

移动充放电设施技术及其规划与运营研究综述

黄小庆¹,于慎仟¹,朱彬²,段建焱¹,胡晓锐²,黄会²

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院,湖南 长沙 410082;2. 国网重庆市电力公司营销服务中心,重庆 400023)

摘要:目前,充放电需求区域性、时段性短缺,固定充电设施存在总量不足、扩容难、利用率低等问题,移动充电设施因其移动便捷性,受到广泛关注。阐明移动充放电设施的8种典型应用场景,阐述了“智能插座+移动充电桩”、不带储能装置的移动充电车、带储能装置的移动充放电车3种移动充放电设施类型。分析规划布局、调度运行、运营模式与价格机制、关键组件以及安全等关键技术。针对移动模式选取等7个关键方面对移动充放电设施的发展模式进行总结和展望。

关键词:电动汽车;移动充电桩;移动放电;智能插座;移动充放电车;调度;运营

中图分类号:TM715;U469.72

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202405005

0 引言

充电需求的时间、空间和功率分布不均衡,导致区域性、时段性的充电服务能力短缺。为有效解决充电资源利用率低、固定充电车位被占用、配电网容量和“场地难”导致的扩容升级难等问题,移动充放电设施受到关注。交通运输部、国家能源局等四部门印发的《加快推进公路沿线充电基础设施建设行动方案》(国发[2022]12号)要求加快形成“固定充电设施为主体、移动充电设施为补充”的充电服务网络。

国外已开展了移动充电设施试点应用。2010年,瑞士储能公司Nation-e推出了第一台带储能装置的移动充电车,提供电动汽车充电救援服务。2014年,美国公司Free Wire推出一种移动充电设备,采用容量为48 kW·h的蓄电池作为电源,可同时为5辆电动汽车充电。2017年,德国Charging公司打造了一批用自行车拉动的移动充电站,利用电池总容量为24 kW·h的12个锂离子电池组,可为电动汽车提供160 km续航所需电量^[1]。2020年,保时捷公司发布了一种新型移动充电解决方案,由拖车搭载2.1 MW·h电池系统,可同时为10辆电动汽车充电,并提出涡轮移动充电技术^[2]。

我国首台移动式充电车于2016年亮相深圳国际低碳城论坛。同年,北京市在约200个无法安装固定充电桩的老旧小区内,开展投放约500台移动充电桩的项目^[3]。普天新能源公司负责350台移动充电桩的投放、运营、数据监测、维修保养、后期回收、高端充电等服务。中国沃特玛新能源汽车产业

创新联盟推出了多种型号的移动充电车,充电费用按照政府统一要求的电费和服务费收取。2021年,国电南瑞推出一款移动式应急充电车,用于负荷保供,支持多电源车联合供电。2023年,江苏始途科技推出智能移动充电机器人,搭载了60 kW充电功率和70度电的宁德时代电池。

目前,移动充放电设施的理论研究围绕带储能和不带储能的移动充电车的调度与路径优化方面,考虑服务时间窗^[4]、道路拥挤程度、道路等级、道路长度等交通信息^[5],以实现最大化服务电动汽车数量、减小配电网负担以及最小化综合社会成本等目的。而针对“智能插座+移动充电桩”模式的研究较少。智能插座布局本质上是充电设施规划问题,但由于涉及取桩和送桩路径的优化,与当前考虑投放成本、用户充电需求,兼顾配电网和交通网络的充电桩规划研究并不相同,需要独立研究。在移动充放电设施运营方面,究竟是与固定充电设施集成,还是单独运营,尚无模式可借鉴。在定价方法上,博弈论方法可用于形成多主体利益均衡的动态电价^[6],潮流追踪法等可从时空双维度上推导出快充电价^[7],改进免疫鱼群算法等智能算法能求解定价优化模型^[8],但并未基于充电设施的移动场景和特征制定与常规充电设施有所区分的价格和定价机制。此外,除移动外,充放电设施的组件化也是匹配充电需求动态波动的有效措施,但针对组件组合策略、组合设施可靠和安全运行措施尚无研究。

综上所述,本文从移动充放电设施应用场景和类型出发,分析其规划布局、调度运行、运营机制、组件与组合、设施安全等关键技术和发展模式。

1 移动充放电设施应用场景和发展需求

移动充放电设施是固定充电设施的有效补充,在以下场景具有明显优势。

场景1:固定充电设施“建设难”场景。受到电

收稿日期:2023-07-05;修回日期:2024-04-08

在线出版日期:2024-05-15

基金项目:国家电网公司科技项目(5400-202327232A-1-1-ZN)

Project supported by the Science and Technology Project of

State Grid Corporation of China(5400-202327232A-1-1-ZN)

力基础设施、土地面积、停车位数量等限制,部分区域有充电需求却无法安装固定充电设施^[9]。

场景2:固定充电设施“盈利难”场景。新投入固定桩不能解决利用率低的问题,例如高速公路服务区,节假日桩不够,平时桩闲置。

场景3:固定充电设施“使用难”场景,包括充电停车位被占用、景区/城市快充站过载、充电排队等待时间过长、配电变压器容量受限等场景。

场景4:普通充电站检修替用场景。

场景5:电动汽车应急救援,或重大会议、活动的充电需求需满足的场景。

场景6:变压器和线路容量临时减载场景。移动放电设施通过迁徙可以在负荷重载区放电。

场景7:避免用户里程焦虑场景。移动充放电设施可减少用户找桩及排队时间,例如移动充电车能确保纯电双层巴士及电池容量不到300 kW·h的车辆全天续驶,可以减少公交车往返里程^[10]。

场景8:投资尝试场景,利用移动充电桩来测试桩的使用率,待利用率达到阈值后,再投资建设固定充电设施,可减少盲目投资。

面向上述场景,移动充放电设施需重点解决以下问题。

1)移动的便捷性。对于设施本体,要尽可能自重轻、占地小、即插即用,最好能够实现模块化部署、可拆卸运维,某些场景下支持储能功能。对于移动过程,多样化移动场景涉及小区内部、城区内部、跨城区、高速公路上转移等多种路线,移动路径的规划和智能插座布局方法决定移动效率。

