

电动汽车感应式无线电能传输技术研究综述

高警蔚¹, 张玉旺², 郭彦杰³, 薛 明³

(1. 石家庄铁路职业技术学院基础部, 河北 石家庄 050041;

2. 河北科技大学电气工程学院, 河北 石家庄 050018; 3. 河北工业大学电气工程学院, 天津 300401)

摘要: 便捷和安全的无线电能传输技术对推动电动汽车智能化发展具有重要作用。针对电动汽车无线充电应用场景, 对国内外感应式无线电能传输技术研究现状进行综述。首先, 介绍电动汽车无线电能传输系统结构, 并阐明其工作原理。其次, 从磁耦合机构、补偿网络和系统控制三个方面, 分析该技术当前的研究现状。最后, 讨论电动汽车无线电能传输技术亟待解决的关键问题和挑战, 并对其未来应用前景进行展望。

关键词: 电动汽车; 感应式无线电能传输; 磁耦合机构; 补偿网络; 系统控制

Review of inductive wireless power transfer technology for electric vehicles

GAO Jingwei¹, ZHANG Yuwang², GUO Yanjie³, XUE Ming³

(1. Department of Basic Courses, Shijiazhuang Institute of Railway Technology, Shijiazhuang 050041, China;

2. School of Electrical Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China;

3. School of Electrical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: The convenient and safe wireless power transfer technology plays an important role in promoting the intelligent development of electric vehicles(EV). In this paper, aimed to the application scenarios of EV wireless charging, the research of inductive wireless power transfer(WPT) technology is reviewed. Firstly, the structure of EV WPT system is introduced, and its working principle is clarified. Secondly, the research status and key problems of the technology are analyzed from three aspects: magnetic coupling mechanism, compensation network and system control. Finally, the technical challenges faced by EV WPT technology are discussed, and its future application prospects are prospected.

Keywords: electric vehicles; inductive wireless power transfer; magnetic coupling mechanism; compensation network; system control

0 引言

在国家“双碳”政策背景下, 电动汽车发展迅猛, 数量显著增加, 且逐渐朝着无人驾驶、智能化方向发展。传统的有线充电方式需要消费者进行电动汽车充电枪的插拔操作, 过程繁琐, 且在雨雪天气存在安全隐患, 在一定程度上限制了

电动汽车智能化程度。

感应式无线电能传输 (Inductive Wireless Power Transfer, IWPT) 技术具有可靠性与安全性更高、占地空间小、使用方式灵活及不易受外界环境因素干扰等优点, 可为许多应用场合 (如人体植入式医疗设备、无人机、高电压环境、水

国家自然科学基金资助项目 (52077153)

下探测和电动汽车等)的无线供电问题提供解决方案^[1-3]。尤其在电动汽车领域^[4], IWPT技术可有效解决充电方式不便捷的问题,实现电动汽车主动式充电。

目前,无线电能传输领域的科研机构 and 高校已对IWPT技术在电动汽车上的应用进行了研究,并取得了一定进展,但是在传输效率、稳定性与工程化落地等方面仍存在诸多挑战。本文聚焦电动汽车IWPT系统核心关键技术,从磁耦合机构设计、补偿网络拓扑与控制策略三个维度,对当前研究现状和问题进行综述。

1 电动汽车无线电能传输系统结构

电动汽车IWPT系统主要分为三部分:磁耦合机构、一次电路和二次电路。磁耦合机构包含发射线圈和接收线圈。一次电路主要由功率因数校正(Power Factor Correction, PFC)电路、高频逆变电路和一次补偿网络组成。二次电路主要由二次补偿网络和高频整流电路组成。一次电路和磁耦合机构的发射线圈安装于地上,二次电路和接收线圈安装于车上,具体结构如图1所示。

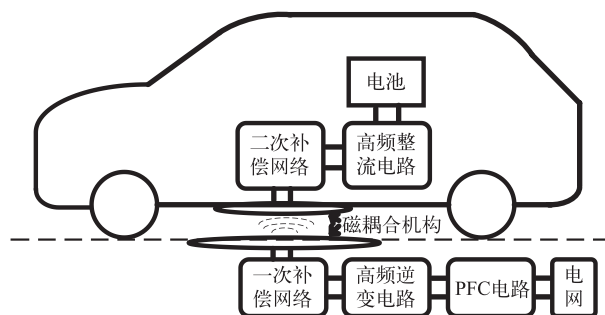


图1 电动汽车 IWPT 系统结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of EV IWPT system

