第 52 卷 第 4 期：1825-1837　　高电压技术　　Vol.52, No.4: 1825-1837
2026 年 4 月 30 日　　High Voltage Engineering　　April 30, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20251347

高压碳化硅器件无线取能型隔离电源的绝缘特性

姜　怡[1]，潘建宇[1]，唐海博[1]，雷　宏[1]，杜　林[1]，杨曼琳[1,2]
（1. 输变电装备技术全国重点实验室(重庆大学)，重庆 400044;
2. 集成电路与微系统全国重点实验室，重庆 400000）

摘　要：隔离取能电源为高压碳化硅(silicon carbide，SiC)器件驱动电路供能的核心部分，其面临严峻的绝缘耐压问题。无线传输(wireless power transfer，WPT)型隔离电源因其非接触和去磁芯特性在 SiC 器件高压强绝缘取能电源展现出良好应用前景。然而，现有 WPT 隔离电源的绝缘特性不清，耐压能力难以准确评价，严重制约了其性能优化和应用。为此首先搭建了 WPT 型取能结构三维仿真模型，阐明了取能线圈相对距离、匝数、线径这 3 个关键参数对电场分布和最大场强的影响规律；然后构建了高压放电试验平台，从局部放电起始电压、最大放电量、放电脉冲数和总放电量这 4 个特征量探究了关键结构参量和绝缘放电特性的关联关系，明晰了不同结构参数下的 WPT 型电源绝缘特性；最终阐明了各结构参数对 WPT 型取能结构绝缘性能的影响机制。该研究为 WPT 型隔离取能电源绝缘性能优化与可靠性应用提供了理论基础与试验依据。

关键词：隔离电源；无线传能；绝缘特性；有限元仿真；高压测试

Insulation Characteristics of Wireless Power Transfer Isolated Power Supply for High-voltage Silicon Carbide Devices

JIANG Yi[1], PAN Jianyu[1], TANG Haibo[1], LEI Hong[1], DU Lin[1], YANG Manlin[1,2]
(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment Technology(Chongqing University), Chongqing 400044, China;
2. State Key Laboratory of Integrated Circuits and Microsystems, Chongqing 400000, China)

Abstract：Isolated power supply serves as the core component which supplies energy to drive circuits of a high-voltage silicon carbide (SiC) device , facing severe challenges in terms of electrical insulation and voltage endurance. Wireless power transfer (WPT)-based isolated power supplies, characterized by their non-contact operation and coreless design, show significant promise for high-voltage and high-insulation applications in SiC devices. However, the insulation properties of existing WPT isolated power supplies remain unclear, and it is difficult to accurately evaluate their voltage endurance capability, which severely restricts performance optimization and practical application. Therefore, a three-dimensional simulation model of the WPT isolated power supply was established, and the influences of three key parameters, namely, the relative distance, the wire diameter, and the number of turns of the coils, on the electric field distribution and maximum field strength were elucidated. Subsequently, a high-voltage discharge experimental platform was constructed to investigate the relationship between key structural parameters and insulation discharge characteristics based on following four indicators: the partial discharge inception voltage, the maximum discharge magnitude, the number of discharge pulses, and the total discharge quantity. The insulation properties of the WPT based power supply under various structural parameters were clarified. Finally, the influence mechanisms of each structural parameter on the insulation performance of WPT based isolated power supplies were elucidated. This research offers a theoretical foundation and experimental support for the optimization of insulation performance and reliable application of WPT based isolated power supplies.

Key words：isolated power supply; wireless power transfer; insulation characteristics; finite element simulation; high-voltage testing

基金资助项目：重庆市技术创新与应用发展专项重大项目(CSTB2024TIAD-STX0024)；重庆市高等教育教学改革研究一般项目(233065)。
Project supported by Major Project of Chongqing Technical Innovation and Application Development Program (CSTB2024TIAD-STX0024), Chongqing Municipal Higher Education Teaching Reform Research General Project (233065).

0 引言

高压碳化硅(silicon carbide，SiC)功率器件因其高电压等级、快开关速度等特性，在新能源并网、船舶电气化等新兴场景中展现出极高应用前景[1-3]。目前，科研院所与半导体企业已研发出电压等级 10 kV 和 15 kV 级 SiC 器件。尽管高压碳化硅器件的应用能够显著提升电力电子装备的功率密度、效率等，但也带来了一系列新的技术挑战。隔离取能电源是为高压 SiC 器件栅极驱动供能并实现主功率强电侧与控制弱电侧电气隔离的重要部件，实际运行过程中，隔离电源两端耐受电压将高达近 10 kV 乃至几十千伏，这对取能电源的绝缘设计提出了严苛挑战[4-5]。

现有商业隔离电源主要针对高压 Si 基器件设计和应用，在高压 SiC 系统应用中面临着多重局限[6-8]。其中最重要的一点就是，现有商业隔离电源绝缘耐压等级不足，且实际工况电压等级低，极易发生局部放电，长期运行会严重影响系统可靠性，最终导致击穿，甚至引发器件烧坏等事故。因此，亟须探索针对高压 SiC 器件的新型高压、高可靠性的隔离电源解决方案。

目前，隔离电源结构主要可分为 4 种类型——光纤传能型(power over fiber-based，PoF)、变压器型(简称 TV)、电流互感器型(简称 TA)和无线传能型(wireless power transformer，WPT)。PoF 型[9]电源通过光纤实现能量传输，能实现极高的电气隔离，同时理论上消除了原副边耦合电容，适用于高压、高干扰环境，但其能量转换效率较低，发射端体积庞大、成本高，限制了其工程应用。TV 型[10-11]取能是目前最为常见的结构，通过磁芯一、二次侧绕组耦合实现能量传输，设计和控制方法简单，但是随着隔离电压的上升，装置体积会迅速增大，且寄生参量较大。TA 型[12-14]电源通过 1 根高频原边母线并联多个二次侧，实现多通道输出，具有高集成度的特点，但存在一、二次侧耦合弱，电气隔离距离近的问题。WPT 型[15-16]取能通过发射线圈和接收线圈的高频谐振耦合实现能量传递，其结构不需要磁芯，具有非接触式传能和灵活调节隔离距离的优势，在强绝缘耐压能力上具有极高的应用前景。

现有针对 WPT 型隔离电源的研究主要集中在电力隔离传输性能的优化设计，包括传能拓扑电路优化、传能效率提升以及功率-信号协同传输等方面，在绝缘特性上的研究较为缺失。其中，德克萨斯大学达拉斯分校的 Van Thuan Nguyen 等人专注于电路优化和效率提升，团队于 2019 年提出单发射—单接收结构的紧凑型无线隔离栅极驱动电源[17]；2020 年在此基础上升级为单发射—双接收的印制电路板(printed circuit board，PCB)双输出拓扑[18]；2021 年聚焦于为 10 kV SiC 器件研发高频无线隔离栅极驱动电源[19]，通过非重叠线圈与接地屏蔽实现极低耦合电容和紧凑封装；2022 年提出双侧 LCC 拓扑的线圈间效率优化方法[20]。通用电气的 Juan Sabate 等人专注于器件整体设计，团队于 2018 年提出一种用于高压 dv/dt SiC MOSFET 的门极驱动电源[21]；在 2022 年进一步对比了 2 种空芯变压器方案[22]，在保证低耦合电容的同时实现更小体积与更高可制造性。阿肯色大学的 Yuqi Wei 等人于 2021 年提出一种基于 WPT 的门极驱动电源[23]；在 2022 年进一步完成该方案的优化与试验验证[24]，采用堆叠式 WPT 结构并集成两级门极驱动与过流保护。佛罗里达州立大学的 Hui Li 等人在 2022 年提出了“信号-功率一体化”设计[25]，在 5 kV 直流母线电压的工况下验证了所提方法的有效性。大阪大学的 Masaaki Takasaki 等人在 2022 年提出了针对栅极电源供电系统的电路设计优化方法[26]，提出了 2 种补偿电路配置并分别采用不同的补偿电容器配置以提升功率传输效率。

绝缘性能方面，相关学者提出了部分绝缘优化设计研究。2020 年，弗吉尼亚理工大学的 Dushan Boroyevich 团队采用对称盘绕利兹线圈和铁氧体同电位屏蔽，可以做到在空气隙为 34 mm 时实现 33 kV 无局放[27]，但主要针对有无出现放电电压进行。2021 年，挪威科技大学的 Ole Christian Spro 等人针对无磁芯平面 PCB 变压器，提出“三明治”式复合绝缘[28]：绕组蚀刻在多层聚四氟乙烯 PCB 板内形成固体绝缘屏障，板间注入绝缘油防闪络，最后在 PCB 外圈铜箔尖角处再涂 1 层高介电常数环氧涂层均压实现固体-液体-涂层三重耐压。试验表明 6 mm 聚四氟乙烯厚度下平均击穿电压达 73 kV，耦合电容控制在 10 pF 以内，验证了介质填充对绝缘性能优化的有效性，但同时也带来了寄生电容高的问题。2024 年，佛罗里达州立大学的 Hui Li 团队采用 PCB 绕组方案，多层板采用聚四氟乙烯材料，最后采用硅胶灌封整机以增强绝缘[29]。最终整体装置实现了 1.9 pF 的超低耦合电容，变压器实现了

