

单向单线电能传输原理与实现方法研究

李阳, 胡玮, 翟宇洁, 祝丽花, 周维

(天津理工大学 天津市新能源电力变换传输与智能控制重点实验室, 天津 300384)

摘要:单线电能传输技术解决了特殊场合电源的供给问题,也为电能传输提供了除传统有线和无线以外的第3种方式。然而传统的单线电能传输依赖空间电场来实现电能传输,所需电压等级一般较高,会产生较大的电场辐射。针对上述问题,提出一种单向单线电能传输方法,其原理是改变电磁场辐射传播方式并将其聚焦或束缚在传输介质周围,利用传输介质对电磁场进行定向导引、高效传输。构建一种以高频电源、阻抗匹配、模式转换发射装置、单导线介质与模式转换接收装置为核心的新型传输结构。为提升电能传输效率,建立系统仿真模型,并对模式转换装置参数进行优化和设计。最后搭建系统进行实验,在电源功率为50 W条件下,实现10 m的传输距离,传输效率达到77.28%,验证所提方法的可行性与仿真研究的正确性。

关键词:单线电能传输;单向单线;传输原理;传输结构;传输效率

DOI:10.15938/j.emc.2025.11.011

中图分类号:TM724

文献标志码:A

文章编号:1007-449X(2025)11-0109-11

Research on principle and realization method of one-way single-wire power transfer

LI Yang, HU Wei, ZHAI Yujie, ZHU Lihua, ZHOU Wei

(Tianjin Key Laboratory of New Energy Power Conversion, Transmission and Intelligent Control, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract: Single-wire power transfer technology addresses the power supply issue in special scenarios, offering a third approach alongside traditional wired and wireless methods. However, traditional single-wire power transfer relies on spatial electric fields, often involving high voltage levels that generate large electric field radiation. To tackle these issues, a one-way single-wire power transfer method was proposed, based on altering the radiation pattern of electromagnetic fields to focus or confine them around the transmission medium, facilitating directional guidance and efficient transmission of electromagnetic fields through the medium. A novel transmission structure was constructed, with a high-frequency power supply, impedance matching, mode conversion transmitting device, single-wire medium and mode conversion receiving device as its core. To enhance the transmission efficiency, a system simulation model was established, and the parameters of the mode conversion device were optimized and designed accordingly. Finally, with a power supply power of 50 W, the system was built for experiments, achieving a transmission distance of 10 meters with a transmission efficiency of 77.28%, verifying feasibility of the proposed

收稿日期: 2024-09-05

基金项目: 天津市应用基础及前沿技术研究计划(自然科学基金)面上项目(23JCYBJC00400);国家自然科学基金(52277016)

作者简介: 李阳(1979—),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为无线电能传输技术;

胡玮(1997—),男,硕士研究生,研究方向为无线电能传输技术;

翟宇洁(1995—),男,博士研究生,研究方向为无线电能传输技术;

祝丽花(1984—),女,博士,教授,博士生导师,研究方向为工程电磁场与磁技术、无线电能传输技术;

周维(2000—),男,硕士研究生,研究方向为无线电能传输技术。

通信作者: 胡玮

method and correctness of the simulation study.

Keywords: single-wire power transfer; one-way single-wire; transfer principle; transmission structure; transmission efficiency

0 引言

单线电能传输技术(single-wire power transfer, SWPT)是利用单根导线通过空间电场和位移电流实现将电能从电源端传递至用电设备端的一种新型传输模式,即仅使用一根导线为负载提供电能的颠覆性技术,是一种新型的电能传输方式^[1]。单线电能传输技术介于传统有线传输与无线电能传输之间,弥补了两者在电能传输方面的不足,成为了第3种可能的电能传输方式^[2]。相对于传统有线电能传输技术,单线电能传输技术不仅减少了导线的使用数量,而且通过利用环境中固有介质(如大地、海水、管道等),不需要单独铺设导线实现电能便携、灵活、安全地传输。相比于无线电能传输技术,单线电能传输技术易于实现电能传输的高距径比和中远距离,尤其是在超越了无线电能传输技术可实现范围的场合,具有重要的应用价值,是解决如无线传感网络、体域网智能设备、水下探测系统、孤岛区域以及封闭金属装置等特殊场合电源传输与供给的重要方法^[3]。由于其独特的传输方式,以及可能对电能传输带来的颠覆性影响,吸引了越来越多的研究人员对其展开研究^[4-6]。

虽然单线电能传输近年来才被重视和研究,但其实早在1899年,Nicola Tesla便提出了单线电能传输的概念^[7]。1927年,特斯拉在一篇文章中提到,通过合理布置发射和接收装置,能量可以通过地球以任何距离传输,没有功率限制,效率可以达到99.5%^[8]。但是由于缺乏资金支持,特斯拉在有生之年并没有实现这一宏伟计划,很长一段时间该技术也进展缓慢。

2001年,俄罗斯全俄农业电气化研究所研究团队使用铜、铝、钢、钨碳、水和潮湿的土壤作为介质,设计了1 kW大功率SWPT系统^[9-10]。2008年美国内华达雷电实验室依靠两个高压谐振变压器之间的电场耦合和单线,实现了在5 m的距离内传输800 W的功率,传输效率为22.27%^[11]。2009年,美国田纳西理工大学设计搭建了水-导线复合的单线实验系统,模拟利用海水替代导线并研究了该环境下实现单线电能传输的实现可行性^[12]。2014

年,加拿大阿尔伯塔大学对单线电能传输系统展开了一系列研究,利用发射、接收装置的螺旋线圈与空间所存在的杂散电容产生共振现象,实现了对50 W负载进行能量传输,效率可达83%^[13];2016年,该团队提出一种利用土壤导电性的小功率单线电能传输装置,在1.5 m的传输距离下可以实现效率为80%的能量传输^[14]。2022年,美国田纳西理工大学研究了单线电能传输介质的土壤适应性,实现了为45 m传输距离下的农业传感器的供电^[15]。

在国内,2013年,南阳理工学院利用单线电能传输技术成功点亮了距离30 m、功率2 W的LED灯泡^[16]。大连理工大学研究基于特斯拉线圈的单线电能传输系统,2016年通过实验验证了系统的可行性^[17];2017年基于集总参数电路模型,研究了影响传输功率和传输效率的关键因素^[18];2023年通过引入多层线圈结构和使用电磁表面波理论,有效地提高了远距离电力传输的效率,并实现了长达5公里的电力传输,传输功率达到5 kW,传输效率高达87%^[19-20]。2019年,华南理工大学分析了一种使用限幅器的25~50 m单线电场耦合功率传输系统,建立了系统的耦合模型,然后分析了传递性能,制定了系统的模态解决方案和动作机制^[21]。

