

基于联盟区块链的新能源企业智能 电动汽车充电系统

王浩柱¹, 谢秦², 邓方明³, 杨阳²

(1. 国网天津城南供电公司, 天津 300201; 2. 国网天津市电力公司, 天津 300143;
3. 国网电子商务有限公司, 天津 300143)

摘要: 新能源电动车需求的日益扩增进一步提升了电动车充电的需求, 然而各运营公司之间的间隙导致充电桩信息无法全面并切实地面向需求大众。针对上述问题, 介绍了一种基于联盟区块链的新型智能电动汽车充电系统。首先, 通过联盟区块链使得系统具备防篡改、多中心化等特点; 之后, 提出了生物目标混合整数规划模型(BOMILP)来平衡企业和电动汽车用户之间的利益, 并在此基础上, 引入一种支持智能合约实现的有限领域记忆搜索算法(LNSM), 以进一步提升智能合约运行速度及性能; 最后, 以天津地区的电动车充电数据为例, 验证了所提出系统的有效性和可行性。

关键词: 新能源; 区块链; 有限领域记忆搜索算法; 生物目标混合整数规划模型; 智能合约

中图分类号: TM933 **文献标识码:** B **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed23060

Intelligent Electric Vehicle Charging System for New Energy Enterprises Based on Alliance Block Chain

WANG Haozhu¹, XIE Qin², DENG Fangming³, YANG Yang²

(1. State Grid Tianjin Chengnan Power Supply Company, Tianjin 300201, China;
2. State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300143, China;
3. State Grid E-commerce Co., Ltd., Tianjin 300143, China)

Abstract: The growing demand for new energy electric vehicles (EVs) has further boosted the demand for electric car charging. However, the gap between operating companies results in that the information of charging piles cannot be fully and effectively presented to the demanding public. Aiming at the above problems, a new intelligent EV charging system based on alliance block chain was introduced. Firstly, the system was tamper-proof and multi-centralized through the alliance block chain. Then, a bio-objective mixed-integer programming model (BOMILP) was proposed to balance the interests between enterprises and electric vehicle users. A limited neighborhood search method with memory (LNSM) algorithm supporting the implementation of smart contract was introduced to further improve the speed and performance of smart contract. Finally, the charging data of electric vehicles in Tianjin area was taken as an example to verify the proposed system, the results show that the method is feasible.

Key words: new energy; block chain; limited neighborhood search method with memory (LNSM); bio-objective mixed-integer programming model (BOMILP); intelligent contract

随着可持续发展意识的深入人心, 电动汽车(electric vehicle, EV)行业也逐渐受到了各地政府的重视^[1-2]。不同地区的政府通过发布不同的政策促进电动汽车(简称电车)的发展, 使得电车的需求量日益增长^[3-5]。而电车需求增长的同时也进一步提升了电车充电的需求, 这便要求有限的充电设施在城市环境内得到高效利用和同步部署。

然而, 现有的市场中, 不同运营公司之间不同的需求度导致了电车充电设施与电车需求之间不平衡^[6-7]。目前, 电车充电所面临的问题可综合为以下两个方面^[8-9]: 1) 不同空间分布的充电设施与电车服务用户数量的不平衡直接影响企业的收益, 导致不同新能源公司(new energy companies, NECs)之间的利益难以协调; 2) 由于缺乏公平的

基金项目: 国家自然科学基金(51807127)

作者简介: 王浩柱(1979—), 男, 本科, 高级经济师, Email: co889kurf@sina.com

分配机制,导致企业之间难以完全相互信任,进而充电设施的实时信息和客户信息难以共享,甚至出现某些公司为提升自身利益而与其他公司提供虚假信息的情形^[10]。因此,迫切需要一种能解决当前问题的切实方案。

文献[11]在2008年时提出了区块链技术,其作为一种新兴且具有前景的技术,最初是应用于比特币加密的基础技术,具备安全和抗篡改等优势。通过在点对点网络中建立信任链接^[12-14],使网络中的所有节点达到互相信任的基础,从而进一步提升业务流程的推进。然而,尽管区块链技术解决了企业之间的信任问题,但NECs之间的利益分配也是不容忽视的问题。因此,文中设计了一种合作机制来协调不同公司之间的利益分配。