由于电动汽车停车位置的不同,不可避免地引起磁耦合机构发射线圈与接收线圈之间的偏移,进而影响电池充电状态。为了便于对电池充电工况进行控制,根据需求可在二次侧高频整流电路后级增加充电控制电路。PFC电路的作用是将50 Hz的工频交流电转换为高压直流电。高频逆变电路将直流电转换成频率为几十千赫兹的高

频交流电。高频交流电通过一次补偿网络后,在发射线圈周围产生同频率的高频变化磁场。穿过接收线圈的高频磁场将在线圈中产生感应电流,如此,一次侧的电便能传输至二次侧。

由于接收线圈感应的交流电无法直接给电池充电,因此需要通过高频整流电路将交流电转换为直流电。一二次补偿网络主要用于提高IWPT系统的传输效率和能量传输能力。可以看出,磁耦合机构和补偿网络是实现能量高效无线传输的核心部分。

2 磁耦合机构

电动汽车IWPT系统的磁耦合机构通常为单平面结构,其中以单极性线圈最为常见,例如圆形、方形和矩形线圈^[5],如图2所示。平面圆形线圈绕制简单,在同样的线圈面积下,相较于方形和矩形线圈具有更高的耦合。然而,在实际应用中,圆形线圈周围存在不易利用的空间,导致对空间的利用率不高。

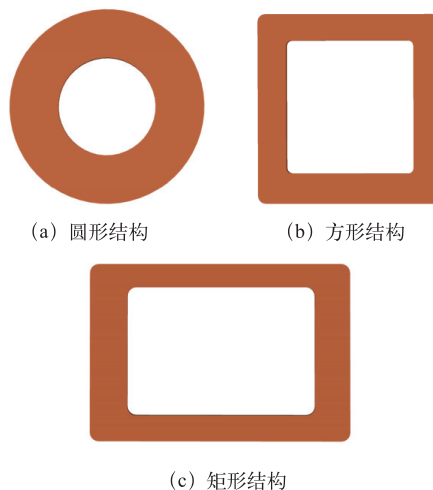


图2 单极性线圈结构图

Fig. 2 Structure of the unipolar coil

相较而言,方形线圈具有更好的空间利用率。对于边长与圆形线圈直径相等的方形线圈,其所围成的面积更大,因此具有更强的耦合程度^[6]。相较于圆形和方形线圈,矩形线圈在横向和纵向具有不同的偏移特性,可适用于在横向和纵向具有不同偏移距离要求的场合。与相同面积的方形线

圈相比,矩形线圈在无偏移时的互感耦合系数更小,但当发生偏移时,其互感耦合系数的下降较方形线圈小^[7]。

由于单极性线圈抗偏移能力有限,研究人员设计了采用多线圈组合的DD和DDQ双极性平面结构线圈,如图3所示。

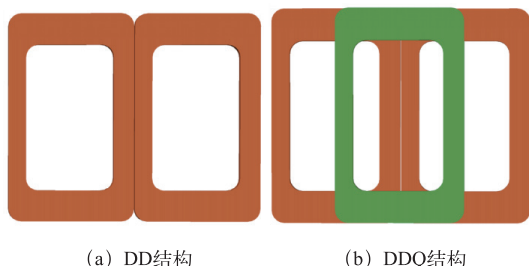


图3 双极性线圈结构图

Fig. 3 Structure of the bipolar coil

DD线圈在同一平面上采用两个线圈绕组实现了等效磁路的串联,使得磁耦合机构在X轴具有很强的抗偏移能力。但当X轴水平偏移距离达到线圈长度的34%时,DD线圈存在天然的耦合零点^[8]。而在DD线圈基础上,增加额外线圈构成的DDQ线圈可以消除该耦合零点^[9]。值得注意的是,虽然双极性平面结构线圈具有一定优势,但其结构较为复杂。在实际应用中可结合充电偏移距离、充电效率和线圈安装位置尺寸等指标选取磁耦合机构结构。

