

电动汽车智能动态无线充电系统的研究现状与展望

苏宏业¹, 周泽¹, 刘之涛¹, 张立炎²

(1. 浙江大学工业控制技术国家重点实验室, 浙江 杭州 310027;

2. 武汉理工大学自动化学院, 湖北 武汉 430070)

摘要: 为了解决电动汽车的车载电池体积大和里程焦虑等问题, 加速电动汽车的推广应用, 动态无线充电系统(DWCS)应运而生。介绍了电动汽车智能 DWCS 的基本框架, 从电路结构及系统建模、电动汽车定位、DWCS 的控制策略以及与智能电网的相互影响等方面详细阐述了国内外学者在 DWCS 方面的研究工作, 然后从系统结构及优化、与无人驾驶技术的融合以及电网和交通网的协同优化策略等方面对电动汽车智能 DWCS 未来的研究方向和发展趋势进行了展望。

关键词: 电动汽车; 动态无线充电系统; 系统建模及优化; 电动汽车定位; 无人驾驶技术

中图分类号: TM910.6, U469.72+2

文献标识码: A

doi:10.11959/j.issn.2096-6652.202001

Research review and prospect of intelligent dynamic wireless charging system for electric vehicles

SU Hongye¹, ZHOU Ze¹, LIU Zhitao¹, Zhang Liyan²

1. State Key Laboratory of Industrial Control Technology, Institute of Cyber-Systems and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

2. School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China

Abstract: In order to solve the problems of large volume of battery and mileage anxiety, and accelerate application of electric vehicles, dynamic wireless charging system (DWCS) was presented and studied. In this paper, the basic framework of intelligent DWCS for electric vehicles was introduced, and a detailed review of the research results for DWCS by the researchers in the world was described, including the circuit structure and system modeling, electric vehicle positioning, control strategy of DWCS and the interaction with smart grid, etc. Then the intelligent DWCS of electric vehicle was prospected, mainly including system structure and optimization, the integration with the driverless technology, the integration of technologies and the collaborative optimization strategy with power grid and traffic network. The research direction and development trend in the future were also analyzed in this paper.

Key words: electric vehicles, dynamic wireless charging system, system modeling and optimization, position detection of electric vehicles, driverless technology

1 引言

近年来, 随着全球能源和环境问题的凸显, 具有零排放、低噪声和能源利用率高等优点的电动汽车受到社会各界的广泛关注, 相关的研究、产量和

销售都逐步得到提升, 世界各国也纷纷制定了禁售燃油车的时间表。尽管电动汽车的发展得到了很多国家和车企的大力支持, 但与燃油车相比, 目前电动汽车仍然存在许多问题, 如充电设施不齐全、充电时间长、车载电池容量大等, 这些问题在很大程

收稿日期: 2020-02-06; 修回日期: 2020-03-02

通信作者: 苏宏业, hysu@iipc.zju.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目 (No.2018YFA0703800); 国家自然科学基金创新群体基金资助项目 (No.61621002)

Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China (No.2018YFA0703800), Science Fund for Creative Research Group of the National Natural Science Foundation of China (No.61621002)

度上影响了电动汽车的推广。为了解决电动汽车电池充电时间长、充电不方便等问题,无线充电技术得到了发展。无线充电技术可以有效地解决传统传导式充电面临的接口限制,无线充电主要分为静态无线充电和动态无线充电 2 种。静态无线充电无法解决电动汽车续航里程短和电池组体积大等问题,而动态无线充电系统(dynamic wireless charging system, DWCS)则可以很好地解决上述问题, DWCS 铺设在道路上,与公共设施相结合,能以非接触的方式为行驶中的电动汽车持续地提供能量,实现便捷化和智能化充电。电动汽车动态无线充电系统的基本原理是:利用无线电能传输原理,通过地面上的发射线圈将电能传输到汽车上的接收线圈,进而给电动汽车的电池组充电。这种方式可以极大地降低电池组容量、延长电动汽车的续航里程,同时使得电能补给变得更加安全和便捷。

电动汽车动态无线充电系统吸引了国际上众多学者的关注,取得了众多的研究成果^[1-3]。国内外学者对电动汽车无线充电系统的研究进展进行了总结,对比了国内外的研究成果,指出了动态无线充电系统面临的关键技术问题。人工智能与智能化技术(例如无人驾驶、车联网和智能电网等)的快速发展,有效地促进了电动汽车动态无线充电关键技术的突破,加快了动态无线充电系统在公路上的工程应用。本文首先对动态无线充电系统的建模、车辆定位和优化控制技术进行总结和分析,然后介绍智能技术在电动汽车动态无线充电系统中的应用,最后对电动汽车动态无线充电的关键技术与人工智

能的结合进行展望,并分析未来的发展趋势。

2 电动汽车 DWCS 的基本框架

从能量发射端来看,动态无线充电技术可以分为导轨式和分段式^[4-7]。导轨式 DWCS 结构比较简单,其能量发射端铺设的充电轨道长度通常为数十米,可同时为多辆电动汽车充电。其局限性是效率低,导轨式 DWCS 的发射线圈电感值太大,使得寄生电阻也大,当导轨式 DWCS 上只有一辆电动汽车行驶时,导轨式 DWCS 的全面通电就会导致很大的能量损失,并且接收线圈的电感值比发射线圈的电感值小很多,因此耦合系数也会很小,与静态无线充电相比,导轨式 DWCS 的能量传输效率较低。而分段式 DWCS 的结构和静态无线充电系统的结构很相似,区别是分段式 DWCS 的发射端存在多个能量发射装置,每一套能量发射装置都可以单独工作,并且具有自己的调谐网络,可以通过智能控制算法进行切换控制,从而大大提高了系统的能量传输效率,因此分段式动态无线充电是一种行之有效的办法。