基于此,本文提出了一种新的基于联盟区块链的电动汽车充电系统,该系统通过区块链技术防止企业之间的信息篡改,使系统具有多中心化等特点。而后设计了一种新的智能合约来平衡联盟中各公司的利润,通过生物目标混合整数规划模型(BOMILP)来平衡企业及电车用户之间的利益。同时,提出了一种有限领域记忆搜索算法(LNSM)进一步支持智能合约运行,提升合约运行速度及系统性能。最后,在天津地区电车充电数据的基础上对所提系统进行了验证,结果表明:该系统具备切实可行性,LNSM可进一步降低计算复杂度,提升系统使用性能。

1 系统框架

区块链技术的引用可提高电车充电信息透明度及可靠性,基于区块链技术,本节提出了电动汽车充电框架。

1.1 系统概述

图1为传统电车充电系统与基于区块链充电系统的两种充电方法的比较。

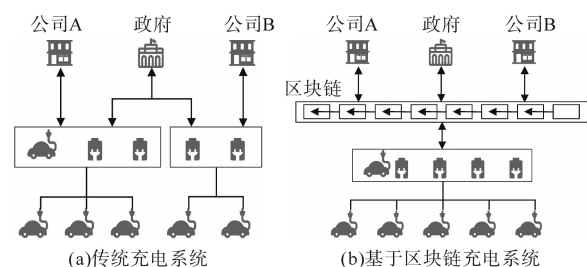


图1 电动汽车充电方法比较

Fig.1 Comparison of EV charging methods

如图1所示,传统的电车充电时,电车充电站独立运行,实时数据由该充电桩所属公司保存,

这种信息隔离导致了电车充电信息的不共享。而区块链技术的协同操作系统通过数据集中并记录在区块链上,共享信息,最大程度提高了电车充电桩的使用率,进而提升电车用户的充电体验。基于区块链充电系统工作流程如图2所示。

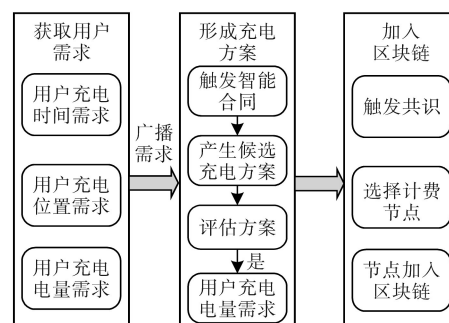


图2 系统工作流程

Fig.2 System implementation flowchart

工作程序归纳为3个步骤:

- 1) 系统获取电动车用户的充电需求,包括位置、时间及电量;
- 2) 根据区块链上的实时充电信息触发智能合约,在特定条件下,系统生成可接受的充电方案;
- 3) 将所有交易信息统一并添加入区块链信息网络体系中,使得全部信息数据对该区域内所有公司成员透明且具有可信度。

1.2 系统中的组件

图3为所设计电车充电系统框架。该框架共包含新能源公司、电动汽车用户、政府和区块链系统4个主要组成部分。

区块链用于公司、政府及EV用户侧的联动交互,每侧均有详细的组件。三方通过联动,在区块链技术的支持下共同完成电车充电系统的运行。公司满足用户的充电需求,政府统一收费

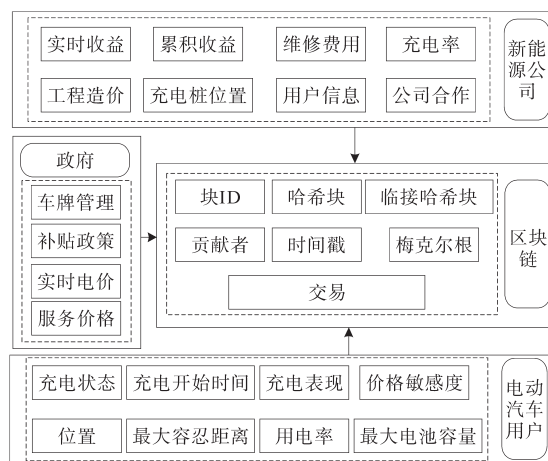


图3 电动汽车充电系统架构

Fig.3 Framework of EV charging system

价格,用户根据共享信息选取充电区域及充电时间,而区块链作为中间运行的支持技术来保证计费系统的可靠性。

2 智能合约的设计及实现

智能合约的本质是区块链基于触发事件所引起的价值和信息流的扩展应用程序,其具备完全数字化、可编程及自动执行等优势。通过建立数学模型,设计智能合约,着重强调最优目标和最优约束,而后通过已有模型进行程序编码。为解决充电设施的动态分布问题,本文建立了一个生物目标混合整数规划模型(BOMILP)。