3 补偿网络结构

在IWPT系统中,为了实现能量的高效无线传输,需在一次侧和二次侧设计补偿网络,实现

无功补偿和阻抗变换。最简单且补偿元件最少的补偿方式为单电容补偿。根据一次侧和二次侧补偿电容与耦合线圈连接方式的不同,单电容补偿系统可以分为SS(串-串)、SP(串-并)、PS(并-串)和PP(并-并)四种补偿结构^[10],等效电路如图4所示。其中, V_1 为高频逆变电路输出电压基波; C_1 和 C_2 分别为一次侧和二次侧补偿电容; L_1 和 L_2 分别为磁耦合机构发射线圈和接收线圈自感; r_1 和 r_2 为线圈内阻; M 为 L_1 和 L_2 之间的互感; Z_{re} 为高频整流电路输入阻抗; Z_c 为二次侧回路阻抗。

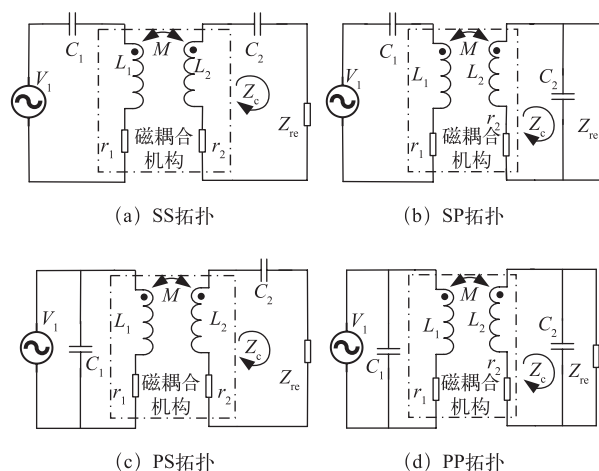


图4 采用单电容补偿拓扑的IWPT系统等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit of IWPT system with single capacitor compensation topology

在设计系统参数时,从输出特性的角度可以选取不同的补偿结构进行设计,实现系统的恒压或恒流输出。这四种单电容补偿拓扑可实现的系统输出特性见表1。其中, ω 为系统工作频率。

表1 单电容补偿系统输出特性

Tab. 1 Output characteristics of the system with single capacitor compensation

补偿拓扑类型	谐振条件	输出电压 U_o 或电流 I_o	输出特性
SS	$C_1 = \frac{1}{\omega^2 L_1}, C_2 = \frac{1}{\omega^2 L_2}$	$I_o = \frac{jV_1}{\omega M}$	恒流特性
SP	$C_1 = \frac{L_2}{\omega^2 L_1 L_2 - \omega^2 M^2}, C_2 = \frac{1}{\omega^2 L_2}$	$U_o = \frac{V_1 L_2}{M}$	恒压特性
PS	$C_1 = \frac{L_1 Z_{re}^2}{\omega^4 M^4 + \omega^2 Z_{re}^2}, C_2 = \frac{1}{\omega^2 L_2}$	负载较大时, $U_o = MV_1 / L_1$ 负载较小时, $I_o = jV_1 / \omega M$	负载较大呈恒压特性 负载较小呈恒流特性
PP	$C_1 = \frac{L_1 L_2^2 - M^2}{M^2 Z_{re} + \omega^2 (L_1 L_2 - M^2)^2}, C_2 = \frac{1}{\omega^2 L_2}$	负载较大时, $U_o = V_1 L_2 / M$ 负载较小时, $I_o = \frac{-jMV_1}{\omega L_1 L_2 - \omega M^2}$	负载较大呈恒压特性 负载较小呈恒流特性

文献[11]通过SS补偿拓扑实现了无线电能传输系统的恒流输出特性。文献[12]分析了利用SP补偿实现系统恒压输出的设计方法。这里的恒流或恒压输出特性仅指系统输出电压或电流,与负载无关,当线圈之间存在偏移或逆变器输出电压变化时,系统输出电压或电流仍将发生变化。

