



计算机科学

COMPUTER SCIENCE

智能电网中基于优先级的预约式电动汽车充电管理研究

张捷, 唐强, 刘朔晗, 曹越, 赵维, 刘韬, 谢士明

引用本文

张捷, 唐强, 刘朔晗, 曹越, 赵维, 刘韬, 谢士明. [智能电网中基于优先级的预约式电动汽车充电管理研究](#)[J]. 计算机科学, 2022, 49(6): 55-65.

ZHANG Jie, TANG Qiang, LIU Shuo-han, CAO Yue, ZHAO Wei, LIU Tao, XIE Shi-ming. [Priority Based EV Charging Management Under Service Reservation in Smart Grid](#)[J]. Computer Science, 2022, 49(6): 55-65.

相似文章推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[基于粒子群优化的 SVM 多分类的电动车价格预测研究](#)

Study on Electric Vehicle Price Prediction Based on PSO-SVM Multi-classification Method

计算机科学, 2020, 47(11A): 421-424. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.191200132>

[一种基于蚁群的电动汽车充电调度优化方法](#)

Optimization Method of Electric Vehicles Charging Scheduling Based on Ant Colony

计算机科学, 2020, 47(11): 280-285. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.190700129>

[能量受限的单移动设备无线充电调度算法](#)

Wireless Charging Scheduling Algorithm of Single Mobile Vehicle with Limited Energy

计算机科学, 2018, 45(3): 108-114. <https://doi.org/10.11896/j.issn.1002-137X.2018.03.018>

[基于改进粒子群算法的电动汽车停车场 V2G 策略研究](#)

Research of V2G Strategies for EV Parking Lot Based on Improved PSO

计算机科学, 2018, 45(11A): 92-96.

智能电网中基于优先级的预约式电动汽车充电管理研究

张捷^{1,2} 唐强² 刘朔晗¹ 曹越¹ 赵维² 刘韬² 谢士明²

1 武汉大学国家网络安全学院 武汉 430072

2 思极星能科技(四川)有限公司 成都 610000

(zhangjie@aostarit.com.cn)

摘要 电动汽车因排放的温室气体极少,在力图实现绿色交通的今天具有巨大应用潜力。然而,其充电时间长及充电拥挤等问题,极大地影响了电动汽车用户的出行体验。为优化电动汽车充电服务,充电站选择方案(于何处充电)及充电调度策略(于何时充电)成为了解决城市电动汽车充电问题的关键。面向以未来 6G 为承载的交通物联网应用,提出了一项考虑充电优先级(Charging Priority, CP)的抢占式充电调度策略。该策略以经典排队论为基础,允许充电优先级(由充电需求和剩余停车时长计算)较高的电动汽车以抢占的方式充电,最大限度优化充电时序。在 CP 充电调度策略的基础上,该方案进一步结合预约信息对充电站选择方案进行优化,为电动汽车选择充电行程时长(含一次充电行为)最短的充电站。其中,该方案要求电动汽车上传其充电预约信息以准确预测充电站的服务拥塞状态,从而高效地调配充电资源。方案的结果验证基于赫尔辛基城市交通场景,对充电网络进行了仿真模拟。结果表明,所提优化充电管理方案(CP 充电调度策略及基于预约的充电站选择方案)能有效缩短电动汽车的平均充电行程时长,并在有限停车时长内为更多电动汽车提供完整的充电服务。

关键词: 电动汽车;电动汽车充电;充电调度;充电站选择;充电优化

中图分类号 TP3-05

Priority Based EV Charging Management Under Service Reservation in Smart Grid

ZHANG Jie^{1,2}, TANG Qiang², LIU Shuo-han¹, CAO Yue¹, ZHAO Wei², LIU Tao² and XIE Shi-ming²

1 School of Cyber Science and Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China

2 SG Star Energy(Sichuan) Technology Co. Ltd, Chengdu 610000, China

Abstract The introduction of electric vehicles(EVs) alleviates greenhouse gases emission. Its application has huge potential in the attempt to achieve green transportation today. However, the long charging time and charging congestion greatly affect the travel experience of EVs. To optimize EV charging, the charging station(CS) selection scheme(where to charge) and the charging scheduling strategy(when to charge) become the core of solving the problem of urban EV charging. In this paper, the preemptive charging scheduling strategy considering the charging priority(CP) is proposed. This strategy allows the preemptive charging of EVs with high urgency of charging(calculated from the charging demand and the remaining parking duration). Based on the CP charging scheduling strategy, a CS selection scheme that further combines reservation information is optimized. This scheme selects the CS with the shortest charging travel time(including one-time charging process) for EVs. Meanwhile, EVs are required to report their charging reservation information to accurately predict the congestion status of CSs, so as to efficiently allocate charging resources. The charging network is simulated through the urban traffic scene of Helsinki. The results show that the charging management scheme, CP scheduling strategy and reservation-based CS selection scheme proposed in this paper, can effectively shorten the average charging travel time of EVs and provide fully charging service for more EVs within a limited parking duration.

Keywords Electric vehicle, Electric vehicle charging, Charging scheduling, Charging station selection, Charging optimization

1 变量命名

本节对文中出现的变量命名进行了解释说明。

LIST: 充电站处充电槽的可用时刻输出表;

T_{ev}^{arr} : 电动汽车到达充电站时刻;

T_{ev}^{ra} : 电动汽车行驶至充电站时长;

T_{ev}^{cha} : 电动汽车预期充电时长;

T_{ev}^{sta} : 电动汽车到达充电站后的停留时长;

到稿日期:2022-01-31 返修日期:2022-03-15

基金项目:湖北省国际科技合作计划项目(2021EHB012)

This work was supported by the Hubei Province International Science and Technology Collaboration Program(2021EHB012).

通信作者:刘朔晗(Shuohan_liu@yeah.net)

T_{cur} : 当前充电网络中的时刻;
 S_{ev} : 电动汽车移动速度;
 α : 电动汽车移动每米的能量消耗;
 D_{ev} : 电动汽车停车时长上限;
 β : 充电站充电功率;
 N_c : 充电站处充电中电动汽车队列;
 N_w : 充电站处等待中电动汽车队列;
 N_R : 充电站处已预约电动汽车队列;
 V_{ev} : 充电优先级;
 δ : 充电站处的充电槽数量;
 E_{ev}^{max} : 电动汽车电池电量上限(满电);
 E_{ev}^{cur} : 电动汽车电池当前电量;
 T_{ev}^{fin} : 电动汽车充电结束时刻;
 $EACT_{cs}$: 充电站预期可开始充电时刻;
 N_{cs} : 充电站队列;
 l_{cs} : 充电站位置;
 $T_{cs,d}^{min}$: 充电站到电动汽车终点行驶时长;
 $T_{ev}^{cs,d}$: 电动汽车经由一次充电的总行程结束时刻。

2 引言

人类的社会发展伴随着大量的能量消耗。近百年来,人类对化石燃料的消费量不断增加,或将导致环境愈加恶劣,产生如温室效应等环境问题。为解决上述问题,近年来电动汽车(Electric Vehicle, EV)大规模普及。与传统内燃机车相比,电动汽车对环境更加友好,其使用电能作为动力补充,可减少由传统内燃机车出行产生的二氧化碳和有害气体。同时,考虑到化石燃料的储量在近几十年间急剧下降,电动汽车作为未来的必要出行手段势在必行^[1]。

然而,电动汽车取代传统内燃机车仍然存在许多局限性。电动汽车需要充电以延长行驶距离,但受限于目前的电动汽车充电技术,其充电时长远远长于传统内燃机车的加油时长。因此,电动汽车司机可能会经历较长的充电等待时长,这无疑降低了电动汽车用户的出行体验。此外,充电站(Charging Station, CS)的不合理分布也会对电动汽车充电产生不利影响,并影响电动汽车充电服务的稳定性。当前情况下,充电站的分布主要取决于城市政策及区域规划,这也导致在某些地区电动汽车可能需要更长的额外巡航时长,以寻找空闲充电站。上述两个问题共同造成了制约当前电动汽车大规模普及面临的核心问题,即充电服务拥挤。因此,面向以6G通信技术为核心支撑的交通物联网应用,解决充电服务拥挤将成为电动汽车在道路上普及的重中之重。

采用经典的计算机排队论是解决该研究问题的主要手段,已有文献关于电动汽车充电问题的大部分研究都聚焦于电动汽车的停车模式上,即电动汽车已停靠在固定地点(充电站或带有充电设备的社区等)^[2-4]。该模式下,充电调度优化(如电动汽车充电顺序)是解决电动汽车何时/是否充电的关键。文献[2]使用了先到先服务(First In First Serve, FIFS)策略,为需要充电的电动汽车进行充电顺序排序。然而,在处理充电能量和时长需求不定的电动汽车时,FIFS策略缺乏灵活性。因此,提出更为灵活的充电调度策略已成为了充电优