为了使模型更易理解,进行了合理的假设。文中公式采用的假设和特征如下:

1)一旦电动汽车完成充电操作,用户立即开车离开充电站。

2)充电期间,电动汽车的所有设备均处于关机状态,包括空调、音乐系统等。

3)电动汽车充电站收取的电费是其利润的一部分。

优化模型的目标是使不同企业收益和运营成本的不平衡性最低,同时模型也要切实考虑到电动汽车用户对充电服务的满意程度。基于此,考虑到用户充电通常喜欢就近原则,即用户不满意度与充电站和电车充电起始位置密切相关,因此,双目标函数可表示为

$$\min(UB) = \frac{1}{N} \sum_{n \in N, t \in T} (Profit_n^t - \overline{Profit}_t) \quad (1)$$

$$\min(Df) = \sum_{i \in I, t \in T} d_i^t \quad (2)$$

其中

$$\begin{aligned} Profit_n^t &= Profit_n^{t,f} + Profit_n^{t,s} \\ Profit_n^{t,f} &= \frac{1}{\sum_{i,f,n} \vartheta_{i,t}^{f,n}} \sum_{i,f,n} \vartheta_{i,t}^{f,n} \cdot [pr_t(1 + \gamma^f) - (1 - \tau^f)c_f] \cdot E_{i,t}^{f,n} \\ Profit_n^{t,s} &= \frac{1}{\sum_{i,s,n} \vartheta_{i,t}^{s,n}} \sum_{i,s,n} \vartheta_{i,t}^{s,n} \cdot [pr_t(1 + \gamma^s) - (1 - \tau^s)c_s] \cdot E_{i,t}^{s,n} \\ \overline{Profit}_t &= \sum_{n \in N} Profit_n^t / N \end{aligned}$$

式中:UB为企业收益和运营成本的不平衡度;Df为用户不满意度; d_i^t 为第*i*个电动汽车与充电站的距离; $Profit_n^t, \overline{Profit}_t$ 分别为第*n*个新能源公司收益与平均收益; $\vartheta_{i,t}^{x,n} (x = f, s)$ 为第*i*个电动汽车在*t*时刻第*n*个公司的*xn*号充电桩的充电状态,若在该充电桩充电,则 $\vartheta_{i,t}^{f,n} = 1$,否则 $\vartheta_{i,t}^{f,n} = 0$ (f代表快充电

桩,s代表慢充电桩); pr_t 为*t*时刻的电价; γ 为充电服务补贴系数; c 为充电桩建设价格; τ 为充电桩建设补贴系数; $E_{i,t}^{x,n} (x = f, s)$ 为第*i*个电动汽车在*t*时刻第*n*个公司的*xn*号充电桩的充电电量。

2.1 约束

约束条件确定了优化模型中可行解的范围。这些约束可以分为4个部分,分别为充电特性约束、充电设施资源约束、用户收费距离约束以及非负性约束。

1)充电特性约束如下式:

$$\sum_{i,t} \vartheta_{i,t}^{x,n} \leq 1 \quad x = f, s \quad (3)$$

$$\sum_n \sum_i (\vartheta_{i,t}^{f,n} + \vartheta_{i,t}^{s,n}) = \sum_n (\Psi_t^{f,n} + \Psi_t^{s,n}) \quad (4)$$

$$\sum_i \delta_x \cdot \vartheta_{i,t}^{x,n} + Cap \cdot SOC_i^t \leq Cap \quad x = f, s \quad (5)$$

式中: $\Psi_t^{f,n}, \Psi_t^{s,n}$ 分别为隶属于公司*n*的快、慢充电桩的数量; δ_x 为充电桩的充电效率; Cap, SOC_i^t 分别为电动汽车电池容量和荷电状态。

约束式(3)表示每个充电桩在一个时间段内最多只能服务1个EV;约束式(4)保证所有需要充电服务的电动汽车用户都被分配到充电站;约束式(5)确保充电电量不能超过电动汽车电池最大容量。

2)充电设施资源限制如下:

$$\begin{cases} \sum_{i,t,f,n} \vartheta_{i,t}^{f,n} \leq \sum_n A_n^{f,t} \\ \sum_{i,t,s,n} \vartheta_{i,t}^{s,n} \leq \sum_n A_n^{s,t} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $A_n^{x,t} (x = f, s)$ 为可用充电桩数量。