分段式 DWCS 的基本结构如图 1 所示,道路侧的交流电首先经过整流器变成直流电,再通过高频逆变器逆变成交流电,经过补偿网络后送往铺设在道路上的能量发射线圈。能量发射终端由多套能量发射装置组成,其中每一套能量发射装置都可以由控制器单独控制。能量发射装置包括高频逆变器、发射端补偿网络和能量发射线圈。电动汽车底部铺设了一个能量接收线圈,能量接收线圈拾取从能量

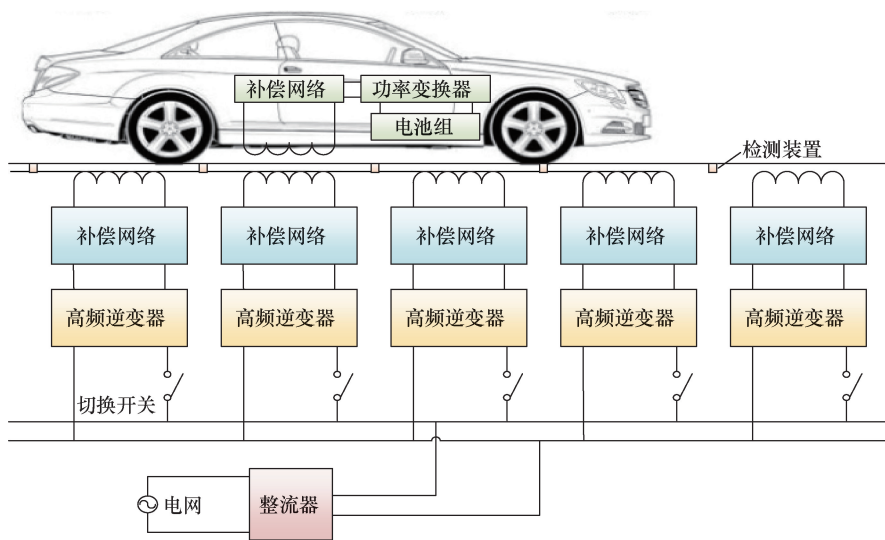


图 1 电动汽车分段式 DWCS 基本结构

发射端发射的能量给电动汽车上的锂电池充电。能量接收装置则由能量接收主线圈、接收端补偿网络、整流器和用于控制系统功率的直流-直流(DC-DC)变换器等功率变换器组成。随着检测技术的发展和智能控制技术的发展,分段式动态无线充电技术可以通过获取电动汽车的位置,分析电动汽车电池系统的状态,控制能量发射线圈的启停,从而有效地提高能源的利用率和系统能量传输的效率。

随着人工智能、车联网、无人驾驶技术的快速发展,人们可以尝试通过整合这些新技术提升电动汽车动态无线充电系统的性能,并促进工程应用。笔者团队提出的电动汽车智能动态无线充电系统的框架和开发的实物如图 2 所示。当电动汽车进入动态无线充电的道路时,通过智能定位检测技术,可将电动汽车的位置和速度等信息传送到智能控制系统;同时通过 5G 等无线通信技术采集并传输车辆状态信息,包括电池组荷电状态(state of charge, SOC)、电池组健康状态(state of health, SOH)等;利用车联网等技术获得道路上需要充电的电动汽车数量等信息,基于信息融合、大数据分析技术和深度学习等智能算法,实现能量的智能优化调度和动态无线充电系统的智能协调控制,提高能源的利用率,保证 DWCS 的安全、可靠、高效运行。

3 电动汽车智能 DWCS 的研究现状

3.1 电路磁耦合结构与系统建模

关于 DWCS 电路的研究主要包括补偿网络以

及功率变换器 2 个方面。根据发射端和接收端的串并联形式,补偿网络可以分为串联-串联、串联-并联、并联-串联和并联-并联等结构。基于这些基础结构,研究人员对电容和电感进行了组合,衍生出一系列补偿网络结构,如 LC-CL 和 LCC-CCL(L 代表电感,C 代表电容,LC-CL 和 LCC-CCL 是电容和电感的不同组合形式)等。由于动态充电过程中电动汽车偏移发射线圈,导致耦合系数降低,为了弥补耦合系数降低带来的功率下降,多种抗偏移的补偿拓扑被提出^[8-11]。除了动态无线充电系统的补偿网络结构,功率变换器的设计与控制也是关键所在,最常见的就是在能量发射端或接收端加入 DC-DC 变换器^[12]。奥克兰大学在磁耦合线圈上开展了大量研究,对圆形、双矩形和双矩形正交线圈的磁场特性进行了深入分析^[13-15]。关于磁耦合主线圈的详细分析可见参考文献[1]。笔者团队采用的 DWCS 电路和线圈的结构如图 3 所示^[16],通过引入 DC-DC 变换器和相应的 DC-DC 控制器,可以有效地提升系统的传输效率。

通过分析 DWCS 的电路结构可知,可以采用多种建模方法得到 DWCS 模型。犹他州立大学通过广义状态空间平均法建立了完整的 DWCS 模型,采用方波函数和符号函数将能量发射端的逆变器、能量接收端的整流器和两端的谐振网络联系起来^[17]。中国科学院的研究团队为了分析电动汽车 DWCS 的开通过程,建立了 DWCS 的等效数学模型^[18],通过对系统参数和车速影响的分析,研究了开关瞬态特性。随后,该团队通过建立 DWCS 的小信号模型