当考虑系统最大传输效率时,需要对二次回路阻抗的实部和虚部进行优化,使二次回路阻抗虚部为0,实部等于线圈最优负载^[13],即 $[(\omega M)^2 r_2 / (r_1 + r_2^2)]^{0.5}$ 。而上述单电容补偿网络往往无法同时满足这两个条件。串联型拓扑仅能对二次回路阻抗的虚部进行补偿,而不能改变实部的数值。并联型拓扑虽然可以同时二次回路阻抗的实部和虚部进行调节,但是由于并联型拓扑仅存在一个设计自由度,难以同时将二次回路阻抗的实部和虚部调整至最佳状态。

总的来说,当二次侧采用串联型电容补偿时,无法调节二次回路阻抗的实部,适合于充电等效负载与线圈最优负载相差不大的场合;并联型电容补偿可以在充电等效负载偏离线圈最优阻抗的情况下,将二次回路阻抗的实部匹配至最优阻抗,但是无法满足虚部为0的条件,此时系统无功较大。

考虑到单电容补偿拓扑的局限性,研究人员又提出了含有多个设计自由度的高阶补偿网络,如LC和LCC型^[14-16],如图5所示。其中, L 为串联补偿电感; C_p 为并联补偿电容; C_s 为串联补偿电容。

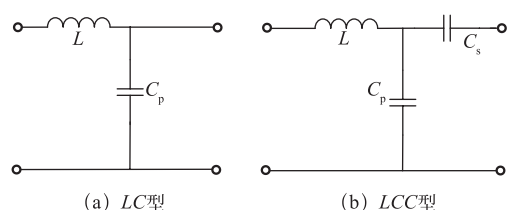


图5 高阶补偿网络拓扑

Fig. 5 High order compensation network topology

高阶补偿拓扑虽然在补偿元件个数上有所增加,但由于有多个设计自由度,使得电路参数的设计难度降低,具有如下明显的优势。

1) 二次侧采用高阶补偿网络可调节二次回

路阻抗,以满足最大传输效率点的条件。

2) 二次侧补偿电感可以抑制高频整流电路的非线性影响。

3) 由于高阶阻抗匹配电路中采用了串联和并联混合结构,当系统出现负载端短路或断路故障时,能够限制系统电流和电压的升高,具有一定的保护作用。

4) 可以同时实现高频逆变器的软开关、系统传输效率和输出功率等多个性能指标的同时优化。

在电动汽车IWPT系统应用场景中,可以综合考虑功率等级、充电工况等因素,选择合适的补偿网络进行系统设计。例如,在大功率应用场景下,多采用SS补偿网络,可以有效避免补偿电感发热问题。为了同时考虑软开关、输出功率优化问题,且避免负载轻载时输出电压过高或便于二次侧整流电路后级增加DC/DC变换器,可以选择具有恒压输出特性的LCC-S补偿拓扑结构。

4 系统控制

电动汽车停车位置和底盘高度的不同,将影响发射线圈与接收线圈的相对位置,进而导致互感参数发生变化。在充电过程中,电池电压将逐渐升高,随着恒流充电与恒压充电阶段的切换,系统等效负载(充电电压/充电电流)也将随之改变。上述参数的变化将影响系统软开关、输出功率和传输效率等特性。

为了实现系统高效输出和稳定充电,需要采用一些控制措施。目前的控制方式主要分为发射端控制、接收端控制以及发射与接收协同控制三种类型,见表2。

发射端控制需要通过接收端与发射端之间的无线通信^[17],或利用参数辨识技术获取控制对象信息^[18],如输出电压、电流等,进而通过发射端高频逆变电路移相角或工作频率实现控制。例如,文献[19]提出了一种基于参数辨识的WPT系统输出电流控制方法。通过采集发射端并联电容电压有效值和高频逆变电路直流母线电流值,对系统负载和输出电流进行估算,采用高频逆变电

表 2 IWPT 系统控制类型

Tab. 2 The control type of IWPT system

控制类型	必要条件	特点	实现方式
发射端控制	利用参数辨识技术估计互感、负载、输出电压或电流等参数	无须增加额外电路，控制准确度易受参数估计结果影响	控制高频逆变电路
接收端控制	二次侧采用可控整流或增加 DC/DC 变换控制电路	增加无线通信链路，控制响应速度与通信速率和误码率有关	控制二次侧变换电路
发射与接收协同控制	二次侧采用可控整流或增加 DC/DC 变换电路	增加额外电路，可以同时兼顾多个指标进行优化控制	高频逆变电路和二次侧控制电路同时参与控制