约束式(6)保证了电动汽车用户在任意时间段的快、慢充电需求都得到满足。

3)剩余电量及与充电桩距离约束如下:

$$\frac{Cap \cdot SOC_i^t}{e_{100}} > d_i^t \quad (7)$$

$$d_{i-p}^t \leq d_{\max} \quad (8)$$

式中: e_{100} 为电动汽车百公里耗电量; d_{i-p}^t 为*t*时刻电动汽车*i*到充电站*p*的充电距离; $d_{\max}$ 为电动汽车最大容忍距离。

约束式(7)保证电动汽车剩余电量能够支持车辆驶往充电站;约束式(8)确保电动汽车用户不会在超过最大容忍距离内选择充电站。

4)非负性约束如下:

$$\begin{cases} \vartheta_{i,t}^{x,n} \in \{0, 1\} & x = f, s \\ d_{i-p}^t > 0 \end{cases} \quad (9)$$

2.2 智能合约的实现

为了解决上述问题并将其转化为可执行的

智能合约,这要求更为合适的算法从而获取可行解。与传统的优化方法不同,区块链中嵌入的智能合约需要更快、更轻的算法以满足节点的需求。邻域搜索算法(neighborhood search algorithm, NSA)^[15]是一种求解组合问题的近似算法。考虑到电车充电调度是动态情形,因此,本文提出了有限邻域记忆搜索(LNSM)算法来解决BOMILP问题,使区块链的智能合约能够更高效、更智能地工作。LNSM中有两个关键策略:1)限制候选解集,提高搜索效率;2)基于已有决策动态改变解决方案。

LNSM的具体步骤如下:

步骤1:限制候选充电点,主要关键在于选择满足条件的点作为可行点,如图4所示。首先,依据电动汽车用户的充电需求,可计算得出电动汽车位置和充电站位置之间的距离,充电距离 d_{i-p}^i 低于最大距离 d_{max}^i ,也要低于电动汽车考虑SOC容量的剩余范围,如下式所示:

$$d_{i-p}^i < \min(d_{max}^i, \frac{Cap - Cap \cdot SOC_i^i}{e_{100}}) \quad (10)$$

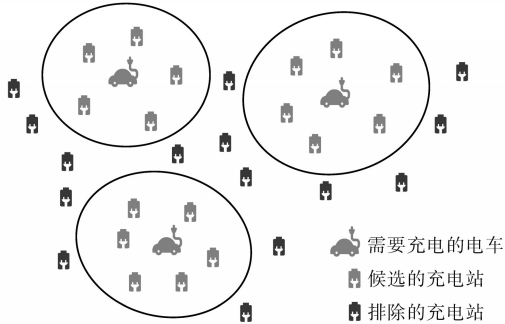


图4 有限邻域搜索策略

Fig.4 Limited strategy of neighborhood search

步骤2:排序运算并生成解。对步骤1中候选点集,根据距离从小到大进行排序,如图5所示。排序完成后,可从集合中选取候选点,使其满足目标函数式(2)。解决方案的生成顺序是从顶行到结束行,如,当选取线1作为新生成的解(P1,P6,P11),此解总距离最小;若解不满足,可在领域中重新生成新的解,如(P2,P6,P11),(P1,P7,P11)等。

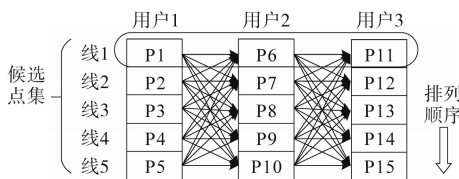


图5 算法的搜索机制

Fig.5 Search mechanism of algorithm

步骤3:计算每个解决方案的均衡度。引入均衡度来描述各解的不平衡利润,并使其等于解矩阵的方差。因此,可以根据之前的最优解(内存池)计算每个解的实时累积利润,并得到方差的值。如果不满意,返回步骤2,重新生成解决方案。因此,我们总能在每次迭代中得到一个非劣解。