14.37 kV 下的无局部放电，但未测量其他局部放电特性。

综上，现有研究主要对 WPT 传能结构单一击穿电压或者局部放电起始电压(partial discharge inception voltage，PDIV)进行研究，以用于评价所研装置能否通过绝缘测试。然而，WPT 关键结构参量与绝缘性能的关联规律未知，隔离电压提升对 WPT 放电影响特性不清，极大地限制了 WPT 取能电源的绝缘性能优化提升，使其难以在高压 SiC 器件和装备中得到可靠应用。

因此，本文以 WPT 型电源隔离线圈结构为研究对象，探讨其隔离距离、线圈匝数、单匝线径 3 个核心参量对其电场分布的关联规律；其次，构建 WPT 型传能线圈高压放电试验平台，通过 PDIV、最大放电量、放电脉冲数、总放电量这 4 个特征量阐明不同结构参量下的放电形成特性，最终综合分析得到相应的影响成因机制。

1　WPT 隔离取能装置及有限元仿真建模

1.1　WPT 隔离取能装置工作原理

WPT 隔离取能装置工作原理如图 1 所示，主要部件为直流输入电源 DC 端、高频逆变电路、一次侧谐振补偿电路、发射端线圈(Tx 线圈)、接收端线圈(Rx 线圈)、二次侧谐振补偿电路、整流滤波电路以及负载。该装置的工作原理是直流输入电源 DC 端输入低压直流电(图中电压表示为 U)，经过高频逆变电路转换为高频交流电。随后，高频交流进入一次侧谐振补偿网络，该网络在设定频率形成 LC 谐振，实现无功补偿等功能；谐振后的高频电流激励发射线圈产生交变磁场。接收线圈耦合该磁场并感应高频电压，经二次侧补偿网络后经整流滤波电路输出直流电压，实现给负载稳定供能。其中，一次侧电路直接接地(图中用 GND1 表示)；二次侧电路给负载驱动电路供电，接地取决于负载驱动电路电位情况(图中用 GND2 表示)。

其中，线圈不仅是能量耦合的核心部件，其结构设计更直接决定了绝缘特性的优劣。在高频交变磁场作用下，线圈的匝间、层间及对地绝缘承受着严苛的电场应力，而结构因素如绕组匝数、绕线粗细以及线圈之间的相对位置等因素都会显著影响 WPT 结构电场分布。因此，本文对于 WPT 装置绝缘特性的研究主要关注于线圈结构的绝缘特性研究。

1.2　WPT 结构关键结构参数与有限元仿真建模

本节建立了 WPT 结构基准模型。WPT 取能装置的结构参数如图 2 所示，决定线圈尺寸的主要参数有：线圈匝数 n、线圈内半径 R_i、线圈外半径 R_o、单匝绕组截面半径 r 和线圈间的隔离距离 h。由于线圈匝数 n、线圈内半径 R_i 与线圈外半径 R_o 和单匝绕组截面半径 r 这 4 个参数是相互影响的。因此，本文固定线圈内半径 R_i，选择研究对象为单匝绕组截面半径 r 和线圈匝数 n 以及线圈间的隔离距离 h。

基于现有文献的线圈参数[19,23,30-31]，所设计的基准模型具体参数如表 1 所示，发射线圈和接收线圈选择完全一致的线圈参数以充分利用空间，保证系统的对称性，简化系统设计[32]。基于此表格参数建立了线圈的基准仿真模型。

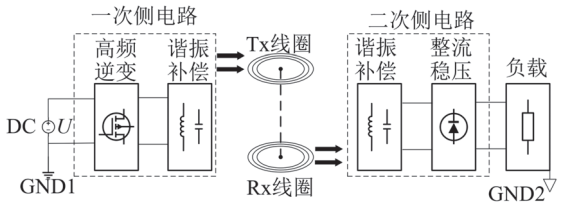


图 1　WPT 隔离取能装置原理图

Fig.1　Schematic diagram of WPT isolated power transfer device

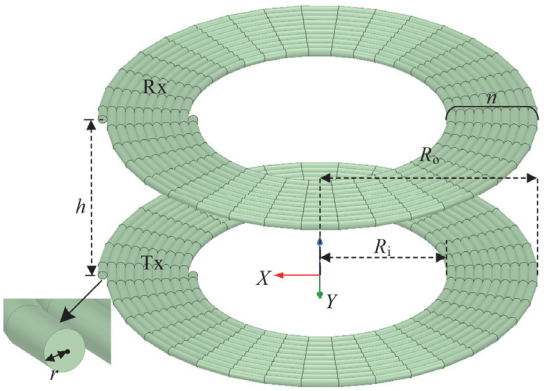


图 2　线圈主要结构参数示意图

Fig.2　Schematic diagram of the main structural parameters of the coils

表 1　有限元模型仿真参数值

Table 1　Simulation parameters of the FEM model

模型参数	数值
线圈匝数 n	10
线圈内半径 R_i/mm	14
线圈外半径 R_o/mm	24
线圈截面半径 r/mm	0.5
隔离距离 h/mm	20

2 WPT 关键结构参量电场特性分析

本章系统研究了在空气介质条件下基准模型的电场分布情况以及场强最大点的位置，然后探究了隔离距离 h、线圈匝数 n 和线圈截面半径 r 这 3 个关键参数对 WPT 型隔离取能装置电场分布的影响规律。

在建立基准模型并完成仿真参数设置后，对该模型进行了静电场仿真分析，设定 Rx 线圈为高压端，Tx 线圈为低压端。仿真计算完成后，获得了 WPT 型隔离取能装置的静电场分布图。图 3 展示了基准模型在 *XOZ* 平面(前视图)、*YOZ* 平面(侧视图)和 *XOY* 平面(俯视图)的静电场分布，这 3 个正交投影视图完整呈现了模型在三维空间中的电场分布特征。通过对 WPT 型隔离取能装置静电场分布图的观察可以看出，线圈外侧电场强度相较于内侧更大，且电场强度最大值(即图中标注 E_{max} 区域位置)出现线圈外围上。如图所示，Rx 线圈和 Tx 线圈附近的电场分布较为相似，最大场强点出现在 Rx 线圈或者 Tx 线圈的最外围。

图 4 展示了不同隔离距离下 WPT 型隔离取能装置的电场分布对比图。从图 4 中可以清晰地看出，随着线圈隔离距离的增加，高压电场区域显著减少，且等电场线分布逐渐稀疏。图 5 揭示了隔离距离对 WPT 型装置最大电场强度 E_{max} 的影响规律。仿真结果表明，随着隔离距离的增加，外线圈和内线圈的 E_{max} 都先迅速减小后逐渐变缓，两者变化趋势完全一致。隔离距离从 20 mm 提升到 30 mm 时，E_{max} 在 20 mm 所对应的外径最大场强的基础上减小了约 16%。当隔离距离增加到 100 mm 时，最大场强达到最小值，约为 22 kV/cm。

通过仿真结果可以发现，增加隔离距离是增强 WPT 型取能结构绝缘性能最直接且效果极其显著的方式，但是隔离距离过大会导致装置体积显著增大且降低线圈两端耦合系数和电路传能效率。

图 6 展示了不同线圈匝数下 WPT 型隔离取能装置的电场分布对比图。从图 6 中可以观察到，随着线圈匝数的增加，电场分布的集中区域颜色逐渐发生变化，等电场线的密集程度也随之改变，这表明电场强度的分布特征受到线圈匝数的直接影响。图 7 揭示了线圈匝数对 WPT 型隔离取能装置最大电场强度 E_{max} 的影响规律。仿真结果表明，随着线圈匝数的增加，E_{max} 呈现出先减小后逐渐趋于平稳

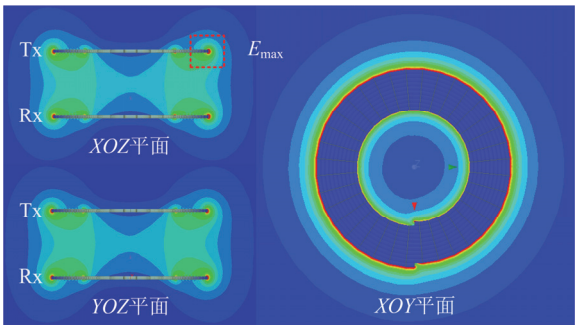


图 3 不同视角下 WPT 型装置的静电场分布图

Fig.3 Static field distribution of WPT device at different viewing angles

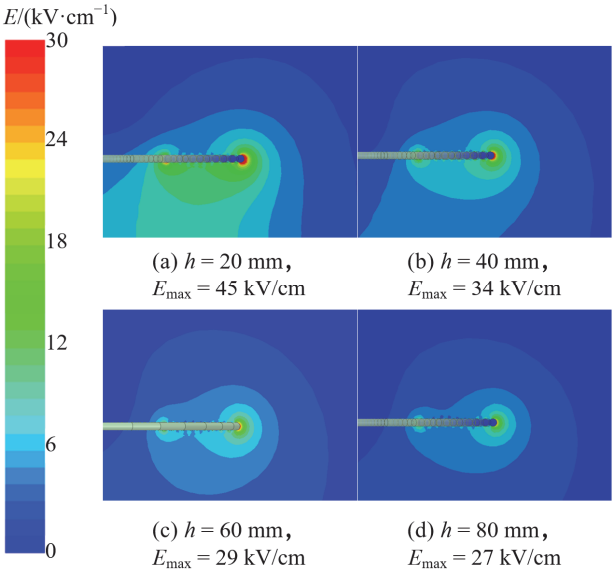


图 4 不同隔离距离下 WPT 型装置电场分布

Fig.4 Electric field distribution of WPT device under different isolation distances