路移相控制，实现了系统恒流输出控制。这种基于参数估计结果的控制方法，存在控制准确度易受估计结果影响的问题。

接收端控制需要将高频整流电路设计为可控整流，或者在全桥不控整流电路与电池负载之间增加 DC/DC 变换电路^[20]，实现对充电工况的控制。这类控制方式在同一时刻只能针对单一性能指标（如输出功率、传输效率、输出电压或电流）进行控制。而发射端与接收端协同控制方式在电路拓扑结构上与接收端控制类似^[21]，但可以同时兼顾多个指标进行优化控制。文献[22]提出了一种在二次侧全桥不控整流电路后级增加 Buck-Boost 变换器的协同控制方法，在满足系统充电电流或电压的前提下，有效提高了系统的传输效率。文献[23]针对 SS 补偿的 WPT 系统，提出了一种双边协同控制策略，具体电路结构如图 6 所示。利用发射端高频逆变电路和接收端半控整流电路，实现了不同负载和互感下的恒定电压输出和最大效率跟踪。

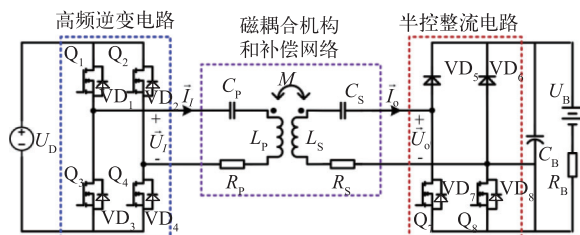


图 6 基于半控整流的双边协同控制电路拓扑

Fig. 6 Topology of bilateral cooperative control circuit based on semi-controlled rectifier

5 亟待解决的问题与挑战

尽管现有研究已取得诸多成果，但要实现大规模商业化应用仍面临如下关键问题。

1) 传输性能。传输效率与传输距离的矛盾仍然突出，实际应用中，在 20~25 cm 气隙下系统整体效率普遍低于 92%，距离增大或偏移距离增加 15 cm 时效率明显下降，同时系统在轻载条件下效率低下。此外，大功率传输时的热管理问题严峻，线圈温度较高，影响系统可靠性。

2) 电磁安全。感应式无线电能传输技术的机理决定了磁耦合机构将产生电磁辐射。尽管现有的研究认为，在正常充电情况下其辐射水平在安全范围内，但长期的影响还不确定。特别是对孕妇、儿童等敏感人群的影响，还需要更多的研究来评估。需要建立严格的电磁辐射标准和监测机制，开发有效的电磁屏蔽技术，确保电磁辐射在安全范围内。

3) 兼容性与通用性。不同品牌和型号的电动汽车，在电池管理系统、充电接口等方面存在差异。目前，无线电能传输技术还没有完全实现与各种车型的兼容。此外，在实际应用中，电动汽车可能需要在不同的环境下充电，如公共停车场、家庭车库等。无线充电设备需要与现有的充电基础设施（包括有线充电桩、电网等）进行协同工作，这是实现该技术广泛应用的关键。

6 结束语

电动汽车IWPT技术作为传统有线充电的重要补充,正在引领新能源汽车能源供给方式的革命性变革。该技术不仅解决了插拔式充电的机械磨损、安全隐患等问题,而且为实现自动驾驶车辆的完全自主充电提供了关键技术支撑。本文首先介绍了电动汽车感应式无线电能传输系统结构和原理,然后从磁耦合机构、补偿网络和系统控制三个方面进行了分析和总结,最后对亟待解决的关键问题和未来发展进行了探讨和展望。随着技术的不断成熟,IWPT有望成为智能交通基础设施的重要组成部分,对进一步推动电动汽车的普及和智能化发展起到重要作用。