步骤4:选取最优解决方案并更新内存池。依据步骤3所得最优解决方案,并将其添加至内存池内。基于此内存池可整合不同时间段的整个解。

3 案例研究及结论

本节讨论基于区块链方法的电动汽车充电问题。通过对中国最大城市之一,即天津的真实数据进行分析,可以验证电动汽车分配系统的有效性,同时对智能合约的性能进行了研究。

3.1 案例介绍和数据预处理

基于天津市实际电动汽车充电数据进行了案例研究。为提升不同公司的信息系统间的透明性,系统采用了区块链联盟。

依据全国电动汽车数据联盟发布的电动汽车充电数据(包括电车充电数据及60 d内的出行信息),电车出行数据集有两亿多条,充电数据集有5 000多条。电动汽车的位置数据由GPS设备记录,采集间隔为10 s。电动汽车一天充电需求的分布如图6所示,充电时间统计如表1所示,电动汽车充电参数如图7所示。

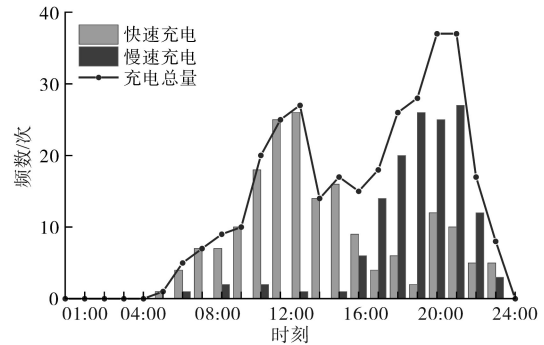


图6 电动汽车充电需求的分布

Fig.6 Distribution of EV charging needs

依据上述数据可以获得表2,根据下式计算电池容量:

$$Cap = \Delta Electricity / \Delta SOC \quad (11)$$

再由下式推导出功耗:

$$Cons = \Delta Mileage / \Delta SOC \quad (12)$$

电动汽车充电速率的计算公式为

$$Rate = \Delta Electricity / \Delta t \quad (13)$$

式中: $\Delta Electricity$ 为电池变化电量; ΔSOC 为电池

荷电状态变化量; $\Delta Mileage$ 为里程变化量。

考虑到随机误差,对所获值进行平均化处理。

表1 充电时间统计

Tab.1 Charging time statistics

时刻	充电时间/min		
	期望值	95%	100%
07:00	30.2	15.2~47.2	8.9~58.1
08:00	42.3	20.7~45.3	5.1~56.2
09:00	22.2	12.4~39.4	1.9~57.2
10:00	38.3	26.5~47.4	5.1~57.2
11:00	36.9	24.6~51.6	0.1~59.1
12:00	24.6	14.1~42.5	0.4~56.1
13:00	32.8	18.7~43.1	2.0~59.2
14:00	23.8	13.9~36.6	0.3~58.4
15:00	30.0	9.53~41.2	0.7~59.2
16:00	33.6	11.2~48.1	1.5~57.3
17:00	33.4	22.1~44.3	0.1~59.5
18:00	30.4	15.6~46.6	0.3~59.3
19:00	37.3	23.4~48.5	2.7~59.2
20:00	26.7	12.4~40.7	0.6~59.2
21:00	25.4	16.6~39.0	0.2~58.3
22:00	38.1	17.5~49.7	0.4~59.4
23:00	16.7	10.3~23.7	0.8~33.5

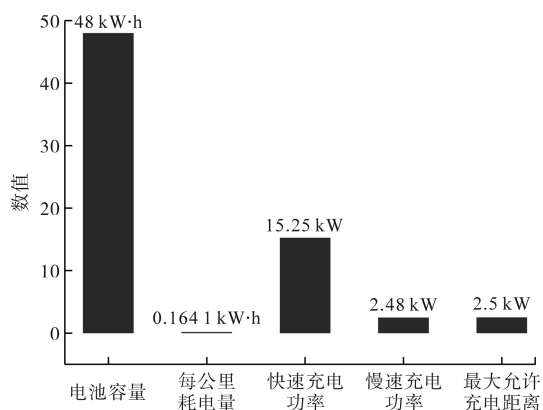


图7 电动汽车充电参数

Fig.7 Parameter of EV charging

表2 数据描述

Tab.2 Data description

	数据字段	描述
数据集1 (电动汽车充电)	电动汽车ID	车辆数目
	充电开始时间	开始充电时间
	当前SOC	电池剩余电量
	当前里程	当前总里程
数据集2 (电动汽车旅行)	电动汽车位置	EV的纬度和经度
	时间戳	当前时间
	充电状态	是否正在充电