本团队2017年开始先后研究了单线电能传输的原理、系统结构与优化、传输基本特性(频率特性、距离特性、功率特性、电磁安全性等)和单线介质的替代性^[22-23]。2020年验证了其在无线传感器网络供电中的高效性和可行性^[24];2022年研究了单线电能传输系统的电磁安全性,所提出的无电容球单线电能传输系统更符合电磁安全标准^[25];2023年研究了单线介质对结构、形状、导电性、导磁性等的适应性,为实现固有介质替代单导线提供理论依据^[26]。

国内外的科研人员在单线电能传输技术概念的提出、原理的探索、耦合系统的设计与优化、传输性能的提升、电磁的安全性、介质的替代性等方面做了很多工作,不但提出了一种新型的电能传输方式,还为提升其传输性能做了大量卓有成效的工作,为单线电能传输技术的发展奠定了坚实基础。然而,上述研究和成果的思想大多是源于特斯拉对于单线电

能传输技术的设想,所设计的传输结构也多是特斯拉专利中的结构演化而来。从电路角度分析,现有成果的基本原理大多是依靠单根导线和由空间电场、位移电流构成“回路”来实现电能的传输。为更好实现位移电流,尤其是在传输距离较远情况下,需要提高发射装置的电压等级,这样就会不可避免地存在由于高电场强度所引起

的安全隐患。针对上述问题,本文提出一种从电路角度来看“无回路”的新型单线电能传输方法,即单向单线电能传输技术。主要思想是摆脱电能传输必须依靠“回路”的束缚,通过改变电磁波辐射传播方式,实现电能从源端到负载端的单向无回路传输。与传统的单线电能传输技术相比,不仅解决高电压带来的安全问题,而且传输装置尺寸更小、传输距离更远。本文首先阐述单向单线电能传输技术的原理,然后论述单向单线电能传输技术的实现方法和具体结构,并通过仿真对结构进行设计与优化,最后进行实验研究,验证所提原理、方法、结构的正确性和有效性。

1 单向单线电能传输原理与方法

特斯拉单线电能传输系统结构如图 1 所示,其中左侧为发射装置,右侧为接收装置。高频电源经过升压,在金属导体 D_1 和 D_2 之间,产生时变的空间电场,形成位移电流,并与大地电流一同构成回路,从而实现电能的传输^[7]。传统单线电能传输大多是基于尼古拉特斯拉的构想演化而来,其核心在于利用单根导线与空间电场、位移电流共同构成电能传输回路。在“回路”模式中,电能从电源端流向负载端,又沿着“回路”从负载端流向电源端,更像传统双向有线电能传输。

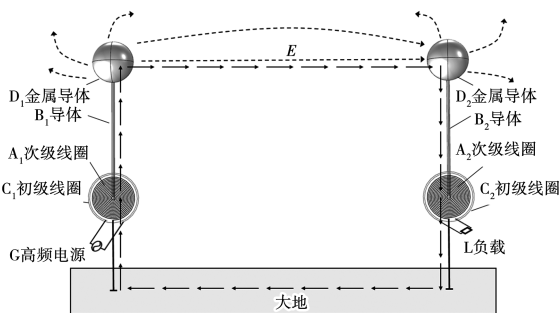


图 1 特斯拉提出的单线电能传输系统
Fig. 1 Single-wire power transfer system proposed by Nikola Tesla

从系统原理来看,传统单线电能传输需要位移

电流与大地电流形成回路才能完成电能传输,且形成位移电流所需的电压与传输距离成正相关。为提升传输距离,传统单线电能传输技术一般采用提高电压等级的方法(通常为千伏级),会产生较大电场辐射。针对上述问题,本文提出的传输方式其原理不再是依靠形成电路中电流回路,而是电能从电源端定向传输给负载端,与传统单线传输原理不尽相同,因此本文命名这种方法为单向单线电能传输。这里的“单向”指的是从系统原理出发而言的没有形成和依赖电流回路,这也是与有线和传统单线电能传输所不同的。

众所周知,电偶极子振荡产生的电磁波向四周辐射,即天线传输原理,如图 2(a) 所示。受天线无回路传输启发,本文通过增加传输介质来改变电磁波自由辐射传播方式,提出了一种单向单线电能传输方式,其电磁波传输过程如图 2(b) 所示。该方法的关键在于:改变电磁场辐射传播方式并将其聚焦或束缚在传输介质周围;传输介质对电磁场进行定向导引、高效地传输。本文的单向单线电能传输方法由于不依赖电流回路,也不是靠升压解决位移电流,因此从传输原理角度避免高电压带来的电场辐射问题。通过图 2(b) 可以直观看到,该方法类似于天线的无回路传输,电能从电源端出发,沿着传输介质所限定的单一线路方向,依靠上述电磁场聚焦、导引机制,朝着负载端进行定向传输,而很难像有回路的情况那样自然地实现反向传输,所以呈现出明显的单向特征。

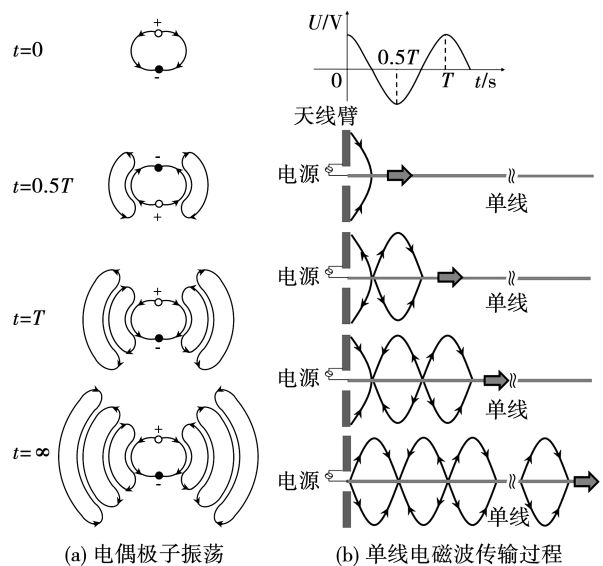


图 2 单向单线电能传输原理
Fig. 2 Principle of one-way single-wire power transfer

上述单向单线电能传输的原理与实现方法如图3所示,该方法依靠同轴线和漆包线实现电能的传输,是目前最基础、最简单的实现方式。单向单线电能传输系统采用同轴线结构作为电源端和负载端的电能和电磁场的能量变换装置,采用漆包线作为引导电磁波传输的单导线介质。