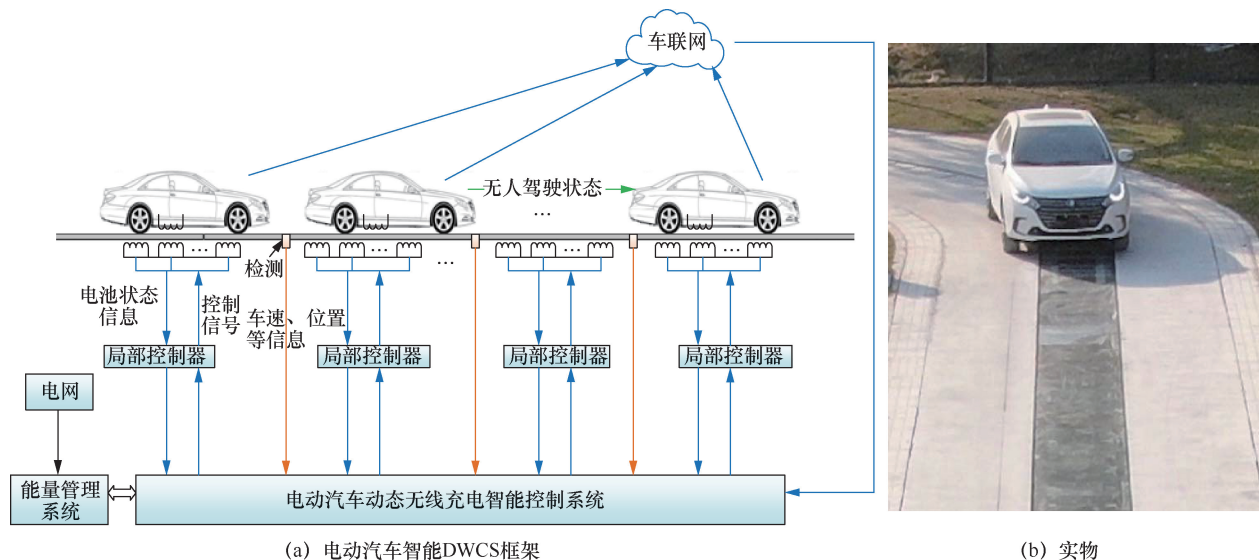


图 2 电动汽车智能 DWCS 框架与实物

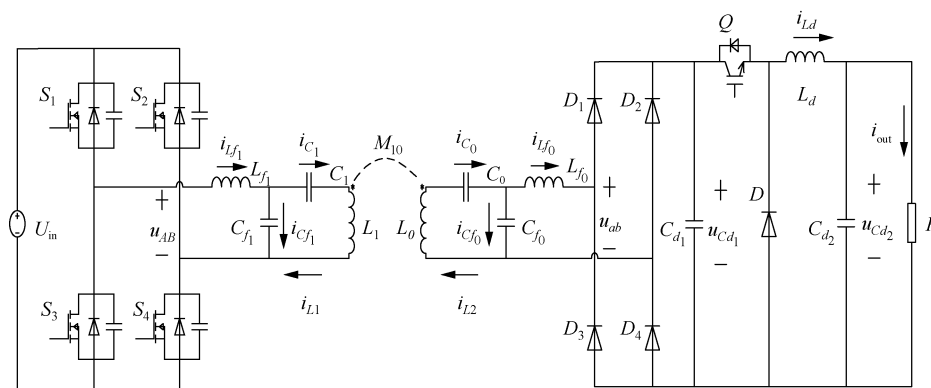


图3 DWCS 的电路和线圈的结构

来描述系统的动态特性^[19],分析了开关位置对系统动态特性的影响,并通过实验验证了模型和分析结果的有效性。为了稳定输出功率,有学者通过建立双发单收的数学模型,提出一种基于神经网络的控制算法,并进行了闭环性能分析^[20]。

由于多发单收的情况不同于静态下的单发单收, Kim D H 等人^[21]建立了多发单收的效率模型,并且优化了发射线圈的电流比例和有效负载以得到最大效率。Wang Z 等人^[22]构造了一个关于成本和效率的多目标优化问题,且带有接收机总长度和横向容差等约束,对 20 kW/20 kHz 的 DWCS 中不同配置的多相接收器进行了综合比较。

Hwang I 等人^[23]提出了一种优化设计电动汽车 DWCS 的模型和算法,特别针对多路径环境下的优化,通过建立一个通用的模型,优化分配每个路线上的功率并确定车载电池组的大小。Ko Y D 等人^[24]介绍了使用在线电动汽车的公交系统的设计问题,提出了一种数学模型和优化方法来更合理地分配功率发送器,并确定电动汽车的电池容量。为了捕捉车辆交通流的动态和电动汽车电池的充电状态, Ou C H 等人^[25]将电动汽车的移动性建模为一个基于交通信息系统统计数据的排队网络,针对电动汽车 DWCS 的需求,提出了一个经济调度问题,得到了各电力系统总线的节点边际价格。

需要解决的问题不同,建立的相关 DWCS 的模型也不同。如果单从 DWCS 的电气特征来分析,则建立的往往是小信号模型、状态空间模型或者效率模型,其中效率模型需要针对系统的各个部件建立精确的损耗模型;除了电学模型外,经济学模型也是电动汽车 DWCS 常用的模型。综上所述,电动汽车智能 DWCS 模型类别如图 4 所示。