而后,设置实验充电桩信息。假设每个充电桩有一个快速充电桩和两个慢速充电桩,从天津地区充电桩所属公司:国家电网公司(SGCC)、BAIC的Teld、普天新能源有限公司(Potevio)、StarCharge收集数据,进而获得天津地区电动汽车充电具体数据及空间分布,如图8所示。

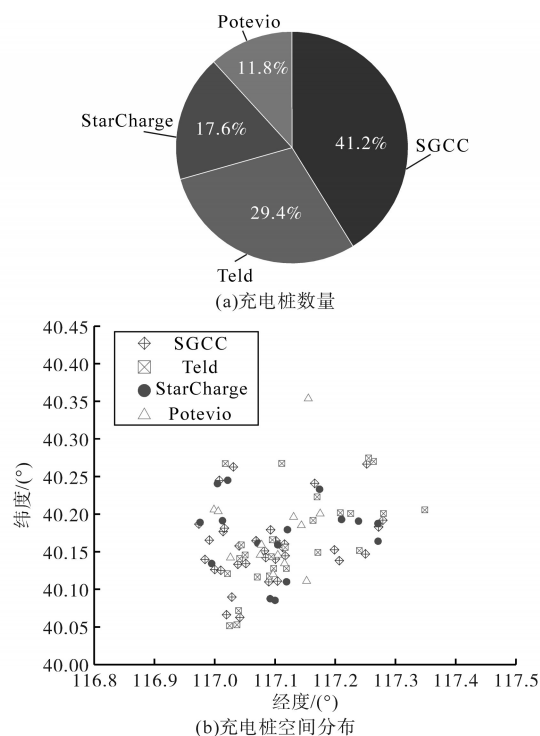


图8 充电桩的数量与空间分布

Fig.8 Charging pile compass and spatial distribution

最后,依据天津市发展改革办公室政府网站(2015年发布)收集收费价格数据。天津市分时电价情况如图9所示,充电桩服务收费为0.8元/(kW·h)。另外,快、慢充电桩的建设价格分别为5元/d和0.5元/d。根据快/慢充电桩销售价格(5万元/5000元),政府补贴率为每个充电桩80%,充电桩生命周期为3a(约1000d)。

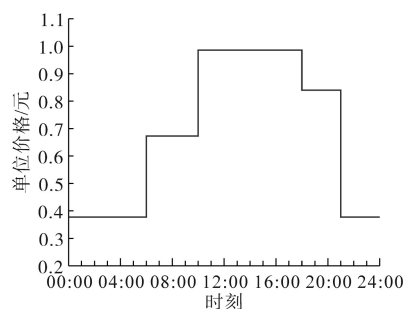


图9 天津的定期电价

Fig.9 Periodic electricity price of Tianjin

3.2 区块链系统的实现

充电系统正常工作需要经过两个程序。首

先是关键数据收集,包括电动汽车用户的充电需求、闲置充电桩位置等,之后系统生成一个账户节点并将数据记录于联盟区块链上;而后触发智能合约实现充电桩的动态配置,通过间隔的触发智能触点建立电动汽车与充电桩之间的连接。

用户:当用户产生充电需求后,可通过应用程序寻求合适充电桩,登录系统后,系统对用户所在位置进行定位,而后依据定位推荐周围充电桩,由用户选取心仪充电桩位置。文中充分考虑到用户使用的体验,在用户选取位点后程序将为用户提供最佳的前往充电桩路线。

公司:构建联盟区块链系统,记录交易信息。交易信息由联盟中的所有公司维护,使数据在任何时候均可被信任。首先,系统收集交易信息并将其打包成一个数据块,通过哈希函数(如MD5, SHA-1, SHA-256等)生成块哈希值和Merkle树。而后将在联盟中生成一个贡献者(核算节点),将数据块放入区块链。在这个系统中,生成机制是轮流的,如前一个块由SGCC记录,下一个块由StarCharge记录。通过这种方式,区块链将有序延伸,联盟区块链也将得到良好的维护。

3.3 系统的性能

为了评估所提系统的性能,本节进行了两组验证实验:实验1验证LNSM算法中内存操作的效果,对LNSM算法和NSA算法进行了比较,验证了不同的系统利润均衡结果;实验2对算法进行参数敏感性分析,通过改变限制杠杆、邻域搜索时间来查看结果的差异。