化的潜在方向。例如,Zhu等^[5]提出了一项充电调度策略,其中电动汽车的充电顺序取决于其电量需求(电池容量上限减去当前容量)而非到达时刻。

此外,大量行驶中的电动汽车也面临充电的需求(电动汽车移动模式),而解决该需求的核心痛点与停车模式下的电动汽车充电方案相异。其中,行驶状态下的电动汽车需要解决驶向何处的充电站以获得充电服务的问题。由于电动汽车的充电需求在时间和空间维度上具有动态性,可能会面临大量电动汽车的并发充电请求,最终将导致部分充电站无法满足所有电动汽车的充电需求,从而造成充电拥堵^[6],降低了电动汽车用户的体验质量(Quality of Experience, QoE)。

针对移动模式下的充电优化方案,需要协调行驶中的电动汽车的需求,以缓解电动汽车的充电拥堵状况。其中,充电站的选择方案旨在分流电动汽车前往具有更高可用性(意味着可用时刻更早或可用充电插槽更多)的充电站进行充电^[7-9]。因此,如何准确获知电动汽车及充电网络中充电站的状态至关重要。充电网络通信在物联网应用层面的数据处理量大,且对延迟敏感度高,需要无线通信和网络技术的迭代,如6G技术应用^[10]。为实现实时状态监控,中央全局控制器(Global Controller, GC)通过汇总的充电站状态和电动汽车充电请求,对全局电动汽车做出充电站选择决策。Gharbaoui等^[9]提出了基于等待时长最短的充电站(电动汽车在充电槽可用之前等待时长最短)选择方案,并证明该方案比基于最短距离选择充电站的方案效果更优。然而,由于充电站的充电服务状态存在不确定性(缺乏驶往充电站的电动汽车的信息),该决策方案仍有待改良。Qin等^[11]将预约信息引入系统。电动汽车发送其自身预约信息以提高充电站充电服务状态及可用时刻的预测准确性。此外,考虑到实际情况下电动汽车通常有既定出行路线,并不会长时间在充电站停留,文献[12-13]引入了电动汽车在充电站的停车时长上限。此时,有限的停车时长意味着大量电动汽车不得不在完全充电之前离开,也为电动汽车充电提出了另一维度的要求。本文的主要贡献如下:

(1) 本文提出了考虑充电优先级的充电调度策略,以优化电动汽车在有限停车时长内的充电体验质量。此外,本文进一步提出了预约模式下基于CP充电调度策略的充电站选择方案,旨在缓解大规模电动汽车应用中存在的充电拥堵问题。具体而言,文中提出了一项CP充电调度策略,基于电动汽车的充电需求和剩余停车时长计算充电优先级,并使用充电优先级作为抢占式充电调度的度量。中央全局控制器允许充电优先级较高的电动汽车进行抢占式充电。CP调度策略的创新在于先前的文献研究(如文献[2-3, 5])均未考虑剩余停车时长,且不提供抢占式充电服务(如文献[2, 12])。本文引入CP充电调度策略,以保证尽可能多的电动汽车在出发前完全充电。

(2) 通过估算总充电行程时长(综合考虑在充电站的充电时长花费,前往、离开充电站驶向目的地旅程时长的总和),文中提出基于预约的充电站选择方案。该方案在估算充电站的充电时长时应用了CP充电调度策略,可以进一步提升单位时长内电动汽车的总体充电服务性能。相比先前基于静态

历史数据的充电站选择方案(如文献[9,11]),本文提出的充电站选择方案考虑了充电站的实时充电服务状态。在该方案中,电动汽车需要发送其自身的充电预约。预约信息有利于针对充电网络中电动汽车的整体充电分配,并显著提升电动汽车用户的整体充电体验。

3 相关工作

解决电动汽车的充电问题聚焦于两个主要应用案例。第一个应用案例用于解决电动汽车处于停车模式下的充电调度问题,其中由于单个充电站可能无法处理大量停靠电动汽车的并行充电需求,需要对电动汽车进行充电调度。另一个应用案例中,电动汽车在路上行驶但由于能量过低,需要寻找合适的充电站来获得充电服务(充电站选择)。

3.1 充电策略

尽管大量研究(如文献[2-3,14])都对电动汽车充电调度策略进行了分析,但上述研究都是根据电动汽车的到达时刻,以FIFS策略排序充电优先级,缺乏充电服务的灵活性。因此,一部分研究着眼于改进充电调度策略。Qin等[11]提出了一种基于推导等待时长的近似模型来优化分布式充电调度策略。而Ovalle等[15]提出了基于动态规划博弈论的方法管理电动汽车充电调度,该方法以分布式的方案调度电动汽车充电。但是,上述研究均没有考虑电动汽车的充电结束时刻。Zhu等[5]则提出了两种调度策略:最早开始时刻策略(Earliest Start Time, EST)和最早完成时刻策略(Earliest Finish Time, EFT)。在EST策略中,充电顺序取决于电动汽车到达的时刻顺序;在EFT策略中,电动汽车充电调度顺序则取决于电动汽车最早完成充电的时刻顺序。需要注意的是,上述研究都未考虑电动汽车的停车时长上限。

Cao等[16]引入停车时长作为一个充电优化指标,并提出了停车时长驱动的充电优化策略,使更多的电动汽车在有限的时长内完全充电。停车时长模拟了实际生活中电动汽车在充电站停留的时长限制。同时,为考虑电动汽车的类型影响,Yao等[17]优化了公共交通中多车型电动汽车的调度问题,并考虑了不同车型的充电时长和能耗对其充电调度的影响。在此基础上,Cao等[13]进一步提出了异构电动汽车的调度策略,其中具有更高充电优先级(车辆类型)的电动汽车能够抢占式充电。

3.2 充电选择方案

通过比较基于距离最近和等待时长最短的两种不同充电站选择方案,Gharbaoui等[9]证明了选择等待时长最短的充电站在城市场景中表现更好。同时,Yang等[18]对高速公路场景下的电动汽车充电站选择行为进行模拟发现,基于最短预期等待时长的充电站选择方案可实现最佳的全局电动汽车充电结果。为更准确地预测一段时间后充电站的充电服务状态,Tian等[19]结合了预期等待时长和充电意图进行预测,其中充电意图考虑了电动汽车的历史充电站偏好数据和电动汽车的实时位置。

为缓解充电站的充电拥堵,Moghaddam等[20]将充电站选择建模为多目标优化问题,并综合考虑了充电时长、旅行时长和充电成本,以进行最优充电站的选择。部分工作[21-22]

则将充电成本纳入了衡量指标,并根据充电站的拥堵程度采用定价策略,充电拥堵的充电站将采用更高的充电价格。这些定价策略可防止电动汽车涌向拥堵程度更高的充电站,并使充电站利润最大化。

Yao等[23]考虑了能源需求响应,其重点是维持能源供需平衡。然而,优化供需并不能保证充电服务质量。因此,可通过引入电动汽车充电预测以确保整体充电性能[24]。De Werdt等[25]提出了一类导航系统,该系统允许电动汽车用户将其充电意图(充电站选择、路线行驶等)传达给其他电动汽车用户,提高了对充电站充电状态估计的准确性。

此外,充电预约信息的引入可以帮助中央全局控制器更好地预测电动汽车状态(能源需求和当前位置),以优化充电站选择方案。Qin等[11]模拟了高速公路场景下的电动汽车充电并引入充电预约信息。而Cao等[26]进一步模拟了城市场景下的充电及预约。上述基于充电预约信息的充电站选择方案显著提升了电动汽车的整体充电性能(减少了电动汽车的平均充电等待时长,缓解了充电拥堵)。

为更好地体现电动汽车充电过程,Pan等[27]考虑了充电桩的覆盖位置优化模型,最大限度地减少非必要充电行程。考虑到有限的出行时长约束,部分工作[12-13,16]引入了停车时长概念。其中,中央全局控制器在分配电动汽车充电时,需要考虑电动汽车能否在有限的停车时长内获得充电服务。此外,部分工作[12,28]引入交通拥堵作为充电站选择的影响因素,电动汽车可避免选择需要通过拥挤路段的充电站。