2)经济竞争力。可以通过优化配置、路径规划、充放电调度、组件及接口规范、运营管理等方式实现经济竞争力。文献[11]采用数学模型对移动与传统固定充电桩进行比较,评估了移动充电桩的经济竞争力。

3)移动的安全可靠性。因需要适应多种场景下的组装和移动,移动充放电设施对装置和连接的可靠性、抗震性要求都更高。

4)配套管理措施和商业模式。现有固定充电设施服务范围无法覆盖的城市综合体、城市居民小区、乡镇住宅、高速公路服务区、景区等,其建设、使用、盈利的难点不一,投建方和用户需求各异,应区分性地提出有效的管理运行与价格机制,从而解决充电设施建设空间难落实、供电设施承压不够、居民认识不足等难点问题。

5)相关技术标准。相关技术标准包括:规范设施本体,例如组件、接口、智能插座、连接件等的标准;规范移动过程,例如移动半径与频率、轻量化、抗震性、耐压性、移动数据管理等标准;规范服务内容,例如运营模式、价格机制、计量与结算、激励考核

等的标准。

2 移动充放电设施的主要类型

基于上文中的8种场景,结合有源无桩、无源无桩的使用环境,移动充放电设施可分为以下3种。

模式1:智能插座与移动充电桩的组合模式。该模式为无储能的移动充电桩模式,需要智能插座与之配合,组合模式示意图见附录A图A1。智能插座具有标准化供电接口,可快速连接多个移动充放电桩,并对充电负荷进行柔性调控。国网重庆市电力公司采用这类方式研制的移动充电设施,已在18个高速公路服务区投运44台,国庆假日期间贡献了高速公路服务区20.1%的充电量,单桩日均充电量与固定桩接近^[12]。

模式2:不带储能的移动充放电车模式。Atmaja等将移动充电车定位为向过载的充电站或具有紧急需求的电动汽车提供应急帮助,据此将移动充电车分为2种类型:一是没有储能功能的,主要辅助过载固定充电站;二是具有储能功能的,可以在不接入电网的情况下向具有紧急充电需求的电动汽车进行充电,即模式3。

模式3:带储能的移动充电车,由车辆、储能电池组、变流器、控制柜、供电接口设备、充电机、消防系统和空调、安防、照明、倒车影像等辅助系统构成。带储能的移动充电车包括燃油型和电动型2种模式。燃油型移动充电车携带大容量电池,仅为顾客提供充电服务,当电量不足时,其到充电站补充电量;电动型移动充电车携带大容量电池,不仅为其他电动汽车提供充电服务,还需为其自运行提供动力^[13]。带储能的移动放电车还能对配电网馈能。

3种移动充放电设施比较如表1所示。

表1 3种移动充放电设施的优缺点及应用场景比较
Table 1 Comparison of advantages and disadvantages and application scenarios among three mobile charging and discharging facilities

模式	优点	缺点	适用场景
1	经济性好; 安全性高; 用户接受度高	智能插座需提前安装;移动和响应速度相对慢;不能放电	1—4、6—8
2	便于移动; 响应速度快	成本高; 可能对配电网造成负荷冲击	2—4、8
3	便于移动; 响应速度快; 对配网冲击小	成本高;电池容量有限;安全性相对低	2—6、7

3 移动充放电设施发展的关键技术

3.1 智能插座的规划布局(模式1特有)

智能插座的规划布局是指满足移动充电需求以及配电网、交通等约束,确定智能插座投放位置、容

量、类型、数量等。智能插座过少无法满足移动充电桩的接入需求,而投放过多又会降低插座利用率,浪费资源。约束包括设施服务质量、利用率、投资费用、电力电量平衡、充电循环时间窗约束等。此外,高效的规划模型求解算法也是研究重点。

1) 规划布局的目标。

智能插座布局考虑问题的角度不同,规划目标也不同,与电动汽车充电网络规划类似。第1类规划目标主要满足电动汽车用户的充电需求,一般通过定义充电站建设成本、电动汽车司机等待成本以及电动汽车不便驾驶成本,提出既能满足充电需求又能降低建设成本的规划方法。第2类以运营方收益最大、投资运行成本最低等为目标。智能插座投放定容类似充电站选址定容,其数学模型可设定为投放成本和用户时间损失、路途电量损失之和最小为目标,同时考虑配电网的扩容成本。第3类主要以配电系统最优运行为规划目标。文献[14]考虑交流变压器的能量转换效率-负载率特性,以配电网运行效率最高、充电站投资与运行成本最低为目标,建立了电动汽车快充站在配电网中优化配置的模式。第4类以社会综合效益最大为目标,例如文献[15]提出一种基于用户侧主动充电引导的电动汽车充电站双层扩容规划方法,上层以投资经济性和用户时间成本最小为目标,下层以电动汽车充电时间成本最小为目标进行主动充电引导。

本文认为,智能插座的投放应遵循社会总成本最小原则,兼顾电动汽车用户、运营方和配电系统三方利益且应伴随电动汽车入网规模等动态调整。例如示范阶段的移动充放电设施规模较小,用户对充电服务质量的要求相对较低,设施投资边际成本大,只需要满足某一类场景的充电需求即可,决策重点在于智能插座的总容量和分布的均衡度。对于大规模移动充放电设施接入,移动充电负荷大,对电网的影响不可忽视,此时,与配电网和交通网络的协同将是智能插座布局的重要目标。

2) 与配电网、交通网络的协同规划。

协同规划方面,可将配电网安全可靠运行作为约束条件,建立智能插座规划模型。可借鉴考虑配电网充电设施的规划成果,例如计及充电站和配电网的年总成本,考虑配电网网损,建立配电网线路可用裕度模型,实现充电站及接入配电网的馈线规划。文献[16]考虑了用户的充电心理,设计了综合考虑充电需求约束和配电网接纳能力的充电设施规划方法。

兼顾交通网络的智能插座规划会使模型更难求解^[17]。类似于兼顾交通网络、配电网的充电站规划,可考虑路网分布特征与交通流量时空动态,建立智能插座投放定容模型^[18]。由规划边界条件给定交通系统中的约束,同时考虑配电系统中的节点电压