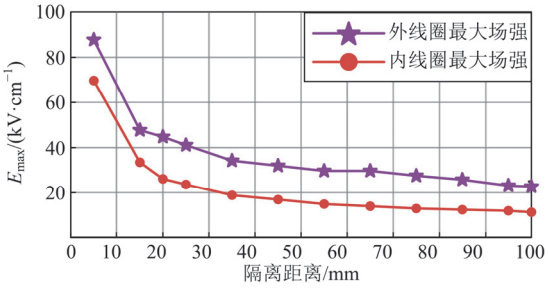


图 5 隔离距离对 WPT 型装置 E_{max} 的影响规律

Fig.5 Impact of isolation distance on E_{max} of WPT device

的变化规律，匝数从 8 匝增加到 10 匝时，E_{max} 在 8 匝所对应的外径最大场强的基础上减小了约 34%。这表明线圈匝数不仅影响电场分布的情况，还对电场强度的峰值产生重要影响。

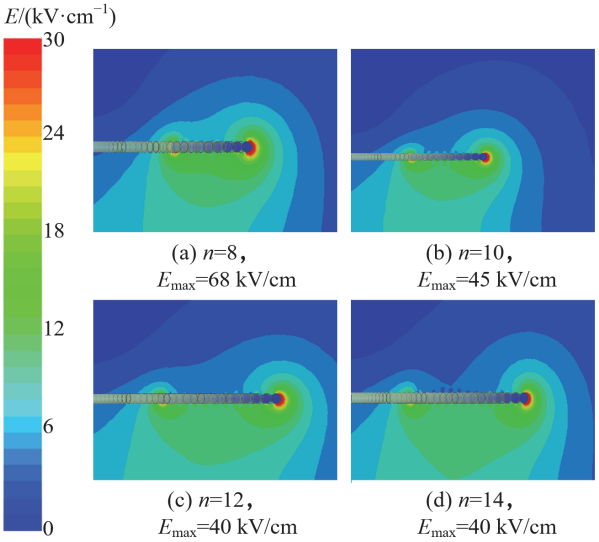


图 6　不同线圈匝数下 WPT 型装置电场分布

Fig.6　Electric field distribution of WPT device under different coil turns

通过仿真结果可以发现，增加线圈匝数会减小 E_{max}，且使电场分布更均匀，内外线圈的最大场强差距逐渐减小。这是因为在仿真过程中施加的电压恒定，增大线圈匝数会使单位匝间电压降低，且匝数增加后，导体密度提高，电场分布趋于均匀，避免局部集中，从而降低最大电场强度。但是在不改变匝间距离和线圈内径的情况下，增加线圈匝数也会增大装置体积，不利于装置的高集成度设计。

图 8 展示了不同线圈截面半径下 WPT 型隔离取能装置电场分布的对比情况。从图 8 中可以看出，随着线圈截面半径的增大，高场强区域明显减少，这表明增大线圈截面半径对电场分布的均匀性、域内最大场强等有着显著的影响。图 9 揭示了线圈截面半径对 WPT 型隔离取能装置电场最大值 E_{max} 的影响规律。仿真结果表明，随着线圈截面半径的增加，E_{max} 呈现出先减小后逐渐趋于平稳的变化规律，线圈截面半径从 0.5 mm 增加到 2 mm 时，E_{max} 在 0.5 mm 所对应的外径最大场强的基础上减小了约 16%。当线圈截面半径增加到 3 mm 时，最大场强达到最小值，约为 33 kV/cm。

通过仿真结果可以发现，增加线圈截面半径会减小 E_{max}，且电场分布更均匀。这是因为电场强度在导体表面附近最大，其值与导体表面的电荷密度成正比。增加导线半径会使曲率半径变大，从而降低电荷密度，最终达到减小表面电场强度的目的，但是过度增加线圈截面半径反而不能起到很好的改善作用。即截面半径从 0.5 mm 增加到 1 mm 时，电场强度有大幅下降，而接着增大截面半径，电场强度则几乎保持不变。

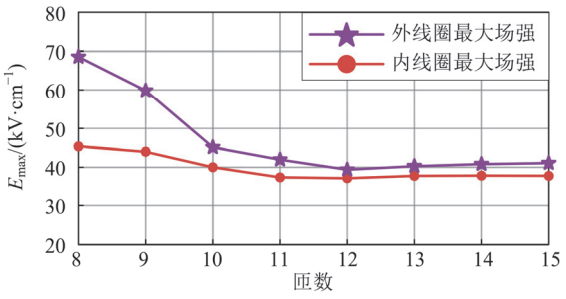


图 7　线圈匝数对 WPT 型装置 E_{max} 的影响规律

Fig.7　Impact of coil turns on E_{max} of WPT device

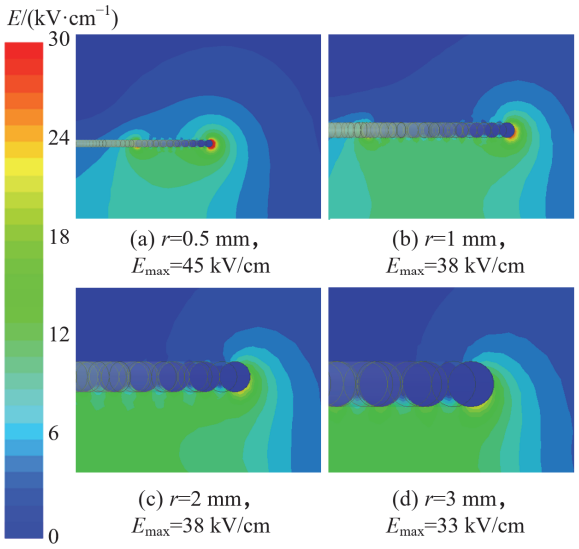


图 8　不同线圈截面半径下 WPT 型装置电场分布

Fig.8　Electric field distribution of WPT device under different coil cross-section radii

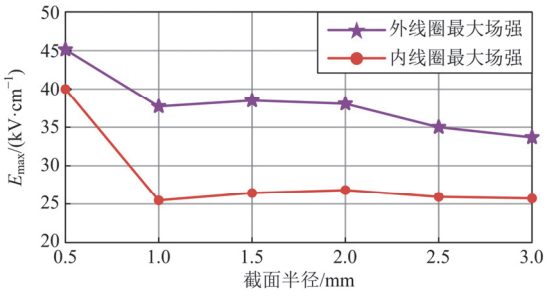


图 9　线圈截面半径对 WPT 型装置 E_{max} 的影响规律

Fig.9　Impact of coil cross-section radii on E_{max} of WPT device

3　WPT 取能电源放电测试试验研究

本文通过搭建 WPT 取能电源线圈结构的放电

测试试验平台和建立相应的实物模型，通过试验研究探究其放电特性。

3.1 放电测试平台和测试样本构建

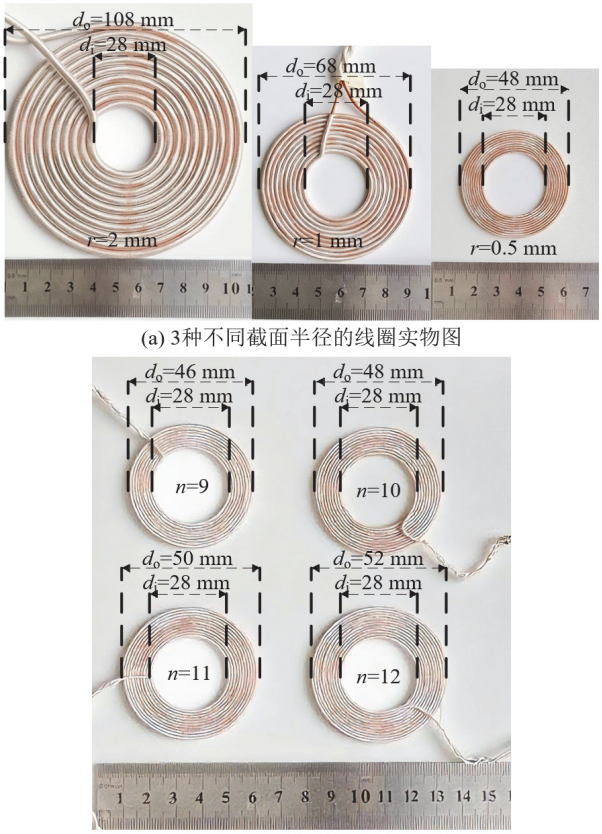
本文按照仿真设置的参数进行 1:1 实物模型的建立，采用利兹线绕制不同规格的线圈如图 10 所示。图 10(a)是 3 种不同截面半径的线圈实物图，从左到右分别是线圈截面半径为 2、1、0.5 mm 的实物线圈；图 10(b)是 4 种不同匝数的线圈实物图，从左到右、从上到下分别是线圈匝数为 9、10、11、12 匝的实物线圈。图中的 d_i 和 d_o 分别表示线圈的内直径和外直径。