单线电能传输的研究虽已有历史,但是单向的概念和思想系首次提出,本文主要目标是通过对该传输系统电磁场的分布进行理论研究与推导,阐明单线电能传输的单向传输机理。如图3所示,建立柱坐标系,复矢量电场强度 $\mathbf{E} = E_r \mathbf{e}_r + E_\theta \mathbf{e}_\theta + E_z \mathbf{e}_z$, 磁场强度 $\mathbf{H} = H_r \mathbf{e}_r + H_\theta \mathbf{e}_\theta + H_z \mathbf{e}_z$, 其中: \mathbf{e}_r 、 \mathbf{e}_θ 、 \mathbf{e}_z 分别是径向变量 r 、角度方向变量 θ 、轴向变量 z 的单位向量; E_r 、 E_θ 、 E_z 是电场强度的柱坐标系下的3个分量; H_r 、 H_θ 、 H_z 是磁场强度的柱坐标系下的3个分量,它们都是变量 r 、 θ 、 z 函数。规定 \mathbf{e}_z 方向为纵向, \mathbf{e}_r 和 \mathbf{e}_θ 方向为横向。

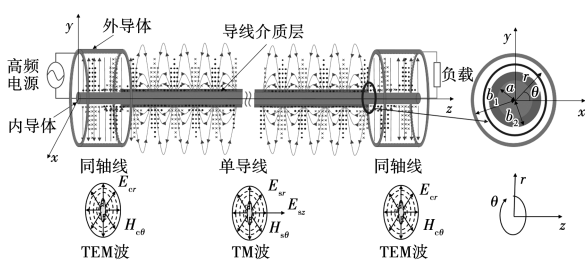


图3 单向单线电能传输系统雏形

Fig.3 Prototype of one-way single-wire power transfer system

首先,在图3电源端同轴线中产生电场和磁场是横向分布、互相垂直、没有纵向分量的横电磁波(transverse electromagnetic wave, TEM wave)。

同轴线内导体半径设定为 a , 外导体半径设定为 b_1 , 在同轴线内、外导体间是无源理想介质, 则传导电流密度 $\mathbf{J}_c = 0$, 自由电荷密度 $\rho_c = 0$, 则同轴线中的电磁场满足的麦克斯韦方程组为:

$$\left. \begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{E}_c &= 0; \\ \nabla \cdot \mathbf{H}_c &= 0; \\ \nabla \times \mathbf{E}_c &= -j\omega\mu_c \mathbf{H}_c; \\ \nabla \times \mathbf{H}_c &= j\omega\varepsilon_c \mathbf{E}_c. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: \mathbf{E}_c 和 \mathbf{H}_c 分别为同轴线内、外导体间传播的复

矢量电场强度和磁场强度; ε_c 和 μ_c 分别为同轴线内填充介质的介电常数和磁导率; $\omega = 2\pi f$ 为角频率。

由于同轴线结构关于 z 轴对称, 电磁场呈轴对称分布, 则 \mathbf{E}_c 和 \mathbf{H}_c 不随角度方向变量 θ 变化而变化, 由同轴线传播 TEM 波, 采用分离变量法解式(1)得:

$$\left. \begin{aligned} E_{cr} &= \frac{E_0}{r} e^{-j\beta_c z}, (a < r < b_1); \\ H_{c\theta} &= \frac{E_0}{Z_0 r} e^{-j\beta_c z}, (a < r < b_1); \\ E_{c\theta} &= 0; H_{cr} = 0; E_{cz} = 0; H_{cz} = 0, (a < r < b_1). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: E_{cr} 和 $H_{c\theta}$ 分别为同轴线中的径向电场分量和角度方向磁场分量, 都为横向分量; $E_0 = U/\ln(b_1/a)$ 为电源决定的幅值, U 为电源电压; $Z_0 = (\mu_c/\varepsilon_c)^{0.5}$ 为同轴线内、外导体间填充介质固有波阻抗; $\beta_c = \omega(\varepsilon_c\mu_c)^{0.5}$ 为相位常数。

由式(2)可知, 同轴线中只存在横向电场分量 E_{cr} 和横向磁场分量 $H_{c\theta}$, 其值大小均由电源电压 U 、同轴线结构参数 a 和 b_1 、介质参数 μ_c 和 ε_c 以及角频率 ω 决定, 即同轴线内的 TEM 波受电源、同轴线结构和填充介质的影响。

其次, 在图3单导线介质上引导传输横磁波(transverse magnetic wave, TM wave)。

单导线介质为覆盖介质层的理想导体, 设定单线的导体部分半径为 a , 覆盖介质层后单线整体的半径为 b_2 。单线上的电磁场仅存在于介质层 ($a < r < b_2$) 与空气中 ($r > b_2$), 由于传导电流密度 $\mathbf{J}_s = 0$, 自由电荷密度 $\rho_s = 0$, 可得单导线上的麦克斯韦方程组为:

$$\left. \begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{E}_s &= 0; \\ \nabla \cdot \mathbf{H}_s &= 0; \\ \nabla \times \mathbf{E}_s &= -j\omega\mu_s \mathbf{H}_s; \\ \nabla \times \mathbf{H}_s &= j\omega\varepsilon_s \mathbf{E}_s. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: \mathbf{E}_s 和 \mathbf{H}_s 分别为单线上传播的复矢量电场强度和磁场强度; ε_s 和 μ_s 分别为单线介质的介电常数和磁导率。

同样地, 由于单线结构关于 z 轴对称, \mathbf{E}_s 和 \mathbf{H}_s 不随角度方向变量 θ 变化而变化, 解式(3)得:

$$\begin{aligned}
 E_{sz} &= \begin{cases} [AJ_0(hr) + BY_0(hr)]e^{-j\beta_s z}, (a < r < b_2); \\ CK_0(pr)e^{-j\beta_s z}, (r > b_2); \end{cases} \\
 E_{sr} &= \begin{cases} -\frac{j\beta_s}{h}[AJ'_0(hr) + BY'_0(hr)]e^{-j\beta_s z}, (a < r < b_2); \\ \frac{j\beta_s}{p}[CK'_0(pr)]e^{-j\beta_s z}, (r > b_2); \end{cases} \\
 H_{s\theta} &= \begin{cases} -\frac{j\omega\epsilon_0\epsilon_r}{h}[AJ'_0(hr) + BY'_0(hr)]e^{-j\beta_s z}, (a < r < b_2); \\ \frac{j\omega\epsilon_0}{p}[CK'_0(pr)]e^{-j\beta_s z}, (r > b_2); \end{cases} \\
 E_{s\theta} &= 0; H_{sr} = 0; H_{sz} = 0, (r > a).
 \end{aligned} \quad (4)$$

式中: E_{sz} 为单导线介质轴向电场分量; E_{sr} 和 $H_{s\theta}$ 分别为单线径向电场分量和角度方向磁场分量; $J_0(hr)$ 、 $Y_0(hr)$ 、 $K_0(pr)$ 分别为 0 阶的柱贝塞尔函数、第二类柱贝塞尔函数、修正的柱贝塞尔函数; ϵ_r 为介质层的相对介电常数; ϵ_0 为真空中的介电常数; β_s 为相位常数; A 、 B 、 C 为电场强度和磁场强度幅值的待定系数, 根据边界条件而定; h 、 p 为待定系数, 根据两种相邻介质之间电场和磁场的衔接条件而定。