约束与线路潮流约束^[19]。例如文献[20]进一步结合交通路网和配电网络耦合分布图,采用混合整数线性规划方法来确定快速充电站的位置和容量。

值得注意的是,需重视具有无功支撑能力的四象限双向移动充电桩。组件式移动充放电系统集成部署,可提供无功治理功能,通过调节充电桩功率因数灵活快速地实现配电网节点电压稳定运行^[21]。文献[22]建立了考虑有序充放电的无功优化模型,可在满足用户需求的基础上有效提高电压质量、降低配电网网损。还可借鉴虚拟同步机的转子运行特性,提出充电桩虚拟惯性功率补偿控制策略,为配电网提供频率支撑^[23]。

3) 规划模型求解。

智能插座的规划模型含整数变量,在考虑不确定因素的情况下,是一个复杂的非凸非线性的组合优化问题^[24]。规划模型的求解属于非确定性多项式问题,需要使用智能算法、数学规划、启发式算法、风险价值工具、CPLEX工具、鲁棒式优化算法和随机规划等智能算法进行模型简化和求解。规划模型约束条件越多,目标函数维数越大,计算与存储量越容易急剧增长导致算法运行速度变慢。文献[25]在求解充电站规划模型时采用图计算方法,通过交叉熵优化算法显著提高计算效率。

3.2 不带储能的移动充电桩调度和配送车辆路径优化(针对模式1和模式2)

移动充放电桩调度中心通常会在服务区域内配置一定数量的配送车辆,配送移动充放电设施。移动充电桩优化调度问题的实质是,每个调度周期内,调度中心综合考虑需求、桩移动距离、配送车辆初始位置和负载能力、行驶速度、最大行驶里程等多种因素,将桩取送订单分配给合适的配送车辆,并为车辆规划最优行驶路径和取送桩的时间窗口。

首先,调度中心计及充电负荷的时空分布、交通流量和固定充电设施的排队信息和充电成本等,利用出行链理论、Floyd算法、起点至终点(origin to destination, OD)路径等,预测充电桩的移动需求^[26],例如文献[27]考虑成本和服务质量,使用时间序列线性回归集合来准确预测需求点的未来不确定的充电需求。针对新增随机需求的动态需求,路径转移分为不考虑和考虑未来随机需求信息2种场景。前者可采取启发式算法搜索更新路径策略,在新需求发生时实时判断是否插入当前的最优方案。后者将对未来用户需求信息的考虑体现在等待策略上,例如:文献[28]基于信息动态更新策略帮助用户决策是继续行驶还是等待充电;文献[29]将未来客户需求信息融合到动态车辆路径决策中,使用共同进化方法生成更好的等待策略,以最大限度地提高预期服务用户数量。

然后,基于智能插座布局确定各调度周期内的取送桩数,以减少插座投放、提高移动充电桩利用率和优化运营商收益为目标,规划合理的取桩和送桩路径。不带储能的移动充电桩调度及其充放电行为会对交通系统和能源网络造成影响,构建车-桩-网动态融合模型,实现动态环境下的移动充电桩路径规划,可保证配电网的安全经济运行和移动充电桩调度系统的经济适应性^[30]。取桩送桩策略可参考的理论包括:餐饮外卖配送调度方法,将移动充放电设施看作带时间窗的即时配送车辆路径问题,以路径成本、绩效成本和惩罚成本之和最小化为优化目标^[31];团队定向问题,考虑配送车辆行驶里程、容量限制、客户选择、时间窗约束等,以最大服务数量为目标,进行路径优化,求解方法包括领域搜索算法、蚁群算法、元启发式方法^[32]。

3.3 带储能的移动充放电车的路径优化(模式3特有)

具有储能功能、可在不接入电网的情况下向电动汽车充电的移动充放电车的路径优化问题,与从一个地方移动到另一个地方的服务设施,例如救护车、流动餐车等的路径优化问题具有一定的相似性。

首先,移动充放电车的需求预测与移动充电桩类似。但由于不受智能插座的限制,移动充放电车服务位置更灵活。

然后,明确移动充放电车的调度目标,例如最大化服务范围、最小化需求响应时间,以覆盖更多的充电需求,并减小运营成本^[33]。为最小化充电车辆的排队时间、最大化运营商收益,文献[34]计及固定充电站,提出弹性协同派遣的多目标优化调控模型,为移动充电车规划最优服务路径。在最大化运营商总利润的目标下,需考虑充电服务效益和拒绝服务惩罚成本,文献[35]基于电动汽车驾驶员预订预约数据,提出了一种考虑时间窗和多模式充电方法的移动充电站的混合整数线性优化运营模型。在移动放电方面,常以配电网运行效益最大为目标,受移动充放电车电量及配电网运行约束,构建优化调度模型。

同时,考虑是否配备储能设备和能源补给模式等关键因素,优化移动模型。文献[36]以换电模式作为移动充电车的能源补给方式,结合变邻域搜索算法和精确算法,提出带时间窗和同步移动电池交换的车辆路径问题。文献[37]考虑移动充电车能源补给问题,构建了以物流成本最小为目标、以时间窗等为约束的车辆路径选择模型。

最后,求解移动充放电车路径优化方案。基于动态需求的路径规划问题常用的求解方法包括动态规划、列生成方法、蚁群算法、禁忌搜索、适应性记忆、基于场景的计划方法等。文献[38]为构建完整的路线,结合地理信息采用基于插入的启发式方法,利用一种极端梯度增强快速构造算法来选择路径构

建的排序规则。文献[39]综合考虑移动充电车、移动电池交换站2种服务模式,提出了一种预约服务规则,即选择距离服务车辆位置最近的充电订单先进行服务,采用排队论方法确定了运营参数范围。

总之,路径优化研究集中在移动充电车的位置部署、能源补给、车辆调度、路径转移规划等方面,对于“智能插座+移动充电桩”模式的移动充电桩调度问题研究较少。

3.4 运营模式与价格机制(针对所有模式)

