

DOI: 10.7667/PSPC161983

适于电动汽车充电桩集群管理系统的 WSN 路由算法研究

周凯, 杨晓东, 张有兵, 陈宇, 谢路耀, 卢俊杰

(浙江工业大学信息工程学院, 浙江 杭州 310023)

摘要: 在深入分析了电动汽车(EV)充电桩集群管理系统的通信需求和对比了典型通信方式的基础上, 综合层次分析法和离差最大化方法确定了基于光纤通信技术和无线传感器网络(WSN)的管理系统双层组网通信架构。针对充电桩集群的应用环境提出一种基于地理位置信息的高效 WSN 路由机制——GLAR, 在一定程度上缓解了“热区”问题, 并且实现了最小跳路由。根据用户充电规律, 采用蒙特卡洛模拟法模拟用户充电需求, 并在相同网络环境下对 GLAR 和 LEACH 的性能进行了仿真和对比分析。研究表明, GLAR 算法在平均传输时延、网络吞吐量和扩展性等性能上表现优异, 能够满足集群管理系统对数据通信服务性能的需求。

关键词: 电动汽车; 层次分析法; 无线传感器网络; 路由协议; 网络通信; 蒙特卡洛模拟法

An effective WSN routing protocol for electric vehicle charging piles management system

ZHOU Kai, YANG Xiaodong, ZHANG Youbing, CHEN Yu, XIE Luyao, LU Junjie

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: Based on the in-depth analysis of the data communication requirements of the electric vehicle (EV) charging piles management system and the comparison of the typical network communications, the double network communication architecture of the management system composed of optical fiber communication technology and wireless sensor network (WSN) is determined by using analytic hierarchy process and dispersion maximization integratively. For the application environment of the charging piles, a reliable geographic location-aware routing protocol (GLAR) is proposed. To a certain extent, the “hot spots” problem is alleviated and the minimum hop routing is realized. Monte Carlo simulation method is utilized to generate the charging needs of customers based on their charging rule. The performances of GLAR and LEACH applied to the same network are simulated and compared. The simulation results indicate that the average transmission delay, network throughput and scalability of GLAR are excellent and can meet the communication requirements of management system commendably.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51507153) and Natural Science Foundation of Zhejiang Province (No. LY16E070005).

Key words: electric vehicle (EV); analytic hierarchy process; wireless sensor network (WSN); routing protocol; network communication; Monte Carlo simulation

0 引言

可再生能源的充分利用已被公认为解决能源危机和环境问题的有效途径^[1], 在新能源不断开发利用的潮流下, 电动汽车(EV)因在节能减排和能源安全等方面表现出的重要意义, 成为人们关注的焦点^[2-3]。目前, EV 的能源供给主要由充电桩充电提

供^[4]。EV 充电桩在提供安全、高效的充电服务的基础上, 需要通过先进的技术手段对同一区域多个充电桩进行集中监视和统一经营管理, 提供完善的集群管理系统, 以推动 EV 产业的发展。

由于各地都在加快 EV 基础设施的建设和配套, 充电桩集群规模向着超大规模方向发展^[5-6], 给集群管理系统带来很大的挑战。目前国内外的研究主要集中在充电桩集群的建模^[7]、布局规划^[8]以及经济运行策略分析^[9-10]等方面, 具体的底层通信技术方案的研究仍处于探索阶段。文献[11]分析了利用

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51507153); 浙江省自然科学基金项目 (LY16E070005)

WSN 进行 EV 的能量管理以及实现信息系统管理和电子计费的可行性。文献[12]以 IEC61850 系列标准为技术基础, 提出 EV 充电站监控系统建模方案, 但却没有对用于信息集成和交互的通信方式作具体分析。文献[13]提出利用 Zigbee 和 CAN 总线构建电能监控系统, 很大程度上降低了系统的管理成本, 但其并未涉及关于 Zigbee 路由的改进, 对监控系统数据的高效流通有一定约束。几乎所有上层的应用和需求都依赖于底层通信技术方案的支撑, 因此对底层通信系统的深入研究是进一步探讨上层应用的前提和关键。

本文在分析了 EV 充电桩集群管理系统的通信需求和对比了典型通信方式的基础上, 利用层次分析法和离差最大化方法确定了基于光纤通信和无线传感器网络(WSN)的管理系统双层组网通信架构, 其核心是一种基于地理位置信息的 WSN 路由算法 GLAR, 能够实现对充电桩集群的有效管理与安全防护。

1 充电桩集群管理系统通信方案

1.1 管理系统对数据通信的需求分析

1.1.1 监控业务架构

EV 充电桩集群管理系统主要应用微机及网络通信技术实现区域内设备的监视、保护、控制、管理和事故情况下的紧急处理, 构成完整的自动化级管理系统, 这使得高性能的数据通信网络成为系统合理运行的关键因素之一。充电站监控业务架构如图 1 所示。

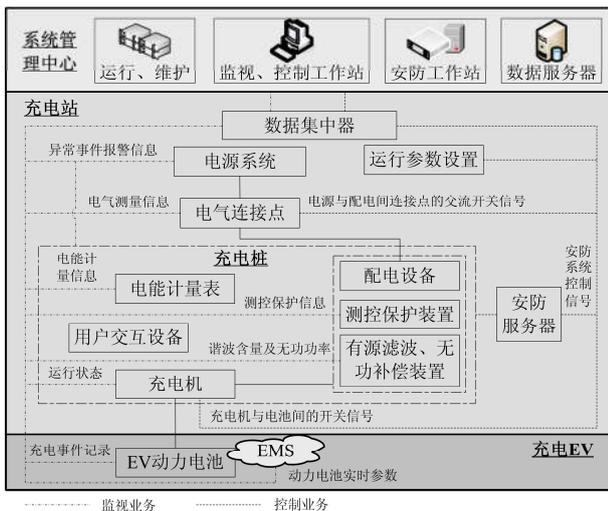


图 1 充电站监控业务架构

Fig. 1 Charging station supervisory control business architecture

考虑某区域存在若干个充电站, 处于同一充电桩集群管理系统中。对于每个充电站, 要求实现一种确定服务质量的多对一流量模式的高效数据通信, 且具有以下特点:

- 1) 每台充电桩都要在系统的管理中运行, 因此所有节点必须入网。
- 2) 区域网络拓扑结构固定, 充电桩分布密度较高。
- 3) 所有充电桩都是同构的, 每个充电桩都有一个唯一的标识。
- 4) 网络通信中存在事件驱动型的业务分组, 对时延和可靠性要求较高。

1.1.2 数据通信需求分析

充电桩中存在充电机、智能电表、谐波监测以及测控保护装置等多种监控设备^[11], 需要对参数配置、监控设备状态及充电过程实时信息等进行集成、分析。根据南方电网公司制定的电动汽车充电设施企业标准^[14]对通信报文的要求, 充电参数配置阶段、充电阶段和充电结束后最大发送量分别为 24 packets/s、57 packets/s 和 12 packets/s, 监视单元产生报文的间隔周期为 20 ms, 最大数据长度为 8 bytes。可见, 各充电桩与系统之间的数据交互频繁、种类繁多。

充电桩集群管理系统中, 由充电业务产生的数据涉及用户隐私及充电桩运营商的金额交易信息, 重要性不言而喻, 被要求必须可靠地送达系统管理中心, 记录至系统数据服务器。

系统安全防护监控需要与充电设施、配电设备等实现实时联动, 针对故障及报警做出实时处理, 确保设备及操作人员安全。根据标准^[14], 充电桩与管理系统的通信规约可采用 IEC61850 标准。IEC61850 标准的第五部分对 P1 类通信网络实时性提出的指标如表 1 所示^[15]。

表 1 IEC61850 P1 类通信实时性要求

Table 1 IEC61850 P1 class communication real-time requirements

类型	应用对象	实时性指标
快速报文	启动、停止、触发等	≤100 ms
中速报文	正常状态信息	≤100 ms
慢速报文	事件记录、读取或改变设置值	≤500 ms

1.2 管理系统双层融合通信组网架构

为了实现充电桩集群运行与管理的智能化, 需要重点研究集群管理系统的通信组网方式。

结合管理系统的特点及通信需求, 以实现数据的高效交互及便于管理为原则, EV 充电桩集群管

理系统的通信架构采用如图 2 所示的双层组网方式。

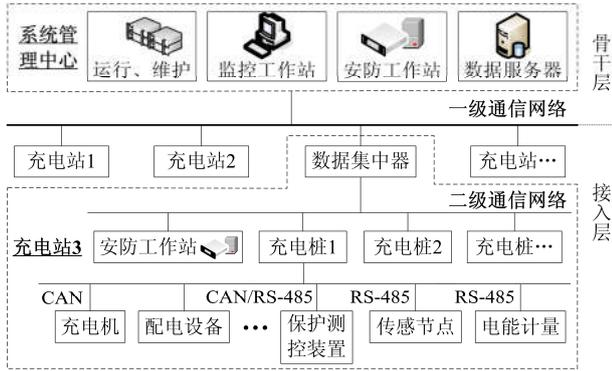


图 2 集群管理系统双层组网通信架构

Fig. 2 Double network communication architecture of cluster management system

整个通信架构分为站内通信子系统和站间通信子系统两部分。站内通信子系统中信息和数据的传递由二级通信网络承担，其中存在多个分散终端，线路连接复杂，对通信方式的组网方便性、可扩展性等要求较高，但是对通信距离要求不高，相对站间通信，综合数据量不大。各数据集中器(Sink 节点)与管理中心之间的信息交互由一级通信网络承担，站间通信环境较封闭，数据量大，一般需要跨越较大的地理区域，对通信距离要求很高。此外，一级网络可以看作是二级网络数据传递的延续，各充电桩产生的业务需要一级、二级网络的承接合作才能传至系统管理中心，故一级和二级网络对业务的实时性和可靠性都有较高要求。