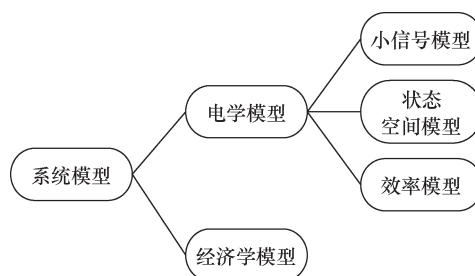


图4 电动汽车智能 DWCS 模型类别

此外,电动汽车动态无线充电系统与静态无线充电的最大区别在于: DWCS 的接收线圈在移动过程中与发射线圈会有相对位置的变化,导致互感系数也发生变化。因此,在系统的建模过程中,需要建立互感系数与相对位置的函数关系。笔者团队通过磁场分析,建立了动态无线充电系统的互感系数与相对位置的函数关系^[16]。线圈移动过程中自感和互感曲线、耦合系数的变化曲线分别如图 5 和图 6 所示。

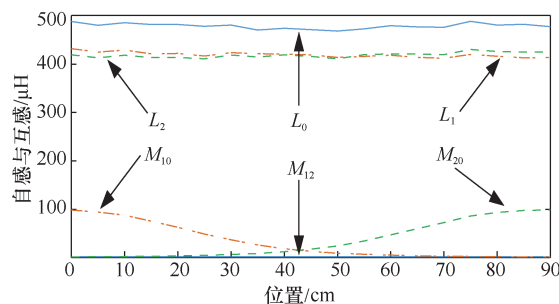


图5 线圈移动过程中自感和互感曲线

3.2 电动汽车定位

分析图 5 和图 6 可以发现,发射线圈和接收线圈的相对位置误差对动态无线充电系统的互感系数有很大的影响。为了提高系统的传输效率和能源的利用率,需要具有高精度和实时性好的电动汽车

定位技术。然而不同型号的汽车的底盘到地面的高度不同,充电过程中车速变化快、路况复杂,使得电动汽车的定位问题也成为无线动态充电系统迫切需要解决的关键问题之一。目前,对汽车的定位主要采用检测和估计的方式来实现。

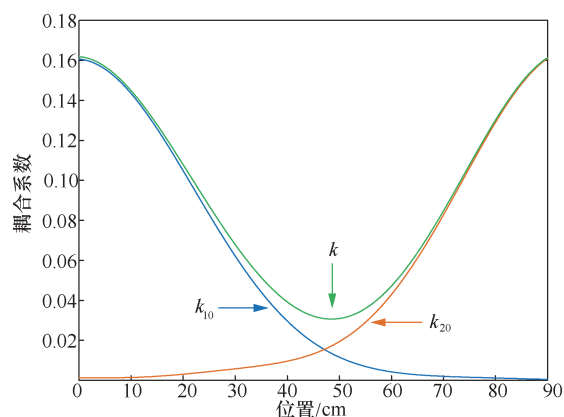


图6 耦合系数的变化曲线

奥克兰大学的 John Boys 课题组^[26]采用多个感应线圈进行电动汽车位置检测。华中科技大学赵锦波等人^[27]通过充分复用磁耦合主线圈,提出了一种主动激励探测电路的方法,进行接收线圈的主动探测。重庆大学孙跃等人^[28]提出在能量发射线圈之间安装检测装置,从而实现智能切换控制。哈尔滨工业大学宋凯等人^[29]通过一种三轴磁传感器测量行驶方向的磁场强度,实现次级绕组的实时精确定位,测量周期为 6 ms,分辨率为 5 mGs。Azad A N 等人^[30]提出了一种适用于 DWCS 的基于磁性原理的综合车辆检测系统,该检测系统集成了车辆检测机制、车辆横向偏差和车辆速度的测量等功能。浙江大学研究团队通过磁场传感器感应电动汽车上的能量接收线圈在移动过程中引起的磁场变化,通过错位放置磁场传感器来弥补时延,从而使能量接收线圈在电动汽车行驶到其正上方时开启。以上这些都是常用的检测方法。

还有一种估计的方法,它不需要通信和检测装置,如 Hasan N 等人^[31]根据发送线圈和接收线圈之间的偏离,计算相应的电压和功率变化,再根据检测到的电压和功率来估计接收端的位置; Lee T S 等人^[32]通过检测接收线圈所对应的 3 个发送线圈的电压变化来估计接收端的位置等。

除了上述传统的定位技术外,随着人工智能技术的发展,可以充分利用在无人驾驶领域发展起来的全球定位系统(GPS)、雷达定位、视觉定位和雷

达与视觉融合定位等感知方法来定位。GPS 的精度在 10 m 左右,显然不满足 DWCS 高精度定位的要求。Hata A Y 等人^[33]将特征检测方法与蒙特·卡罗定位方法结合来估计车辆的位置,该方法具有很好的误差精度。通过将地面图像与卫星地图进行匹配,一种利用不受季节变化影响的语义信息进行图像匹配的方法被提出^[34]。地图辅助类定位算法(即同步定位与建图)也是无人驾驶的一种智能定位方法,该方法基于概率与统计的原理对汽车的位置进行定位。目前,基于无人驾驶领域的感知方法与动态无线充电系统的电动汽车定位技术相结合的方法还比较少,可以作为未来的研究方向。

综上所述,电动汽车的定位技术可以分为传统的检测和估计技术以及目前的智能感知技术,如图 7 所示。从国内外的研究现状来看,电动汽车 DWCS 中的汽车定位技术仍是难点,现存的各种定位方法各有优劣,单一方法难以精确实时地定位电动汽车的位置,可能需要综合各种方法来实现,同时还要考虑成本。