3.4.1 与固定设施集成的运营模式

移动充放电设施运营可集成到现有固定设施运营系统,相较于独立开发,能节省成本,提高运营效率和用户满意度。集成运营模式可分为以下3种。

1)以政府为导向的运营模式。

政府为主要投资方,提供支持补贴,统一建设规划移动设施,出台一系列与充放电设施相关的政策规范,组织电网企业、汽车生产商和设施供应商、服务平台、使用者等共同参与。该模式适用于移动充放电设施投运初期,能够促进有序发展,需进一步完善运维服务激励政策和标准。该模式的缺点是仅凭政府资金支持建设,缺乏市场竞争,易受市场充电桩拥有量和密度分布的影响,稳定盈利目标有风险,会导致移动充放电桩投建率下降。

2)以电网为导向的运营模式。

电网企业为主要投资方,负责为不同类型充电桩所有者搭建生态共享的充电服务运营平台,提供充电服务、运营管理、结算交易等业务支撑。电网企业具备良好的充电设施网络优势、充足的能源供应与完善的电力供应技术支持,例如南方电网2019年底构建“顺易充”手机客户端,已完成对南方五省区内7个电动汽车充电平台的整合。移动充放电设施管理能较容易地集成到此类平台中,推动实现跨越式发展,协同满足其面向充电业主的各类服务需求。

3)以其他企业为导向的运营模式。

为了在未能实现稳定盈利的同时,还能继续维持移动充放电设施的建设,可考虑引入多元投资主体。其他企业相比电网企业,在技术实力、资源等方面存在不足,该模式下,企业需投入大量资金激励消费者有序充电,才能实现双方共赢。这种模式主要适用于商业条件相对成熟以及基础设施发展相对稳定的情况。企业研发手机客户端给予客户免费的服务,用户借助手机客户端享受预约、充电站导航、手机付费等服务,也可进行相关服务评价等操作。

与固定设施集成的运营模式为在已有的固定充电设施运营平台新增移动充电请求模块,需要充电的电动汽车驾驶员通过手机客户端发送移动充电请求,固定充电设施运营平台根据已收集的多个服务请求,考虑移动设施路径优化,指定某移动充电桩为

其提供充电服务,集成运营模式如图1所示。

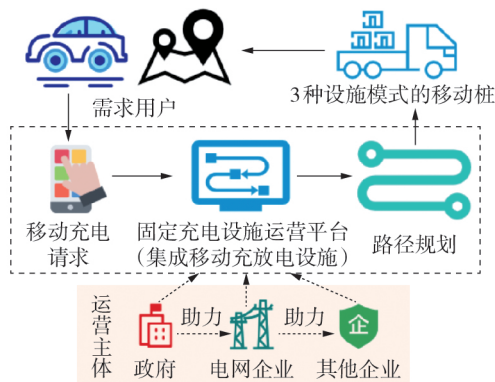


图1 移动设施运营与固定设施运营集成的运营模式

Fig.1 Operation mode of integration of mobile facility operation and fixed facility operation

4) 区别于固定设施的移动充放电价格探讨。

固定设施定价主要用来引导用户充电,以达到增大服务群体、减少负荷峰谷差等目的。而移动充电设施的运行目标与需求场景相关,更为复杂。例如场景5下的应急救援需求紧迫,此时价格可大幅偏离同时段固定充电设施价格。在移动需求以外,能源政策、电力市场机制、移动成本、移动时间(例如是否是保供电期间)、与固定设施的协作度等因素也将直接影响移动设施的服务价格^[40-41]。

3.4.2 独立运营模式

独立运营模式将建设新运营系统,独立于固定充电设施运营系统,为运营商提供订单、用户、充放电设施管理,电子支付,统计报表等服务;为电动汽车用户提供信息、充电和增值服务。移动充放电设施独立运营平台如图2所示。图中:组件层通过射

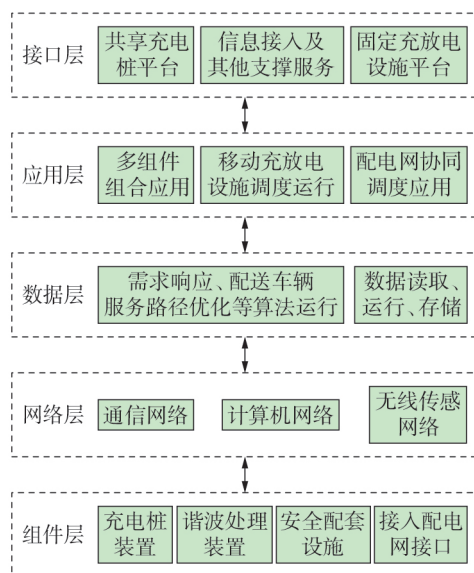


图2 移动充放电设施独立运营平台

Fig.2 Independent operation platform of mobile charging and discharging facilities

频识别标签、传感器等感知和识别信息;网络层依托公众电信网、互联网及行业专业网络,实现信息传输和交换;数据层基于Hadoop分布式架构等构建,基于Hadoop分布式文件系统(Hadoop distributed file system, HDFS)解决海量数据的存储问题,提取并存储需求和服务路径等数据;应用层运行需求响应、路径规划等优化算法,实现移动设施储能与充电控制、通信、身份认证、计量计费、安全保护、组件组合、监控管理和服务等功能;接口层连接其他平台、应用软件等,协同固定充电设施软件平台,可定制充放电服务。

综上所述,尽管独立运营模式建设周期短,但其投资维护成本高、与其他系统集成难度大,选择与固定充电设施集成的运营模式在不同阶段均更有利。

3.4.3 多主体的定价方法

移动充电设施定价需考虑定价范围、用户价格弹性、充电需求等约束^[6],分目标主体制定固定电价、分时电价等价格机制。市场环境下,用户、运营商和电网都希望自身利益最大化,能均衡多方利益的博弈论被引入定价。

1) 电网和用户博弈定价。

实际调度中,电网处于领导者地位,制定充放电价格,但电网无法强迫用户充电或不充电,电网与用户之间构成主从博弈格局。电网目标一般为电网安全经济运行,如削峰填谷。电碳双定价机制开始得到研究,文献[42]将阶梯碳价与分时电价的耦合关系进行内联,以电网日负荷均方差最小、电动汽车用户充电费用最小和发电商碳交易成本最小为目标,构建电动汽车有序充电模型。