4 系统模型

4.1 电动汽车充电网络中的参与者

图1给出了充电网络中的参与者。

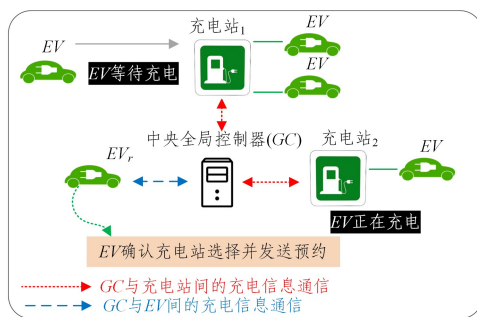


图1 充电网络中的参与者

Fig. 1 Participants in charging network

电动汽车(EV):电动汽车包含无线通信设备,用于与中央全局控制器进行充电请求通信。电动汽车在行驶时,其当前电池电量与电池电量的比值低于预设充电状态(Status of Charge, SOC)阈值时,电动汽车将向中央全局控制器发送充电请求以选择充电站进行充电。

充电站(CS):充电站固定部署于城市的各个区域,并与中央全局控制器通信,提供其充电服务状态。其中,充电站配备多个充电槽,以支持并行充电。

中央全局控制器(GC):中央全局控制器能够同时与电动汽车及充电站通信(通过6G通信网络)。中央全局控制器基于来自充电站和电动汽车的聚合信息(来自充电站的充电

服务状态信息和来自电动汽车的充电请求信息),管理电动汽车的充电站选择决策及充电站处的充电调度决策。

4.2 基于优先级充电调度策略

CP 充电优先级调度策略示意图如图 2 所示。

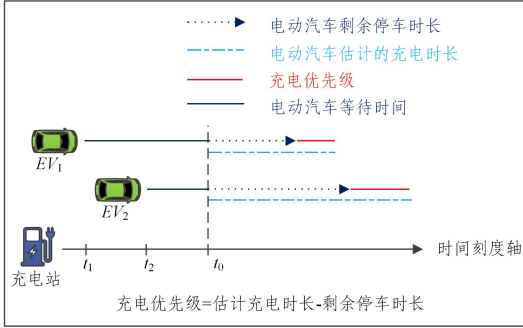


图 2 CP 充电优先级调度策略(电子版为彩图)

Fig. 2 CP charging priority scheduling strategy

由于电动汽车的充电能量和时长需求存在不确定性,部分高充电优先级电动汽车存在抢占式充电需求。为了优化上述问题,本文提出了 CP 策略作为充电底层调度策略(于何时为电动汽车充电)。CP 充电调度策略考虑了电动汽车的停车时长和充电能量需求,并允许“充电优先级”较高的电动汽车进行抢占式充电。这里,充电优先级由电动汽车的预计充电时长减去电动汽车的剩余停车时长计算得出的差值给出。作为确定不同电动汽车之间充电顺序的指标,充电优先级 V_{ev} 可表示为:

$$V_{ev} = T_{ev}^{cha} - (T_{ev}^{arr} + D_{ev} - T_{ev}^{sta}) \quad (1)$$

其中, T_{ev}^{arr} 表示了电动汽车到达充电站的时刻; T_{ev}^{cha} 表示充电时长; T_{ev}^{sta} 为电动汽车到达充电站直至充电插槽可用的等待时长,计算式为 $(T_{cur} - T_{ev}^{arr})$; $(T_{ev}^{arr} + D_{ev} - T_{ev}^{sta})$ 指电动汽车的剩余停车时长。

在图 2 中,当充电站处的充电槽可用时 t_0 , EV_1 和 EV_2 都已经到达且等待在该充电站。这里, t_1 和 t_2 分别指 EV_1 和 EV_2 的到达时刻。由于 EV_1 比 EV_2 更早到达且停车时长上限是固定值,可得出 EV_1 的剩余停车时长较短。

然而,通过比较 EV_1 和 EV_2 的充电需求,发现 EV_2 的预计充电时远远长于 EV_1 。此时,虽然 EV_2 的到达时刻晚于 EV_1 ,但根据充电优先级的公式计算, EV_2 的充电优先级(图中的红色线条)更高。因此, EV_2 可以抢占式获取充电服务,而 EV_1 则在后一个充电槽可用时进行充电。此时,通过 CP 策略调度充电,电动汽车可实现整体充电最优效果。

如果电动汽车具有更高的充电需求和更短的剩余停车时长,CP 充电调度策略将提高电动汽车获得充电服务的可能性。同时,CP 策略可以缓解电动汽车未能完全充电的情况。值得一提的是,抢占式充电仅调度还未开始充电的电动汽车充电顺序,并不会中断已处于充电进程的电动汽车服务。

4.3 算法假设

文中充电站分布在城市的不同位置,中央全局控制器在全局范围内管理电动汽车充电服务。电动汽车的车载系统可以通过配备的无线设备(如 5G/6G 网络)与中央全局控制器通信,向中央全局控制器请求/回复充电站选择。本文采用

集中式通信框架,由中央全局控制器于云端集中处理充电请求及充电服务优化分配。

当电动汽车在行驶中且其 SOC 低于预设阈值时,电动汽车向中央全局控制器发送充电请求。中央全局控制器处理电动汽车的充电请求,开始对充电站进行排序,并通过充电站和电动汽车的充电状态信息,预测充电行程时长(主要受等待充电时长影响)。

为使更多的电动汽车完全充电(充满电量),中央全局控制器综合考虑电动汽车的充电需求和充电站的充电服务状态。其中,CP 调度策略为高充电优先级的电动汽车提供抢占式充电服务。在 CP 调度基础上,中央全局控制器估算得到电动汽车通过各个充电站的总充电行程时长,随后选择总充电行程结束时刻最早的充电站。

4.4 问题描述

为更好地利用充电站充电资源并缓解充电拥塞,本节细化了充电优化公式,分别对符号及目标函数进行了定义。为了便于问题的表述,罗列了如下符号。

(1) δ_{ics} :单个充电站处完全充电的电动汽车数量(次数)。

(2) ν_{CS} :单个充电站处的电动汽车完全充电的平均总充电行程时长。

(3) N_{CS} :充电站队列中充电站数量。

(4) M :所有充电站处的电动汽车完全充电的总行程时长。

(5) X :所有充电站处完全充电的电动汽车数量(次数)。

目标函数如下:

$$\text{Maximize } X = \sum_{ics \in N_{CS}} \delta_{ics} \quad (2)$$

$$\text{Minimize } M = \sum_{ics \in N_{CS}} \delta_{ics} \times \nu_{CS} \quad (3)$$

其中,电动汽车必须在停车时长上限时离开充电站。目标函数式(2)希望最大化所有电动汽车完全充电的总次数,因此需要在有限的停车时长内优化充电调度。为使充电网络中的更多电动汽车完全充电,每个充电站的 δ_{ics} 都应增加。目标函数式(3)旨在最小化网络中所有完全充电的电动汽车的总充电行程时长,因此随着 δ_{ics} 在目标函数(2)中的增加, ν_{CS} 需要减少。 ν_{CS} 和 δ_{ics} 与 N_{CS} 相关,较大的 N_{CS} 将带来较小的 ν_{CS} ,这是因为电动汽车可以分布在更多的充电站中进行充电服务。然而,由于 N_{CS} (指总充电站的数量)不可变,因此只有在充电站之间平均分配电动汽车充电服务才能减少 ν_{CS} 。

5 技术描述

中央全局控制器计算电动汽车经由各个充电站进行充电的总充电行程时长,并选择最佳充电站。图 3 给出了参考,通过以下步骤可以计算出有预约的电动汽车 EV_r 的充电总行程结束时刻(含一次充电)。

步骤 1 通过本地充电状态监控,中央全局控制器估计充电槽的可用时刻。

步骤 2 当 EV_r 发起充电请求时,步骤 1 的输出、停靠在充电站的电动汽车队列、行驶中的已预约充电的电动汽车队列将被汇总,以预测当 EV_r 到达该充电站时的充电调度(通过 CP 充电调度策略)。