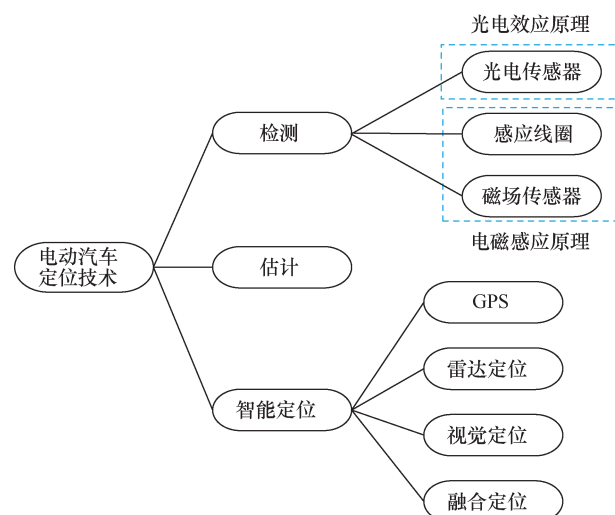


图7 电动汽车定位技术

3.3 DWCS 控制策略

动态无线充电与静态无线充电相比的最大区别在于:接收线圈在移动过程中,相对位置的变化导致发射线圈和接收线圈之间的互感系数发生了变化。为了保证 DWCS 输出电压(或者电流)的恒定,需要设计有效的控制器用于补偿由互感系数变化产生的输出电压(或者电流)的波动。电动汽车动态无线充电控制策略主要分为发射端控制、接收端控制和双端控制等。东京大学的研究者结合半有源整流电路和 DC-DC 变换器,在 DWCS 的接收端

进行控制,以达到控制功率和优化效率的目的^[17]。然而,半有源整流电路会影响 DWCS 的谐振网络,从而降低系统的可靠性。由于能量接收线圈和发射线圈会产生偏移,犹他州立大学通过对发射端的逆变器进行移相控制来调节系统功率^[35]。哈尔滨工业大学朱春波等人^[2]对国内外 DWCS 的控制技术进行了对比分析,指出了各种控制方法的优缺点。笔者团队也针对电动汽车在移动过程中耦合因子大范围快速变化的情况,提出了一种用于 DWCS 接收端 DC-DC 变换器的模型预测控制方法来保证系统的高效性与可靠性^[16],有效地提高了电动汽车 DWCS 的传输效率。

此外,发射线圈的摆放与 DWCS 的控制策略也有很大的关系^[36]。笔者团队通过磁耦合仿真分析,建立了 DC-DC 输入电压与发射线圈间隔的函数关系,如图 8 所示。当汽车上的接收线圈与发射线圈正对时,互感最大,当汽车行驶在发射线圈间时,互感系数下降至最低;随着发射线圈间距增大,互感系数下降幅度增大,并趋于稳定值。针对动态无线充电系统的 DC-DC 结构,笔者团队提出了混杂输出调节控制方法,实现了发射线圈在不同间隔下的系统的稳压控制^[36],如图 9 所示。

电动汽车 DWCS 的控制策略与系统的磁耦合结构、定位技术、系统工程设计等参数都有很大的关系,是从静态无线充电转向动态无线充电的关键技术。

3.4 DWCS 与电网的交互关系

电网为电动汽车 DWCS 的实际应用提供了能量的来源。然而,在实际的应用中,由于具有动态无线充电功能的道路上车流量大,车辆进出道路具有随机性, DWCS 的动态特性可能会由于负载需求的变化而对现有的电网设施造成巨大的压力和冲击。为了保证电网的稳定运行, Theodoropoulos T 等人^[37]通过引入光伏储能系统,减少了 DWCS 的负载变化对电网的影响,后来,他们也提出了智能能源管理策略来解决 DWCS 充电的多变性问题^[38]。Debnath S 等人^[39]利用电磁瞬态技术研究了 DWCS 对电网的影响,研究结果表明,通过将智能控制与储能或直流配电基础设施结合,可以有效保持电网的稳定运行。

为了保证能源的供给、电动汽车充电电量的精确计量和有效性, Danping Z 等人^[40]提出了一种由识别设备、充电软件和电能表等组成的计量充电系

统。在电网中,由交通流模式的变化引起的 DWCS 需求的变化会影响电价,而电价的变化会进一步影响电动汽车的充电策略和相关的交通流模式,一种利用分布式优化的方法解决了电网中的经济调度问题和交通网络中的交通分配问题^[41]。