由式(4)可知, 空气中 ($r > b_2$) 的电场强度和磁场强度与径向变量 r 之间的关系满足修正的柱贝塞尔函数 $K_0(pr)$, 其随着 r 变大而快速变小, 因此, 电磁场主要集中在单线周围, 其坡印廷矢量 $\mathbf{S} = 0.5\text{Re}(\mathbf{E}_s \times \mathbf{H}_s^*)$ 也集中在单线周围, 电磁场的能量径向扩散范围很小, 即单线对电磁场具有束缚和单向引导作用。

最后, 图 3 中负载端与电源端的同轴线采用相同的结构, 根据互易定理可得, 它们有类似的电磁过程, 产生的是横电磁波, 不再赘述。

由上述单向单线电能传输系统电磁场分析可知, 电磁波在同轴线中以 TEM 波传输, 在单导线上以 TM 波传输。因为 TEM 波和 TM 波模式有所不同, 在发生模式转变时, 系统会出现电磁波模式转换损耗, 所以为了提升系统传输效率, 就必须降低电磁波模式转换损耗。基于此分析, 在同轴线和单导线之间设计了发射和接收的模式转换装置, 如图 4 所示, 模式转换装置与同轴线外导体连接, 等效让同轴线外导体半径渐近变大, 这使得电磁波模式平滑地进行了转换, 优化了电磁波在单导线上传输的初始状态, 从而达到降低电磁波转换损耗的目的。另外, 为进一步提升系统传输效率, 增加了阻抗匹配网络,

提升电源和负载的匹配度, 同时也增加整流器实现交流到直流的变换。

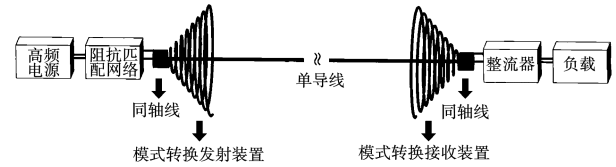


图 4 改进型单向单线电能传输系统结构

Fig. 4 Improved one-way single-wire power transfer system structure

本文提出了单向单线电能传输思想, 阐明了其传输机理, 解释了具体实现原理, 并提供一种改进型系统结构模型。下面将对结构进行具体设计, 并通过仿真与实验的方法对参数进行优化, 以期达到单向单线电能最佳传输效率。本文定义传输效率为负载接收的功率与电源发出的功率之比; 传输效率最大时的频率为系统的工作频率。

2 单向单线电能传输结构设计与优化

本文结构设计与优化整体思路围绕两个核心目标展开: 一是实现电能的高效单向传输, 减少能量的损失; 二是进一步研究模式转换装置结构参数与传输效率之间的关系, 提升系统的传输效率。

2.1 结构设计

在结构设计阶段, 本文聚焦于提升系统传输效率、减小装置空间占用以及降低装置制造加工难度, 在无模式转换装置基础上, 依次经喇叭结构、振子结构、螺旋线圈结构的多次迭代与优化, 通过对结构进行定量的对比研究, 最终确定了适合单线电能传输的模式转换装置。

从以上单线电能传输原理和结构分析可知, 系统的主要损耗包括 3 部分: 电源端同轴线与单导线介质电磁场模式转换损耗、单导线介质的传输损耗、单导线与负载端电磁场模式转换损耗。模式转换装置是结构设计的重要部分, 对于整个系统的高效工作至关重要, 因此该部分结构设计的核心任务是最大程度地降低电磁波模式转换过程中的损耗, 从而提高系统的整体性能。单向单线电能传输系统仿真模型如图 5 所示, 模式转换装置可以采用喇叭和振子两种结构, 而对于振子结构则可以考虑多振子和单振子结构。

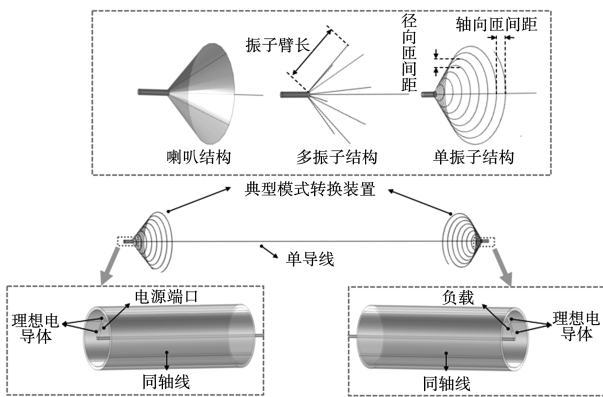


图5 单向单线电能传输系统仿真模型

Fig. 5 Simulation model diagram of one-way single-wire power transfer system

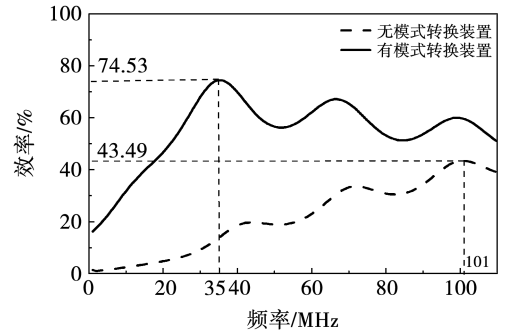
为了验证增加模式转换装置能够更高效地进行能量传输,对两种结构的单向单线电能传输进行了仿真:一种是无模式转换装置,另一种是带有喇叭结构的模式转换装置。在传输距离为5 m、不同频率(1~110 MHz)情况下,得到了如图6(a)所示的仿真结果。从图6(a)可以看出,增加了模式转换装置显著提高了传输效率。由于模式转换装置结构上的渐变,会使得电磁场在同轴线与单导线之间经过模式转换装置逐渐过渡,从而减小了电磁波转换损耗,有效提高传输效率。

为研究不同喇叭结构对模式转换效率的影响,对圆锥、角锥、开槽和片状等典型喇叭结构分别进行了仿真,得到图6(b)所示的在传输距离为5 m、不同频率(1~110 MHz)下,不同喇叭结构的传输效率的仿真结果。由图6(b)可知:4种喇叭结构的仿真结果曲线基本重合,即喇叭结构对模式转换效率的影响可以忽略。从开槽和片状喇叭结构不影响模式转换效率的结果,一方面可以找到材料的节省方案,另一方面进一步拓展开槽和片状喇叭结构就变成了多振子结构。