1.3 利用层次分析法确定管理系统通信方案

调研各种通信方式的特性，考虑满足管理系统数据通信需求，选定以太网(M1)、光纤(M2)、电力线载波通信(M3)、WSN(N1)、时分长期演进技术(无线方式中 3G/4G 技术)(N2)和通用无线分组业务(N3)进行特性比较和分析。

由于上述通信方式都有利有弊，而且都没有表现出关于其是管理系统最佳通信方式的绝对优势，因此本文结合层次分析法^[16](AHP)和离差最大化方法^[17]客观地确定用于集群管理系统的最佳通信方案。下文简述确定管理系统通信方式的步骤。

1) 将待解决问题层次化，建立关于影响因素的递阶层次结构，如图 3 所示。

M3 和 N1 通信距离较短，N2 的相关基础设施多在建设中，信号覆盖尚不够广，都不具备充当一级网络的条件。另外，由于两级网络的规模没有定量，故这里仅简单采用叠加的方式确定组合方案的综合评价指标性能。基于上述考虑，排除不满足条

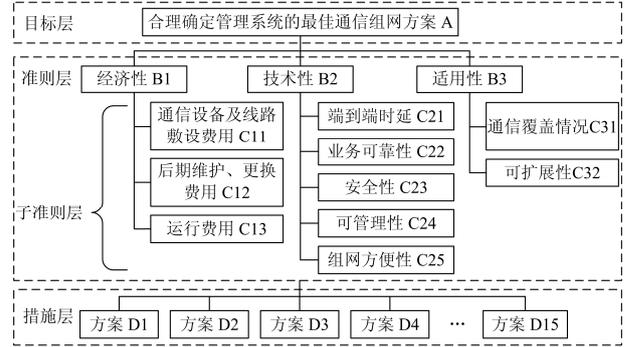


图 3 确定管理系统通信方案的层次分析结构

Fig. 3 Hierarchy analysis structure for determining the management system communication scheme

件和重复的组合，措施层共有 M1M1、M1M2、M1M3、M1N1、M1N2、M1N3、M2M2、M2M3、M2N1、M2N2、M2N3、N3M3、N3N1、N3N2、N3N3 等 15 种待选择的组合方案(组合“M1M2”表示一级通信网络和二级通信网络分别由 M1 和 M2 承担，其他组合的含义与此相同)。

2) 构造各层的判断矩阵。广泛调研各种通信方式的特性^[16,18-20]，结合行业专家评判，得到如表 2 所示的充电站通信方式比较。根据互反性 1~9 标度法对各影响因素的重要性进行判断，得到各层的判断矩阵。

3) 层次排序与检验。参考文献[16]可计算出各评价指标的主观权重 w_{sc} ，考虑到 w_{sc} 容易失去客观性，本文参考文献[17]中决策优化模型，首先根据客观决策信息分别得到可选通信方案的多目标决策矩阵(见附录 A)，然后借助模糊数学概念得到相对优属度矩阵，最后在相对优属度矩阵的基础上，利用离差最大化方法得到客观权重 w_{oc} ，对 w_{sc} 进行修正。综合主观权重 w_{sc} 和客观权重 w_{oc} 可计算得到各指标的综合权重为

$$w_c = [w_c(1), w_c(2), \dots, w_c(m)] \quad (1)$$

式中： $w_c(k) = w_{sc}(k) \cdot w_{oc}(k) / w_{sc} \cdot w_{oc}^T$, $k = 1, 2, \dots, m$ ； m 表示评价指标个数； $w_{sc}(k)$ 和 $w_{oc}(k)$ 分别表示第 k 个指标的主观权重和客观权重； w_c 表示 m 个评价指标的综合权重矩阵。

4) 结果分析。通过对层次总排序结果的分析，得出最后的决策方案。

本文决策方案中，准则层到目标层对应的判断矩阵为 $A = [1, 1/5, 1/5; 5, 1, 5; 1, 1/5, 1]$ ，子准则层到准则层 $B2$ 、 $B3$ 、 $B1$ 对应的判断矩阵分别为 $B2 = [1, 1, 2, 3, 2; 1, 1, 2, 3, 2; 1/2, 1/2, 1, 2, 1; 1/3, 1/3, 1/2, 1, 1/2; 1/2, 1/2, 1, 2, 1]$ 、 $B3 = [1, 1; 1, 1]$ 、 $B1 = [1, 3, 1/3; 1/3, 1, 1/5; 3, 5, 1]$ ，根据以

表 2 充电站管理系统适用的主要通信方式特性比较

Table 2 Characteristic comparison of main communication methods applied to charging management system

指标	有线方式			无线方式		
	M1	M2	M3	N1	N2	N3
C11	较高	高	一般	低	一般	一般
C12	较高	高	较高	较低	较低	较低
C13	较低	较高	低	低	高	高
C21/ms	5~10	0.1	150~250	15~20	<15	>500
C22(量级)	10^{-5} ~ 10^{-9}	10^{-9}	10^{-6}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-5}
C23	好	好	较好	较好	较好	较好
C24	较好	较好	一般	好	较差	较差
C25	较好	较好	较好	好	一般	好
C31/km	20~120	60~100	<10	<1	<12	<35
C32	较好	较好	较差	好	好	好

上判断矩阵可计算出 $w_{sc}=[0.0445, 0.150, 0.083, 0.2060, 0.2060, 0.1202, 0.0619, 0.0714, 0.0714]$ 。子准则层到措施层的判断矩阵依据表2得出,具体判断矩阵见附录A。最终得到措施层在目标层的权重 $w_d=[0.0805, 0.0873, 0.0625, 0.0889, 0.0615, 0.0547, 0.0890, 0.0637, 0.0900, 0.0686, 0.0581, 0.0391, 0.0658, 0.0445, 0.0458]$ 。方案D9所占的权重0.09在所有方案中最大,因此方案D9对应的“光纤+WSN”组合即为管理系统的最佳通信方案。

WSN 以其特有的自组织能力和优越的扩展性,被广泛应用于数据采集和运行监测中,适用于分布式处理以提高数据处理能力,是站内通信子系统的理想通信方式。

WSN 可选择不同通信技术完成传感器节点之间的通信,一般适合采用短距离通信技术。现在主流的短距离通信技术主要有 WiFi、Zigbee 和 BLE mesh, 三种通信技术的主要特性比较如表 3 所示。从表 3 可以看出,采用 Zigbee 技术的无线传感器网络可容纳的最大节点数目明显高于 WiFi 和 Zigbee;在功耗、设备成本两方面上,Zigbee 技术性能最优,BLE mesh 次之,WiFi 最差;WiFi 在通信带宽和距

表 3 短距离通信技术特性比较

Table 3 Characteristic comparison of short-range communication technology

性能	WiFi	Zigbee	BLE mesh
最大节点数	2007	65 536	7
设备成本	高	低	适中
功耗	10~50 mA	5 mA	23 mA
通信带宽	11~54 Mbps	250 kbps	1Mbps
通信距离	20~200 m	2~20 m	20~200 m
稳定性	一般	高, 自动组网	较稳定
无线路由算法	AODV	AODV	BAODV

离上优于其他两种通信技术; Zigbee 凭借其在自动组网上的优势,其稳定性比其他两种技术要强;三种短距离通信技术的无线路由协议都是在 AODV 算法基础上进行的改进,以适应不同应用环境。目前,Zigbee 技术因其低功耗、低成本和组网灵活等优点最为广泛地运用于无线传感器网络。

光纤通信距离可观,传输速率高,可靠性好,适合承担站间通信子系统的业务通信任务。“光纤+WSN”组合方案弥补了相互间的缺陷,达到了优势互补。

管理系统中,每个充电站配置一个无线传感器网络,用于各充电桩与 Sink 节点间的数据交互,每台充电桩抽象成一个传感节点,由定位装置获取的地理位置信息唯一标识。为实现各充电桩与管理中心之间可靠、实时的数据交互,一级网络采用有自愈功能的光纤双环路通信,二级网络需要配备一种合理的 WSN 路由机制。传统的 WSN 路由算法不适用于充电桩所存在的无能量约束的网络环境,此时网络面临的挑战不再是尽可能减小能耗和延长网络生存时间,而在于最大化网络的性能。基于此,需要重点研究适用于 EV 充电桩集群管理系统的高效 WSN 路由算法。

2 路由算法描述

本文提出的 WSN 路由算法 GLAR 采用层次和地理位置信息混合的路由方式,具有较好的可扩展性,适用于构建大规模、高密度网络。算法包含的主要过程有簇的建立阶段和路由的确定阶段。