实验1:将候选站点固定为5个站点,EV号为3个,然后分别采用LNSM和NSA算法作为智能合约的核心机制进行实验。各公司的累积利润如图10所示。在60 d内,LNSM比非记忆法NSA表现出更好的公司联盟均衡。另外,公司的利润方差如图11所示,可看出LNSM算法中公司的方差是相当稳定且低的,而NSA算法的方差要比LNSM算法高。

实验2:对智能合约采用LNSM算法,为用户改变备选电动汽车充电站。用户更改充电站时,新能源公司的利润方差如图12所示。随着候选限制的放宽,智能合约可使新能源企业的利润更加均衡。因此,备选充电站数量的变化对新能源企业利润均衡有很大影响。此外,从实验结果可以看出,候选站存在一个阈值,当候选站点数量从8个增加到9个时,利润方差仍有较大变化,然而,当候选站点数量从9个增加到10个时,利润

方差几乎无变化。

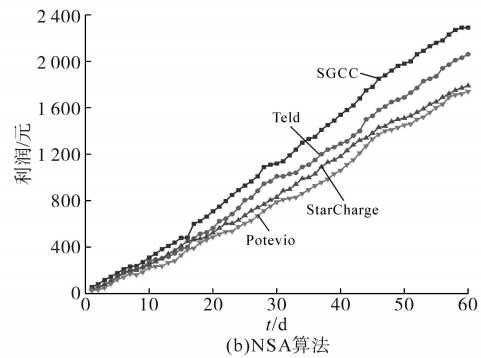
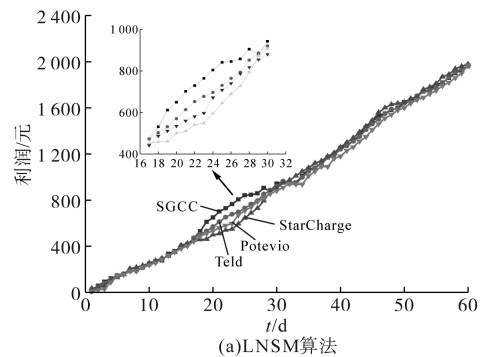


图10 LNSM和NSA的利润比较

Fig.10 Profit comparison between LNSM and NSA

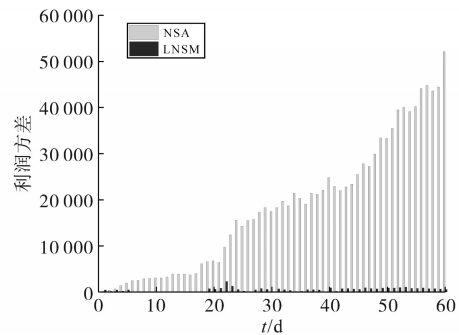


图11 LNSM和NSA的利润方差比较

Fig.11 Profit variance comparison between LNSM and NSA

实验结果表明,采用记忆法对新能源企业联盟的均衡非常有用,在电动汽车充电站为用户推荐系统时应采用记忆法。

3.4 结论

针对新能源电车充电需求的日益提升以及运营公司之间不同利益需求导致的充电桩不合理分配等问题,文中提出了一种基于联盟区块链的新型智能电动汽车充电系统。在该系统中,企业通过触发智能合约与客户建立联系,维护客户分配的公平性,平衡公司联盟的利润。公司之间通过区块链联盟的支持相互信任,区块链具备防篡改和透明性等特点。同时,为企业构建了切实可行的业务框架,为电动汽车用户设计了简洁的应用方法。而后,文中提出了一种新的算法