步骤3 中央全局控制器通过步骤2调度输出结果,计算该充电站的可用充电时刻。

步骤4 将步骤3获得的可用充电时刻及 EV_r 到达、离开该充电站的行程时长汇总,最终计算出预期总充电行程结束时刻。

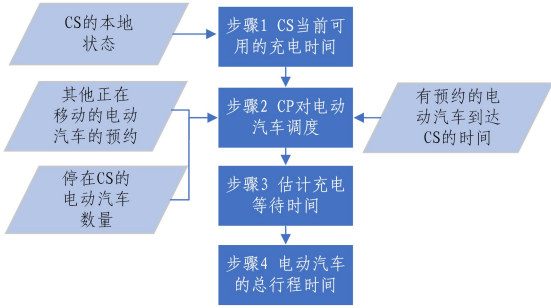


图3 充电站选择逻辑流程图

Fig. 3 Flow Chart of CS-selection decision

5.1 充电站充电服务当前状态

充电站当前充电服务队列状态计算如算法1所示。

算法1 充电站当前充电服务队列状态计算

输入: N_c

输出:LIST

1. if 没有电动汽车正在充电 then
2. add T_{cur} 进 LIST with δ 次数(充电槽数量)
3. return LIST
4. end if
5. for($n=1; n \leq N_c; n++$) do
6. if($(T_{cur} - T_{ev(n)}^{arr} + \frac{E_{ev(n)}^{max} - E_{ev(n)}^{cur}}{\beta}) \leq (T_{ev(n)}^{arr} + D_{ev(n)})$) then
7. LIST.ADD($(\frac{E_{ev(n)}^{max} - E_{ev(n)}^{cur}}{\beta}) + T_{cur}$)
8. else
9. LIST.ADD($T_{ev(n)}^{arr} + D_{ev(n)}$)
10. end if
11. end for
12. if($N_c < \delta$) then
13. for($m=1; m \leq (\delta - N_c); m++$) do
14. LIST.ADD(T_{cur})
15. end for
16. end if
17. 以升序对 LIST 进行排序
18. return LIST

充电站处设置有多个充电槽可同时为多辆电动汽车充电,因此当前充电中的电动汽车被表征为 N_c 队列。

网络中的当前时刻以 T_{cur} 表示。如果当前没有电动汽车停在该充电站进行充电, T_{cur} 将被添加到LIST中(充电槽可用充电时刻列表)中,共计以 δ (代表充电槽数量)次加入到LIST中。这表明该充电站当前时刻可用,且所有充电槽的可用充电时刻均为 T_{cur} ,如算法1第2行所示。

算法1第5-11行给出了 EV_n (队列 N_c 中的电动汽车)的充电过程,第6行比较了 EV_n 能否在停车时长上限内完全充电,即比较了 $D_{ev(n)}$ 和完全充电时长 $(\frac{E_{ev(n)}^{max} - E_{ev(n)}^{cur}}{\beta})$ 。若 EV_n

可以在离开前完全充电,则体现为 $((T_{cur} - T_{ev(n)}^{arr} + \frac{E_{ev(n)}^{max} - E_{ev(n)}^{cur}}{\beta}) \leq (T_{ev(n)}^{arr} + D_{ev(n)}))$,此时其可以在完全充电结束时刻离开,该充电完成时刻 $((\frac{E_{ev(n)}^{max} - E_{ev(n)}^{cur}}{\beta}) + T_{cur})$ 将被添加到LIST中;若 EV_n 未能完全充电,则充电完成时刻(离开时刻)将由 $(T_{ev(n)}^{arr} + D_{ev(n)})$ 代替,表示 EV_n 必须在允许停车时长上限到达后离开。

算法1第12-16行考虑了在充电槽未全部被 EV_n 占用的情况下(存在可用充电槽的情况), T_{cur} 会以 $(\delta - N_c)$ 次(代表可用充电槽的数量)加入到LIST中。此时, T_{cur} 将是这些未占用充电槽的可用充电时刻。随后在第17行和第18行,算法1对LIST进行了升序排序并返回该LIST,以表明LIST按照各个充电槽的充电状态可用时刻进行顺序排序。

5.2 充电站可用充电时刻预测

为缓解充电站处的充电拥塞,充电站选择方案尝试在各个充电站之间平均分配电动汽车充电需求,以实现充电站利用最大化。值得注意的是,在实际情况下,由于不同电动汽车有不同的充电优先级要求,部分电动汽车可能需要抢占式充电。因此,当为发送充电请求的电动汽车 EV_r 进行充电站选择时,中央全局控制器会估计充电站的可用充电时刻。算法2和算法3将详细计算CP充电调度策略下的各个充电站处的估计可用充电时刻(Earliest Available Charging Time, EACT)。算法2和算法3分别讨论了两种不同的情况。

(1)Case-1 EV_r 先于 N_w 队列充电的情况:与 N_w 队列(已经停靠在充电站等待充电的电动汽车队列)中的电动汽车相比,算法2计算得到后续到达的 EV_r (和其他发送充电的电动汽车)在到达该充电站时会有机会抢占充电(仅在充电优先级高的情况下)。

(2)Case-2 EV_r 未能先于 N_w 队列充电的情况:算法3计算得到后续到达的电动汽车(EV_r 和其他发送充电的电动汽车)将在到达充电站后直接获得充电。而这种情况仅出现在 N_w 队列中的所有电动汽车都已处于充电队列或该充电站没有等待充电的电动汽车。

算法2 EACT Case-1 $\langle LIST, N_R \rangle$

输入:LIST, N_R

输出:EACT 或 EACT Case-2

1. 以CP充电调度策略排序 N_w 队列
2. 将 EV_r 添加到 N_R 队列
3. 以CP充电调度策略排序 N_R 队列
4. if 没有电动汽车等待充电 then
5. return EACT Case-2 $\langle LIST, N_R \rangle$
6. else
7. for($i=1; i \leq N_w; i++$) do
8. for($j=1; j \leq N_R; j++$) do
9. if($(LIST.GET(0) > T_{ev(j)}^{arr}) \cap (V_{ev(j)} > V_{ev(i)})$) then
10. if(EV_r 是 EV_j) then
11. return LIST.GET(0)
12. else
13. if($(T_{ev(j)}^{cha} + LIST.GET(0)) < (D_{ev(j)} + T_{ev(j)}^{arr})$) then
14. $T_{ev(j)}^{fin} = LIST.GET(0) + T_{ev(j)}^{cha}$

```

15. else
16.    $T_{ev(i)}^{fin} = D_{ev(i)} + T_{ev(i)}^{arr}$ 
17. end if
18.   将 LIST.GET(0) 替换为  $T_{ev(i)}^{fin}$ 
19.   以升序对 LIST 进行排序
20.   将  $EV_j$  记录进 DELETEDSET
21. end if
22. end if
23. end for
24. 将 DELETEDSET 中记录的 EVs 从  $N_R$  队列中删除
25. if  $((T_{ev(i)}^{cha} + LIST.GET(0)) < (D_{ev(i)} + T_{ev(i)}^{arr}))$  then
26.    $T_{ev(i)}^{fin} = LIST.GET(0) + T_{ev(i)}^{cha}$ 
27. else
28.    $T_{ev(i)}^{fin} = D_{ev(i)} + T_{ev(i)}^{arr}$ 
29. end if
30. 将 LIST.GET(0) 替换为  $T_{ev(i)}^{fin}$ 
31. 以升序对 LIST 进行排序
32. end for
33. end if
34. return EACT Case-2  $\langle LIST, N_R \rangle$ 

```

5.2.1 Case-1 EV_r 先于 N_w 队列充电情况

首先,算法 2 通过 CP 充电调度策略对 N_w 队列中的电动汽车进行充电排序。随后,将 EV_r 加入到 N_R 队列中,并将 N_R 队列按照 CP 策略排序。算法 2 中第 4—6 行考虑了 EV_i 到达充电站时没有其他电动汽车等待充电的情况,此时将输出 $LIST$ 和 N_R 队列到算法 3 中进一步计算 EACT。由于 $LIST$ 已在算法 1 中进行了排序,此时 $LIST$ 的排序是基于最早可用的充电槽。因此, $LIST.GET(0)$ 表示第一个可用的充电时刻。

当第一个充电槽可用时,将对 EV_i (N_w 队列中的电动汽车)和 EV_j (N_R 队列中的电动汽车)进行比较,以决定它们的充电优先级。其中,该比较在循环操作中进行,于算法 2 第 7 行开始进行,充电调度顺序的比较由充电优先级 V_{ev} 决定。

当满足算法 2 第 9 行中的条件,即 EV_j 的充电优先级 $V_{ev(j)}$ 高于 EV_i 的充电优先级 $V_{ev(i)}$,且当第一个充电槽可用时, EV_j 已经到达了该充电站 ($LIST.GET(0) > T_{ev(j)}^{arr}$),此时 EV_j 才可在 EV_i 之前抢占充电。算法 2 第 10 行考虑了两种不同的情况:

(1)如果 EV_j (当前循环操作中正在处理的 N_R 队列中电动汽车)是发起本次充电请求的 EV_r 。那么该条件意味着 EV_r 能够在其到达充电站时直接抢占充电,于是算法 2 第 11 行把 $LIST.GET(0)$ 作为 EACT 输出。