本文搭建了高压放电测试平台，如图 11 所示，包括了无局放调压控制台、无局放滤波器、1 台 100 kV/10 kVA 的无局放试验变压器、100 kV/5 kΩ 的高压保护电阻、100 kV/800 pF 的耦合电容以及 GDJF-2008 系列局部放电监测装置。此平台能够提供最高 100 kV(有效值)的工频测试电压，具备 10 kVA 的输出能力。在额定电压条件下，系统局部放电背景噪声控制在 10 pC 以下。通过平台能够实现测定 PDIV、视在放电量、放电频次等功能。

3.2 WPT 放电特性的试验结果

本节利用高压放电测试平台，研究关键结构参数对 PDIV、最大放电量、总放电量和放电脉冲数的影响规律。PDIV 是指样品在开始发生局部放电时的最低施加电压，单位为 kV。最大放电量是指在试验中观测到的单次局部放电所释放的瞬态电荷量，单位为 pC。本文中的总放电量是指在 1 s 内观测到的所有放电量之和，单位为 pC。放电脉冲数是指在 1 s 内观测到的所有放电次数之和。选择这 4 个指标能够从“阈值-单次-累计-频次”4 个维度较完整刻画绝缘特征。PDIV 反映放电的起始阈值，最大放电量反映单次放电的最大强度，总放电量反映能量的积累速率，放电脉冲数反映放电的密度。结合这 4 个参数可以区分“高频低能”和“低频高能”的不同劣化模式。“低频高能”意味着单次注入能量极高，击穿风险呈“阶跃式”上升，难以预测；“高频低能”意味着不会立即击穿，但长期累积损伤显著，击穿呈“渐进式”，可提前数月预警。因此在设计时应尽量避免装置设计出现“低频高能”的绝缘缺陷。

图 12 中多幅图展示了基准模型参数(h=20 mm，n=10，r=0.5 mm，R_i=14 mm)下实物线圈在不同电压下一周期的放电情况。图 12(a)展示了线圈还未开始放电的情况，图 12(b)—(d)展示了线圈从开始放电到剧烈放电的情况。



(a) 3种不同截面半径的线圈实物图

(b) 4种不同匝数的线圈实物图

图 10 绕制的不同规格线圈实物图

Fig.10 Physical drawing of coils with different specifications

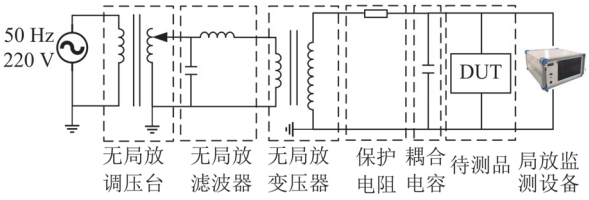


图 11 高压放电测试平台

Fig.11 High-voltage partial discharge test platform

当施加电压为 13 kV(有效值)时，并没有检测到局放现象，当电压施加到 14.5 kV 时，检测到待测品出现了幅值为 15 pC 的较为明显的放电信号，将该电压定义为 PDIV。随着电压的增加，局放量不仅在幅值上有所增长，而且在密集程度上也有所增加。在空气介质条件下，WPT 系统结构对称，通过图 12 可以观察到“双簇”放电现象，其在物理本质上属于电晕放电。这是由于线圈导体外圈的电场强度超过了空气的击穿场强所致。这一结论与前文仿真电场图中可以直观观察到的“电场强度最大值出

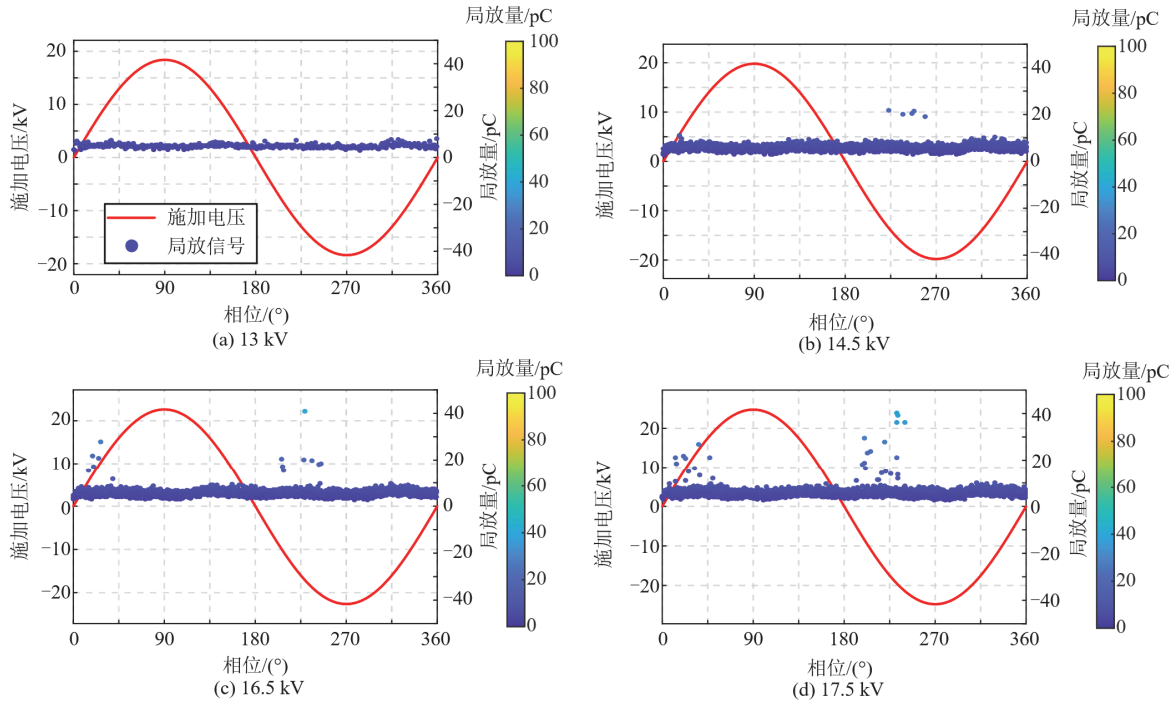


图 12　基准模型参数下实物线圈在不同电压下 1 周期的放电情况

Fig.12　Discharge of physical coils at different voltages for one cycle under baseline model parameters

现线圈外围上”结论保持一致。电场仿真与试验结果共同证实，电晕放电优先发生于电场强度最高的线圈外圈。

通过测量待测品在不同电压等级的放电量，可以得到该待测品的 PDIV 以及该待测品的最大放电量、总放电量和放电脉冲数同施加电压的增长关系，文中试验全程遵循 GB/T 7354—2018《高电压试验技术-局部放电测量》标准[33]，后续试验都将基于以上操作。

图 13 展示了 4 组不同 WPT 线圈下从放电产生到击穿的整个放电增长规律。线圈 1 表示基准线圈(h=20 mm，n=10，r=0.5 mm，R_i=14 mm)，线圈 2 表示不同隔离距离的线圈(d=60 mm)，线圈 3 表示不同截面半径的线圈(r=2 mm)，线圈 4 表示不同匝数的线圈(n=12)。从结果可以看出，3 组参量均呈现了随着电压增长，放电量先缓慢上升然后急剧增加的过程，并进入击穿阶段。从 PDIV 产生到击穿电压，电压的增长 ΔV 不超过 3 kV。击穿电压和 PDIV 差异不大，并没有显著提高。由此可见：空气介质下 WPT 传能装置一旦开始产生局部放电，提升电压会很容易进入击穿阶段，这在 WPT 取能绝缘设计中要尤为注意。以下论文对从 PDIV 到击穿过程这一段过程进行了更细致地分析和探讨。