2.1 传感网络模型

图 4 为电动汽车充电桩集群管理系统中某传感网络的拓扑结构示意图,本文将传感网络划分为若干个簇,每个簇有一个簇头和若干簇成员。分簇式

的拓扑结构便于管理, 无需维护复杂的路由信息, 而且簇头可以对成员节点的数据融合过之后再行转发, 降低了网络负担, 一定程度上保证了重要信息的高效传输。

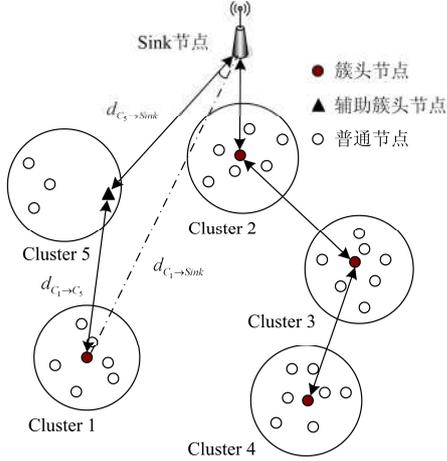


图 4 传感网络拓扑结构示意图

Fig. 4 Topology diagram of sensor network

2.2 簇的建立

本文借鉴 LEACH 算法的基本思想对传感网络进行分簇, LEACH 算法是一种经典的无线传感器网络分簇算法^[21], 具有诸多优点, 但算法本身存在着一些缺陷, 难以满足系统需求。

针对 LEACH 算法在负载平衡、网络连通以及可扩展性方面的缺陷, 引入节点密度因素, 对阈值定义加以改进, 以平衡各簇的负载平衡程度; 引入辅助簇头节点均匀分布于区域中, 确保大规模网络的连通, 保证每个充电桩都与系统连接; 改善算法可扩展性的方法将在 2.3 节中具体介绍。对阈值的定义如式(2)。

$$T_n = 2p\lambda \exp\{(-\lambda)[(-k) \log(1 + k \frac{d_{\max} - d_{s_n \to Sink}}{d_{\max}})]\} \quad (2)$$

其中

$$\lambda = \lambda_{\min} + \alpha \frac{b_n}{N} \quad (3)$$

式中: p 是节点被选为簇头的概率; N 为传感网络中节点总数; b_n 为传感节点 s_n 的邻居节点数; $d_{A \to B}$ 为节点 A 到节点 B 的距离 (A, B 可表示各类型节点); d_{\max} 为区域中节点到 Sink 节点的最远距离; k 、 α 和 λ_{\min} 为特定参数。

从式(2)和式(3)易知, 当节点数 N 一定时, T_n 是变量 b_n 的增函数, 这样就使得传感节点密度较大的区域中选取更多的簇头, 提高了网络负载平衡程度。另一方面, T_n 又是 $d_{s_n \to Sink}$ 的减函数, 节点可根据到 Sink 节点的距离自适应地调整阈值, 缓解“热区”问题。

此阶段, 每个节点随机选择(0,1)中的一个值, 如果选定的值小于特定阈值, 那么该节点将利用 CSMA-MAC 协议广播 ADV 消息, 宣布自己当选本轮簇头, 普通节点根据式(4)决定加入哪个簇, 成为该簇的一个成员, 并通知簇头。

$$S_i \in Q_{C_j} \Leftrightarrow \begin{cases} (R > d_{S_i \to C_j}) \\ \forall k \neq j, S_i \notin Q_{C_k} \\ \forall C_n \in U_i, N_{C_n} \geq N_{C_j} \end{cases} \quad (4)$$

式中: S_i 表示普通节点; Q_{C_j} 表示簇头为 C_j 的簇; R 为节点通信距离; U_i 表示在节点 S_i 通信范围内的簇头节点集合; N_{C_n} 为以 C_n 为簇头的簇成员数。式(4)表示普通节点加入簇时, 不仅考虑距离, 还考虑与之连通的各簇的规模。

2.3 路由的确定

簇结构中的簇头以 TDMA 的方式为簇内成员节点安排发送数据的次序, 簇头在必要的去冗余之后, 采用 CSMA/CA 机制将数据沿簇间路径传送至 Sink 节点。

簇间数据的传输采用基于信任值启发的多跳路由机制, 提高了算法的可扩展性。信任值用来表征节点适合承担数据转发任务的程度, 其他簇节点偏离源节点和目的节点之间连线越小、离 Sink 节点越近, 源节点赋予该节点的信任值就越大。簇间路径的选择遵循: 选择的下一跳是与当前节点连通的信任值最大的节点。路由确定的具体过程如图 5 所示。

图 5 中, r 为当前循环数; h 为最大循环次数; m_r 为当前循环中产生的簇节点(簇头节点和辅助簇头节点)数目; $\Gamma_{C_{Nh}}$ 表示 C_{Nh} 邻接节点集合, 如式(5)所示。

$$\Gamma_{C_{Nh}} = \{s_n \mid s_n \text{ 是簇节点或 Sink 节点, 且 } d_{s_n \to C_{Nh}} \leq R\} \quad (5)$$

$Path_i$ 为 C_i 到 Sink 的路径; 判断节点 P_n 是否已经在路径中是为了防止路径中出现环路。 K_i 为簇节点 C_i 信任值矩阵, 如式(6)所示。

$$K_i = [K_{i,1} \ K_{i,2} \ \cdots \ K_{i,m_r+1}] = (K_{i,j})_{1 \times (m_r+1)} \quad i \in [1, m_r] \quad (6)$$

式中, $K_{i,j}$ 表示节点 C_i 赋予节点 C_j 的信任值 (K_{i,m_r+1} 对应于 Sink 节点), 是由关于角度和距离的函数来度量的, 其计算公式为

$$K_{i,j} = (lt + wt) - (\tau \sqrt{lt^2 + wt^2} \theta_{i,j} + \eta d_{C_j \to Sink}) \quad (7)$$

式中: lt 、 wt 分别为传感区域的长度和宽度; τ 、 η 为信任值度量参数; $\theta_{i,j}$ 是以 Sink 节点为顶点的节点 C_i 的与节点 C_j 所夹的锐角, 见图 4, $\theta_{i,j}$ 通过节点中定位装置获取的地理位置信息 (x, y) 计算。

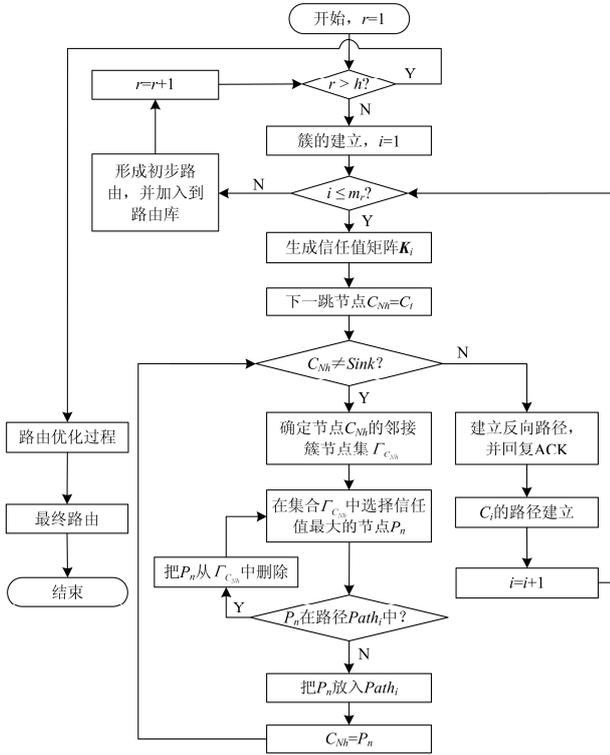


图5 路由确定过程

Fig. 5 Process of route determination

$$\theta_{i,j} = \left| \arcsin \left(\frac{x_{Sink} - x_j}{d_{C_j \rightarrow Sink}} \right) - \arcsin \left(\frac{x_{Sink} - x_i}{d_{C_i \rightarrow Sink}} \right) \right| \quad (8)$$

式中, x_i 、 x_j 、 x_{Sink} 分别为节点 C_i 、 C_j 和 $Sink$ 节点的横坐标值。

图5中, 路径选择过程从源节点 C_i 开始, 考虑各簇节点信任值和连通性决定选择哪条路径, 当 C_{N_h} 最终搜索到 $Sink$ 节点时, 路径即被选定, 算法支持多路径的特性可有效提高路由的可靠性。当 $i > m_r$ 时, 即确定了本次循环的初步路由, 形成了一颗以 $Sink$ 节点为根、簇节点为骨干的路由树。

在簇的建立阶段, 虽然引入了节点密度因素对簇头节点的选择有了一定的导向性, 簇头出现的位置仍然具有随机性。为防止路由树仅有一条主干, 进一步对吞吐量、时延等多目标进行协调优化, 本文采用先广度搜索再深度搜索的方式确定路由。当初步路由建立后, 对当前路由进行一段时间的路由评估, 得到以下评估参数: ① 平均传输时延 D_r (本文统计的时延为因信道接入机制产生的时延和节点本身的处理时延); ② 网络吞吐量 ThP_r , 即观察时间内 $Sink$ 节点收到的总数据量。经过 h 次循环后, 根据评估参数从路由库中确定满足管理系统信息传输要求的最优路由, 并广播相应簇头。路由的确定

可以简化为区间上限性能指标约束的端到端不确定过程寻优求解问题, 在有限次循环内寻求最优解。满足实时性条件下的路由优化模型为

$$\begin{cases} \max(M(1), M(2), \dots, M(r), \dots, M(h)) \\ \text{s.t. } D_r < D_0 \end{cases} \quad (9)$$

$$M(r) = \begin{cases} ThP_r, & D_r \leq D_r^* \\ 0, & D_r > D_r^* \end{cases} \quad (10)$$

$$V = \begin{cases} \lfloor 0.4h \rfloor, & N < 200 \\ \lfloor 0.7h \rfloor, & N \geq 200 \end{cases} \quad (11)$$

式中: D_0 为充电桩集群管理系统中信息传输允许的最大时延, 具体地, 只有该循环的传输时延小于 D_0 时, 才有可能被确定为最终路由; D_r^* 为各循环的时延值按升序排序后的第 V 个时延值, 参数 V 由实验经验获取, 取值如式(11)所示; $\lfloor u \rfloor$ 表示小于 u 的最大整数。