(2)算法 2 第 13—21 行考虑了另一个条件分支,即 EV_j 可以在到达充电站后抢占充电,但 EV_j 并非发起本次充电请求的 EV_r 。

在 EV_j 并非 EV_r 的情况下, EV_j 的充电完成时刻 $T_{ev(j)}^{fin}$ 将替换 $LIST.GET(0)$ (意味着 $LIST.GET(0)$ 时刻的可用充电槽将一直被 EV_j 占用,直至 $T_{ev(j)}^{fin}$)。由于 EV_j 当前正在行驶且尚未到达充电站,其充电时长 $T_{ev(j)}^{cha}$ 将通过式(4)预估:

$$T_{ev(j)}^{cha} = \frac{E_{ev(j)}^{max} - E_{ev(j)}^{cur} + (S_{ev} \times T_{ev(j)}^{tra} \times \alpha)}{\beta} \quad (4)$$

其中,充电时长的计算方式为电动汽车需要充电的能量除以充电槽充电功率。需要充电的能量包括 EV_j 需求充电电量 ($E_{ev(j)}^{max} - E_{ev(j)}^{cur}$) 及额外消耗能量两部分。由于 EV_j 从当前位置移动到该充电站会消耗额外的能量,额外消耗能量的计算式为 ($S_{ev} \times T_{ev(j)}^{tra} \times \alpha$)。如果满足算法 2 第 13 行的条件, EV_j 可以在其停车时长内完全充电 ($D_{ev(j)} + T_{ev(j)}^{arr}$),则 $T_{ev(j)}^{fin}$ 被计算为 ($LIST.GET(0) + T_{ev(j)}^{cha}$);如果 EV_j 不能完全充电, $T_{ev(j)}^{fin}$ 将在算法 2 第 16 行以 EV_j 的停车时长上限 ($D_{ev(j)} + T_{ev(j)}^{arr}$) 计算。因为最早可用充电槽已被 EV_j 占用,所以 $LIST$ 会按升序再次更新,这样 $LIST.GET(0)$ 仍然是最早可用的充电时刻。考虑到 EV_j 已被调度充电,该 EV_j 将在算法 2 第 24 行从 N_R 队列中被删除。

如果 EV_j 不满足抢占充电条件 ($V_{ev(j)}$ 高于 $V_{ev(i)}$ 且 EV_j 在最早充电槽可用时到达充电站)将不会抢占充电,最早可用的充电槽将先为 EV_i 提供充电服务。算法 2 第 25—28 行计算了 EV_i 的充电完成时刻 $T_{ev(i)}^{fin}$ 。考虑到停车时长上限,如果 EV_i 可以在停车时长上限前完全充电 ($(T_{ev(i)}^{cha} + LIST.GET(0)) < (D_{ev(i)} + T_{ev(i)}^{arr})$), $T_{ev(i)}^{fin}$ 将计算为 ($LIST.GET(0) + T_{ev(i)}^{cha}$)。否则, $T_{ev(i)}^{fin}$ 将计算为 ($D_{ev(i)} + T_{ev(i)}^{arr}$)。随后,算法 2 第 30—31 行以升序更新了 $LIST$,以确保 $LIST.GET(0)$ 是第一个可用的充电时刻。最终,在算法 2 的第 34 行,如果发起本次充电请求的 EV_r 在算法 2 中仍未被安排充电,则 $LIST$ 和 N_R 队列中的其余电动汽车将被作为输入函数,在算法 3 中进一步计算以得到该充电站的 EACT。

5.2.2 Case-2 EV_r 未能先于 N_w 队列充电的情况

算法 3 EACT Case-2 $\langle LIST, N_R \rangle$

输入: $LIST, N_R$

输出: EACT

```

1. 将  $N_R$  队列中的所有电动汽车加入  $N_R^f$  队列
2. 以 FIFS 先到先充调度策略排序  $N_R^f$  队列
3. for(k=1; k ≤ NR; k++) do
4.   for(l=1; l ≤ NRf; l++) do
5.     if  $((LIST.GET(0) > T_{ev(l)}^{arr}) \cap (LIST.GET(0) > T_{ev(k)}^{arr}) \cap (V_{ev(l)} > V_{ev(k)}))$  then
6.       if ( $EV_r$  是  $EV_l$ ) then
7.         return LIST.GET(0)
8.       else
9.         if  $((T_{ev(l)}^{cha} + LIST.GET(0)) < (D_{ev(l)} + T_{ev(l)}^{arr}))$  then
10.           $T_{ev(l)}^{fin} = LIST.GET(0) + T_{ev(l)}^{cha}$ 
11.          else
12.             $T_{ev(l)}^{fin} = D_{ev(l)} + T_{ev(l)}^{arr}$ 
13.            end if
14.            将 LIST.GET(0) 替换为  $T_{ev(l)}^{fin}$ 
15.            以升序对 LIST 进行排序
16.            将  $EV_l$  记录进 DELETEDSET
17.          end if
18.        end if
19.      end for
20.    将 DELETEDSET 中记录的 EVs 从  $N_R$  队列和  $N_R^f$  队列中删除
21.    if ( $EV_k$  不是  $EV_r$ ) then
22.      if  $(LIST.GET(0) > T_{ev(k)}^{arr})$  then

```

```

23.         if(( $T_{ev(k)}^{cha} + LIST.GET(0)$ ) < ( $D_{ev(k)} + T_{ev(k)}^{arr}$ )) then
24.              $T_{ev(k)}^{fin} = LIST.GET(0) + T_{ev(k)}^{cha}$ 
25.         else
26.              $T_{ev(k)}^{fin} = D_{ev(k)} + T_{ev(k)}^{cha}$ 
27.         end if
28.     else
29.         if(( $T_{ev(k)}^{arr} + T_{ev(k)}^{cha}$ ) < ( $D_{ev(k)} + T_{ev(k)}^{arr}$ )) then
30.              $T_{ev(k)}^{fin} = D_{ev(k)} + T_{ev(k)}^{cha}$ 
31.         else
32.              $T_{ev(k)}^{fin} = D_{ev(k)} + T_{ev(k)}^{arr}$ 
33.         end if
34.     end if
35.     将  $LIST.GET(0)$  替换为  $T_{ev(k)}^{fin}$ 
36.     以升序对  $LIST$  进行排序
37. else
38.     if( $LIST.GET(0) > T_{ev(r)}^{arr}$ ) then
39.         return  $LIST.GET(0)$ 
40.     else
41.         return  $T_{ev(r)}^{arr}$ 
42.     end if
43. end if
44. end for

```

如果等待充电的 N_w 队列为空或 EV_r 未能抢占充电,则中央全局控制器只需考虑 EV_r 和 N_R 队列中其他电动汽车之间的充电优先级。这里,算法 3 的输入值 (N_R 队列和 $LIST$) 在算法 2 中更新获取。 N_R 队列中的所有电动汽车在算法 3 的第 1 行中被添加到 N_R^k 队列中,随后按 FIFS 调度策略对 N_R^k 队列进行排序。第 4 行开始的循环操作对 EV_i 进行遍历 (N_R^k 队列中通过 FIFS 充电调度策略排序的电动汽车),同时嵌套中的起始于第 3 行的循环操作对 EV_k 进行遍历 (N_R 队列中的 EV)。通过双队列的循环,算法 3 可以找到 EV_r 的充电调度顺序,并最终确定在该充电站的最早可用充电时刻。算法 3 第 5 行的判定定义为,若 EV_i 在 $LIST.GET(0)$ 之前到达充电站, EV_k 也在 $LIST.GET(0)$ 之前到达充电站并且 EV_i 具有更高的充电优先级 ($V_{ev(i)} > V_{ev(k)}$),则 EV_i 允许在 EV_k 之前抢占充电。若满足算法 3 第 5 行的条件,则:

(1)在算法 3 的第 6—7 行中,若当前循环中的 EV_i 是发起充电请求的 EV_r ,则 $LIST.GET(0)$ 将作为该充电站的 EACT 输出。

(2)第 8—16 行中, EV_i 可以在 EV_k 之前充电,但是 EV_i 不是 EV_r 。此时, $LIST.GET(0)$ 将被替换为 EV_i 的充电完成时刻 $T_{ev(i)}^{fin}$ 。值得注意的是,如果 EV_i 可以在出发前完全充电, $T_{ev(i)}^{fin}$ 将被计算为 ($LIST.GET(0) + T_{ev(i)}^{cha}$)。如果 EV_i 未能完全充电(必须在停车时长上限离开), $T_{ev(i)}^{fin}$ 将计算为 ($D_{ev(i)} + T_{ev(i)}^{arr}$)。算法 3 第 15 行随后对 $LIST$ 进行升序排序,以确保 $LIST.GET(0)$ 为最早可用充电时刻。