参考文献

- [1] 刘耀,肖晋宇,赵小令,等.无线电能传输技术发展与应用综述[J].电工电能新技术,2023,42(2):48-67.
- [2] 程志远,张智超,睦清洋,等.基于无迹卡尔曼滤波水下WPT系统副边关键参数在线辨识[J].中国电机工程学报,2024,44(11):4470-4480.
- [3] 蔡春伟,姜龙云,陈轶,等.基于正交式磁结构及原边功率控制的无人机无线充电系统[J].电工技术学报,2021,36(17):3675-3684.
- [4] 王懿杰,陆凯兴,姚友素,等.具有强抗偏移性能的电动汽车用无线电能传输系统[J].中国电机工程学报,2019,39(13):3907-3916.
- [5] 刘言伟,卢闻州,董一帆,等.电动汽车无线充电用方形线圈仿真优化研究[J].电源学报,2020,18(2):180-190.
- [6] LUO Z, WEI X. Analysis of square and circular planar spiral coils in wireless power transfer system for electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(1): 331-341.
- [7] MOHAMMAD M, CHOI S, ISLAM M Z, et al. Core design and optimization for better misalignment tolerance and higher range of wireless charging of PHEV[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2017, 3(2): 445-453.
- [8] BIMA M E, BHATTACHARYA I, VAN N C W. Experimental evaluation of layered DD coil structure in a wireless power transfer system[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2020, 62(4): 1477-1484.
- [9] 庄廷伟,姚友素,袁悦,等.基于DDQ/DD耦合机构的强抗偏移电动汽车用无线充电系统[J].中国电机工程学报,2022,42(15):5675-5685.
- [10] 陆江华.无线电能传输系统中补偿网络的级联等效方法研究[D].武汉:武汉理工大学,2020.
- [11] WANG X, XU J, MAO M, et al. An LCL-based SS compensated WPT converter with wide ZVS range and integrated coil structure[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(6): 4882-4893.
- [12] YANG L, REN L, SHI Y, et al. Analysis and design of an S/S/P-compensated three-coil structure WPT system with constant current and constant voltage output[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2023, 11(3): 2487-2500.
- [13] 张玉旺,王丽芳,郭彦杰.无线能量传输系统移相控制ZVS设计研究[J].电力电子技术,2019,53(5):97-100.
- [14] JIA Y, ZHAO L, WANG Z, et al. Integrated LCC-LCC topology for WPT system with CC output regarding air gap and load variations[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(10): 11904-11915.
- [15] FU N, DENG J, WANG Z, et al. A hybrid mode control strategy for LCC-LCC compensated WPT system with wide ZVS operation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(2): 2449-2460.
- [16] 徐紫薇,李晓明,杨林,等.基于S-LCL补偿的磁场感应式电能传输系统研究[J].电测与仪表,2022,59(9):39-46.
- [17] DAI X, JIANG J, XU Z, et al. Cooperative

- control for multi-excitation units WPT system with multiple coupling parameter identification and area adaptation[J]. IEEE Access, 2020(8): 38728-38741.
- [18] GUO Y, ZHANG Y, LI S, et al. Load parameter joint identification of wireless power transfer system based on the DC input current and phase-shift angle[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(10): 10542-10553.
- [19] 王旭, 郭彦杰, 王瑞民, 等. 无线电能传输系统恒流输出控制方法研究[J]. 电力电子技术, 2024, 58(6): 99-101, 140.
- [20] 逢海萍, 邱毅, 陈浩然. 基于最优负载匹配WPT系统的最大效率跟踪[J]. 电源学报, 2021, 19(2): 153-159.
- [21] 赵进国, 赵晋斌, 张俊伟, 等. 无线电能传输系统中源阻抗匹配网络断续电流模式最大效率跟踪研究[J]. 电工技术学报, 2022, 37(1): 24-35.
- [22] 黄文聪, 饶天彪, 蒋煊焱, 等. 无线电能传输系统最大效率追踪及恒压输出复合控制方法[J]. 电工技术学报, 2024, 39(12): 3589-3601, 3615.
- [23] YANG L, SHI Y, WANG M, et al. Constant voltage charging and maximum efficiency tracking for WPT systems employing dual-side control scheme[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(1): 945-955.

作者简介

高警蔚（1989—），女，博士，讲师，研究方向为数理模型建模与分析、无线充电技术研究。

（收稿日期：2025-02-27）