本文基于地理位置信息进行路径选择, 选择的路线是向着 $Sink$ 节点收敛的, 实现了从源节点到目的节点的最小跳路由, 对于充电桩的使用场景(分布密集、无能量约束)来说, 可有效降低传输时延。

3 仿真分析

3.1 基于 MCS 的 EV 充电的集群特性分析

为了测试 GLAR 算法能否满足系统需求, 以一个位于小区停车场内的充电桩集群为例进行分析。根据中国 2010 年通过的《电动汽车传导式接口》^[22], 采用常规充电模式对该小区内的 EV 进行充电, 充电功率为 7 kW, 充电负荷功率因数为 0.9。考虑该集群拥有 300 台充电桩, 每日服务 EV 1200 辆, 电池容量均为 32 kWh。

本文假设每辆 EV 到达充电站的时间是一个遵循一定分布规律的随机变量, 实际生活中, 此分布规律受分时电价、用户用车习惯及充电规律等的影响。同时, 起始充电时的电池容量 SOC_0 也服从一定的分布。

根据文献[23]中的 EV 充电数据设定(具体设定如表 4), 基于蒙特卡洛模拟法(Monte Carlo Simulation, MCS)模拟产生每个 EV 日充电需求数据, 仿真次数为 400 次, 得到日充电 EV 数量分布图, 如图 6 所示。

考虑到算法的使用场景和应用要求, 下文在平均传输时延、网络吞吐量、负载平衡程度和入网节点个数等几个方面分析算法性能。根据文献[24], 用负载平衡方差 σ_r^2 量化簇的负载平衡程度。

表 4 EV 的充电数据设定

Table 4 Charging data set of EV

起始充电 时间分布	时段充 电概率	SOC ₀ 分布	用户要求离开 时的荷电状态
$N(9,0.5^2)$	0.2	$N(0.6,0.1^2)\sqrt{0.2}$	0.8或0.9(各占50%)
$N(19,3^2)$	0.8	$N(0.6,0.1^2)\sqrt{0.2}$	00:00之前充电设置 为0.95, 否则0.9

注: $a \vee b$ 表示取 a 和 b 之间的较大值; $N(a, b^2)$ 表示取值服从均值为 a 、标准差为 b 的正态分布。

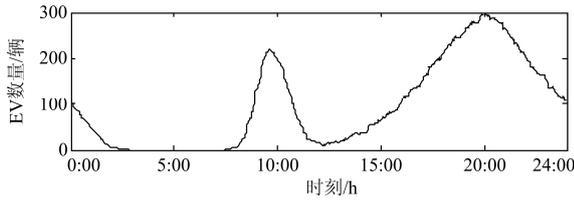


图 6 日充电EV数量分布图

Fig. 6 Quantitative distribution diagram of charging EV per day

$$\sigma_r^2 = \frac{1}{m_r} \sum_{i=0}^{m_r} |N_{C_i} - N_{\text{avg}}| \quad (12)$$

式中: N_{avg} 为当前循环中平均簇成员数; σ_r^2 越小说明簇的负载越平衡。

3.2 参数设置

我国目前尚未出台 EV 充电站建设相关标准和政策, 但根据城市公共停车场工程项目建设标准^[25], 300 个车位的大型停车场占地面积为 8250~14 400 m²。不失一般性, 文中算法的试验场所选择方形区域, 面积为 14 400 m²。

从图 6 可以看出, 投入充电服务的充电桩数量几乎遍布了 0~300 中的每一个数, 特别是在每日 20:00 左右的充电晚高峰时, 站内充电桩更是全部参与服务。故仿真中, 本文分别设上述区域中正在进行充电服务的充电桩数为 25、50、75、...、300 台, 在簇头选举概率 p 不同的情况下形成不同的网络场景, 并假设进行充电的各充电桩均以马尔可夫过程产生长度固定的数据分组作为数据源, 在确定路由路径后, 统计性能参数。根据区域大小及节点通信能力均匀部署 A 个辅助簇头节点, Sink 节点位于区域边缘, 其余节点随机部署。具体实验场景和参数设置如表 5 所示。

3.3 仿真结果及分析

图 7 所示的是 GLAR 算法在不同簇头选举概率下的平均传输时延曲线, 随着节点数的增加, 两条曲线都在上升, 但都满足 IEC61850 标准的实时性要求。图 8 是两种簇头选举概率下 GLAR 的网络吞吐量对比图, 两条吞吐量曲线都呈现先上升后下降

表 5 仿真参数设置

Table 5 Parameter settings for simulation

参数	取值	参数	取值
区域大小	120×120 m ²	A	4
Sink节点坐标	(60, 120)	通信距离 R	50 m
传输速率	2 Mbps	分组产生频率	1000 次/s
总时隙数	5×10^5	D_0	100 ms
时隙长度	20×10^{-6} s	τ	1.473
循环次数 h	100	η	0.1
帧长	64 bits	λ_{\min}	0.455
k	2/3	α	0.1

的趋势, 但 p 为 0.05 时的吞吐量峰值较 p 为 0.1 时的峰值靠后。

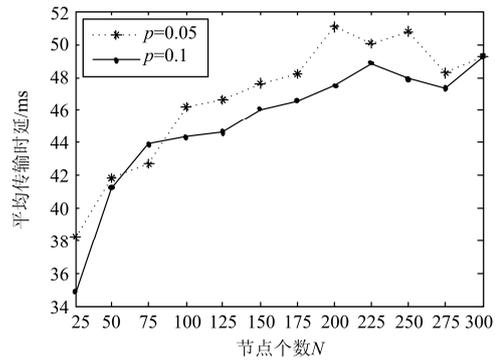


图 7 不同簇头选举概率下的平均传输时延

Fig. 7 Average transmission delay under different cluster head election probability

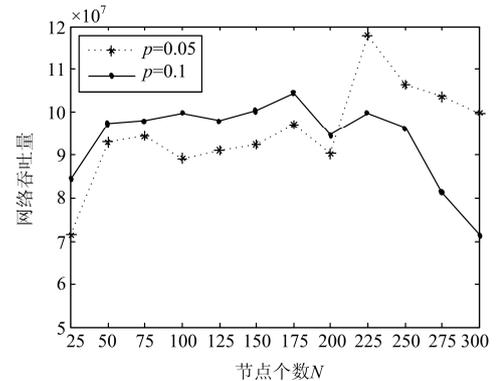


图 8 不同簇头选举概率下的网络吞吐量

Fig. 8 Network throughput under different cluster head election probability

根据 1.1 节的分析, 观察时隙内系统对吞吐量的最大需求为 $68 480 \times N$ 。从图 8 可知, GLAR 算法在吞吐量方面可满足电动汽车集群管理系统的需求。

图 9 是 GLAR 算法在不同簇头选举概率下的负载平衡方差图, 两条曲线波动都不大, 但 p 为 0.1 时的负载平衡方差曲线更平稳, 这是因为在簇头数多的情况下, 普通节点在加入簇时有更大的选择余地。

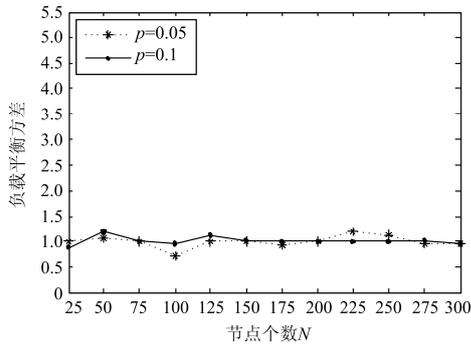


图 9 不同簇头选举概率下的负载平衡方差
Fig. 9 Variance of load balancing under different cluster head election probability

图 10 是 GLAR 和 LEACH 在 $120 \times 120 \text{ m}^2$ 区域中的入网充电桩个数对比图。LEACH 算法中簇头到 Sink 节点之间无论远近直接采用单跳通信方式，因此在较大的区域中难以覆盖到所有充电桩，为满足所有充电桩必须入网的系统要求，GLAR 算法引入辅助簇头节点确保了所有充电桩与系统连接。

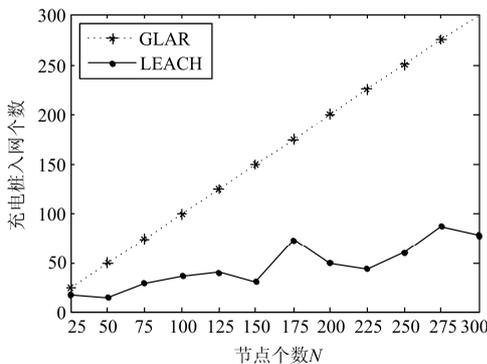


图 10 充电桩入网个数
Fig. 10 Access number of charging pile

为了验证改善负载平衡程度是提高算法性能的有效措施，本文对另一算例进行分析：在上述小区充电站内划出一个边长为 44.72 m 的方形区域，并在此区域中进行 GLAR 算法和 LEACH 算法的性能对比，为准确获取 LEACH 性能，所有与 LEACH 相关的仿真结果都是通过 h 次独立实验取均值所得。Sink 节点坐标为 $(22.36, 44.72)$ ，此时所有节点均可在 LEACH 算法中入网， A 为 0，节点数分别设置为 10、20、...、100 个， p 取 0.1，其余参数同表 4。此时两种算法中的簇节点均以单跳路由机制与 Sink 节点通信，两者区别仅存在于簇的建立阶段。