由于 EV_i 已被安排充电,它将在算法 3 第 20 行从 N_R 和 N_R^k 队列中被删除。需要说明的是, EV_i 和 EV_k 都是初始即位于 N_R 队列中的电动汽车, N_R 和 N_R^k 的队列具有相同的电动汽车,但是按照不同的调度策略(分别为 FIFS 和 CP 充电调度策略)进行排序。在算法 3 第 20 行删除的任何 EV_k 的 EV_i 都

不再出现在后续循环操作中。满足上述条件的 EV_i 完成充电调度后,算法 3 只需要调度剩余的 EV_k 。而决定 EV_k 是否为 EV_r 存在两种不同的情况:

(1)算法 3 的第 21—36 行对 EV_k 不是 EV_r 的情况进行了处理。这里,根据 EV_k 是否在 $LIST.GET(0)$ 之前到达以及 EV_k 是否可以完全充电,存在 4 种不同子情况。首先,如果 EV_k 在 $LIST.GET(0)$ 之前到达充电站并且可以在其停车时长上限内完全充电,即符合条件 ($T_{ev(k)}^{cha} + LIST.GET(0)$) < ($D_{ev(k)} + T_{ev(k)}^{arr}$),则其充电结束时刻 $T_{ev(k)}^{fin}$ 将在第 24 行被计算为 ($LIST.GET(0) + T_{ev(k)}^{cha}$);其次,如果 EV_k 在 $LIST.GET(0)$ 前到达充电站但不能在停车时长内完全充电, $T_{ev(k)}^{fin}$ 将在第 26 行被计算为 ($D_{ev(k)} + T_{ev(k)}^{arr}$);第三种子情况下,如果 EV_k 晚于 $LIST.GET(0)$ 到达充电站但可以在其停车时长内完全充电, $T_{ev(k)}^{fin}$ 将在第 30 行被计算为 ($T_{ev(k)}^{arr} + T_{ev(k)}^{cha}$);在最后一种子情况中,如果 EV_k 晚于 $LIST.GET(0)$ 到达并且无法在其停车时长内完全充电,则 $T_{ev(k)}^{fin}$ 将被计算为 ($D_{ev(k)} + T_{ev(k)}^{arr}$)。算法 3 的第 35 行对上述 4 种可能情况下出现的 $T_{ev(k)}^{fin}$ 进行了汇总,并将 $LIST.GET(0)$ 替换为 $T_{ev(k)}^{fin}$ (表示 $LIST.GET(0)$ 时可用的充电槽将一直进行充电服务直到 $T_{ev(k)}^{fin}$ 才可用)。随后 $LIST$ 在算法 3 第 36 行按升序进行排序。

(2)算法 3 第 37—43 行对最后的情况进行了计算,当所有电动汽车都调度充电后,当前循环中 EV_k 为 EV_r 。此时, EV_r 的到达时刻将与 $LIST.GET(0)$ 进行比较,以了解何时可为 EV_r 充电。如果 EV_r 在第一个可用充电时刻之前到达,则 $LIST.GET(0)$ 将作为 EACT 在第 39 行输出;反之,在算法 3 第 41 行以下的另一个情况中, EV_r 的到达时刻 $T_{ev(r)}^{arr}$ 将作为 EACT 返回。

5.3 充电站选择决策

算法 4 充电站选择决策

输入: $LIST, N_R$

输出: l_{cs}^{\min} (作为充电站选择)

```

1. for  $\forall l_{cs} \in N_{cs}$  do
2.     计算  $T_{cs,d}^{\min}$ 
3.     根据算法 3 计算 EACTcs
4.     if(( $T_{ev(i)}^{cha} + EACT_{cs}$ )  $\leq$  ( $D_{ev(i)} + T_{ev(i)}^{arr}$ )) then
5.          $T_{ev(i),d}^{cs} = T_{ev(i)}^{cha} + EACT_{cs} + T_{cs,d}^{\min}$ 
6.     else
7.          $T_{ev(i),d}^{cs} = T_{ev(i)}^{arr} + D_{ev(i)} + T_{cs,d}^{\min}$ 
8.     end if
9. end for
10.  $l_{cs}^{\min} \leftarrow \arg \min(T_{ev(i),d}^{cs})$ 
11. return  $l_{cs}^{\min}$ 

```

中央全局控制器需要在所有充电站中寻找最佳充电站,使电动汽车在最快的总充电行程结束时刻到达其行程终点。充电站选择过程中包括了如下参数定义:

(1) EV_r 在选定的充电站处结束充电的时刻,分别体现在算法 4 中的第 5 行和第 7 行。

(2) 从选定的充电站到 EV_r 的行程目的地的旅行时长,以 $T_{cs,d}^{\min}$ 表示。其中,电动汽车在充电站的充电时长受限于允许停车时长,因此其在充电站处的充电花费时长分为两种情况:

EV_r 完全充电, 则其充电结束时刻为 $(T_{ev(r)}^{cha} + EACT_{cs})$ 。对应的 EV_r 总行程结束时刻为:

$$T_{ev(r)}^{cs,d} = T_{ev(r)}^{cha} + EACT_{cs} + T_{cs,d}^{\min} \quad (5)$$

这里的 $EACT$ 在算法 2 和算法 3 中计算得到。

若 EV_r 未能完全充电, 则其充电结束时刻为 $(T_{ev(r)}^{arr} + D_{ev(r)})$, 对应的 EV_r 总行程结束时刻在算法 4 的第 7 行计算为:

$$T_{ev(r)}^{cs,d} = T_{ev(r)}^{arr} + D_{ev(r)} + T_{cs,d}^{\min} \quad (6)$$

当循环操作在算法 4 的第 10 行完成时, 可以获得 EV_r 经由每个充电站进行充电的预计 $T_{ev(r)}^{cs,d}$ 。中央全局控制器将选择最早的 $T_{ev(r)}^{cs,d}$ 充电站并将其位置 l_{cs}^{\min} 一并发送给 EV_r 作为充电站选择决策。

6 实验验证

本文使用机会网络环境 (Opportunistic Network Environment, ONE)^[29] 搭建城市充电网络的仿真模拟场景。如图 4 所示, 通过 ONE 仿真搭建了一个 $4500 \times 3400 \text{ m}^2$ 的区域场景, 来仿真模拟芬兰赫尔辛基市的市区充电网络。仿真中的电动汽车使用 Coda Automotive^[30] 进行配置, 其最大电池容量为 33.8 kWh, 最大行驶距离为 193 km, 平均能耗为 0.1751/(kWh/km)。在仿真模拟开始时, 所有电动汽车的电池都处于满容量状态。

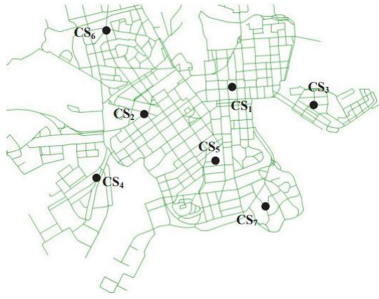


图 4 基于赫尔辛基的城市仿真环境

Fig. 4 Simulation scenario of Helsinki city

为区分不同的电动汽车以丰富仿真环境, 仿真将电动汽车划分为 3 类, 分别对应 30%, 40% 和 50% 的 3 个 SOC 阈值。电动汽车在场景中以随机初始位置开始, 移动速度在 30~50 km/h 之间波动。其中, 电动汽车的速度在每条路径上都会发生变化, 以反映不同交通状况的影响。此外, 每个电动汽车将随机选择其旅程终点。每当到达终点时, 电动汽车会再次随机选择一个新的旅程终点, 直到其 SOC 低于预设阈值。

该城市场景中部署了 7 个充电站, 每个充电站配备了 5 个充电槽, 所有充电槽的充电功率都为 62 kWh。本实验采用集中式方式并由中央全局控制器与电动汽车、充电站进行通信。中央全局控制器处理来自全部电动汽车的所有充电请求, 并在电动汽车请求充电时为电动汽车做出充电站选择决定。随后, 带有请求的电动汽车将朝着指定的充电站行驶, 并沿着赫尔辛基道路拓扑结构下的最短路径行驶。

该仿真模拟持续 12 h, 其中每 0.1 s 对数据进行一次更新, 包括电动汽车的位置、速度和能量等。仿真过程中, 参与充电的电动汽车皆通过 CP 充电调度策略由中央全局控制器