图 14(a)—(d)分别展示了不同隔离距离下的

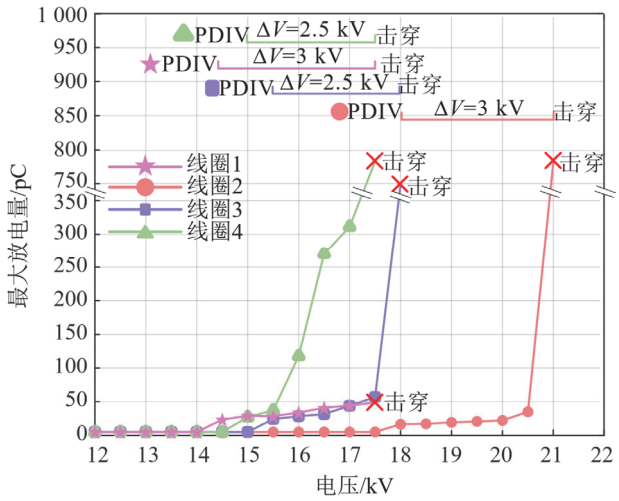
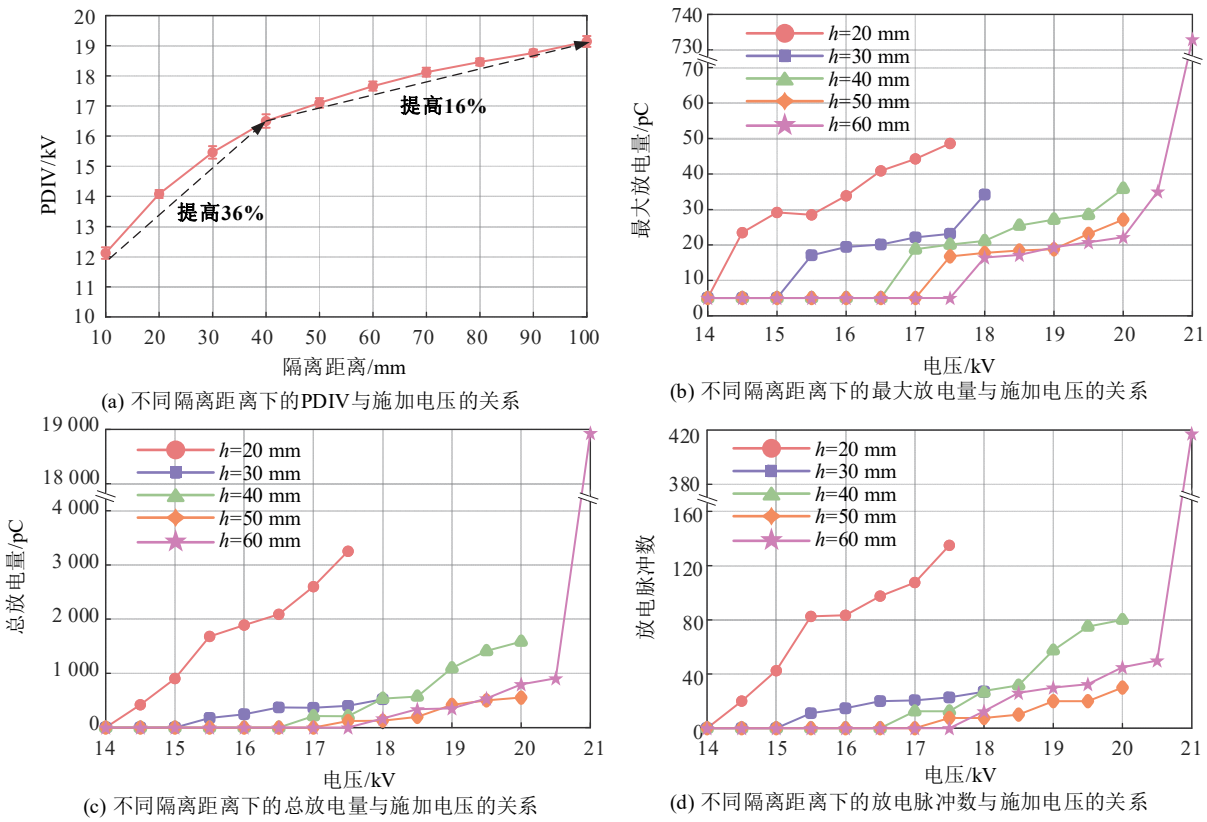


图 13　不同线圈的最大放电量与电压的关系

Fig.13　Relationship between the maximum discharge capacity of different coils and voltages

PDIV、最大放电量、总放电量、放电脉冲数随施加电压(14~21 kV)的变化曲线，不同的隔离距离分别采用不同的颜色和标记表示。此时，线圈截面半径均为 0.5 mm，匝数为 10 匝。

图 14(a)展示了 PDIV 随隔离距离的变化曲线，图中的数据中的误差棒均表示为“平均值±标准偏差”，其计算基于 5 次独立试验。可以看出：1）随着隔离距离的增大，PDIV 呈现上升趋势，但是后



(a) 不同隔离距离下的PDIV与施加电压的关系

(b) 不同隔离距离下的最大放电量与施加电压的关系

(c) 不同隔离距离下的总放电量与施加电压的关系

(d) 不同隔离距离下的放电脉冲数与施加电压的关系

图 14 不同隔离距离下的高压测试结果

Fig.14 High-voltage test results at different isolation distances

期会进入一个减缓趋势。2）隔离距离从 10 mm 提升到 40 mm 时，PDIV 提高了约 36%；但是从 40 mm 提升到 100 mm 时，PDIV 仅提升了 16%。以上现象表明：随着隔离距离的增大，WPT 型取能结构的绝缘性能会增强，但是过大的隔离距离会减弱 PDIV 的提升能力，这与仿真中最大场强场景的变化规律一致。因此，在 WPT 装置隔离距离较近时，提升隔离距离对提高 PDIV 作用明显，但是随着距离进一步增大，后期提升作用会显著降低。综上所述，在隔离距离设计方面，建议将距离设计为 40~60 mm。

图 14(b)展示了在不同隔离距离下最大放电量随施加电压的变化曲线。图中看出：1）所有隔离距离下，随着施加电压的升高，最大放电量总体呈上升趋势。2）相比于基准模型(h=20 mm)组，隔离距离为 60 mm 组的最大放电量增长较快且达到图中最大值，而其他组均未观察到较大的放电量。这主要是因为放电发展较快，在较短的电压抬升中便已经达到极高的放电量，进而导致击穿，未能在仪器中观测到。3）施加电压达到 17.5 kV，隔离距离从 20 mm 提升到 50 mm 时，最大放电量在 20 mm 所对应的数值基础上减小了约 66%。

图 14(c)、(d)分别展示了在不同隔离距离下总放电量和放电脉冲数随施加电压的变化曲线。可见：1）2 幅图中的折线变化趋势基本一致，只是数值上有较大区别。随着施加电压的升高，总放电量和放电脉冲数总体呈上升趋势。2）开始放电后，随着电压的升高，放电脉冲数和总放电量的升高并不是很显著，直到击穿。施加电压达到 17.5 kV，隔离距离从 20 mm 提升到 50 mm 时，总放电量在 20 mm 所对应的数值的基础上减小了约 96%，放电脉冲数减小了约 94%。这意味着，隔离距离越小，取能电源更容易随着电压升高发生严重的电场畸变进而导致击穿。

结合图 14 对不同隔离距离下的高压测试结果的分析可知，隔离距离从 20 mm 提升到 50 mm 时，PDIV 在 20 mm 所对应数值的基础上提高了约 21%；施加电压达到 17.5 kV，最大放电量减小了约 66%，总放电量减小了约 96%，放电脉冲数减小了约 94%。且该组试验下，放电脉冲数与总放电量图形基本相符，呈现“高频高能”、“低频低能”的状态。