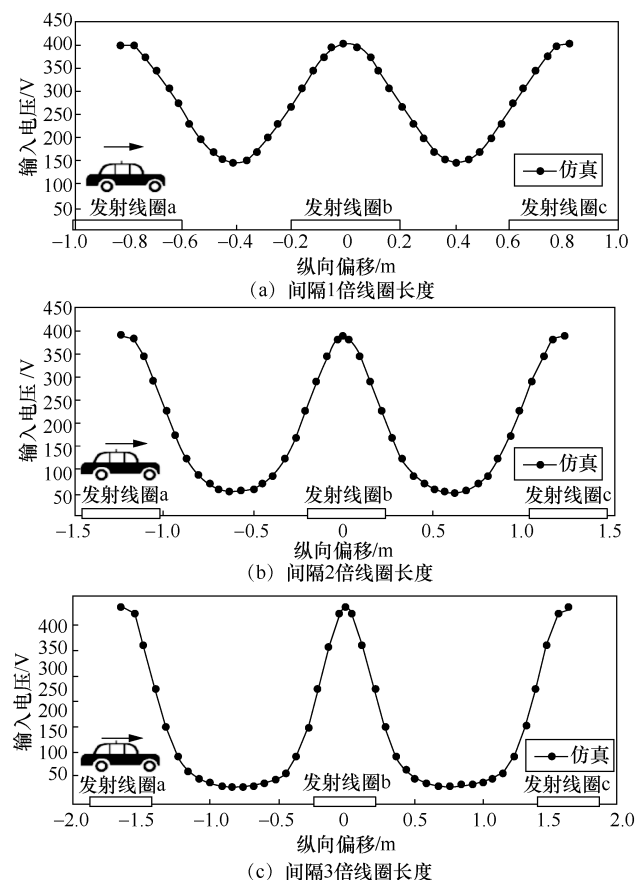


图8 DC-DC 输入电压与发射线圈间隔的数学关系

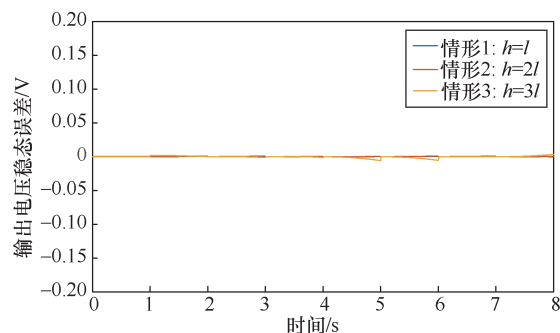


图9 发射线圈在不同间隔下混杂输出调节器的 DC-DC 稳压输出

此外,能源互联网的发展也为电动汽车 DWCS 带来了更多的优势。Chen H 等人^[42]研究了多能源条件下系统中移动充电站 (mobile charging station, MCS) 电源的管理问题。首先,考虑电力供应的随机性和电动汽车用户到达的动态性,建立了电力供

应的动态性框架和经济模型;然后,以 MCS 的长期平均利润最大化为目标,求解一个随机优化问题,从而确定电力管理的最优策略。Kobeissi A 等人^[43]提出了一种面向 DWCS 站点和设施的能源互联网边缘到云的解决方案,以支持计量和能源感知等服务。

4 电动汽车智能无线充电的展望

4.1 系统结构及优化

DWCS 的进一步发展离不开电力电子拓扑和磁耦合线圈结构的改进。由主线圈形成的松耦合变换器的耦合系数不高,而调谐网络则可以很好地弥补低耦合系数带来的影响,提高系统的能量转换效率。因此接下来的工作主要有以下 2 项:

- 研究具有抗偏移、高效率 and 充电特性优良等优点的电路拓扑结构;
- 研究具有长传输距离、高屏蔽效果和高生物安全性等优点的磁耦合线圈。

对于提高动态无线充电系统的性能,除了建立精确的系统模型外,设计具有鲁棒性和自适应性的智能控制算法尤为重要,主要工作如下:

- 研究发射线圈的间隔、发射线圈与接收线圈的偏移距离与系统模型之间的耦合关系,建立具有鲁棒性和自适应性的智能控制算法,提高系统的充电效率;
- 基于道路上车辆的多种信息,通过大数据和信息融合的技术,设计动态无线充电系统的智能优化调度策略,实现能源的合理优化分配。

4.2 电动汽车智能动态无线充电与无人驾驶技术融合

未来的交通系统必然会趋于智能化,而无人驾驶技术是智慧交通的核心组成部分,可以有效降低交通事故、缓解交通拥堵以及提高驾驶员舒适性等。无人驾驶包括环境感知、路径规划、定位导航和运动控制等相关技术^[44-45],这些技术可以很好地与动态无线充电相结合,主要包括以下内容。

- 研究精确的感知技术,能够有效地对发射线圈范围内的异物(生命体、金属等)进行检测,保证系统的安全性。
- 研究具有高精度和实时性强的汽车定位技术,为动态无线充电系统的高效率控制提供支持;在电动汽车无人驾驶的状态下,对电动汽车进行无线充电。

4.3 动态无线充电与电网、交通网的协同优化

随着智能电网和智能交通系统的快速发展^[46-49],采用动态无线充电技术实现公路的电气化将是必然趋势。然而,由于道路车流量变化大、路况复杂,DWCS 的接入必然会对电网和交通网带来巨大的冲击,因此需要研究的内容有:

- 研究电网-交通网-动态无线充电负载(充电的汽车)协同运行机理,基于边缘计算等技术,设计整个系统的智能优化运行策略;
- 综合电动汽车 DWCS、车联网、智能电网和交通网等信息,通过先进的计算、通信和控制技术,分析车对车(vehicle-to-vehicle, V2V)、车对网(vehicle-to-grid, V2G)、网对车(grid-to-vehicle, G2V)的影响,建立一个完备的智慧交通系统。

5 结束语

本文从电动汽车动态无线充电系统的磁耦合结构及系统建模、电动汽车定位、DWCS 的控制策略和 DWCS 与电网交互影响等方面,分析了电动汽车动态无线充电技术的研究现状,并结合目前无人驾驶、车联网和智能电网等相关技术,展望了电动汽车动态无线充电技术未来发展的重要方向。电动汽车动态无线充电技术的发展必将促进电动汽车的推广使用,为建设智慧交通和智慧城市奠定坚实的基础。

参考文献:

- [1] 高大威,王硕,杨福源.电动汽车无线充电技术的研究进展[J].汽车安全与节能学报,2015,6(4):314-327.
GAO D W, WANG S, YANG F Y. State-of-art of the wireless charging technologies for electric vehicles[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2015, 6(4): 314-327.
- [2] 朱春波,姜金海,宋凯,等.电动汽车动态无线充电关键技术研究进展[J].电力系统自动化,2017,41(2):60-65.
ZHU C B, JIANG J H, SONG K, et al. Research progress of key technologies for dynamic wireless charging of electric vehicle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(2): 60-65.
- [3] 刘超群,魏斌,吴晓康,等.电动汽车移动式无线充电技术工程化应用研究[J].电网技术,2019,43(6):2211-2218.
LIU C Q, WEI B, WU X K, et al. Engineering application of dynamic wireless charging technology for electric vehicles[J]. Power System Technology, 2019, 43(6): 2211-2218.
- [4] SHIN J, SHIN S, KIM Y, et al. Design and implementation of shaped magnetic-resonance-based wireless power transfer system for roadway-powered moving electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Industrial electronics, 2014, 61(3): 1179-1192.
- [5] PRASANTH V, BAUER P. Distributed IPT systems for dynamic

