来的电磁波,会因为传播过程中的种种原因产生损耗.这种损耗致使天线发射出来的电磁波不能够无线远的传播.因此用户终端接收到的信号强度也会因为位置的不同而不同,这种信号的强弱度会直接影响到用户是否能够正常的通信.谷歌公司对信号的强度定义了两个单位,分别为 dBm 和独立信号单元(alone signal unit, asu).在 2G,3G 时代 dBm 与 asu 的计算公式为

$$\text{dBm} = -113 + 2 * \text{asu}. \quad (12)$$

在 4G 时代 dBm 与 asu 的计算公式为

$$\text{dBm} = -140 + \text{asu}. \quad (13)$$

表 3 为信号强度分布表.一般来说,4G 信号强度不低于-115 dBm 不会严重影响业务.故最小接收的可用信号为-115 dBm.

由信号强度公式

$$P_{\min}(\text{dBm}) = 10 \lg \left(\frac{P_{\min}(\text{mW})}{1(\text{mW})} \right), \quad (14)$$

可得

$$P_{\min} \approx 3.16 \text{ nW}. \quad (15)$$

表 3 信号强度分布表

Table 3 Signal intensity distribution table

信号的强度/dBm	信号品质
-40~-50	信号为在基站附近
-50~-60	信号属于非常好
-60~-70	信号属于良好
-70~-80	信号属于稍弱
-80~-90	属于信号弱
<-90	基本能通讯状态

3 仿真部分

3.1 偶极子天线馈点电压幅值计算

馈源采用正弦电压,幅值为 U_{s0} ,有效值为 U_s ,天线参数匹配时有,负载阻抗和特性阻抗相等即 $R_r = R_L = 75 \Omega$,等效电路如图 4 所示.

经分析可知,有天线的辐射功率为

$$P = \left(\frac{U_{s0}}{\sqrt{2}} \frac{1}{R_r + R_L} \right)^2 R_r. \quad (16)$$

若取宏基站的馈源功率为 20 W,则馈点电压为

$$U_{s0} = \sqrt{2} \sqrt{20 \div 75} \times 150 \approx 109.54 \text{ V}. \quad (17)$$

3.2 偶极子天线仿真模型搭建和结果

搭建如图 5 所示的偶极子天线仿真模块,实验后其仿真结果如图 6-图 8 所示.在 $\varphi = 0^\circ$ 的方向上波瓣宽度(-3 dB)宽度为 $9.159\ 98^\circ$,最大的增益在 $\theta = 80^\circ$ 时,5.339 4 dB.

根据电磁波在自由空间传播的原理,已知场强(E)功率密度(坡印廷矢量)的大小为:

$$S = |\mathbf{E} \times \mathbf{H}| = \frac{E^2}{\eta_0}. \quad (18)$$

自由空间传播的电磁波 $\eta_0 = 120\pi = 377 \Omega$.

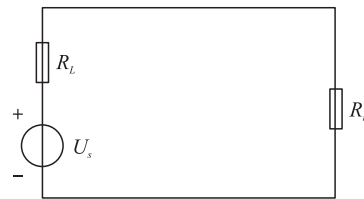


图 4 天线回路的等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit of antenna loop

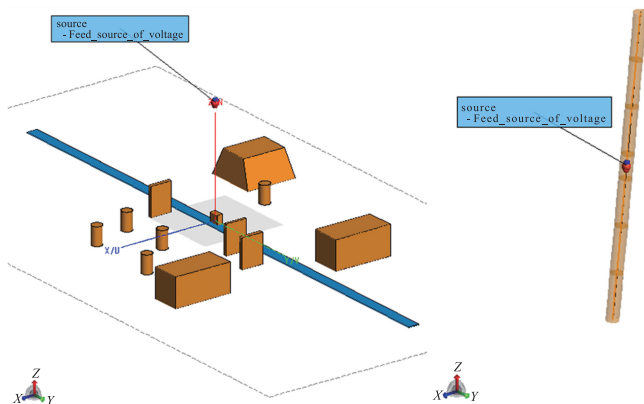


图 5 偶极子天线仿真模型搭建

Fig. 5 Dipole antenna simulation model construction

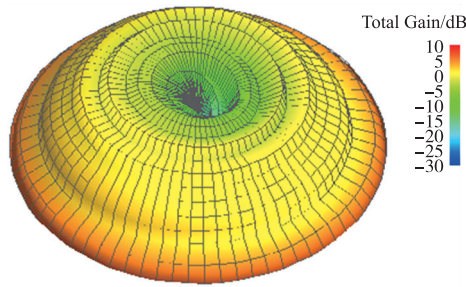


图 6 偶极子天线方向图

Fig. 6 Dipole antenna pattern

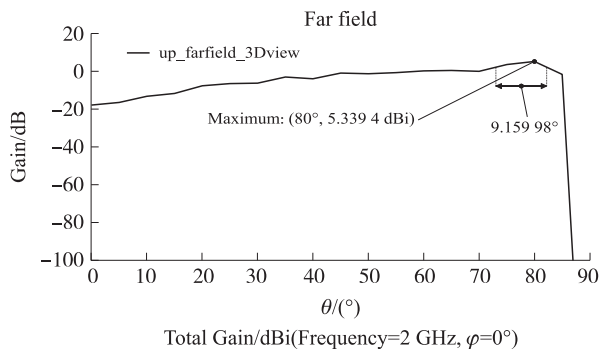


图 7 偶极子天线仿真结果, $\varphi=0^\circ$ 时, 各 θ 的增益图

Fig. 7 Dipole antenna simulation results, $\varphi=0^\circ$, the gain map of each θ