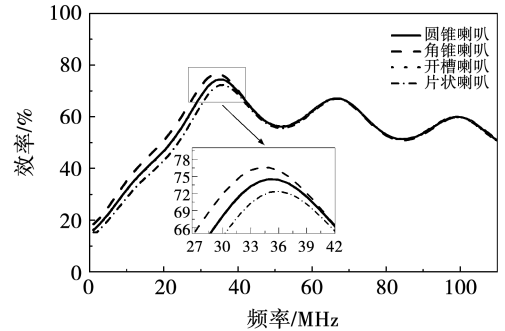
为研究振子结构中振子数量对模式转换效率的影响,对振子数量分别为2、4、8和12的多振子结构进行了仿真,得到其传输效率的对比曲线,如图6(c)所示。由图6(c)可知:随着振子数量的增加,系统的效率也相应提高,但是当振子数量增加到8和12时,它们的效率曲线趋于相似。

对于振子结构来说,减少其占用空间的有效方法是将振子盘绕起来,即得螺旋线圈结构。为对比

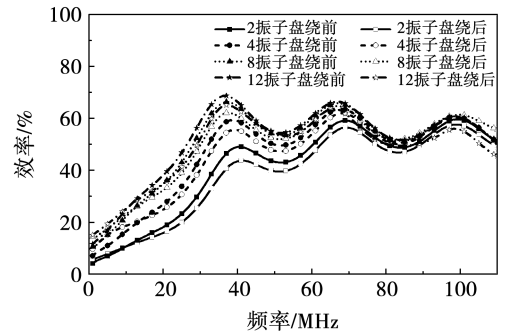
盘绕前后的传输效率,将前述2、4、8、12振子结构的振子盘绕成螺旋线圈,仿真得到如图6(c)所示传输效率结果。由图6(c)可知,振子盘绕后的传输效率与盘绕前相比略有降低,但是综合考虑占用空间与传输效率,选择将振子结构盘绕成螺旋线圈。



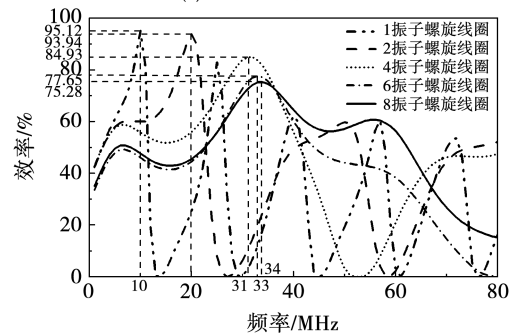
(a) 有无模式转换装置



(b) 不同喇叭结构



(c) 多振子及其盘绕结构



(d) 不同振子数量螺旋线圈

图6 不同频率下单向单线电能传输效率

Fig. 6 Transmission efficiency of one-way single-wire power transfer at different frequencies

螺旋线圈的设计、制造和加工难度与振子数量成正比,因此对比仿真研究了在保持振子总线长不变的情况下振子的数量对传输效率的影响。对振子数分别为 1(线长 10 m)、2(单线长 5 m,总线长 10 m)、4(单线长 2.5 m,总线长 10 m)、6(单线长 1.67 m,总线长 10 m)和 8(单线长 1.25 m,总线长 10 m)的螺旋线圈进行了仿真,得到如图 6(d)所示的在传输距离为 5 m,频率在 1~80 MHz 范围内不同振子数量螺旋线圈传输效率对比。由图 6(d)可知,1(单)振子螺旋、2 振子螺旋、4 振子螺旋、6 振子螺旋、8 振子螺旋线圈在 10、20、32、33、34 MHz 频率下的效率最高,分别达到了 95.12%、93.94%、84.93%、77.65%、75.28%。这表明随着振子数量的减少,螺旋线圈的传输效率的最大值逐渐增加,其中单振子螺旋具有更好的传输性能。

综上所述,喇叭结构、振子结构和螺旋线圈结构都能实现单向单线电能传输,但是综合对比和考虑,选定单振子螺旋线圈作为模式转换装置是最佳方案。为充分发挥单振子螺旋线圈的作用,提高单向单线电能传输的效率,尚需对该结构进行参数的优化设计。

2.2 单振子螺旋线圈参数优化

在对单振子螺旋线圈的性能进行参数优化时,本文首先提炼出代表性结构参数,然后运用控制变量法,定量研究它们与系统传输效率之间的关系,从而提升单振子螺旋线圈的传输效率。

单振子螺旋线圈的结构参数很多,具体包括匝数、径向匝间距、轴向匝间距、线圈线长、螺旋高度以及螺旋角度等。螺旋线圈的结构参数相互耦合,对于性能的影响也是相互交叉的,因此有必要对螺旋线圈的参数进行解耦。本文最终确定了以径向匝间距、轴向匝间距和线圈线长 3 个参数作为螺旋线圈的代表性结构参数,3 个参数相对独立,并可以此完全确定螺旋线圈的结构。

下面将分别对径向匝间距、轴向匝间距和线圈线长 3 个参数进行仿真分析,以期确定结构参数对单向单线电能传输性能的影响,并为系统结构的设计与优化提供理论依据。

首先,为研究线圈线长对传输性能的影响,采用控制变量法令轴向和径向匝间距保持恒定(径向匝

间距 = 轴向匝间距 = 0.04 m),分别在 10、20、50、100 m 4 个不同传输距离下,对不同线圈线长的单振子螺旋线圈结构进行了建模和仿真,得到如图 7 所示的线圈线长与工作频率和传输效率的关系。

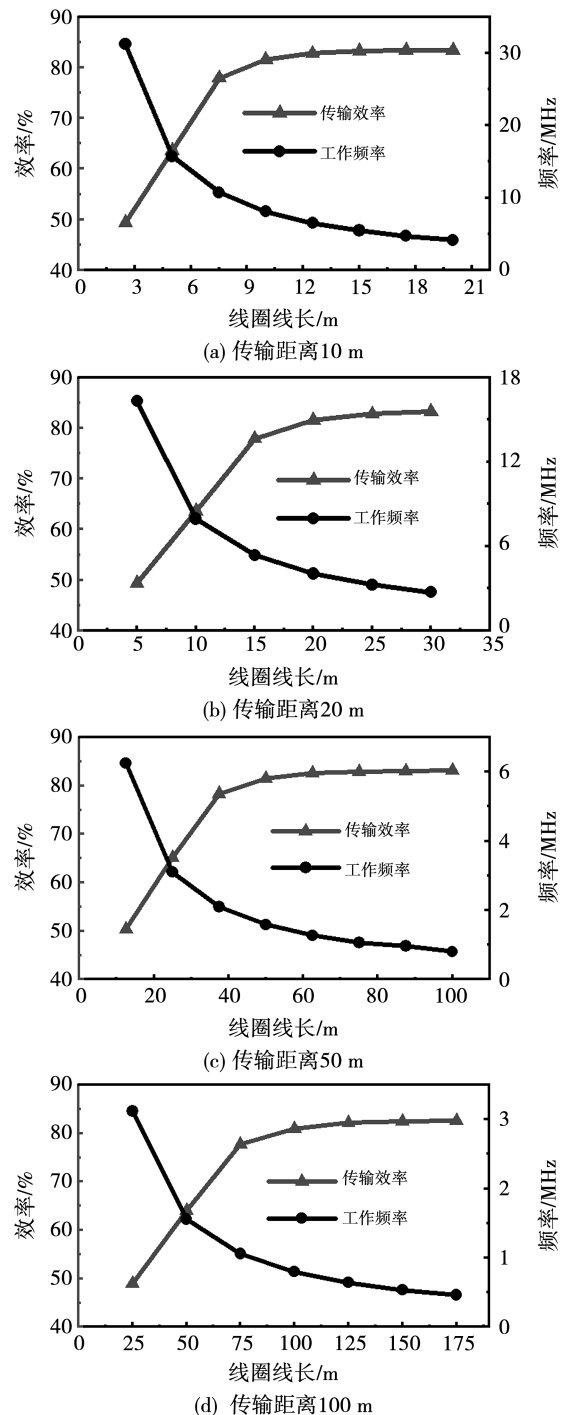


图 7 线圈线长与工作频率和传输效率的关系

Fig. 7 Wire length of coil in relation to operating frequency and transmission efficiency