- powering: misalignment analysis[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(11): 6013-6021.
- [6] VAN DER PIJL F F A, CASTILLA M, BAUER P. Adaptive sliding-mode control for a multiple-user inductive power transfer system without need for communication[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(1): 271-279.
- [7] MILLER J M, ONAR O C, WHITE C, et al. Demonstrating dynamic wireless charging of an electric vehicle: the benefit of electrochemical capacitor smoothing[J]. IEEE Power Electronics Magazine, 2014, 1(1): 12-24.
- [8] 侯佳, 陈乾宏, 严开沁, 等. 新型 S/SP 补偿的非接触谐振变换器分析与控制[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(33): 2-8.
HOU J, CHEN Q H, YAN K Q, et al. Analysis and control of S/SP compensation contactless resonant converters[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2013, 33(33): 2-8.
- [9] VILLA J L, SALLAN J, SANZ OSORIO J F, et al. High-misalignment tolerant compensation topology for ICPT systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(2): 945-951.
- [10] 程鹏天, 王健强, 杜秀. 电动汽车感应耦合充电系统一种新型拓扑的研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 86-91.
CHENG P T, WANG J Q, DU X. Investigation of a novel topology for inductively coupled charging system in electric vehicles[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 86-91.
- [11] 赵锦波, 蔡涛, 段善旭, 等. 适用于分段式动态无线充电的 T 型抗偏移补偿拓扑[J]. 电工技术学报, 2017, 32(18): 36-43.
ZHAO J B, CAI T, DUAN S X, et al. A T-type high misalignment tolerant compensated topology for sectional track-based dynamic wireless power transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(18): 36-43.
- [12] 赵争鸣, 刘方, 陈凯楠. 电动汽车无线充电技术研究综述[J]. 电工技术学报, 2016, 31(20): 30-40.
ZHAO Z M, LIU F, CHEN K N. New progress of wireless charging technology for electric vehicles[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(20): 30-40.
- [13] BUDHIA M, COVIC G A, BOYS J T. Design and optimization of circular magnetic structures for lumped inductive power transfer systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(11): 3096-3108.
- [14] BUDHIA M, BOYS J T, COVIC G A, et al. Development of a single-sided flux magnetic coupler for electric vehicle IPT charging systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(1): 318-328.
- [15] ZAHEER A, HAO H, COVIC G A, et al. Investigation of multiple decoupled coil primary pad topologies in lumped IPT systems for interoperable electric vehicle charging[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(4): 1937-1955.
- [16] ZHOU Z, ZHANG L Y, LIU Z T, et al. Model predictive control for the receiving-side DC-DC converter of dynamic wireless power transfer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020.
- [17] HATA K, IMURA T, HORI Y. Dynamic wireless power transfer system for electric vehicles to simplify ground facilities-power control and efficiency maximization on the secondary side[C]// Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Piscataway: IEEE Press, 2016: 1731-1736.
- [18] GUO Y, WANG L, ZHU Q, et al. Switch-on modeling and analysis of dynamic wireless charging system used for electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 32(18): 36-43.
- [19] 郭彦杰, 王丽芳, 李树凡, 等. 电动汽车移动式无线充电系统动态建模与特性分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(2): 73-78.
- GUO Y J, WANG L F, LI S F, et al. Dynamic modeling and characteristic analysis on dynamic wireless charging system of electric vehicle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(2): 73-78.
- [20] 张强, 黄云霄, 牛天林, 等. 基于神经网络的电动汽车动态无线充电功率控制[J]. 汽车技术, 2017, 10: 1-5.
ZHANG Q, HUANG Y X, NIU T L, et al. Dynamic wireless charging power control of electric vehicle based on neural network[J]. Automobile Technology, 2017, 10: 1-5.
- [21] KIM D H, AHN D. Maximum efficiency point tracking for multiple-transmitters wireless power transfer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019.
- [22] WANG Z, CUI S, SONG B, et al. Comprehensive optimisation and comparison of multiphase receiver for dynamic wireless charging system[J]. IET Power Electronics, 2019, 12(10): 2475-2484.
- [23] HWANG I, JANG Y J, KO Y D, et al. System optimization for dynamic wireless charging electric vehicles operating in a multiple-route environment[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, 19(6): 1709-1726.
- [24] KO Y D, JANG Y J. The optimal system design of the online electric vehicle utilizing wireless power transmission technology[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2013, 14(3): 1255-1265.
- [25] OU C H, LIANG H, ZHUANG W. Investigating wireless charging and mobility of electric vehicles on electricity market[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 62(5): 3123-3133.
- [26] NAGENDRA G R, CHEN L, COVIC G A, et al. Detection of EVs on IPT highways[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2014, 2(3): 584-597.
- [27] 赵锦波, 蔡涛, 段善旭, 等. 适用于分段式动态无线充电的接力方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(16): 64-70.
ZHAO J B, CAI T, DUAN S X, et al. Relay control method for sectional track based dynamic wireless charging system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(16): 64-70.
- [28] 孙跃, 田勇, 苏玉刚, 等. 电动车在线供电系统高效配电方案[J]. 西南交通大学学报, 2013, 48(2): 236-242.
SUN Y, TIAN Y, SU Y G, et al. High efficiency power distribution scheme for online powered system of electric vehicles[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2013, 48(2): 236-242.
- [29] 宋凯, 朱春波, 李阳, 等. 用于电动汽车动态供电的多初级绕组并联无线电能传输技术[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(17): 4445-4453.
SONG K, ZHU C B, LI Y, et al. Wireless power transfer technology for electric vehicle dynamic charging using multi-parallel primary coils[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2015, 35(17): 4445-4453.
- [30] AZAD A N, ECHOLS A, KULYUKIN V A, et al. Analysis, optimization, and demonstration of a vehicular detection system intended for dynamic wireless charging applications[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2018, 5(1): 147-161.
- [31] HASAN N, WANG H, SAHA T, et al. A novel position sensorless power transfer control of lumped coil-based in-motion wireless power transfer systems[C]//2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Piscataway: IEEE Press, 2015: 586-593.
- [32] LEE T S, HUANG S J, TAI C C, et al. Design of wireless power transfer for dynamic power transmission with position-detection mechanism[C]// 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). Piscataway: IEEE Press, 2015: 976-981.
- [33] HATA A Y, WOLF D F. Feature detection for vehicle localization in