图 15(a)—(d)分别展示了不同匝数下的 PDIV、最大放电量、总放电量、放电脉冲数随施加电压

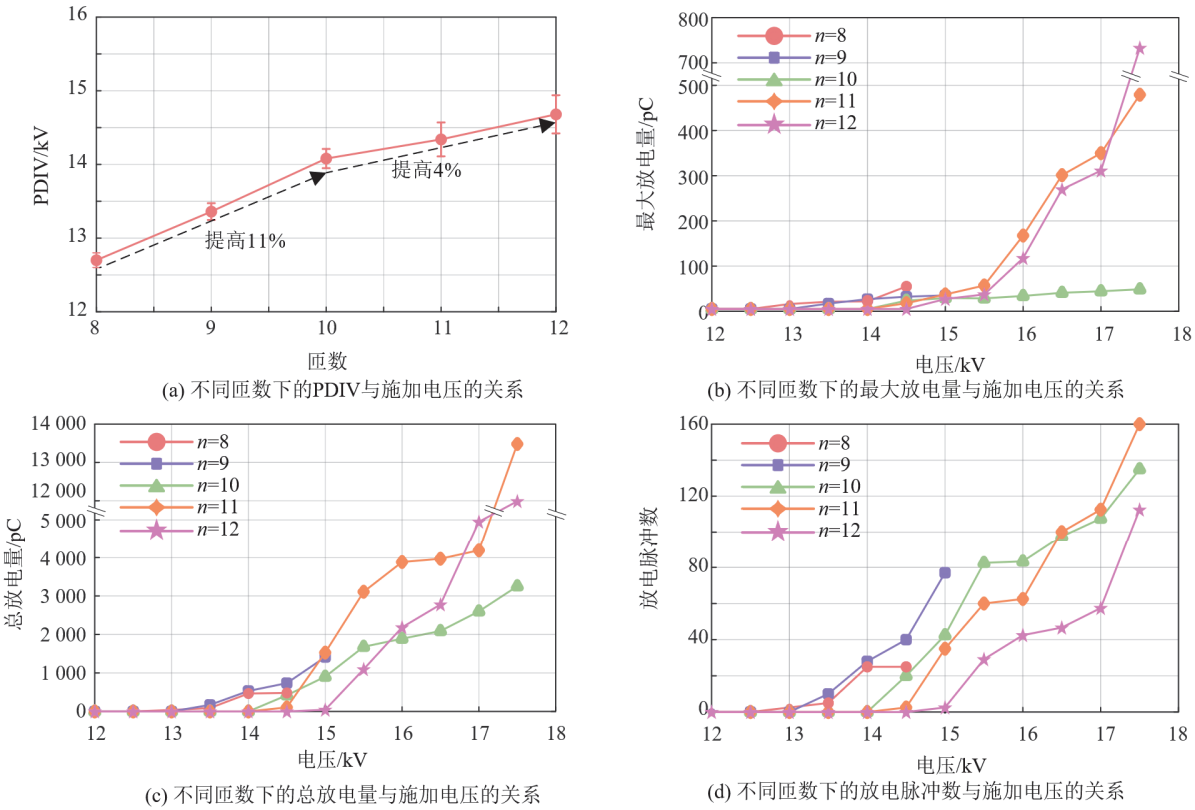
(12~18 kV)的变化曲线，不同的匝数分别采用不同的颜色和标记表示。此时，线圈隔离距离均为 20 mm，截面半径为 0.5 mm。

图 15(a)展示了 PDIV 随匝数的变化曲线，图中的数据中的误差棒均表示为“平均值±标准偏差”，其计算基于 5 次独立试验。图中看出：1）随着匝数的增大，PDIV 整体呈现先迅速增大后平缓上升的趋势。2）匝数从 8 匝提升到 10 匝时，PDIV 提高了约 11%；但是从 10 匝提到 12 匝，PDIV 仅提升了 4%。在前文仿真结果中，随着匝数的增加，穿过内径和外径的 E_{max} 先减小后逐渐平缓，这与试验中出现的 PDIV 随着匝数增多而先大幅增大后平缓上升的现象相符。综上所述，在匝数设计方面，建议保持在 10~12 匝。

图 15(b)展示了在不同匝数下系统最大放电量随施加电压的变化曲线。图中看出：1）所有匝数下，随着施加电压的升高，最大放电量总体呈上升趋势。2）相比于基准模型(n=10)组，匝数为 12 组的最大放电量增长较快且达到图中最大值。匝数为 8、9、10 组这 3 条折线随着电压升高的变化情况基本一致，最大放电量随施加电压的增大增长较缓；而匝数为 11 和 12 组的变化情况更为相似，最大放电量随施加电压的增大而增大较快，在较短的电压增长范围内就达到较大的数值。施加电压达到 15 kV，匝数从 10 匝增加到 12 匝时，最大放电量在 10 匝所对应的数值基础上减小了约 7%。增加匝数会增加线圈的电感值，而更高的电感可以存储更多的能量，这导致在放电过程中短时间内释放更多的能量，匝数多的组别最大放电量会更高。

图 15(c)、(d)分别展示了在不同匝数下总放电量和放电脉冲数随施加电压的变化曲线。可见：1）随着施加电压的升高，总放电量和放电脉冲数整体均呈上升趋势。2）施加电压达到 15 kV，匝数从 10 匝增加到 12 匝时，总放电量在 10 匝所对应的数值基础上减小了约 95%，放电脉冲数减小了约 94%；线圈匝数为 11 匝时，放电脉冲数随施加电压的增大而增长较快，且施加电压达到 17.5 kV 时放电脉冲数最高，为 160；且总放电量最大值也出现在这个点，为 13 482 pC。

结合图 15 对不同匝数下的高压测试结果分析可知，匝数从 10 匝增加到 12 匝时，PDIV 在 10 匝所对应的数值基础上提高了约 4%。施加电压达到 15 kV 时，最大放电量减小了约 7%，放电脉冲数减小了约 94%，总放电量减小了约 95%。但是该组试



(a) 不同匝数下的PDIV与施加电压的关系

(b) 不同匝数下的最大放电量与施加电压的关系

(c) 不同匝数下的总放电量与施加电压的关系

(d) 不同匝数下的放电脉冲数与施加电压的关系

图 15　不同匝数下的高压测试结果

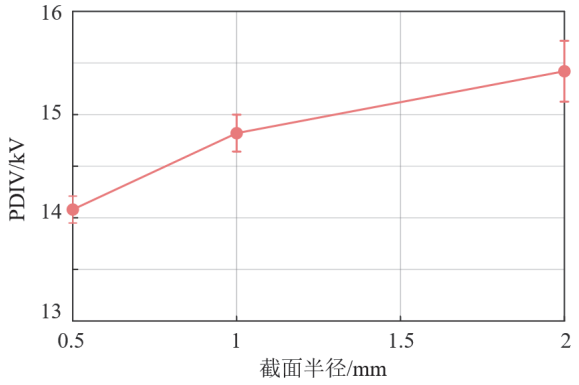
Fig.15　High-voltage test results at different number of turns

验下，放电脉冲数与总放电量图形与前 2 组不相符。就图形情况而言，匝数为 10 组呈现“高频低能”的情况，而匝数为 12 组呈现“低频高能”的情况。图 16(a)—(d)分别展示了不同截面半径下的 PDIV、最大放电量、总放电量、放电脉冲数随施加电压(14~19 kV)的变化曲线，不同的截面半径分别采用不同的颜色和标记表示。此时，线圈隔离距离均为 20 mm，匝数为 10 匝。

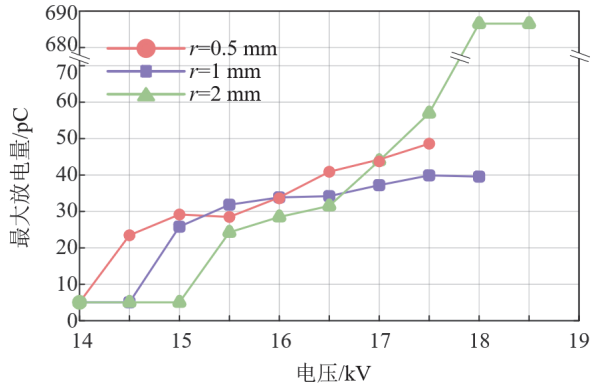
图 16(a)展示了 PDIV 随截面半径的变化曲线，图中的数据中的误差棒均表示为“平均值±标准偏差”，其计算基于 5 次独立试验。图中看出：1）随着线圈截面半径的增大，PDIV 整体呈现上升趋势。这表明，随着截面半径的增大，WPT 型取能结构的绝缘性能增强。2）线圈截面半径从 0.5 mm 增加到 2 mm 时，PDIV 在 0.5 mm 所对应的数值基础上提高了约 10%。在前文仿真结果中，增加线圈截面半径会减小 E_{max}，这与试验中出现的 PDIV 随着线圈截面半径增大而增大的现象相符。综上所述，在截面半径设计方面，建议线圈截面半径设计为 1~2 mm。

图 16(b)展示了不同截面半径下系统最大放电量随施加电压的变化曲线。图中看出：1）所有截面半径下，随着施加电压的升高，最大放电量总体呈上升趋势。2）相比于基准模型(r=0.5 mm)组，截面半径为 2 mm 组的最大放电量增长较快且达到图中最大值。而截面半径为 0.5 mm 组和 1 mm 组的 2 条折线随着电压升高的变化情况基本一致。施加电压达到 16.0 kV，线圈截面半径从 0.5 mm 增加到 2 mm 时，最大放电量在 0.5 mm 所对应的数值基础上减小了约 16%；截面半径为 2 mm 时，最大放电量随施加电压的增大而增长较快，施加电压达到 18 kV 时，最大放电量最大，约为 690 pC。