由图 7 可知,随着线圈线长的增加,其传输效率

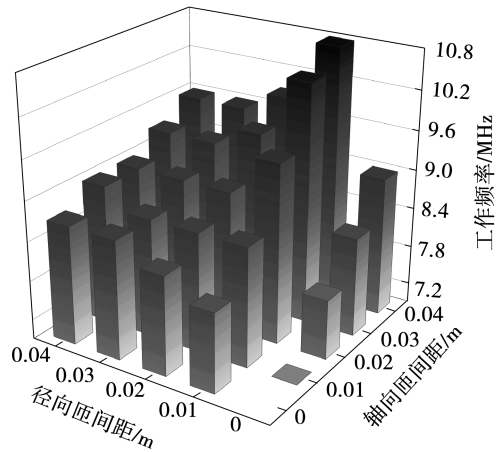
逐渐上升,工作频率逐渐下降;当线圈线长增加到一定程度后,线圈线长增加对于系统传输效率的提升不再有明显效果。

其次,保持线圈线长 10 m 恒定,在传输距离为 10 m 情况下,研究轴向匝间距和径向匝间距对工作频率和传输效率的影响。在轴向匝间距分别为 0、0.01、0.02、0.03 和 0.04 m 情况下,改变径向匝间距(0、0.01、0.02、0.03 和 0.04 m),仿真得到如图 8 所示的轴向和径向匝间距与工作频率和传输效率的关系。

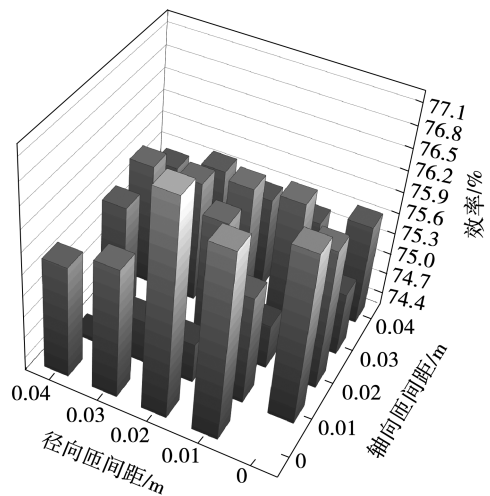
由图 8(a)可知,改变轴向匝间距和径向匝间距对工作频率有一定的影响,按照本文所选参数,得到的最高工作频率为 10.8 MHz,最低工作频率为 6.9 MHz。由图 8(b)可知,改变轴向匝间距和径向匝间距对传输效率有一定的影响,按照本文所选参数,得到的最高传输效率为 77.22%,最低传输效率为 74.28%。整体而言,改变轴向匝间距和径向匝间距对工作频率的影响较大,而对传输效率影响较小。线圈匝间距的改变,主要影响到线圈的分布参数,而分布参数影响到谐振频率,因此,线圈匝间距的改变主要影响工作频率。

3 实验研究

为了验证本文提出的单向单线电能传输方法的可行性以及结构、参数设计优化的合理性和正确性,搭建了如图 9 所示的实验系统。



(a) 轴向和径向匝间距与工作频率的关系



(b) 轴向和径向匝间距与传输效率的关系

图 8 轴向和径向匝间距与工作频率和传输效率的关系
Fig. 8 Axial and radial turn pitch in relation to operating frequency and transmission efficiency

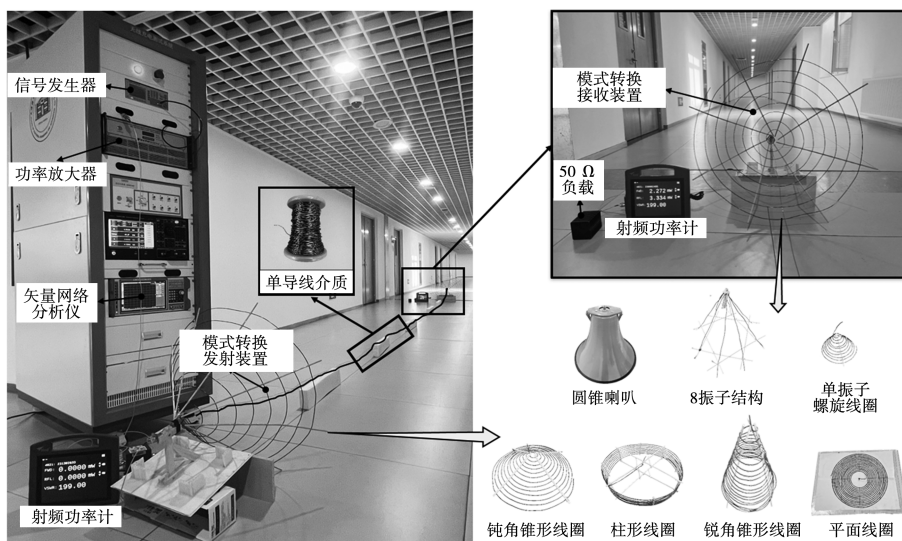


图 9 单向单线电能传输实验系统

Fig. 9 Experimental system for one-way single-wire power transfer

实验场地选定于实验楼内的空旷走廊区域,该区域空间开阔,能够满足 10 m 的单导线维持相对平直或呈现微小弯曲状态,实验系统远离大体积金属异物。采用信号发生器和功率放大器作为高频电源,电源电压设定为 100 V,功率为 50 W,采用射频功率计测量负载接收的功率,实验系统的具体参数详见表 1。

表 1 系统实验及仿真参数

Table 1 System parameters for experiment and simulation

参数	仿真	实验
高频电源电压/V	100	100
电源发射功率/W	50	50
负载/ Ω	50	50
单导线线径/m	0.002	0.002
振子结构线径/m	0.002	0.002
螺旋线圈线径/m	0.002	0.002
圆锥喇叭结构口径/m、长度/m	0.6、0.3	0.6、0.3
8 振子结构单根振子长/m	0.425	0.425
单振子螺旋线圈线长/m	3.4	3.4
钝圆锥形线圈线长/m	10	10
锐圆锥形线圈线长/m	10	10
柱形线圈线长/m	10	10
平面线圈线长/m	10	10