进行充电调度安排, CP 调度策略在 4.2 节进行了详述。

为评估所提算法的性能, 本文对 3 种不同的充电管理方案 (包括充电站选择方案和充电调度策略) 进行了模拟, 并比较了响应结果。

(1) R-CP: 文中提出的充电管理方案由中央全局控制器基于预约信息对电动汽车进行充电站选择, 其中电动汽车充电利用 CP 策略进行调度。

(2) WR-CP^[31]: 前述文献中提出的充电管理方案由中央全局控制器对电动汽车进行充电站选择, 其中电动汽车充电利用 CP 策略进行调度。但该方案缺乏对电动汽车的充电预约信息的参考。

(3) R-FIFS^[26]: 前述文献中提出的充电管理方案由中央全局控制器基于预约信息对电动汽车进行充电站选择, 其中电动汽车充电利用 FIFS 策略进行调度。

本文对以下充电效果指标进行了对比。

(1) 完全充电次数: 该指标侧重于充电站端, 旨在模拟持续时长内获得完全充电服务的电动汽车的次数 (电动汽车若获得多次完全充电, 可以被多次统计)。

(2) 未完全充电次数: 该指标统计电动汽车到达充电站但未充满电的次数。极端情况下, 部分电动汽车甚至无法在离开前 (受限于停车时长) 获得任何时长的充电服务。

(3) 平均充电等待时长: 该指标侧重于电动汽车端, 它表示电动汽车到达选定充电站后获得完全充电的平均等待时长。

(4) 平均充电行程时长: 该指标计算了完全充电的电动汽车平均获得该充电服务的总行程时长 (电动汽车行驶至充电站, 在充电站处等待和充电时长之和)。

6.1 停车时长变化下的结果

停车时长变化的结果如图 5 所示。在第一组模拟中, 电动汽车的数量被设为定值。调整停车时长以观察其对不同充电管理方案的影响, 停车时长分别设置为 1 200 s, 1 500 s, 1 800 s, 2 100 s 及 3 600 s。为了体现停车时长的影响, 仿真模拟设置中, 充电槽在电动汽车达到停车上限时会断开其充电服务并强制电动汽车离开。

在停车时长延长的情况下, 3 种充电管理方案都促使更多的电动汽车完全充电, 如图 5(a) 所示。然而, 由于 R-CP 和 R-FIFS 方案都要求电动汽车进行充电预约, 因而保证了 EACT 预估更精确, 也使得中央全局控制器进行充电站选择时, 可以将有充电请求的电动汽车分配给拥挤度较低的充电站, 此举提高了全局充电站的利用率。此外, R-CP 方案考虑了电动汽车充电的优先级并允许抢占式充电, 有效地避免了一部分电动汽车在未完全充电的情况下离开充电站, 尤其避免了部分电动汽车耗费较长等待时间但未得到任何充电服务。这也意味着, 得益于 CP 充电调度策略, 与 R-FIFS 方案相比, R-CP 可以使更多的电动汽车得到完全充电。

在图 5(b) 中, R-CP 方案比 R-FIFS 和 WR-CP 方案有更明显的结果优势。当停车时长是主要约束条件时 (停车时长较小), 充电站会陷入充电拥挤, 此时为具有较高充电优先级的电动汽车提供抢占式充电, 可有效增加全局的充电结果。图 5(b) 的结果也显示出充电调度策略的重要性。

在图 5(c)中,无论停车时长缩短还是增长,WR-CP 方案的平均等待时长都是 3 种方案中最长的。同时,R-CP 方案与 R-FIFS 方案的平均充电等待时长相近,这是因为两者都引入了充电预约信息,使得中央全局控制器能够更准确地预测充电站的潜在充电状态,并平均分配充电需求。预约信息的引入也避免了大量的电动汽车驶向同一拥挤充电站而造成充电拥挤。R-CP 和 R-FIFS 方案的比较证明了 R-CP 引入的 CP 策略可使更多的电动汽车完全充电,如图 5(a)所示,同时将充电等待时长维持在较低的水平。图 5(d)对平均充电行驶

时长进行了比较,可以看出,R-CP 和 R-FIFS 仍然体现出了引入预约信息的重要性。值得注意的是,由于 R-CP 和 R-FIFS 方案在算法中都考虑了从电动汽车当前位置到充电站以及从充电站到目的地的行驶时长,在停车时长为 3600s 时,停车时长对总充电行程时长的影响程度降低,反之对充电调度的影响上升。因此,如何在停车时长内规划充电调度变得更为重要,此时 CP 充电调度策略的优势得以体现。R-CP 和 WR-CP 都在 3600s 时达成了比 R-FIFS 更短的平均充电行程时长。

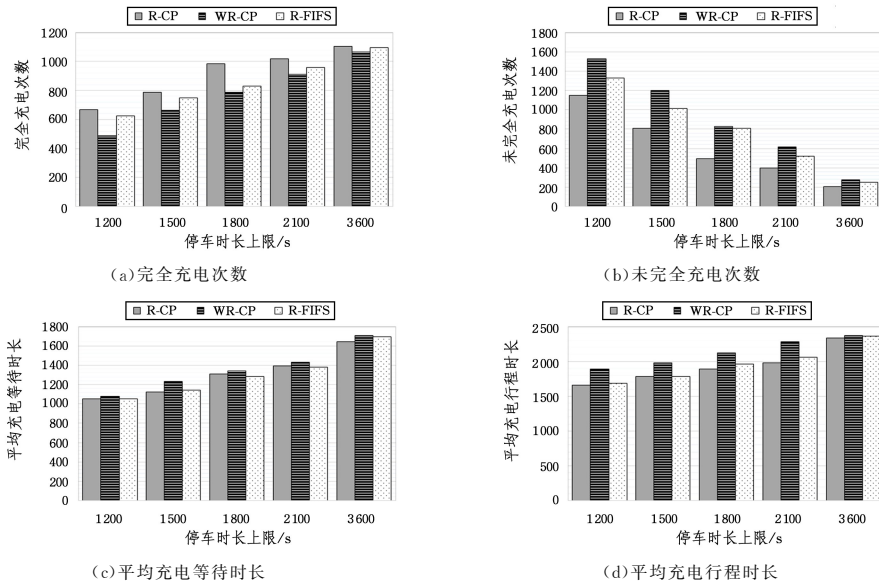


图 5 停车时长变化下的结果(电动汽车数量:330)

Fig. 5 Results of parking duration variation(330 EVs)

6.2 电动汽车数量变化下的结果

电动汽车数量变化下的结果如图 6 所示。在第二组模拟中,电动汽车在充电站的停车时长上限被固定为 1800 s。通过改变电动汽车数量来观察 3 种不同充电管理方案的效果。

图 6(a)中的结果表明,R-CP 方案获得最多的电动汽车完全充电次数,尤其是当电动汽车数量增加时,R-CP 方案比另两种方案的效果更好。由于 R-CP 方案考虑了电动汽车的充电优先级并允许抢占式充电,即使在充电拥挤的情况下,也能保证有足够多的电动汽车可以完全充电。

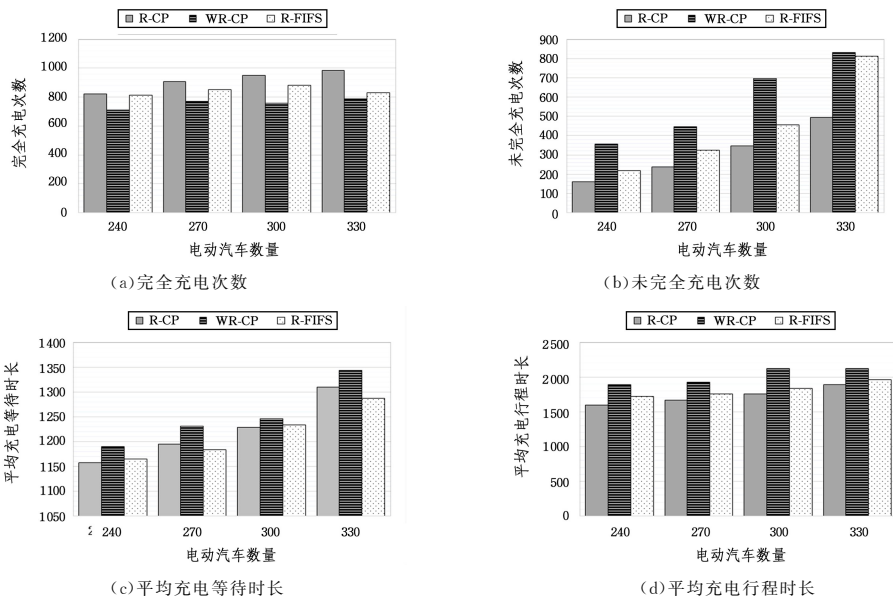


图 6 电动汽车数量变化下的结果(停车时长上限:1800 s)