图 11 是 GLAR 和 LEACH 的负载平衡方差图，LEACH 中，由于无任何措施左右簇头的选举，负载平衡方差波动较大。而 GLAR 考虑节点密度因素，并在普通节点加入簇的过程中增加了比较各簇成员

数目的环节，在负载平衡特性方面有很大的改善。

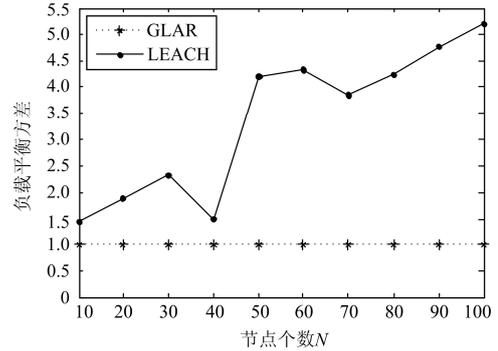


图 11 负载平衡方差
Fig. 11 Variance of load balancing

图 12 和图 13 分别为 GLAR 和 LEACH 的平均传输时延曲线和网络吞吐量曲线对比图。可以看出两种算法在时延及吞吐量上都能满足集群管理系统需求，但 GLAR 在时延和吞吐量性能上均优于 LEACH 算法，结合图 11，GLAR 的负载平衡方差较 LEACH 减小了 70.4% 且较平稳，证明了平衡簇间负载是提高层次型网络性能的有效措施。

LEACH 是一种单跳星型拓扑路由机制，而 GLAR 是一种多跳树型拓扑路由机制。结合上述两

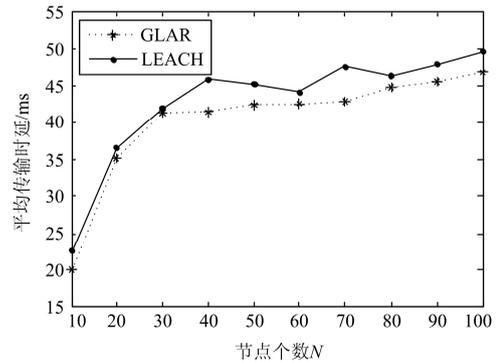


图 12 平均传输时延

Fig. 12 Average transmission delay

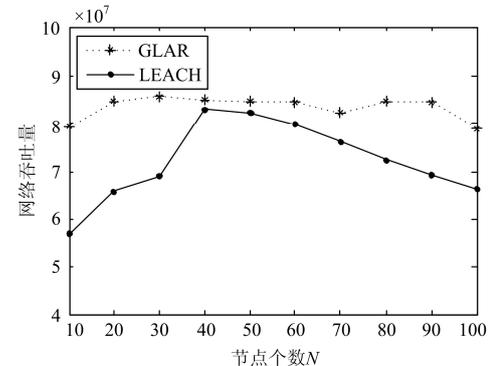


图 13 网络吞吐量

Fig. 13 Network throughput

个算例并对比图 7 和图 12 以及图 8 和图 13, 在 $44.72\text{ m}\times 44.72\text{ m}$ 的小区域中, GLAR “被迫” 形成星型拓扑, 而在 $120\text{ m}\times 120\text{ m}$ 的大区域中, GLAR 以多跳树型拓扑组网, 性能比前者有所提升, 原因是 GLAR 改善了 LEACH 算法所有节点都处于一个大冲突域中的缺陷, 在大区域网络环境下, 确定的多主干路由树将网络划分为多个冲突域, 降低了数据冲突的机率, 从而减小传输时延, 增大吞吐量。

4 结语

本文基于 AHP 和离差最大化方法研究并设计了 EV 充电桩集群管理系统的双层组网通信架构。相对于传统纯有线通信架构, 本文提出的基于 WSN 的分层通信组网方式更适用于构建 EV 充电桩集群管理系统, 方便实现灵活高效、快捷安全的充电服务, 更易促进电动汽车产业的发展。

本文针对充电桩集群的特定应用环境和通信需求, 提出一种高效的 WSN 路由算法。该算法通过路由优化模型确定了局部最优路由, 具有较好的负载均衡特性和可扩展性。仿真结果显示, 算法促使路由树往多主干方向发展, 在网络吞吐量、平均传输时延等方面表现优异, 满足 EV 充电桩集群管理系统对数据通信服务性能的需求。本文提出的路由算法仅基于 Matlab 软件从理论上得到了验证, 下一步将在专业通信仿真平台或实际工程应用中进行实践。

附录 A

1) 多目标决策矩阵 F 中评价值是可选通信方案中两级通信方式评价值的叠加, 每级通信方式评分值位于 1~9。

$$F = \begin{bmatrix} 10 & 10 & 6 & 10 & 12 & 14 & 12 & 10 & 18 & 14 \\ 14 & 12 & 12 & 6 & 13 & 14 & 12 & 10 & 18 & 12 \\ 8 & 10 & 4 & 12 & 11 & 12 & 11 & 10 & 16 & 10 \\ 6 & 6 & 4 & 10 & 11 & 12 & 15 & 14 & 14 & 16 \\ 8 & 8 & 12 & 10 & 11 & 12 & 9 & 10 & 18 & 15 \\ 7 & 8 & 12 & 13 & 9 & 12 & 9 & 12 & 18 & 15 \\ 18 & 14 & 18 & 2 & 14 & 14 & 12 & 10 & 18 & 10 \\ 12 & 12 & 10 & 8 & 12 & 12 & 11 & 10 & 16 & 8 \\ 10 & 10 & 10 & 6 & 12 & 12 & 15 & 14 & 14 & 14 \\ 12 & 10 & 18 & 6 & 12 & 12 & 9 & 10 & 18 & 13 \\ 11 & 10 & 18 & 9 & 10 & 12 & 9 & 10 & 18 & 13 \\ 5 & 8 & 10 & 15 & 8 & 10 & 8 & 12 & 16 & 11 \\ 3 & 6 & 10 & 13 & 8 & 10 & 12 & 16 & 14 & 17 \\ 5 & 6 & 18 & 13 & 8 & 10 & 6 & 12 & 18 & 16 \\ 4 & 6 & 18 & 16 & 6 & 10 & 6 & 14 & 18 & 16 \end{bmatrix}$$

2) C_{11} 是措施层相对于子准则层(通信设备及线路敷设费用)的判断矩阵。

$$C_{11} = [1 \ 1/3 \ 2 \ 3 \ 2 \ 3 \ 1/5 \ 1/2 \ 1 \ 1/2 \ 1/2 \ 3 \ 4 \ 3 \ 4; 3 \ 1 \ 4 \ 5 \ 4 \ 5 \ 1/3 \ 2 \ 3 \ 2 \ 3 \ 5 \ 6 \ 5 \ 6; 1/2 \ 1/4 \ 1 \ 2 \ 1 \ 2 \ 1/6 \ 1/3 \ 1/2 \ 1/3 \ 1/2 \ 3 \ 4 \ 3 \ 3; 1/3 \ 1/5 \ 1/2 \ 1 \ 1/2 \ 1/2 \ 1/7 \ 1/4 \ 1/3 \ 1/4 \ 1/3 \ 2 \ 3 \ 2 \ 2; 1/2 \ 1/4 \ 1 \ 2 \ 1 \ 2 \ 1/6 \ 1/3 \ 1/2 \ 1/3 \ 1/2 \ 3 \ 4 \ 3 \ 3; 1/3 \ 1/5 \ 1/2 \ 2 \ 1/2 \ 1 \ 1/7 \ 1/4 \ 1/3 \ 1/4 \ 1/3 \ 2 \ 3 \ 2 \ 3; 5 \ 3 \ 6 \ 7 \ 6 \ 7 \ 1 \ 4 \ 5 \ 4 \ 5 \ 8 \ 9 \ 8 \ 8; 2 \ 1/2 \ 3 \ 4 \ 3 \ 4 \ 1/4 \ 1 \ 2 \ 1 \ 2 \ 5 \ 6 \ 5 \ 5; 1 \ 1/3 \ 2 \ 3 \ 2 \ 3 \ 1/5 \ 1/2 \ 1 \ 1/2 \ 1/2 \ 3 \ 4 \ 3 \ 4; 2 \ 1/2 \ 3 \ 4 \ 3 \ 4 \ 1/4 \ 1 \ 2 \ 1 \ 2 \ 5 \ 6 \ 5 \ 5; 2 \ 1/3 \ 2 \ 3 \ 2 \ 3 \ 1/5 \ 1/2 \ 2 \ 1/2 \ 1 \ 4 \ 5 \ 4 \ 5; 1/3 \ 1/5 \ 1/3 \ 1/2 \ 1/3 \ 1/2 \ 1/8 \ 1/5 \ 1/3 \ 1/5 \ 1/4 \ 1 \ 2 \ 1 \ 2; 1/4 \ 1/6 \ 1/4 \ 1/3 \ 1/4 \ 1/3 \ 1/9 \ 1/6 \ 1/4 \ 1/6 \ 1/5 \ 1/2 \ 1 \ 1/2 \ 1/2; 1/3 \ 1/5 \ 1/3 \ 1/2 \ 1/3 \ 1/2 \ 1/8 \ 1/5 \ 1/3 \ 1/5 \ 1/4 \ 1 \ 2 \ 1 \ 1/2; 1/4 \ 1/6 \ 1/3 \ 1/2 \ 1/3 \ 1/3 \ 1/8 \ 1/5 \ 1/4 \ 1/5 \ 1/5 \ 1/2 \ 2 \ 2 \ 1]$$