3.1 结构对比实验

为了验证增加模式转换装置能有效提高传输效率以及对比不同模式转换装置结构的传输效率,发射功率保持 50 W 恒定不变,选择口径为 0.6 m 且长度为 0.3 m 圆锥喇叭、单根振子长 0.425 m 的 8 振子结构及其振子盘绕后结构、线圈线长为上述 8 振子结构振子总长度 3.4 m 的单振子螺旋线圈,在传输距离为 5 m 情况下进行实验,得到如图 10 所示在不同频率(1 ~ 50 MHz)下的不同模式转换装置的传输效率的实验与仿真对比结果。

由图 10 可知,实验中无模式转换装置的工作频率为 44.225 MHz,传输效率为 17.96%;圆锥喇叭的工作频率为 36.770 MHz,传输效率为 70.79%;8 振子结构的工作频率为 37.505 MHz,传输效率为 62.07%;8 振子结构盘绕后的工作频率为 39.955 MHz,传输效率为 58.68%;单振子螺旋线圈工作频率为 24.765 MHz,传输效率为 76.99%。相比于无模式转换装置,增加圆锥喇叭、8 振子结构及其振子盘绕

后结构或者单振子螺旋线圈均提高了传输效率,这充分证明了在单向单线电能传输系统中增加模式转换装置的必要性及其对提高效率的积极作用;单振子螺旋线圈的工作频率最低,传输效率最高,在上述结构中是单向单线电能传输最适合的。

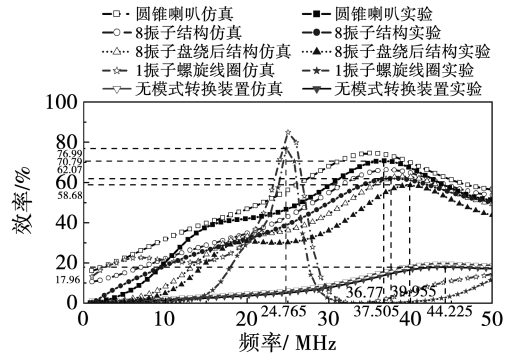


图 10 不同模式转换装置传输效率

Fig. 10 Transmission efficiency of different mode conversion devices

3.2 参数优化实验

首先,为验证线圈线长对系统的工作频率和传输效率的影响,发射功率保持 50 W 恒定不变,保持轴向和径向匝间距均为 0.04 m,绕制了线圈线长分别为 5、10 和 20 m 的单振子螺旋线圈,在传输距离 10 m 情况下进行实验,得到如图 11 所示在不同频率下(1 ~ 50 MHz)的线圈线长与传输效率的关系的实验与仿真对比结果。

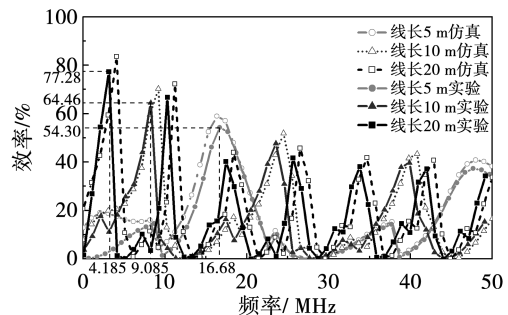


图 11 线圈线长与传输效率的关系

Fig. 11 Coil length in relation to transmission efficiency

由图 11 可知,在线圈线长分别为 5、10、20 m 时,传输效率最大值分别为 54.30%、64.46%、77.28%,对应的工作频率分别为 16.68、9.085、4.185 MHz。表明随着线圈线长的增加,传输效率在逐渐提高,工作频率在逐渐降低。

其次,为验证轴向和径向匝间距对工作频率和传输效率的影响,发射功率保持 50 W 恒定不变,保持线圈线长为 10 m,绕制了 4 种具有代表性的匝间距不同的螺旋线圈结构:钝角锥形线圈、柱形线圈、锐角锥形线圈以及平面线圈,匝间距参数如表 2 所示,在传输距离 10 m 情况下进行实验,得到如图 12 所示在不同频率下(1 ~ 13 MHz)的轴向和径向匝间距与传输效率的实验与仿真对比结果。

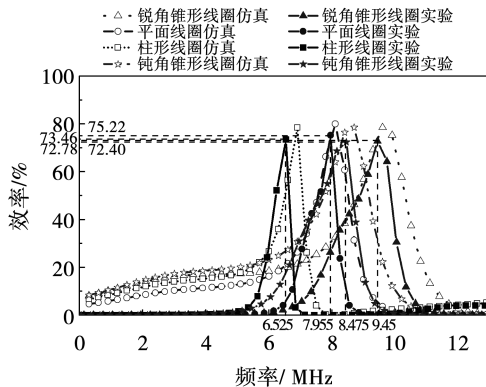


图 12 轴向和径向匝间距与传输效率的关系

Fig. 12 Axial and radial turn pitch in relation to transmission efficiency

由图 12 可知,实验中钝角锥形、柱形、锐角锥形和平面螺旋线圈结构的传输效率和对应的工作频率如表 2 所示。

表 2 不同匝间距线圈工作频率与传输效率

Table 2 Working frequency and transmission efficiency of coils with different turn spacing

线圈类型	径向匝间距/m	轴向匝间距/m	工作频率/MHz	传输效率/%
钝角锥形	0.02	0.01	8.475	72.40
柱形	0	0.01	6.525	73.46
锐角锥形	0.01	0.02	9.450	72.78
平面	0.01	0	7.955	75.22

由表 2 可知,这 4 个线圈的工作频率的最大相差 2.925 MHz,传输效率最大相差 2.82%,因此,轴向和径向匝间距对工作频率影响较大而对传输效率的影响较小。

4 结论

针对传统上单线电能传输技术安全隐患高的问

题,提出了一种新型单线电能传输方法和具体的实现结构。同时通过仿真和实验研究,对单向单线电能传输系统的结构进行了设计,实现了电能仅利用单根导线无回路传输。通过参数解耦方法对单向单线电能传输结构参数进行了仿真和实验研究,其结论如下:

1) 基于电偶极子振荡和非辐射远距离传输的思想,通过传输介质对电磁场的束缚与导引技术,提出了单向单线电能传输方法,构建了以电源、阻抗匹配、模式转换装置、单导线介质与整流器为核心的新型传输结构,实现了电能的单向单线传输。本文的单向单线电能传输方法由于不依赖电流回路,也不是靠升压解决位移电流,因此从传输原理角度避免高电压带来的电场辐射问题。