Fig. 6 Results of EV density variation(1800s parking duration)

图 6(b)中的结果也证明了 R-CP 方案的优势。需要注意的是,当电动汽车的数量增加到 330 辆时,R-CP 和 R-FIFS 方案的结果差距较大。这是因为电动汽车的数量增加会造成更多的充电服务拥堵,即大量的电动汽车停靠在充电站且无法开始充电,此时适用于电动汽车的停车模式,因而充电调度策略的重要性增加。CP 充电调度策略考虑了电动汽车充电的优先级,在充电拥挤时能更好地调度充电顺序,以允许抢占式充电。

电动汽车数量的增加也导致了更多的充电拥堵发生,如图 6(c)和图 6(d)所示,平均充电等待时长和平均充电时长相应增加。其中,R-CP 和 R-FIFS 方案的平均等待时长比 WR-CP 方案更短(见图 6(c)),这是因为 WR-CP 方案在计算 EACT 时没有考虑电动汽车的充电预约信息,因此无法准确预测充电站的充电状态,导致中央全局控制器可能会将发起充电请求的电动汽车分配至充电拥堵的充电站。因为算法 4 综合考虑了行驶时长和充电时长,在图 6(d)中,在 3 种方案中 R-CP 方案保证了最短的电动汽车平均行程时长。

结束语 由于充电服务的拥挤情况制约了电动汽车的大规模普及,为优化电动汽车用户充电体验,本文提出了基于 CP 的充电调度策略。该策略根据电动汽车的充电优先级(综合考虑其充电需求和停车时长),对停车模式下的电动汽车的充电优先级进行排序并允许抢占式充电。而后,基于 CP 调度策略的框架,本文进一步提出基于预约信息的充电站选择方案,以最小化电动汽车的充电行程时长为优化目标。最终,本文提出的充电调度策略及充电站选择算法融合成为本文提出的基于预约信息及充电优先级的充电管理方案。该方案旨在保证电动汽车在有限停车时长约束下获得最优充电服务体验。本文依照芬兰赫尔辛基城市道路拓扑,搭建了充电网络仿真环境并进行了模拟。结果表明,本文提出的充电管理方案相比此前的文献研究实现了更短的平均充电行程时长和平均充电等待时长,同时也保证了较高的充电服务完成率,避免了大量的电动汽车因无法在充电站完成完全充电而中途离开。

参 考 文 献

- [1] ZHENG Y, SHAO Z, ZHANG Y, et al. A systematic methodology for mid-and-long term electric vehicle charging load forecasting: The case study of Shenzhen, China [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 56(5): 102084.
- [2] WU H, PANG G K H, CHOY K L, et al. A scheduling and control system for electric vehicle charging at parking lot[C]//2017 11th Asian Control Conference(ASCC). 2017: 13-18.
- [3] ZHANG T, CHEN W, HAN Z, et al. Charging scheduling of electric vehicles with local renewable energy under uncertain electric vehicle arrival and grid power price, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2014, 63(6): 2600-2612.
- [4] NEYESTANI N, DAMAVANDI M Y, CHICCO G, et al. Effects of PEV traffic flows on the operation of parking lots and charging stations[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(2): 1521-1530.
- [5] ZHU M, LIU X, KONG L, et al. The charging scheduling problem for electric vehicle networks [C] // 2014 IEEE Wireless Communications and Networking Conference(WCNC). 2014: 3178-3183.
- [6] CAI L, PAN J P, ZHAO L, et al. Networked electric vehicles for green intelligent transportation [J]. *IEEE Communications Standards Magazine*, 2017, 1(2): 77-83.
- [7] HAUSLER F, CRISOSTOMI E, SCHLOTE A, et al. Stochastic Park-and-Charge Balancing for Fully Electric and Plug-in Hybrid Vehicles[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2014, 15(2): 895-901.
- [8] TANG Q, WANG K, LUO Y, et al. Congestion balanced green charging networks for electric vehicles in smart grid[C]//2017 IEEE Global Communications Conference(GLOBECOM 2017). 2017: 1-6.
- [9] GHARBAOUI M, VALCARENCHI L, BRUNO R, et al. An Advanced Smart Management System for Electric Vehicle Recharge[C]//IEEE IEVC' 2012. Greenville, SC, USA, 2012.
- [10] GUO F, YU F R, ZHANG H, et al. Enabling Massive IoT Toward 6G: A Comprehensive Survey [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(15): 11891-11915.
- [11] QIN H, ZHANG W. Charging Scheduling With Minimal Waiting in a Network of Electric Vehicles and Charging Stations [C]//ACM VANET' 11. Las Vegas, Nevada, USA, 2011.
- [12] CAO Y, WANG T, KAIWARTYA O, et al. An ev charging management system concerning drivers' trip duration and mobility uncertainty[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2018, 48(4): 596-607.
- [13] CAO Y, LIU S, HE Z, et al. Electric vehicle charging reservation under preemptive service [C] // 2019 1st International Conference on Industrial Artificial Intelligence(IAD). 2019: 1-6.
- [14] TIMPNER J, WOLF L. Design and evaluation of charging station scheduling strategies for electric vehicles[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2014, 15(2): 579-588.
- [15] OVALLE-VILLAMIL A, HABLY A, BACHA S. Optimal management and integration of electric vehicles to the grid: Dynamic programming and game theory approach [C] // IEEE International Conference on Industrial Technology. 2015.
- [16] CAO Y, KAIWARTYA O, ZHUANG Y, et al. A decentralized deadline-driven electric vehicle charging recommendation [J]. *IEEE Systems Journal*, 2019, 13(3): 3410-3421.
- [17] YAO E, LIU T, LU T, et al. Optimization of electric vehicle scheduling with multiple vehicle types in public transport[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 52: 101862.
- [18] YANG S, CHENG W, HSU Y, et al. Charge scheduling of electric vehicles in highways[J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2013, 57(11/12): 2873-2883.
- [19] TIAN Z, JUNG T, WANG Y, et al. Realtime charging station recommendation system for electric-vehicle taxis [J]. *IEEE*

- Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17(11):3098-3109.
- [20] MOGHADDAM Z, AHMAD I, HABIBI D, et al. Smart charging strategy for electric vehicle charging stations[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2018, 4(1):76-88.
- [21] RIGAS E S, RAMCHURN S D, BASSILIADES N, et al. Congestion Management for Urban EV Charging Systems[C] // IEEE SmartGrid-Comm' 13, Vancouver, Canada, 2013.
- [22] FLATH C M, ILG J P, GOTTWALT S, et al. Improving Electric Vehicle Charging Coordination Through Area Pricing[J]. Transportation Science, 2013, 48(4):619-634.
- [23] YAO L, LIM W H, TSAI T, et al. A real-time charging scheme for demand response in electric vehicle parking station[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8:52-62.
- [24] ISLAM M R, LU H, ISLAM M R, et al. An iot-based decision support tool for improving the performance of smart grids connected with distributed energy sources and electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(4):4552-4562.
- [25] DE WEERDT M M, GERDING E H, STEIN S, et al. Intention-Aware Routing to Minimize Delays at Electric Vehicle Charging Stations[C] // Proceedings of the Twenty-Third International Joint Conference on Artificial Intelligence, 2013:83-89.
- [26] CAO Y, WANG N, KAMEL G, et al. An Electric Vehicle Charging Management Scheme Based on Publish/Subscribe Communication Framework[J]. IEEE Systems Journal, 2015, 11(3):1882-1835.
- [27] PAN L, YAO E, YANG Y, et al. A location model for electric vehicle(ev) public charging stations based on drivers' existing activities[J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 59:102192.
- [28] YANG H, DENG Y, QIU J, et al. Electric vehicle route selection and charging navigation strategy based on crowd sensing[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(5):2214-2226.
- [29] KERÄNEN A, OTT J, KÄRKKÄINEN T. The ONE Simulator for DTN Protocol Evaluation[C] // ICST SIMUTools' 09. Rome, Italy, 2009.
- [30] Consultants on Demand Automotive[EB/OL]. (2013-10-20) [2022-01-10]. <https://www.codautomotive.com>.
- [31] LIU S, CAO Y, RUAN W, et al. EV charging recommendation concerning preemptive service and charging urgency policy [C] // 2020 IEEE 92nd Vehicular Technology Conference (VTC2020-Fall). 2020:1-5.



ZHANG Jie, born in 1978, master, senior engineer. His main research interests include smart energy and grid automation.



LIU Shuo-han, born in 1995, Ph.D candidate. His main research interests include electric vehicle charging optimization.

(责任编辑:李亚辉)