由 C_{11} 可以求出权重

$$w_{11} = [0.0503; 0.220; 0.0671; 0.0885; 0.0671; 0.0872; 0.0086; 0.0331; 0.0503; 0.0331; 0.0469; 0.1033; 0.1261; 0.1040; 0.1125]$$

C_{12} 是措施层相对于子准则层(后期维护、更换费用)的判断矩阵。

$$C_{12} = [1 \ 1/3 \ 1 \ 5 \ 3 \ 3 \ 1/5 \ 1/3 \ 1 \ 1 \ 1 \ 3 \ 5 \ 5 \ 5; 3 \ 1 \ 3 \ 7 \ 5 \ 5 \ 1/3 \ 1 \ 3 \ 3 \ 3 \ 5 \ 7 \ 7 \ 7; 1 \ 1/3 \ 1 \ 5 \ 3 \ 3 \ 1/5 \ 1/3 \ 1 \ 1 \ 1 \ 3 \ 5 \ 5 \ 5; 1/5 \ 1/7 \ 1/5 \ 1 \ 1/3 \ 1/3 \ 1/9 \ 1/7 \ 1/5 \ 1/5 \ 1/5 \ 1/3 \ 1 \ 1 \ 1; 1/3 \ 1/5 \ 1/3 \ 3 \ 1 \ 1 \ 1/7 \ 1/5 \ 1/3 \ 1/3 \ 1/3 \ 1 \ 3 \ 3 \ 3; 1/3 \ 1/5 \ 1/3 \ 3 \ 1 \ 1 \ 1/7 \ 1/5 \ 1/3 \ 1/3 \ 1/3 \ 1 \ 3 \ 3 \ 3; 5 \ 3 \ 5 \ 9 \ 7 \ 7 \ 1 \ 3 \ 5 \ 5 \ 5 \ 7 \ 9 \ 9 \ 9; 3 \ 1 \ 3 \ 7 \ 5 \ 5 \ 1/3 \ 1 \ 3 \ 3 \ 3 \ 5 \ 7 \ 7 \ 7; 1 \ 1/3 \ 1 \ 5 \ 3 \ 3 \ 1/5 \ 1/3 \ 1 \ 1 \ 1 \ 3 \ 5 \ 5 \ 5; 1 \ 1/3 \ 1 \ 5 \ 3 \ 3 \ 1/5 \ 1/3 \ 1 \ 1 \ 1 \ 3 \ 5 \ 5 \ 5; 1/3 \ 1/5 \ 1/3 \ 3 \ 1 \ 1 \ 1/7 \ 1/5 \ 1/3 \ 1/3 \ 1/3 \ 1 \ 3 \ 3 \ 3; 1/5 \ 1/7 \ 1/5 \ 1 \ 1/3 \ 1/3 \ 1/9 \ 1/7 \ 1/5 \ 1/5 \ 1/5 \ 1/3 \ 1 \ 1 \ 1; 1/5 \ 1/7 \ 1/5 \ 1 \ 1/3 \ 1/3 \ 1/9 \ 1/7 \ 1/5 \ 1/5 \ 1/5 \ 1/3 \ 1 \ 1 \ 1]$$

由 C_{12} 可以求出权重

$$w_{12} = [0.0449; 0.0206; 0.0449; 0.1280; 0.0810; 0.0810; 0.0078; 0.0206; 0.0449; 0.0449; 0.0449; 0.0810; 0.1208; 0.1208; 0.1208]$$

C_{13} 是措施层相对于子准则层(运行费用)的判断矩阵。

$$C_{13} = [1 \ 1/5 \ 3 \ 3 \ 1/5 \ 1/5 \ 1/7 \ 1/3 \ 1/3 \ 1/7 \ 1/7 \ 1/3 \ 1/3 \ 1/7 \ 1/7; 5 \ 1 \ 7 \ 7 \ 1 \ 1 \ 1/3 \ 3 \ 3 \ 1/3 \ 1/3 \ 3 \ 3 \ 1/3 \ 1/3; 1/3 \ 1/7 \ 1 \ 1 \ 1/7 \ 1/7 \ 1/9 \ 1/5 \ 1/5 \ 1/9 \ 1/9 \ 1/5 \ 1/5 \ 1/9 \ 1/9; 1/3 \ 1/7 \ 1 \ 1 \ 1/7 \ 1/7 \ 1/9 \ 1/5 \ 1/5 \ 1/9 \ 1/9 \ 1/5 \ 1/5 \ 1/9 \ 1/9; 5 \ 1 \ 7 \ 7 \ 1 \ 1 \ 1/3 \ 3 \ 3 \ 1/3 \ 1/3 \ 3 \ 3 \ 1/3 \ 1/3 \ 3 \ 3 \ 1/3 \ 1/3; 5 \ 1 \ 7 \ 7 \ 1 \ 1 \ 1/3 \ 3 \ 3 \ 1/3 \ 1/3 \ 3 \ 3 \ 1/3 \ 1/3 \ 3 \ 3 \ 1/3 \ 1/3; 7 \ 3 \ 9 \ 9 \ 3 \ 3 \ 1 \ 5 \ 5 \ 1 \ 1 \ 5 \ 5 \ 1 \ 1; 3 \ 1/3 \ 5 \ 5 \ 1/3 \ 1/3 \ 1/5 \ 1 \ 1 \ 1/5 \ 1/5 \ 1 \ 1 \ 1/5 \ 1/5; 3 \ 1/3 \ 5 \ 5 \ 1/3 \ 1/3 \ 1/5 \ 1 \ 1 \ 1/5 \ 1/5 \ 1 \ 1 \ 1/5 \ 1/5; 7 \ 3 \ 9 \ 9 \ 3 \ 3 \ 1 \ 5 \ 5 \ 1 \ 1 \ 5 \ 5 \ 1 \ 1; 7 \ 3 \ 9 \ 9 \ 3 \ 3 \ 1 \ 5 \ 5 \ 1 \ 1 \ 5 \ 5 \ 1 \ 1; 3 \ 1/3 \ 5 \ 5 \ 1/3 \ 1/3 \ 1/5 \ 1 \ 1 \ 1/5 \ 1/5]$$

1 1 1/5 1/5; 3 1/3 5 5 1/3 1/3 1/5 1 1 1/5 1/5 1 1 1/5 1/5; 7 3 9 9 3 3 1 5 5 1 1 5 5 1 1; 7 3 9 9 3 3 1 5 5 1 1 5 5 1 1]

由C13可以求出权重

w₁₃=[0.1246; 0.0448; 0.1677; 0.1677; 0.0448; 0.0448; 0.0153; 0.0823; 0.0823; 0.0153; 0.0153; 0.0823; 0.0823; 0.0153; 0.0153]

C21是措施层相对于子准则层(端到端延时的)的判断矩阵。

C21=[1 3 1/3 1 1 1/3 5 2 3 3 1 1/5 1/3 1/3 1/5; 1/3 1 1/6 1/4 1/4 1/7 2 1/2 1 1 1/3 1/8 1/7 1/7 1/8; 3 6 1 2 2 1/2 6 3 5 5 3 1/3 1/2 1/2 1/4; 1 4 1/2 1 1 1/3 5 2 3 3 1 1/5 1/3 1/3 1/5; 1 4 1/2 1 1 1/3 5 2 3 3 1 1/5 1/3 1/3 1/5; 3 7 2 3 3 1 7 5 6 6 3 1/2 1 1 1/3; 1/5 1/2 1/6 1/5 1/5 1/7 1 1/4 1/2 1/2 1/5 1/9 1/7 1/7 1/9; 1/2 2 1/3 1/2 1/2 1/5 4 1 2 2 1/2 1/5 1/4 1/4 1/6; 1/3 1 1/5 1/3 1/3 1/6 2 1/2 1 1 1/3 1/8 1/7 1/7 1/8; 1/3 1 1/5 1/3 1/3 1/6 2 1/2 1 1 1/3 1/8 1/7 1/7 1/8; 1 3 3 1 1 1/3 5 2 3 3 1 1/5 1/3 1/3 1/6; 5 8 3 5 5 2 9 5 8 8 5 1 2 2 1; 3 7 2 3 3 1 7 5 6 6 3 1/2 1 1 1/3; 2 8 4 5 5 3 9 6 8 8 6 1 3 3 1]

由C21可以求出权重

w₂₁=[0.0546; 0.1309; 0.0446; 0.0630; 0.0265; 0.1467; 0.0871; 0.1200; 0.1200; 0.0683; 0.0119; 0.0265; 0.1261; 0.0265; 0.0106]

C22是措施层相对于子准则层(业务可靠性)的判断矩阵。

C22=[1 2 1/2 1/2 1/2 1/4 3 1 1 1 1/3 1/5 1/5 1/5 1/7; 1/2 1 1/3 1/3 1/3 1/5 3 1/2 1/2 1/2 1/4 1/6 1/6 1/6 1/8; 2 3 1 1 1 1/3 4 2 2 2 1/2 1/4 1/4 1/4 1/6; 2 3 1 1 1 1/3 4 2 2 2 1/2 1/4 1/4 1/4 1/6; 4 5 3 3 3 1 6 4 4 4 2 1/2 1/2 1/2 1/4; 1/3 1/2 1/4 1/4 1/4 1/6 1 1/3 1/3 1/3 1/5 1/7 1/7 1/7 1/9; 1 2 1/2 1/2 1/2 1/4 3 1 1 1 1/3 1/5 1/5 1/5 1/7; 1 2 1/2 1/2 1/2 1/4 3 1 1 1 1/3 1/5 1/5 1/5 1/7; 3 4 2 2 2 1/2 5 3 3 3 1 1/3 1/3 1/3 1/5; 5 6 4 4 4 2 7 5 5 3 1 1 1 1/3; 5 6 4 4 4 2 7 5 5 3 1 1 1 1/3; 5 6 4 4 4 2 7 5 5 3 1 1 1 1/3; 7 8 6 6 6 4 9 7 7 7 5 3 3 3 1]