LNSM来提高分配智能合约的性能。通过实验证明,LNSM可以降低计算复杂度。并且LNSM算法的性能优于非记忆NSA算法。

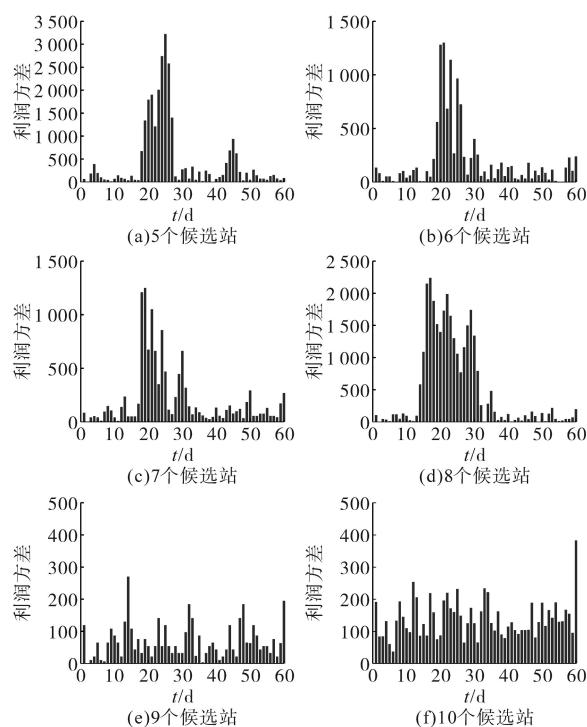


图12 电动汽车用户不同备选站的利润方差

Fig.12 Profit variance of electric vehicle users at different alternative stations

参考文献

- [1] 张丙旭,许刚,张斌华.考虑EV集群时序灵活性的分布式能源协同优化[J].电网技术,2021,45(3):987-998.
Zhang B X, Xu G, Zhang X H. Distributed energy collaborative optimization considering temporal flexibility of EV cluster[J]. Power System Technology, 2021, 45 (3): 987-998.
- [2] 李沛阳.浅析物联网在电动汽车充电设施中的应用[J].中国科技投资,2017(27):245-246.
Li P Y. Brief analysis of the application of internet of things in electric vehicle charging facilities[J]. China Science and Technology Investment, 2017(27): 245-246.
- [3] Fu Z T, Dong P W, Ju Y B. An intelligent electric vehicle charging system for new energy companies based on consortium blockchain[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 261: 121219.
- [4] 高建平.电动汽车充电站网络规划优化研究[D].济南:山东大学,2012:33-36.
Gao J P. Research on network planning and optimization of electric vehicle charging station[D]. Jinan: Shandong University, 2012: 33-36.
- [5] Chen Z H, Ma L W, Liu P, *et al.* Electric vehicle development in China: A charging behavior and power sector supply balance analysis[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2017, 131: 671-685.
- [6] 戴欣,袁越,王敏,等.配网中电动汽车调度策略及其经济效益评估[J].电力系统及其自动化学报,2015,27(3):42-47.
Dai X, Yuan Y, Wang M, *et al.* Electric vehicle scheduling strategy and economic benefit evaluation in distribution network [J]. Journal of Power Systems and Automation, 2015, 27 (3): 42-47.
- [7] Zhou N C, Xiong X C, Wang Q G. Probability model and simulation method of electric vehicle charging load on distribution network[J]. Electric Machines and Power Systems, 2014, 42 (9): 879-888.
- [8] 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 J J, Wen J Q, Wang D, *et al.* Multi-objective optimization of electric vehicle charging strategy based on tou electricity price[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44 (1): 17-23.
- [9] Chen C C, Wu Z G, Zhang Y L. The charging characteristics of large-scale electric vehicle group considering characteristics of traffic network[J]. IEEE Access, 2020, 8: 32542-32550.
- [10] 陈中,段然,黄学良,等.计及电动汽车主动充电管理的配电网与充电站协同规划[J].电测与仪表,2019,721(20):23-29.
Chen Z, Duan R, Huang X L, *et al.* Collaborative planning of distribution network and charging station considering active charging management of electric vehicles[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2019, 721 (20): 23-29.
- [11] He H J, Zhang J S, Tai H M. Block-chain based fragile watermarking scheme with superior localization[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2008, 5284: 147-160.
- [12] 于金刚,张弘,李姝,等.基于区块链的物联网数据共享模型[J].小型微型计算机系统,2019,40(11):70-75.
Yu Jingang, Zhang Hong, Li Shu, *et al.* Blockchain based IOT data sharing model[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2019, 40 (11): 70-75.
- [13] Shen J, Chen L, Zhou B, *et al.* Intelligent energy scheduling model based on block chain technology[C]//2018 5th International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE), 2018, 811-817.
- [14] 徐健,温蜜,张凯,等.基于区块链的分布式电能竞价交易平台设计[J].智慧电力,2019,47(10):56-62.
Xu J, Wen M, Zhang K, *et al.* Design of distributed power bidding trading platform based on blockchain[J]. Smart Power, 2019, 47 (10): 56-62.
- [15] Li J, Wang F, He Y. Electric vehicle routing problem with battery swapping considering energy consumption and carbon emissions[J]. Sustainability, 2020, 12 (24): 115-137.

收稿日期:2021-02-05

修改稿日期:2021-03-15