2) 用户和运营商博弈定价。

用户想将充电时间成本和电量成本降为最低,而运营商想避免设施闲置,设置较高的充电价格以追求利润最大化,此时,运营商与用户之间构成了非合作博弈格局。考虑移动充放电设施的不同应用场景、用户的需求价格弹性和偏好等关键因素,结合运营商的成本收益函数和运营优劣势,考虑运营商与用户之间的获利分成策略,基于权利让渡、延保等额外补偿措施,提出价格激励机制^[43]。

3) 用户、运营商、电网多主体博弈定价。

通过非合作博弈或主从博弈等建立动态电价模型,由于各方利益平衡条件过多,其求解较为复杂。强化学习可用于研究多个主体之间的竞争关系,求解复杂的决策模型^[44]。在充电网络的动态定价研究中,多主体强化学习、在线强化学习和深度强化学习都可以用于求解最优值。将博弈模型中的对局者引入多智能体框架中,通过强化学习的试错和奖赏机制进行运算,可以获得动态定价策略中的最优解。将博弈论和强化学习结合起来进行移动充放电的定价研究,有望成为新的研究热点。

3.5 移动充放电设施组件化与组件组合策略(针对所有模式)

充电桩移动特性,要求其具有组件、功率灵活组合的特性,能即插即用式组合与移动,以适应充电需求的千变万化和充电功率的动态波动。组件和移动相辅相成,在充电设施总量一定且不足的前提下,组件组合能最大限度地提高充电设施利用率。通过建立移动充电站数学模型,以每个临时服务中心放置移动充电装置数量最少和运营成本最小为目标,规划移动充电站的充电装置容量组合模式,可提高服务效率。同时,固定式移动充电设施整体运维成本高,出现问题后需要在现场拆机,维护、维修要求高,组件式移动充电设施能有效地降低运维难度。

随着移动充电设施的推广应用,其逐渐收敛到表2所示的主要组件。

表2 移动充放电设施的组件与组合

Table 2 Components and combinations of mobile charging and discharging facilities

模式	核心组件
智能插座+移动充电桩	智能插座、移动底座、交直流充电机、连接模块、控制模块等
移动充放电车	储能电池组、车载动力装置、移动式交直流充电机、连接模块、控制模块等

文献[45]设计并仿真实现了一种具有配电功能的智能交互插座,可适配快充和慢充的移动充电桩。文献[46]研发的50 kW带电池的充电桩由不控整流桥以及3个单相有源滤波器组成,并由可承载大重量的移动底座搭载,实现自由移动。文献[47]对移动充电桩的外部结构进行建模,并对其在4种负载条件下的强度和可靠性进行分析。移动充电车大多采用厢式载货车改装而成,文献[48]研究了适用于车厢式移动充电站,针对电池储能系统选择了磷酸铁锂电池与双层电容器的组合安装模式,并配置移动式交流及直流充电桩。

目前的研究聚焦于一体式移动充电设备,组件式移动充放电设备的模块化设计方法、核心组件紧凑型设计及不同应用场景下的实例验证,还需系统性研究。特别地,尽管移动充放电设施可移动,但考虑到移动的时间成本、运输成本、机会成本、装置的移动损耗和安全成本,针对同样的服务需求,希望移动中应尽量减少组件组合与拆分次数、尽可能减少移动频率。其中,组合与移动的同步优化问题,要同步并重点解决。

3.6 移动充放电设施的安全问题(针对所有模式)

国内外在固定充电设施可靠性、实时判别、安全预警和防护技术方面开展了相关研究。但组件式移动充换电设施由于其移动频繁,桩与移动车以及场地的适应性都给安全带来了较大挑战。移动充放电设施的安全问题集中于4个方面,如表3所示。

表3 移动充放电设施的主要安全问题

Table 3 Main safety problems of mobile charging and discharging facilities

模式	实施途径	特征
组件安全	定义组件外观、过压、过流、绝缘、漏电、短路等基本安全保护相关标准	组件精准匹配,安全就地检测;数据、装备和防护系统轻量化
连接安全	电气连接、输入输出、通信连接的安全	组件的即接即识别、即诊断
移动安全	耐压性、抗震测试	轻量化移动
系统安全	从部署、数据、功能、环境方面增强安全性	实时判别、预警,精准故障消除

特别地,应借助人工智能理论实现组件式移动充放电设施安全。一方面,基于相关标准开展充电安全的危险因子识别,建立连接可靠性数据库。数据类型与国网车联网平台实现的固定充电桩数据类似,包括状态、电气类、绝缘状态、环境类、开关量状态、关键继电器开关、计量、充电桩故障告警等数据^[49]。另一方面,应用大数据方法,分析充电桩故障影响因素,提取故障特性,构建故障诊断模型^[50],推送故障处理方案,突破故障模式与失效分析、可靠性框图、故障树、马尔可夫等理论模型,提供预警,快速、精准故障处理功能。

4 结论与展望

移动充放电设施具有移动方便等特点。本文提出8种典型的应用场景,将移动充放电设施分为3种模式;分析了其在规划布局、调度运行、运营机制、关键组件与组合、设施安全等方面的关键技术。

1)在总体技术方向上,目前的“智能插座+移动充电桩”、不带储能装置的移动充放电车、带储能装置的移动充放电车3种模式,各有其适用性,应根据场景选择移动模式;“智能插座+移动充电桩”模式适应当前除应急救援以外的所有场景。

2)智能插座布局方面,除了借鉴固定充电桩规划成果外,还应考虑电动汽车入网规模、交通网络现状和发展、取桩送桩路径优化方案的影响。用户的充电心理以及具有无功支撑能力的四象限双向移动充电桩也应重点关注。

3)移动调度与路径转移方面,可引入餐饮外卖配送调度、团队定向问题等方法模型,确定配送车辆最优行驶路径、取送桩数与取送桩时间窗口。除考虑用户需求、车辆移动成本、配送容量外,还需考虑使用场景的需求差异和需求的动态变化,如场景2须确保设施利用率,场景4和场景5须确保移动设施的服务时效。此外,模式1要兼顾智能插座和闲置桩位置,模式3要考虑储能设备的容量电量约束、能源补给位置以及移动储能车的续航里程。