- urban environments using a multilayer LIDAR[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 17(2): 420-429.
- [34] VISWANATHAN A, PIRES B R, HUBER D. Vision-based robot localization across seasons and in remote locations[C]//2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Piscataway: IEEE Press, 2016: 4815-4821.
- [35] TAVAKOLI R, PANTIC Z. Analysis, design, and demonstration of a 25 KW dynamic wireless charging system for roadway electric vehicles[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2018, 6(3): 1378-1393.
- [36] ZHANG M T, MACONI L, LIU Z T, et al. Hybrid output regulation of DC-DC converter for dynamic wireless charging system[C]// The 21st IFAC World Congress. [S.l.:s.n.], 2020. (Accept).
- [37] THEODOROPOULOS T, AMDITIS A, SALLÁN J, et al. Impact of dynamic EV wireless charging on the grid[C]//2014 IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC). Piscataway: IEEE Press, 2014: 1-7.
- [38] THEODOROPOULOS T, DAMOUSIS Y, AMDITIS A, et al. Smart grid architectures for dynamic wireless EV charging[C]// Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MedPower 2016).[S.l.:s.n.], 2016.
- [39] DEBNATH S, FOOTE A, ONAR O C, et al. Grid impact studies from dynamic wireless charging in smart automated highways[C]//2018 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). Piscataway: IEEE Press, 2018: 950-955.
- [40] DANPING Z, YUCHUN C, YUHANG L, et al. Research on electric energy metering and charging system for dynamic wireless charging of electric vehicle[C]//2019 4th International Conference on Intelligent Transportation Engineering (ICITE). Piscataway: IEEE Press, 2019: 252-255.
- [41] MANSHADI S D, KHODAYAR M E, ABDELGHANY K, et al. Wireless charging of electric vehicles in electricity and transportation networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 9(5): 4503-4512.
- [42] CHEN H, SU Z, HUI Y, et al. Dynamic charging optimization for mobile charging stations in internet of things[J]. IEEE Access, 2018, 6: 53509-53520.
- [43] KOBEISSI A, BELLOTTI F, BERTA R, et al. Towards an IoT-enabled dynamic wireless charging metering service for electrical vehicles[C]// 2019 AEIT International Conference of Electrical and Electronic Technologies for Automotive (AEIT AUTOMOTIVE). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [44] 马飞跃, 王晓年. 无人驾驶汽车环境感知与导航定位技术应用综述[J]. 汽车电器, 2015(2): 1-5.
- MA F Y, WANG X N. Overview on environment perception and navigation and location technology applied on unmanned ground vehicle[J]. Auto Electric Parts, 2015(2): 1-5.
- [45] 兰京. 无人驾驶汽车发展现状及关键技术分析[J]. 内燃机与配件, 2019(15): 111.
- LAN J. Development status and key technology analysis of driverless vehicles[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2019(15): 111.
- [46] 吕思, 卫志农. 基于动态无线充电的电力-交通网协同优化运行研究综述与展望[J]. 全球能源互联网, 2019(5): 9.
- LYU S, WEI Z N. Coupling electricity and transportation networks to achieve dynamic wireless charging: review and prospects[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019(5): 9.
- [47] 吕宜生, 陈圆圆, 金峻臣, 等. 平行交通: 虚实互动的智能交通管理与控制[J]. 智能科学与技术学报, 2019, 1(1): 21-33.
- LYU Y S, CHEN Y Y, JIN J C, et al. Parallel transportation: virtual-real interaction for intelligent traffic management and control[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2019, 1(1): 21-33.
- [48] 宁滨. 平行轨道交通系统[J]. 智能科学与技术学报, 2019, 1(3): 215-218.
- NING B. Parallel rail transportation systems[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2019, 1(3): 215-218.
- [49] WEI W, MEI S, WU L, et al. Optimal traffic-power flow in urban electrified transportation networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 8(1): 84-95.

[作者简介]



苏宏业(1969—), 男, 博士, 浙江大学工业控制技术国家重点实验室主任, 主要研究方向为鲁棒控制、时滞系统和先进的过程控制理论与应用。



周泽(1994—), 男, 浙江大学工业控制技术国家重点实验室博士生, 主要研究方向为模型预测控制和无线电能传输系统。



刘之涛(1982—), 男, 博士, 浙江大学工业控制技术国家重点实验室副教授, 主要研究方向为鲁棒自适应控制、无线电能传输系统和能源管理系统。



张立炎(1971—), 男, 博士, 武汉理工大学自动化学院教授, 主要研究方向为新能源汽车建模与控制。