由C22可以求出权重

w₂₂=[0.0916; 0.1131; 0.0714; 0.0714; 0.0714; 0.0376; 0.1355; 0.0916; 0.0916; 0.0916; 0.0535; 0.0236; 0.0236; 0.0236; 0.0086]

C23是措施层相对于子准则层(安全性)的判断矩阵。

C23=[1 1 1/3 1/3 1/3 1/3 1 1/3 1/3 1/3 1/3 1/5 1/5 1/5 1/5; 1 1 1/3 1/3 1/3 1/3 1 1/3 1/3 1/3 1/3 1/5 1/5 1/5

1/5; 3 3 1 1 1 1 3 1 1 1 1 1/3 1/3 1/3 1/3; 3 3 1 1 1 1 3 1 1 1 1 1/3 1/3 1/3 1/3; 3 3 1 1 1 1 3 1 1 1 1 1/3 1/3 1/3 1/3; 1 1 1/3 1/3 1/3 1/3 1 1/3 1/3 1/3 1/3 1/5 1/5 1/5 1/5; 3 3 1 1 1 1 3 1 1 1 1 1/3 1/3 1/3 1/3; 3 3 1 1 1 1 3 1 1 1 1 1/3 1/3 1/3 1/3; 3 3 1 1 1 1 3 1 1 1 1 1/3 1/3 1/3 1/3; 3 3 1 1 1 1 3 1 1 1 1 1/3 1/3 1/3 1/3; 5 5 3 3 3 3 5 3 3 3 3 1 1 1 1; 5 5 3 3 3 3 5 3 3 3 3 1 1 1 1; 5 5 3 3 3 3 5 3 3 3 3 1 1 1 1]

由C23可以求出权重

w₂₃=[0.1292; 0.1292; 0.0655; 0.0655; 0.0655; 0.0655; 0.1292; 0.0655; 0.0655; 0.0655; 0.0655; 0.0655; 0.220; 0.0220; 0.0220]

C24是措施层相对于子准则层(可管理性)的判断矩阵。

C24=[1 1 1/2 4 1/4 1/4 1 1/2 4 1/4 1/4 1/5 1 1/7 1/7; 1 1 1/2 4 1/4 1/4 1 1/2 4 1/4 1/4 1/5 1 1/7 1/7; 2 2 1 5 1/3 1/3 2 1 5 1/3 1/3 1/4 2 1/6 1/6; 1/4 1/4 1/5 1 1/7 1/7 1/4 1/5 1 1/7 1/7 1/8 1/4 1/9 1/9; 4 4 3 7 1 1 4 3 7 1 1 1/2 4 1/4 1/4; 4 4 3 7 1 1 4 3 7 1 1 1/2 4 1/4 1/4; 1 1 1/2 4 1/4 1/4 1 1/2 4 1/4 1/4 1/5 1 1/7 1/7; 2 2 1 5 1/3 1/3 2 1 5 1/3 1/3 1/4 2 1/6 1/6; 1/4 1/4 1/5 1 1/7 1/7 1/4 1/5 1 1/7 1/7 1/8 1/4 1/9 1/9; 4 4 3 7 1 1 4 3 7 1 1 1/2 4 1/4 1/4; 4 4 3 7 1 1 4 3 7 1 1 1/2 4 1/4 1/4; 5 5 4 8 2 2 5 4 8 2 2 1 5 1/3 1/3; 1 1 1/2 4 1/4 1/4 1 1/2 4 1/4 1/4 1/5 1 1/7 1/7; 7 7 6 9 4 4 7 6 9 4 4 3 7 1 1; 7 7 6 9 4 4 7 6 9 4 4 3 7 1 1]

由C24可以求出权重

w₂₄=[0.0910; 0.0910; 0.0723; 0.1446; 0.0390; 0.0390; 0.0910; 0.0723; 0.1446; 0.0390; 0.0390; 0.0265; 0.0910; 0.0098; 0.0098]

C25是措施层相对于子准则层(组网方便性)的判断矩阵。

C25=[1 1 1 5 1 3 1 1 5 1 3 3 7 3 5; 1 1 1 5 1 3 1 1 5 1 3 3 7 3 5; 1 1 1 5 1 3 1 1 5 1 3 3 7 3 5; 1/5 1/5 1/5 1 1/5 1/3 1/3 1/3 1/3 1; 1 1 1 5 1 3 1 1 5 1 3 3 7 3 5; 1/3 1/3 1/3 3 1/3 1 1/3 1/3 3 1/3 1 1 5 1 3; 1 1 1 5 1 3 1 1 5 1 3 3 7 3 5; 1 1 1 5 1 3 1 1 5 1 3 3 7 3 5; 1/5 1/5 1/5 1 1/5 1/3 1/3 1/3 1/3 1; 1 1 1 5 1 3 1 1 5 1 3 3 7 3 5; 1/3 1/3 1/3 3 1/3 1 1/3 1/3 3 1/3 1 1 5 1 3; 1/7 1/7 1/7 1/3 1/7 1/5 1/7 1/7 1/3 1/7 1/5 1/5 1 1/5 1/3; 1/3 1/3 1/3 3 1/3 1 1/3 1/3 3 1/3 1 1 5 1 3; 1/5 1/5 1/5 1 1/5 1/3 1/3 1/3 1/3 1]

由C25可以求出权重

$w_{25}=[0.0234; 0.0234; 0.0234; 0.1249; 0.0234; 0.0697; 0.0234; 0.0234; 0.1249; 0.0234; 0.0697; 0.0697; 0.1828; 0.0697; 0.1249]$

C31 是措施层相对于子准则层(通信覆盖情况)的判断矩阵。

$C_{31}=[1 \ 1 \ 1/3 \ 1/5 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1/3 \ 1/5 \ 1 \ 1 \ 1/3 \ 1/5 \ 1 \ 1; 1 \ 1 \ 1/3 \ 1/5 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1/3 \ 1/5 \ 1 \ 1 \ 1/3 \ 1/5 \ 1 \ 1; 3 \ 3 \ 1 \ 1/3 \ 3 \ 3 \ 3 \ 1 \ 1/3 \ 3 \ 3 \ 1 \ 1/3 \ 3 \ 3 \ 1 \ 1/3 \ 3 \ 3; 5 \ 5 \ 3 \ 1 \ 5 \ 5 \ 5 \ 3 \ 1 \ 5 \ 5 \ 3 \ 1 \ 5 \ 5; 1 \ 1 \ 1/3 \ 1/5 \ 1 \ 1 \ 1/3 \ 1/5 \ 1 \ 1 \ 1/3 \ 1/5 \ 1 \ 1 \ 1/3 \ 1/5 \ 1 \ 1; 1 \ 1 \ 1/3 \ 1/5 \ 1 \ 1 \ 1/3 \ 1/5 \ 1 \ 1 \ 1/3 \ 1/5 \ 1 \ 1; 3 \ 3 \ 1 \ 1/3 \ 3 \ 3 \ 3 \ 1 \ 1/3 \ 3 \ 3 \ 1 \ 1/3 \ 3 \ 3 \ 1 \ 1/3 \ 3 \ 3; 5 \ 5 \ 3 \ 1 \ 5 \ 5 \ 5 \ 3 \ 1 \ 5 \ 5 \ 3 \ 1 \ 5 \ 5; 1 \ 1 \ 1/3 \ 1/5 \ 1 \ 1 \ 1/3 \ 1/5 \ 1 \ 1 \ 1/3 \ 1/5 \ 1 \ 1; 1 \ 1 \ 1/3 \ 1/5 \ 1 \ 1 \ 1/3 \ 1/5 \ 1 \ 1 \ 1/3 \ 1/5 \ 1 \ 1; 3 \ 3 \ 1 \ 1/3 \ 3 \ 3 \ 3 \ 1 \ 1/3 \ 3 \ 3 \ 1 \ 1/3 \ 3 \ 3 \ 1 \ 1/3 \ 3 \ 3; 5 \ 5 \ 3 \ 1 \ 5 \ 5 \ 5 \ 3 \ 1 \ 5 \ 5 \ 3 \ 1 \ 5 \ 5; 1 \ 1 \ 1/3 \ 1/5 \ 1 \ 1 \ 1/3 \ 1/5 \ 1 \ 1 \ 1/3 \ 1/5 \ 1 \ 1; 1 \ 1 \ 1/3 \ 1/5 \ 1 \ 1 \ 1/3 \ 1/5 \ 1 \ 1 \ 1/3 \ 1/5 \ 1 \ 1]$

由C31可以求出权重

$w_{31}=[0.0901; 0.0901; 0.0468; 0.0162; 0.0901; 0.0901; 0.0901; 0.0468; 0.0162; 0.0901; 0.0901; 0.0468; 0.0162; 0.0901; 0.0901]$