2) 设计了模式转换装置的结构,相比于无模式转换装置的单向单线电能传输系统传输效率更高,结构对比实验表明,在电源功率为 50 W,传输距离为 5 m 时,单振子螺旋线圈作为模式转换装置表现最佳,传输效率高达 76.99%。相比其他装置(如圆锥喇叭 62.07%、8 振子结构 62.07%、盘绕后 8 振子结构 58.68%),单振子螺旋线圈传输效率最高,更适合作为单向单线电能传输的模式转换装置。

3) 单振子螺旋线圈的结构主要由径向匝间距、轴向匝间距以及线圈线长决定。实验数据表明,在电源功率为 50 W,传输距离为 10 m 时,随着线圈线长的增加(从 5 m 到 20 m),传输效率显著提升(从 54.30% 到 77.28%),同时工作频率逐渐降低(从 16.68 MHz 到 4.185 MHz)。可见线圈线长的增加有助于提升传输效率,降低工作频率;轴向和径向匝间距的变化对工作频率影响较大,对传输效率的影响不明显。

参考文献:

- [1] SHU X, ZHANG B. Single-wire electric-field coupling power transmission using nonlinear parity-time-symmetric model with coupled-mode theory[J]. *Energies*, 2018, 11(3): 532.
- [2] BANK M, TSINGAUZ V. One wire is always better[J]. *Engineering*, 2021, 13(6): 300.
- [3] 陈希有, 韩守鹏, 齐琛, 等. 用准静态谐振腔实现自由空间无线电能传输[J]. *电机与控制学报*, 2023, 27(3): 69.
CHEN Xiyu, HAN Shoupeng, QI Chen, et al. Freedom spatial wireless power transmission using quasi-static resonant cavity[J]. *Electric Machines and Control*, 2023, 27(3): 69.

- [4] ZHANG Fei, GUO Jing, WANG Jingming, et al. Research on the efficiency of single-wire power transmission[C]//2nd International Conference on Electrical Technology and Automatic Control (ICE-TAC 2021), October 22–24, 2021, Chongqing, China. 2021: 12010.
- [5] CHEN X, LI T, LANG Z, et al. A single-wire power transfer system using lumped-parameter LC resonant circuits[C]//2020 IEEE 9th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2020 – ECCE Asia), November 29, 2020, Nanjing, China. 2020: 1098–1103.
- [6] ZOU L J, HU A P. A contactless single-wire CPT (capacitive power transfer) power supply for driving a variable message sign [C]//2018 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (Wow), June 3–7, 2018, Montreal, QC, Canada. 2018: 1–5.
- [7] TESLA N. System of transmission of electrical energy: 645576 [P]. March 20, 1900.
- [8] TESLA N. World system of wireless transmission of energy[J]. Telegraph and Telephone Age, 1927, 1(20): 457.
- [9] STREBKOV D S, AVRAMENKO S, NEKRASOV A. Single-wire electric power system for renewable-based electric grid[J]. New energy technologies magazine, 2001, 1(1): 21.
- [10] ДС Стеревлюков, 王晓玲. 农村地区单导线输电系统[J]. 农村电气化, 2001, 1(6): 49.
STREBKOV D S, WANG Xiaoling. Single wire transmission system used for rural areas[J]. Rural Electrification, 2001, 1(6): 49.
- [11] LEYH G E, KENNAN M D. Efficient wireless transmission of power using resonators with coupled electric fields [C]//2008 40th North American Power Symposium, September 28–30, 2008, Calgary, AB, Canada. 2008: 337–340.
- [12] VAN NESTE C W, MAHAJAN S M. Wireless reactive power transfer for off-shore energy harvesting [C]//2009 International Conference on Clean Electrical Power, June 9–11, 2009, Capri, Italy. 2009: 504–506.
- [13] VAN NESTE C W, HAWK J E, PHANI A, et al. Single-contact transmission for the quasi-wireless delivery of power over large surfaces[J]. Wireless Power Transfer, 2014, 1(2): 75.
- [14] VAN NESTE C W, HULL R, HAWK J E, et al. Electrical excitation of the local earth for resonant, wireless energy transfer[J]. Wireless Power Transfer, 2016, 3(2): 117.
- [15] NIEMAN B T, PEARCE M G S, JOHNSON C S, et al. Through-soil long range wireless power transfer [C]//2022 Wireless Power Week (WPW), July 5–8, 2022, Bordeaux, France. 2022: 372–377.
- [16] 樊京, 余发山, 张刚, 等. 无线电能传输中值得注意的两个基本物理学问题[J]. 电工技术学报, 2013, 28(S2): 61.
- FAN Jing, YU Fashan, ZHANG Gang, et al. Two fundamental physics issues need paying great attention in wireless power transmission [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(S2): 61.
- [17] 张泽然, 陈希有, 周宇翔, 等. 单线电能传输的实验研究 [J]. 电工电能新技术, 2016, 35(10): 69.
ZHANG Zeran, CHEN Xiyou, ZHOU Yuxiang, et al. Experimental research of single line power transmission[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2016, 35(10): 69.
- [18] 陈希有, 陈建辉, 牟宪民, 等. 空间电场耦合单线电力传输: 仿真、理解与构建 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(19): 5749.
CHEN Xiyou, CHEN Jianhui, MU Xianmin, et al. Single-wire power transmission based on spatial electric field coupling: simulation, understanding and construction [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(19): 5749.
- [19] JIN X, CHEN X, QI C, et al. Investigation on the electromagnetic surface waves for single-wire power transmission[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(3): 2497.
- [20] JIN X, CHEN X, QI C, et al. Modeling and construction of single-wire power transmission based on multilayer tesla coil [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(5): 6682.
- [21] LIU G, ZHANG B. Analytical model of a 25–50 m robust single-wire electric-field coupling power transfer system using a limiter[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2019, 66(6): 978.
- [22] LI Y, HU T, WANG X, et al. Design and optimization of novel transceiver device for one-way single-wire power transfer [J]. Journal of Power Electronics, 2023, 23(1): 1594.
- [23] LI Y, ZHAI Y, LI Y, et al. Single-wire power transfer method and verification [J]. Journal of Power Electronics, 2022, 22(4): 685.
- [24] LI Y, WANG R, ZHAI Y J, et al. A novel single-wire power transfer method for wireless sensor networks [J]. Energies, 2020, 13(19): 5182.
- [25] 李阳, 李焱, 王瑞, 等. 无线传感器网络单线电能传输系统的电磁安全性分析[J]. 电工技术学报, 2022, 37(4): 808.
LI Yang, LI Yao, WANG Rui, et al. Electromagnetic safety analysis on single wire power transfer system based on wireless sensor networks[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(4): 808.
- [26] LI Y, HUANG W, CHEN Y, et al. Study on the media characteristics of single-wire power transfer system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(10): 11974.

(编辑:朱美华)