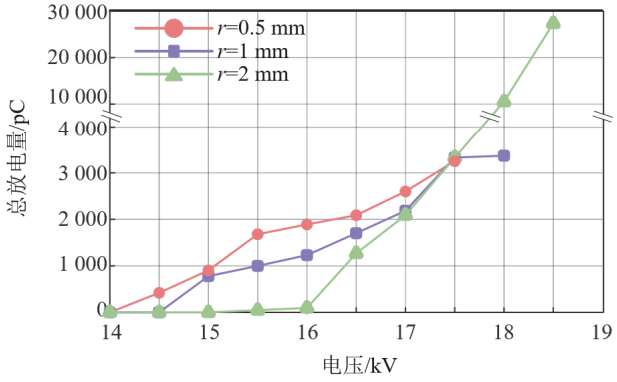
图 16(c)、(d)分别展示了在不同截面半径下总放电量和放电脉冲数随施加电压的变化曲线。图中看出：1）2 幅图中的折线变化趋势基本一致，只是数值上有较大区别。2）在相同施加电压下，线圈截面半径越大，放电脉冲数和总放电量越大。其中，施加电压达到 16.0 kV、线圈截面半径从 0.5 mm 增加到 2 mm 时，总放电量在 0.5 mm 所对应的数值基础上减小了约 95%，放电脉冲数减小了约 87%；截面半径为 2 mm 时，放电脉冲数随施加电压的增大而增长较快，施加电压达到 18.5 kV 时放电脉冲数最高，为 486；总放电量也达到最大，为 27 363 pC。



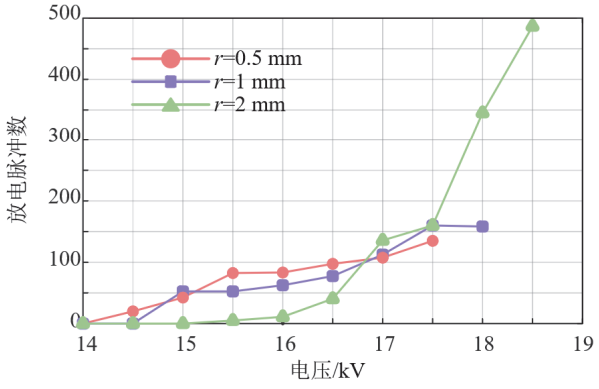
(a) 不同截面半径下的PDIV与施加电压的关系



(b) 不同截面半径下的最大放电量与施加电压的关系



(c) 不同截面半径下的总放电量与施加电压的关系



(d) 不同截面半径下的放电脉冲数与施加电压的关系

图 16　不同截面半径下的高压测试结果

Fig.16　High-voltage test results at different cross-section radii

结合图 16 对不同截面半径下的高压测试结果的分析可知，截面半径从 0.5 mm 增加到 2 mm 时，PDIV 在 0.5 mm 所对应的数值基础上提高了约 10%。施加电压达到 16.0 kV、线圈截面半径从 0.5 mm 增加到 2 mm 时，最大放电量减小了约 16%，总放电量减小了约 95%，放电脉冲数减小了约 87%。且该组试验下，放电脉冲数与总放电量图形大致相符，呈现“高频高能”、“低频低能”的状态。

3.3　关键因素对绝缘特性的成因机制分析

基于以上对于不同关键参量的高压试验结果，分别得到电压、隔离距离、匝数、线圈截面半径对绝缘特性的影响规律，本节着重于分析这些关键因素对绝缘特性的影响成因机制。

从前文提到的图 13 中可以观察到开始放电后，最大放电量增长极为缓慢，随着电压升高到一定程度，最大放电量突然迅速增长，发生剧烈放电。这种现象的出现是因为本模型中的放电属于极不均匀电场气体放电，其过程遵循流注放电理论[34]，如图 17 所示。

在电压较低时，空气未被电离。当电压升高到一定值，在电场最强的尖端附近，电场强度足以加速自由电子并引发碰撞电离，形成初始电子崩并发展为流注。随着电压显著提高，电极尖端的场强急剧增大，流注的发展获得更多能量。流注的长度、强度都大大增加，能够伸展到更远的空间。具体表现为：在电压达到 PDIV 之前，放电量为 0。电压刚超过 PDIV 时，放电的单次脉冲电荷量 Q_{max} 非常小，且放电脉冲数较少。随着电压升高，单次放电的电荷量 Q_{max} 显著增大。电压越高，流注发展越充分，Q_{max} 越大，直至接近由间隙几何结构决定的饱和值。从前文提到的图 14 中观察到的隔离距离对绝缘特性的影响规律可以总结为随着隔离距离的减小，同电压等级下的低隔离距离组放电更为剧烈，且不同隔离距离下的特性曲线基本保持一致，放电脉冲数低的同时总放电量也相对较小，并且这种试验现象与前文中的仿真结果相符。由此可见，隔离距离增大可显著抑制局部放电行为。隔离距离增大使单位长度上的电场强度下降，气隙的击穿概率降低；电子或离子在更长路径中迁移，能量耗散增加，难以形成有效放电通道。迁移路径延长、电子能量耗散、空间电荷扩散效应增强，均抑制了放电。实测 PDIV 不会随 $1/h$ 成线性增长，而是“先快后慢”的饱和趋势。

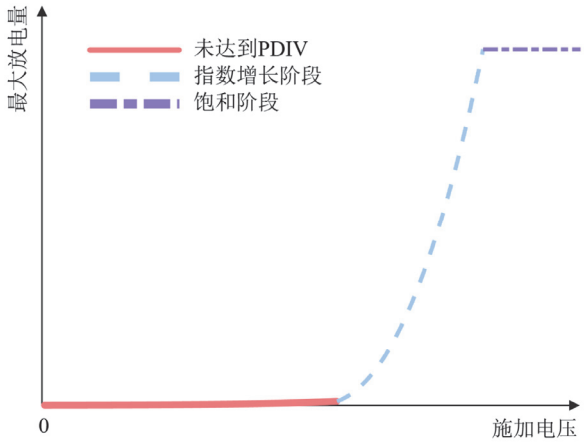


图 17　流注放电中施加电压与最大放电量的关系

Fig.17　Relationship between applied voltage and maximum discharge in stream discharge

从前文提到的图 15 中观察到的匝数对绝缘特性的影响规律可以总结为随着匝数增多，系统整体绝缘性能呈现上升趋势，PDIV 增大，同电压等级下放电剧烈程度减小，与仿真结果一致。这说明了对匝数的适当增大有助于降低局部放电强度。匝数增多使得在相同电压下的匝间电压较低，因此系统的 PDIV 增大，且电场分布也更为均匀，这一点在仿真中也得到了验证。然而在本文中匝数增多同时也意味着线圈面积的增大，总放电量也会有所提升。

从前文提到的图 16 中观察到的线圈截面半径对绝缘特性的影响规律可以总结为随着线圈截面半径的增大，系统整体绝缘性能呈现上升趋势，PDIV 增大，同电压等级下放电剧烈程度减小，与仿真结果一致。试验结果表明线圈截面半径适当增大有助于降低局部放电强度。截面半径越大，导体表面曲率越小，电场集中效应减弱，电场强度下降，PDIV 随之提高。这一点与皮克公式[35-36]中体现的采用粗导线能有效抑制电晕的结论一致。而开始放电后，较大的截面半径会提供更多的放电路径，从而导致更高的放电脉冲数。这表明，线圈截面半径过大，取能电源更容易随着电压升高发生剧烈放电进而导致击穿。

综上所述，隔离距离增大、匝数增加和适当增大线圈截面半径则有助于抑制局部放电行为，但是后期的抑制作用会减缓。其中，对放电影响最大的为电压和隔离距离的变化，匝数和线圈截面半径影响较小。

4 结论

1）WPT 型取能结构在空气介质下随着电压升高，放电呈现“先缓后急”的规律；电压一旦达到 PDIV，虽然放电幅值不高，但是放电频次和总放电量会随着电压显著上升，起始放电产生后会很快进入击穿阶段。因此需要考虑阻挡介质以避免空气介质下放电“先缓后急”导致的快速击穿。

2）隔离距离、线圈匝数、线圈截面半径会对电场分布和放电特性产生不同的影响规律，其中隔离距离增大对 PDIV 提升和最大场强降低作用最为显著。根据电场和 PDIV 变化规律，WPT 取能装置参量优选参量设计建议隔离距离为 40~60 mm、线圈匝数为 10~12 匝、线圈截面半径为 1~2 mm，以实现小体积下电场和耐受电压的协同优化。

本文所揭示的各参数对放电特性的基础影响规律，为后续开展此类多目标优化设计提供了关键的理论与数据基础。未来的研究将从以下几个方面展开：(1)高频激励下的放电行为更为复杂，后续研究将重点关注从工频电压到高频脉冲电压带来的差异影响，以更准确评估高压 SiC 器件应用工况的耐压性能。(2)通过填充介质有望进一步显著提升耐压能力，但是同时会对寄生参量和抗干扰能力有影响，将进一步探究填充介质对 WPT 取能装置的性能影响规律。(3)无线取能装置是效率、功率密度、耐压能力、抗干扰能力兼顾的装置，未来将在明确各结构参量对各个性能影响关系的基础上，开展多目标协同的优化设计方法研究。

参考文献 References

[1] CHEN Z B, HUANG A Q. High performance SiC power module based on repackaging of discrete SiC devices[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(8): 9306-9310.

[2] 彭娇阳，孙 鹏，张浩然，等. 基于栅极泄漏电流的碳化硅 MOSFET 短路栅源极失效判定方法[J]. 高电压技术，2022，48(6)：2391-2400.
PENG Jiaoyang, SUN Peng, ZHANG Haoran, et al. Determination method for short-circuit gate-source failures of silicon carbide MOSFET based on gate leakage current[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(6): 2391-2400.