4)运营方面,要引入经济学理论,对比分析与固

定充电设施集成和单独运营这2种模式的成本收益。笔者认为固定充电设施集成模式当前更易实现、更能保障盈利。要构建面向政府、电网或其他企业的移动设施运营主体优选模型。要构建考虑移动设施潜在放电功能的区域充放电负荷移动调控模式。

5)定价方面,需考虑电网、电动汽车用户、运营商等多主体的利益,引入博弈论进行决策,均衡用户、运营商和电网利益,建立与固定设施有所区分的动态电价模型。需建立移动设施转化为固定充放电设施的阈值条件和转化模型,以避免固定设施盲目投资。

6)组件组合方面,应同步优化组合与移动两方面问题。尽快开展组件组合策略、组合设施可靠性和安全性的优化方法研究,尽早建立移动充放电组件标准,包括入网接口、模块化、组合安全等规范。

7)设施安全性方面,应从组件本体安全、连接安全、移动安全和系统安全4个方面构建安全屏障,借助人工智能理论实现组件式移动充放电设施安全。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] AFSHAR S, MACEDO P, MOHAMED F, et al. Mobile charging stations for electric vehicles—a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 152: 111654.
- [2] LIU Linfeng, XI Zhiyuan, ZHU Kun, et al. Mobile charging station placements in Internet of electric vehicles: a federated learning approach[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(12): 24561-24577.
- [3] 陈秀娟. 移动充电的未来[J]. *汽车观察*, 2016(7): 116. CHEN Xiujian. The future of mobile charging[J]. *Automotive Observer*, 2016(7): 116.
- [4] KABIR M E, SORKHOI I, MOUSSA B, et al. Joint routing and scheduling of mobile charging infrastructure for V2V energy transfer[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2021, 6(4): 736-746.
- [5] WANG Jiawei, GUO Qinglai, SUN Hongbin, et al. Collaborative optimization of logistics and electricity for the mobile charging service system[J]. *Applied Energy*, 2023, 336(1): 120845.
- [6] 王凤学, 欧阳森, 辛曦, 等. 保供电型光储微电网运营策略分析[J]. *电力自动化设备*, 2023, 43(5): 184-191. WANG Fengxue, OUYANG Sen, XIN Xi, et al. Operation strategy analysis of power supply ensuring microgrid with photovoltaic and energy storage[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2023, 43(5): 184-191.
- [7] 蔡小婷, 杨健维, 廖凯, 等. 考虑负荷时空均衡和弹性响应的电动汽车快充电价定价策略[J]. *电力自动化设备*, 2024, 44(2): 94-102. CAI Xiaoting, YANG Jianwei, LIAO Kai, et al. Pricing strategy of electric vehicle fast charging price considering space-time equilibrium and elastic response of load[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2024, 44(2): 94-102.
- [8] 董运昌, 刘世民, 曲朝阳, 等. 计及用户响应电价关联与多主体共赢的电动汽车充放电定价优化[J]. *电力自动化设备*, 2022, 42(7): 134-142. DONG Yunchang, LIU Shimin, QU Zhaoyang, et al. Charging and discharging pricing optimization of electric vehicles considering correlation of user response to electricity price and win-win results of multi-stakeholder[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022, 42(7): 134-142.
- [9] NAZARI-HERIS M, LONI A, ASADI S, et al. Toward social equity access and mobile charging stations for electric vehicles: a case study in Los Angeles[J]. *Applied Energy*, 2022, 311: 118704.
- [10] 徐冉, 徐潇源, 王晗, 等. 考虑公交车移动特性的电动公交车-充电站-配电网联合调度[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(24): 36-44. XU Ran, XU Xiaoyuan, WANG Han, et al. Coordinated dispatching of electric bus, charging station and distribution network considering bus travelling characteristics[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(24): 36-44.
- [11] ZHANG Yaoli, LIU Xingyu, WEI Wenshen, et al. Mobile charging: a novel charging system for electric vehicles in urban areas[J]. *Applied Energy*, 2020, 278: 115648.
- [12] 王燕, 王皓宇. 一江碧水 两岸青山[N]. *中国电力报*, 2022-04-08(001).
- [13] QIU Jiahua, DU Lili. Optimal dispatching of electric vehicles for providing charging on-demand service leveraging charging-on-the-move technology [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2023, 146(1): 103968.
- [14] 陈红坤, 夏方舟, 袁栋, 等. 直流配电网中含光伏的电动汽车快速充电站优化配置方案[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(16): 53-60. CHEN Hongkun, XIA Fangzhou, YUAN Dong, et al. Optimal configuration scheme of fast electric vehicle charging station with photovoltaic in DC distribution network [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(16): 53-60.
- [15] 李恒杰, 夏宇轩, 余苏敏, 等. 基于用户侧主动充电引导的城市电动汽车充电站扩容规划研究[J/OL]. *中国电机工程学报*. (2022-07-08)[2023-07-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20220707.1451.012.html>.
- [16] BAI Xingzhen, WANG Zidong, ZOU Lei, et al. Electric vehicle charging station planning with dynamic prediction of elastic charging demand: a hybrid particle swarm optimization algorithm[J]. *Complex & Intelligent Systems*, 2022, 8(2): 1035-1046.
- [17] ZHOU Bo, CHEN Guo, SONG Qiankun, et al. Robust chance-constrained programming approach for the planning of fast-charging stations in electrified transportation networks[J]. *Applied Energy*, 2020, 262: 114480.
- [18] LIN Yuping, ZHANG Kai, SHEN Z J M, et al. Multistage large-scale charging station planning for electric buses considering transportation network and power grid[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2019, 107: 423-443.
- [19] BALU K, MUKHERJEE V. Optimal allocation of electric vehicle charging stations and renewable distributed generation with battery energy storage in radial distribution system considering time sequence characteristics of generation and load demand[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 59: 106533.
- [20] HASHEMIAN S N, LATIFY M A, YOUSEFI G R. PEV fast-charging station sizing and placement in coupled transportation-distribution networks considering power line conditioning capability[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(6): 4773-4783.
- [21] 王强钢, 田雨禾, 王健, 等. 计及充电站无功补偿的配电网日前-实时协调优化模型[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(17): 27-34. WANG Qianggang, TIAN Yuhe, WANG Jian, et al. Coordinated day-ahead and real-time optimization model for distribution network considering reactive power compensation of charging station[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(17): 27-34.
- [22] CHEN J B, BEI G Y, ZHANG Q Z, et al. Integrated reactive