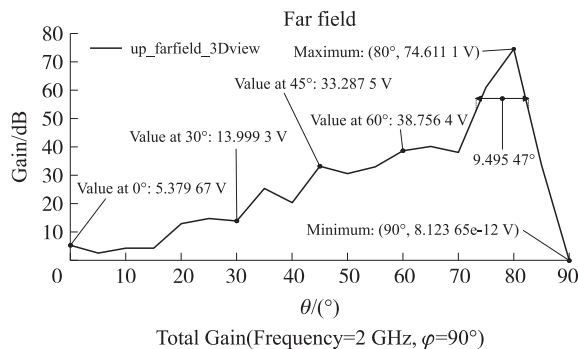


图 8 $\varphi=90^\circ$ 时, 各 θ 场强 E 分布图

Fig. 8 Field intensity E distribution map of each θ at $\varphi=90^\circ$

4 结语

相对于传统的变电站通讯方式,变电站无线 4G 在智能电网中的应用相对新颖. 2017 年 5 月首个企业级无线 4G 专网(陕西电网)开通,验证了变电站无线的可行性. 本文通过对偶极子天线的电磁特性、当下运行的 4G 网络和变电站无线 4G 相关理论的分析以及模拟天线在实景情况下的仿真,验证了添加障碍物的偶极子天线的辐射特性,为更好地建设无线 4G 变电站提供了依据.

[参考文献](References)

- [1] 杨维娜. 论无线通信技术在变电站自动化中的应用[C]//天津市电子工业协会 2017 年年会. 天津, 2017.
YANG W N. On the application of wireless communication technology in substation automation[C]//Proceedings of 2017 Annual Meeting of Tianjin Electronics Industry Association. Tianjin, 2017. (in Chinese)
- [2] 姜琴, 陈剑云. 基于 CDMA 的变电站移动视频监控系统的的设计[J]. 工业控制计算机, 2008, 21(4): 41-43.
JIANG Q, CHEN J Y. Design of CDMA-based substation mobile video surveillance system[J]. Industrial control computer, 2008, 21(4): 41-43. (in Chinese)
- [3] 王宏. 智能变电站通讯技术及其发展方向研究[J]. 通讯世界, 2014, 19(24): 109-110.
WANG H. Research on intelligent substation communication technology and its development direction[J]. Communication world, 2014, 19(24): 109-110. (in Chinese)
- [4] 尚建华. 智能变电站通讯技术及其发展方向分析[J]. 中国新通信, 2017, 19(2): 2.
SHANG J H. Analysis of communication technology and development direction of intelligent substation[J]. China new communications, 2017, 19(2): 2. (in Chinese)

- [5] 马林可. 基于 IEC-61850 的研祥变电站通讯管理机[J]. 可编程控制器与工厂自动化,2010,6(7):59-60,78.
MA L K. Communication power management machine of EVOC substation based on IEC-61850[J]. Programmable controller and factory automation,2010,6(7):59-60,78.(in Chinese)
- [6] 周帆. 无线通信 4G 关键技术浅析[J]. 数字技术与应用,2016,7(10):32.
ZHOU F. Analysis of key technologies of wireless communication 4G[J]. Digital technology and application,2016,7(10):32.(in Chinese)
- [7] 姚新和. 4G 通信系统关键技术[J]. 电子技术与软件工程,2017,6(22):37.
YAO X H. Key technologies of 4G communication system[J]. Electronic technology and software engineering,2017,6(22):37.(in Chinese)
- [8] 林心勇. 电力故障指示器 4G 无线专网通信单元设计与实现[J]. 电力信息与通信技术,2017,15(11):71-76.
LIN X Y. Design and implementation of 4G wireless private network communication unit for power fault indicator[J]. Electric power information and communication technology,2017,15(11):71-76.(in Chinese)
- [9] 倪振华,林亦雷,曾惠兰. 基于变电站通信网的应急现场无线通信覆盖技术和装备研究[J]. 电气应用,2015,34(9):126-129.
NI Z H,LIN Y L,ZENG H L. Research on emergency field wireless communication coverage technology and equipment based on substation communication network[J]. Electrical application,2015,34(9):126-129.(in Chinese)
- [10] 约翰 D 克劳斯,罗纳德 J 马赫夫克. 天线(上册)[M]. 章文勋,译. 3 版. 北京:电子工业出版社,2017:7.
JOHN D K,RONALD J M. Antennas:for all application[M]. ZHANG W X,translation. 3rd ed. Beijing:Electronics Industry Publisher,2017:7.(in Chinese)
- [11] JIA S,HONG S X. Image surveillance system in the unattended substation based on harris corner detection[J]. Advanced materials research,2012,1693(488):82-84.
- [12] YUN W,ZHAO Y Q,YU T Z,et al. The design and implementation of substation monitoring system based on zigbee network[J]. Applied mechanics and materials,2014,3008(510):92-95.
- [13] FENG J S,KUO ZHENG,JIE Q F,et al. Wireless communication in the application of the intelligent substation distributed test system[J]. Applied mechanics and materials,2014,3009(519):56-59.
- [14] FENG J S,KUO Z,JIE Q F,et al. Wireless communication in the application of the intelligent substation distributed test system[J]. Applied mechanics and materials,2014,3009(519):47-50.
- [15] ANONYMOUS. Arcadian networks delivers private broadband wireless substation communications to east central energy[J]. Wireless news,2008,1795(136):67-70.
- [16] ANONYMOUS. Arcadian networks;arcadian networks delivers private broadband wireless substation communications to east central energy[J]. Electronics business journal,2008,2450(476):68-70.

[责任编辑:陈 庆]