C32 是措施层相对于子准则层(可扩展性)的判断矩阵。

$C_{32}=[1 \ 1/3 \ 1/5 \ 3 \ 2 \ 2 \ 1/5 \ 1/6 \ 1 \ 1/2 \ 1/2 \ 1/4 \ 4 \ 3 \ 3; 3 \ 1 \ 1/3 \ 5 \ 4 \ 4 \ 1/3 \ 1/4 \ 3 \ 2 \ 2 \ 1/2 \ 6 \ 5 \ 5; 5 \ 3 \ 1 \ 7 \ 6 \ 6 \ 1 \ 1/2 \ 5 \ 4 \ 4 \ 2 \ 8 \ 7 \ 7; 1/3 \ 1/5 \ 1/7 \ 1 \ 1/2 \ 1/2 \ 1/7 \ 1/8 \ 1/3 \ 1/4 \ 1/4 \ 1/6 \ 2 \ 1 \ 1; 1/2 \ 1/4 \ 1/6 \ 2 \ 1 \ 1 \ 1/6 \ 1/7 \ 1/2 \ 1/3 \ 1/3 \ 1/5 \ 3 \ 2 \ 2; 1/2 \ 1/4 \ 1/6 \ 2 \ 1 \ 1 \ 1/6 \ 1/7 \ 1/2 \ 1/3 \ 1/3 \ 1/5 \ 3 \ 2 \ 2; 5 \ 3 \ 1 \ 7 \ 6 \ 6 \ 1 \ 1/2 \ 5 \ 4 \ 4 \ 2 \ 8 \ 7 \ 7; 6 \ 4 \ 2 \ 8 \ 7 \ 7 \ 2 \ 1 \ 6 \ 5 \ 5 \ 3 \ 9 \ 8 \ 8; 1 \ 1/3 \ 1/5 \ 3 \ 2 \ 2 \ 1/5 \ 1/6 \ 1 \ 1/2 \ 1/2 \ 1/4 \ 4 \ 3 \ 3; 2 \ 1/2 \ 1/4 \ 4 \ 3 \ 3 \ 1/4 \ 1/5 \ 2 \ 1 \ 1 \ 1/3 \ 5 \ 4 \ 4; 2 \ 1/2 \ 1/4 \ 4 \ 3 \ 3 \ 1/4 \ 1/5 \ 2 \ 1 \ 1 \ 1/3 \ 5 \ 4 \ 4; 4 \ 2 \ 1/2 \ 6 \ 5 \ 5 \ 1/2 \ 1/3 \ 4 \ 3 \ 3 \ 1 \ 7 \ 6 \ 6; 1/4 \ 1/6 \ 1/8 \ 1/2 \ 1/3 \ 1/3 \ 1/8 \ 1/9 \ 1/4 \ 1/5 \ 1/5 \ 1/7 \ 1 \ 1/2 \ 1/2; 1/3 \ 1/5 \ 1/7 \ 1 \ 1/2 \ 1/2 \ 1/7 \ 1/8 \ 1/3 \ 1/4 \ 1/4 \ 1/6 \ 2 \ 1 \ 1; 1/3 \ 1/5 \ 1/7 \ 1 \ 1/2 \ 1/2 \ 1/7 \ 1/8 \ 1/3 \ 1/4 \ 1/4 \ 1/6 \ 2 \ 1 \ 1]$

由C32可以求出权重

$w_{32}=[0.0719; 0.0398; 0.0158; 0.1098; 0.0904; 0.0904; 0.0158; 0.0087; 0.0719; 0.0548; 0.0548; 0.0268; 0.1297; 0.1098; 0.1098]$

参考文献

- [1] BASAKA P, CHOWDHURY S, HALDER S, et al. A literature review on integration of distributed energy resources in the perspective of control, protection and stability of microgrid[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(8): 5545-5556.
- [2] 佟晶晶, 温俊强, 王丹, 等. 基于分时电价的电动汽车

多目标优化充电策略[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 17-23.

TONG Jingjing, WEN Junqiang, WANG Dan, et al. Multi-objective optimization charging strategy for plug-in electric vehicles based on time-of-use price[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 17-23.

- [3] 党杰, 汤奕, 宁佳, 等. 基于用户意愿和出行规律的电动汽车充电负荷分配策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 8-15.

DANG Jie, TANG Yi, NING Jia, et al. A strategy for distribution of electric vehicles charging load based on user intention and trip rule[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 8-15.

- [4] 赵明宇, 王刚, 汪映辉, 等. 电动汽车充电设施监控系统设计与实现[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(10): 65-70.

ZHAO Mingyu, WANG Gang, WANG Yinghui, et al. Design and implementation of a supervisory and control system for charging facilities of electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(10): 65-70.

- [5] YILMAZ M, KREIN P T. Review of battery charger topologies, charging power levels, and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(5): 2151-2169.

- [6] 黎永昌, 王钢, 梁远升, 等. 基于 IEC 61850 的电动汽车充电站远动通信建模[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 137-142.

LI Yongchang, WANG Gang, LIANG Yuansheng, et al. IEC61850-based electric vehicle charging station telecontrol communication information modeling[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 137-142.

- [7] 郑竞宏, 戴梦婷, 张曼, 等. 住宅区式电动汽车充电站负荷集聚特性及其建模[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(22): 32-38.

ZHENG Jinghong, DAI Mengting, ZHANG Man, et al. Load cluster characteristic and modeling of EV charge station in residential district[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(22): 32-38.

- [8] WANG G B, XU Z, WEN F S, et al. Traffic-constrained multiobjective planning of electric-vehicle charging stations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(4): 2363-2372.

- [9] SORTOMME E, HINDI M M, MACPHERSON S D J, et al. Coordinated charging of plug-in hybrid electric vehicle to minimize distribution system losses[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(1): 186-193.

- [10] ROTERING N, ILIC M. Optimal charge control of plug-in hybrid electric vehicles in deregulated electricity markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1021-1029.
- [11] KULSHRESTHA P, SWAMINATHAN K, CHOW M Y, et al. Evaluation of ZigBee communication platform for controlling the charging of PHEVs at a municipal parking deck[C] // IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Michigan, USA: [s.n.], 2009: 1211-1214.
- [12] 胡勇, 郭子健, 刘奇峰, 等. 基于 IEC 61970/61850 的电动汽车充电站监控系统建模方案[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(2): 91-96.
HU Yong, GUO Zijian, LIU Qifeng, et al. Modeling scheme of supervisory control system for electric vehicle charging station based on IEC 61970 and IEC 61850[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(2): 91-96.
- [13] JEWELL N, NABER J, MCINTYRE M, et al. A power monitoring and control system to minimize electricity demand costs associated with electric vehicle charging stations[C] // IEEE International Conference on Electric Vehicle, Greenville, USA: IEEE, 2012: 1-5.
- [14] 中国南方电网有限责任公司企业标准: Q/CSG 11516—2010[S]. 广州: 中国南方电网有限责任公司, 2010.
- [15] Communication networks and systems in substations part 5: communication requirements for functions and device models: IEC 61850-5[S]. 2003.
- [16] 杨晓东, 张有兵, 赵波, 等. 考虑规划需求的 EV 充电桩集群管理系统通信方式综合评价[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(24): 63-71.
YANG Xiaodong, ZHANG Youbing, ZHAO Bo, et al. Planning demands considered comprehensive evaluation method of communication for EV charging piles management system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(24): 63-71.
- [17] 陈刚, 马爱军, 张继红, 等. AVC 分散控制模式下的变电站电压无功控制研究[J]. 电网技术, 2010, 34(12): 187-192.
CHEN Gang, MA Aijun, ZHANG Jihong, et al. Voltage and reactive power control in substation under decentralized control mode of AVC[J]. Power System Technology, 2010, 34(12): 187-192.
- [18] 吴润泽, 王欣宇, 张晓平, 等. 一种分布式电源并网监控通信适应性评价方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(8): 72-77.
WU Runze, WANG Xinyu, ZHANG Xiaoping, et al. An evaluation method for monitoring communication of grid-connected distributed energy resource[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(8): 72-77.
- [19] 潘卫钢. 配电自动化通信方案及其比较[J]. 上海电力学院学报, 2011, 27(1): 29-33.
PAN Weigang. Comparison of distribution automation communication solutions[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2011, 27(1): 29-33.
- [20] 王红然, 王书旺. 智能电网系统中变电站通信方案比较[J]. 信息化研究, 2011, 37(6): 64-66.
WANG Hongran, WANG Shuwang. Research on communication solutions in substation in smart power grid[J]. Informatization Research, 2011, 37(6): 64-66.
- [21] HEINZELMAN W R, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks[C] // Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences, Hawaii, USA: [s.n.], 2000: 1-10.
- [22] 罗卓伟, 胡泽春, 宋永华, 等. 电动汽车充电负荷计算方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 36-42.
LUO Zhuowei, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Study on plug-in electric vehicles charging load calculating[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 36-42.
- [23] 徐智威, 胡泽春, 宋永华, 等. 充电站内电动汽车有序充电策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(11): 38-43.
XU Zhiwei, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. DC transmission impact analysis on AC/DC interconnected system self-organized criticality[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(11): 38-43.
- [24] GUPAT G, YOUNIS M. Performance evaluation of load-balanced clustering of wireless sensor networks[C] // IEEE International Conference on Telecommunications, Tahiti, French Polynesia: IEEE, 2003: 1577-1583.
- [25] 城市公共停车场工程项目建设标准: 建标 128—2010[S]. 北京: 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2010.

收稿日期: 2016-11-28; 修回日期: 2017-02-09

作者简介:

周凯(1990—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统通信、微电网与智能电网; E-mail: 675600463@qq.com

杨晓东(1990—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为新能源并网、电动汽车入网、需求侧管理、电力系统通信; E-mail: yang_xd90@163.com

张有兵(1971—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 主要研究方向为智能电网、分布式发电及新能源优化控制、电动汽车入网、电力系统通信、电能质量监控. E-mail: youbingzhang@zjut.edu.cn

(编辑 魏小丽)