- power optimization for distribution systems considering electric vehicle dis-/ charging support[J]. *Energy Reports*, 2023, 9:1888-1896.
- [23] 施兴辉,柯松,张帆,等. 考虑充电站可调潜力的虚拟惯性功率补偿控制策略[J/OL]. *电力系统自动化*. (2023-11-22)[2023-11-23]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.202311-22.0943.002.html>.
- [24] 孔顺飞,胡志坚,谢仕炜,等. 含电动汽车充电站的主动配电网二阶段鲁棒规划模型及其求解方法[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(5):1093-1105.
KONG Shunfei, HU Zhijian, XIE Shiwei, et al. Two-stage robust planning model and its solution algorithm of active distribution network containing electric vehicle charging stations [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(5):1093-1105.
- [25] MAO D, TAN J, WANG J. Location planning of PEV fast charging station: an integrated approach under traffic and power grid requirements[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021, 22(1):483-492.
- [26] 黄帅博,陈蓓,高降宇. 基于马尔可夫决策过程的电动汽车充电站能量管理策略[J]. *电力自动化设备*, 2022, 42(10):92-99.
HUANG Shuaiibo, CHEN Bei, GAO Jiangyu. Energy management strategy of electric vehicle charging station based on Markov decision process[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022, 42(10):92-99.
- [27] TUNGOM C E, NIU B, WANG H. Hierarchical framework for demand prediction and iterative optimization of EV charging network infrastructure under uncertainty with cost and quality-of-service consideration[J]. *Expert Systems with Applications*, 2024, 237:121761.
- [28] 傅质馨,朱韦翰,朱俊澎,等. 动态路-电耦合网络下电动出租车快速充电引导及其定价策略[J]. *电力自动化设备*, 2022, 42(4):9-17.
FU Zhixin, ZHU Weihang, ZHU Junpeng, et al. Fast charging guidance and pricing strategy of electric taxi under dynamic road-electric coupling network [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022, 42(4):9-17.
- [29] BARKAOUI M. A co-evolutionary approach using information about future requests for dynamic vehicle routing problem with soft time windows[J]. *Memetic Computing*, 2018, 10(3):307-319.
- [30] 杨有为,徐春梅,彭道刚,等. 动态能源与地理信息融合的光储充电站电动汽车充电路径引导[J]. *电力自动化设备*, 2024, 44(2):72-80.
YANG Youwei, XU Chunmei, PENG Daogang, et al. Charging path guidance of electric vehicles at photovoltaic-storage charging stations based on dynamic energy and geographic information fusion [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2024, 44(2):72-80.
- [31] REN Teng, XU Hongbo, JIN Kangning, et al. Optimisation of takeaway delivery routes considering the mutual satisfactions of merchants and customers[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2021, 162:107728.
- [32] 葛晓琳,何钦博,符扬,等. 融合分层规划和A*算法的共享电动汽车换车与充电路径规划[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(22):7668-7681.
GE Xiaolin, HE Hongbo, FU Yang, et al. Interchange and charging path planning of shared electric vehicles based on A* algorithm combined with hierarchical programming[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(22):7668-7681.
- [33] ALI BEYAZIT M, TAŞÇIKARAOĞLU A. Electric vehicle charging through mobile charging station deployment in coupled distribution and transportation networks [J]. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 2023, 35:101102.
- [34] 郑远硕,李峰,董九玲,等. 计及资源弹性共享的移动充电车时空灵活性优化调控策略[J/OL]. *电力系统自动化*. (2023-05-17)[2023-05-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20230516.1443.002.html>.
- [35] CUI Shaohua, YAO Baozhen, CHEN Gang, et al. The multi-mode mobile charging service based on electric vehicle spatiotemporal distribution[J]. *Energy*, 2020, 198:117302.
- [36] ÇATAY B, SADATI I. An improved matheuristic for solving the electric vehicle routing problem with time windows and synchronized mobile charging/battery swapping[J]. *Computers & Operations Research*, 2023, 159:106310.
- [37] 刘洪,戚博硕,韩震焘,等. 考虑移动充电车路径选择和能源补给的充电服务一体化经济调度[J]. *电力自动化设备*, 2018, 38(9):62-69, 84.
LIU Hong, QI Boshuo, HAN Zhentao, et al. Integrated economic dispatching for charging service considering routing choice and energy supply of mobile charging vehicle[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2018, 38(9):62-69, 84.
- [38] WANG Xing, WANG Ling, WANG Shengyao, et al. An XGBoost-enhanced fast constructive algorithm for food delivery route planning problem[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2021, 152:107029.
- [39] ZHANG Xu, CAO Yue, PENG Linyu, et al. Mobile charging as a service: a reservation-based approach [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2020, 17(4):1976-1988.
- [40] 郭伟嘉,刘敦楠,王文,等. 基于智能合约的电动汽车充电服务费自适应调整机制[J]. *电力自动化设备*, 2022, 42(10):13-20, 61.
GUO Weijia, LIU Dunnan, WANG Wen, et al. Adaptive adjustment mechanism of electric vehicle charging service fee based on smart contract[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022, 42(10):13-20, 61.
- [41] 王一飞,王秀丽,黄晶,等. 动态电价机制下电动汽车竞争性充电的阻塞管理模型[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(12):103-110.
WANG Yifei, WANG Xiuli, HUANG Jing, et al. Congestion management model for competitive charging of electric vehicles under dynamic electricity price mechanism[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(12):103-110.
- [42] 王均,黄柯然,许潇,等. 基于阶梯碳价和自适应分时电价的电动汽车有序充电[J]. *电力自动化设备*, 2024, 44(2):64-71.
WANG Jun, HUANG Keran, XU Xiao, et al. Ordered charging of electric vehicles based on ladder-type carbon price and adaptive time-of-use electricity price[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2024, 44(2):64-71.
- [43] HONG L L, XUAN B D. Uniform purchasing price approach for Vietnam wholesale electricity market: modeling and discussing[J]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2023, 148:109012.
- [44] LEE J, LEE E, KIM J. Electric vehicle charging and discharging algorithm based on reinforcement learning with data-driven approach in dynamic pricing scheme[J]. *Energies*, 2020, 13(8):1950.
- [45] KIM J M, LEE J, EOM T H, et al. Design and control method of 25 kW high efficient EV fast charger [C]//2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Jeju, Korea: ACM, 2018:2603-2607.
- [46] SCHRITTWIESER L, LEIBL M, HAIDER M, et al. 99.3% efficient three-phase buck-type all-SiC SWISS rectifier for DC distribution systems [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, 34(1):126-140.
- [47] WU Zhongming, WANG Lanxin, LU Junfeng, et al. The structure design of mobile charging piles[J]. *Open Physics*, 2022, 20(1):370-376.
- [48] 吴芳榕,张峰玉,刘骞,等. 基于超级电容与动力电池混合梯次利用的可移动充电系统研究[J]. *蓄电池*, 2022, 59(1):13-16, 40.