[3] 徐子珂，蔡雨萌，孙 鹏，等. 考虑阈值迟滞的碳化硅 MOSFET 开关暂态解析模型[J]. 高电压技术，2023，49(7)：3051-3061.
XU Zike, CAI Yumeng, SUN Peng, et al. Analytical switching transient model for silicon carbide MOSFET considering threshold voltage hysteresis[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 3051-3061.

[4] SCHIRO A, OLIVER S. Wide bandgap power to electrify our world for a sustainable future[J]. IEEE Power Electronics Magazine, 2024, 11(1): 32-38.

[5] ANURAG A, BARBOSA P. High-voltage isolated power supply structure for gate drivers of medium-voltage SiC devices[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(6): 6907-6911.

[6] LIU X, GAO F, XU J Z, et al. A compact auxiliary power supply design for a medium frequency solid state transformer[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2023, 9(1): 1443-1457.

[7] 赵志斌，乔建申，孙 鹏，等. 碳化硅 MOSFET 并联电流分配不均衡影响因素与抑制方法综述[J]. 高电压技术，2024，50(2)：636-650.
ZHAO Zhibin, QIAO Jianshen, SUN Peng, et al. Influencing factors and suppression methods for current unbalance of parallel silicon carbide MOSFETs: a review[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(2): 636-650.

[8] PAN J Y, YAN S, TANG H B, et al. High-Isolation and Compact Wireless Power Supply for Gate Drivers of SiC Devices With Improved Class-E Inverter[J]. High Voltage, 2025, 10(5): 1282-1292.

[9] ZHANG X, LI H, BROTHERS J A, et al. A gate drive with power over fiber-based isolated power supply and comprehensive protection functions for 15-kV SiC MOSFET[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2016, 4(3): 946-955.

[10] LI H G, GAO Z H, WANG F. Medium-voltage isolated auxiliary power supply design for high insulation capability, ultra-low coupling capacitance, and small size[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(6): 7226-7240.

[11] YAN Z X, DALAL D N, LUAN S K, et al. Time domain analysis of series-resonant converter in auxiliary power supply for medium-voltage converter[C]//Proceedings of the 2023 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Orlando, USA: IEEE, 2023: 2715-2720.

[12] YAN N, SUN K Y, FAN B R, et al. Scalable auxiliary power supply system for SiC-based modular medium voltage converters[C]//Proceedings of the 2023 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Orlando, USA: IEEE, 2023: 2333-2339.

[13] 潘建宇，唐海博，姜 怡，等. 高压 SiC 器件电流互感器型取能装置耦合电容特性和抑制研究[J]. 电工技术学报，2025，40(3)：800-811.
PAN Jianyu, TANG Haibo, JIANG Yi, et al. Study of coupling capacitance characteristics and its suppression method of HCT-based isolated power transfer device for high-voltage SiC switches[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(3): 800-811.

[14] 潘建宇，唐海博，姜 怡，等. 高压 SiC 器件电流互感器型取能装置耦合电容特性和抑制研究[J]. 电工技术学报，2025，40(3)：800-811.
Pan Jianyu, Tang Haibo, Jiang Yi, et al. Study of coupling capacitance characteristics and its suppression method of HCT-based isolated power transfer device for high-voltage SiC Switches[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(3): 800-811.

[15] 梁 仓，王党辉，梁晨旭，等. 基于 LCC-LCC/S 可重构拓扑的无线充电系统在传感器网络中的应用[J]. 高电压技术，2025，51(3)：1191-1205.
LIANG Cang, WANG Danghui, LIANG Chenxu, et al. Application of a wireless charging system based on LCC-LCC/S reconfigurable topology in sensor networks[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(3): 1191-1205.

[16] VAN MULDERS J, DELABIE D, LECLUYSE C, et al. Wireless power transfer: systems, circuits, standards, and use cases[J]. Sensors, 2022, 22(15): 5573.

[17] NGUYEN V T, BHARATH G V, GOHIL G. Design of isolated gate driver power supply in medium voltage converters using high frequency and compact wireless power transfer[C]//Proceedings of the

2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Baltimore, USA: IEEE, 2019: 135-142.

[18] NGUYEN V T, GOHIL G. Dual-output isolated gate driver power supply for medium voltage converters using high frequency wireless power transfer[C]//Proceedings of the 2020 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). New Orleans, USA: IEEE, 2020: 1821-1828.

[19] NGUYEN V T, PAWASKAR V U, GOHIL G. Isolated gate driver for medium-voltage SiC power devices using high-frequency wireless power transfer for a small coupling capacitance[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(11): 10992-11001.

[20] NGUYEN V T, VU V B, GOHIL G, et al. Coil-to-coil efficiency optimization of double-sided *LCC* topology for electric vehicle inductive chargers[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(11): 11242-11252.

[21] MAINALI K, WANG R X, SABATE J, et al. Design of gate drive power supply with air core transformer for high dv/dt switching[C]//Proceedings of IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Portland, USA: IEEE, 2018: 5479-5484.

[22] SABATE, DELGADO, HARFMAN-TODOROVIC. Gate driver power supply for medium voltage SiC mosfets with air core transformer[C]//Proceedings of the 2022 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Detroit, USA: IEEE, 2022: 1-6.

[23] WEI Y Q, ZHAO S, JIMENEZ R, et al. Design optimization and experimental validation of gate driver for 10 kV SiC MOSFET[C]//Proceedings of the 2022 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC). Shanghai, China: IEEE, 2022: 43-48.

[24] WEI Q Y, DU L Y, DU X, et al. A wireless power transfer based gate driver design for medium voltage SiC MOSFETs[C]//Proceedings of the 2021 IEEE International Future Energy Electronics Conference (IFSEC). Taipei, China: IEEE, 2021: 1-7.

[25] GUO Z H, LI H. A MHz-pulse-transformer isolated gate driver with signal-power integrated transmission for medium-voltage SiC MOSFETs[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(8): 9415-9427.

[26] TAKASAKI M, MIURA Y, ISE T. Wireless power transfer system for gate power supplies of modular multilevel converters[C]//Proceedings of the 2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia). Hefei, China: IEEE, 2016: 3183-3190.

[27] SUN K Y, XU Y, WANG J, et al. Insulation design of wireless auxiliary power supply for medium voltage converters[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(4): 4200-4211.

[28] SPRO O C, MAUSETH F, PEFTITSIS D. High-voltage insulation design of coreless, planar PCB transformers for multi-MHz power supplies[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(8): 8658-8671.

[29] GUO Z H, LI H. A fiber-optic-less 50-MHz single transformer isolated gate driver with fault feedback for 10-kV SiC MOSFETs[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(9): 10854-10863.

[30] JIANG R Q, YAN S, DENG C F, et al. Electric field analysis and insulation design of wireless power transfer coils under high-voltage stress[C]//Proceedings of the 2022 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Applications (ICHVE). Chongqing, China: IEEE, 2022: 1-4.

[31] SUN K Y, WANG J, BURGOS R, et al. Design and multiobjective optimization of an auxiliary wireless power transfer converter in medium-voltage modular conversion systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(8): 9944-9958.

[32] BOUANOU T, EL FADIL H, LASSIOUI A. Analysis and design of circular coil transformer in a wireless power transfer system for electric vehicle charging application[C]//Proceedings of the 2020 International Conference on Electrical and Information Technologies (ICEIT). Rabat, Morocco: IEEE, 2020: 1-6.

[33] 国家市场监督管理总局，国家标准化管理委员会. 高电压试验技术局部放电测量：GB/T 7354—2018[S]. 北京：中国标准出版社，2018.
State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. High-voltage test techniques-partial discharge measurements: GB/T 7354—2018[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2018.

[34] 石循杰. 低气压下长空气间隙先导放电的物理模型研究[D]. 北京：华北电力大学(北京)，2016.
SHI Xunjie. Physical model research on leader discharge of long air gap under low atmospheric pressure[D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2016.

[35] TONMITR T, RATANABUNTHA T. Comparison of power loss due to corona phenomena model with Peek's formula in high voltage 115 kV and 230 kV system[J]. Procedia Computer Science, 2016, 86: 385-388.

[36] AMRANI M L, BOUAZABIA S, FOFANA I, et al. Modified Peek formula for calculating positive DC corona inception voltage on polluted insulator[J]. Electrical Engineering, 2019, 101(2): 489-498.



JIANG Yi

姜　怡
2002—，女，硕士
主要从事高压隔离电源绝缘技术的研究工作
E-mail: 202311021042@stu.cqu.edu.cn



PAN Jianyu
Ph.D., Professor
Corresponding author

潘建宇(通信作者)
1989—，男，博士，教授，博导
主要从事中高压变换器、SiC 电机驱动、高压变换器绝缘技术相关的研究工作
E-mail: panjianyu@cqu.edu.cn

收稿日期　2025-09-11　修回日期　2025-12-04　　编辑　曾文君