- WU Fangrong, ZHANG Fengyu, LIU Qian, et al. Research on a removable charging system based on mixed step utilization of super capacitance and power battery [J]. Chinese Labat Man, 2022, 59(1): 13-16, 40.
- [49] PENG Jun, JIA Shuhai, YU Hongqiang, et al. Design and experiment of FBG sensors for temperature monitoring on external electrode of lithium-ion batteries [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(4): 4628-4634.
- [50] JIANG Lulu, DENG Zhongwei, TANG Xiaolin, et al. Data-driven fault diagnosis and thermal runaway warning for battery packs

using real-world vehicle data[J]. Energy, 2021, 234: 121266.

作者简介:

黄小庆(1981—),女,副教授,博士,通信作者,主要研究方向为电力系统分析与调控、电力大数据(E-mail: huangxiaqing@hnu.edu.cn)。

于慎仟(1999—),女,硕士研究生,主要研究方向为电力系统分析与调控、电力大数据。

(编辑 任思思)

Review of mobile charging and discharging facility technology and its planning and operation research

HUANG Xiaoqing¹, YU Shenqian¹, ZHU Bin², DUAN Jianyan¹, HU Xiaorui², HUANG Hui²

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. State Grid Chongqing Electric Power Company Marketing Service Center, Chongqing 400023, China)

Abstract: At present, the demand for charging and discharging is regional and time-limited. Fixed charging facilities have problems such as insufficient total amount, difficult expansion and low utilization rate. Mobile charging facilities have received extensive attention due to their mobile convenience. Eight typical application scenarios of mobile charging and discharging facilities, and three main types of mobile charging and discharging facilities, i.e. "intelligent socket + mobile charging pile", mobile charging vehicle without energy storage device and mobile charging and discharging vehicle with energy storage device are expounded. Then, the key technologies such as planning layout, scheduling operation, operation mode and price mechanism, key components and security are analyzed. The development mode of mobile charging and discharging facilities is summarized and prospected in seven key aspects, such as mobile mode selection.

Key words: electric vehicles; mobile charging pile; mobile discharge; smart socket; mobile charging and discharging vehicle; scheduling; operation

(上接第222页 continued from page 222)

Optimal planning of integrated electricity and heating system considering flexible configuration of thermal storage and hydraulic-thermal characteristics of thermal network

SHEN Hongshuai^{1,2}, LÜ Jiajun^{1,2}, LI Gengfeng³, XIONG Fei⁴, WANG Shihao^{1,2}, WANG Yapei^{1,2}, FENG Yi^{1,2}

(1. School of Electronic Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China;

2. Xi'an Key Laboratory of Interconnected Sensing and Intelligent Diagnosis for Electrical Equipment, Xi'an 710048, China; 3. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

4. State Grid Xi'an Electric Power Supply Company, Xi'an 710032, China)

Abstract: The optimal planning of integrated electricity and heating system can quantitatively decide the transformation of the electric-thermal coupling system, and fully develop the wind power consumption path at the planning level. Therefore, an optimal planning method of integrated electricity and heating system considering the flexible configuration of thermal storage and hydraulic-thermal characteristics of heat network is proposed. Based on the variable flow-variable temperature strategy, the heat network model is constructed. The joint planning model of the power system as well as flexible heat source-heat network-thermal storage is established. Four thermal storage modeling methods are given, including the predefined parameter type, the optimal investment type under power balance, the optimal investment type under variable flow temperature and the time coefficient discrete type. The quadratic convex relaxation and the big M method are used to transform the nonlinear planning model into a mixed integer second-order cone planning model. By the case analysis, the proposed method can efficiently promote the economy of the planning method, ensure the feasibility of system operation, and realize the high proportion of the wind power accommodation.

Key words: integrated electricity and heating system; optimal planning; heat storage tank; variable flow-variable temperature strategy; quadratic convex relaxation

附录 A

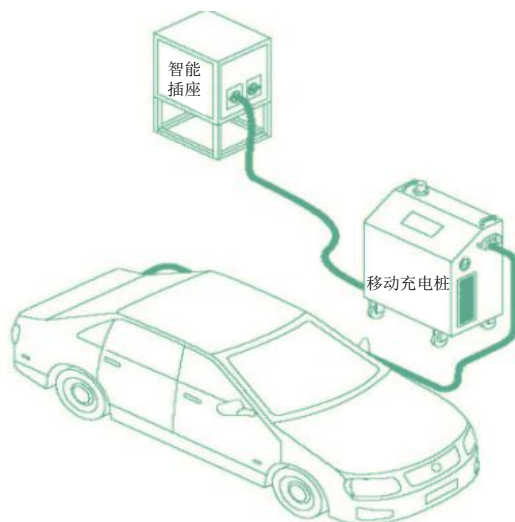


图 A1 “智能插座+移动充电桩”的组合模式

Fig.A1 Combination mode of “intelligent socket + mobile charging pile”