

磁耦合谐振式超导无线输电效率分析

邹谭圆, 代 朋, 盛 鑫, 郭艳群, 蔡传兵

(上海大学 理学院物理系, 上海 200444)

摘 要: 文章提出一种超导-铜磁耦合谐振式无线输电系统, 其发射线圈采用超导材料、接收线圈采用铜材料, 具有较高的无线输电系统传输效率。首先分析了磁耦合谐振式无线输电原理; 接着测量超导线圈电阻和铜线圈电阻并计算分析系统品质因数随频率变化关系; 最后对超导-铜磁耦合谐振式无线输电系统的传输效率进行实验测量, 并以常规铜线圈作为对照组, 分析了系统传输效率随轴向偏移和径向偏移距离变化的关系。实验结果表明通过应用超导线圈可显著提高系统传输效率, 与铜无线输电系统相比, 超导无线输电系统在轴向偏移时至少有 12.4% 的效率提升, 在径向偏移时至少有 11.3% 的效率提升; 而在短距离径向偏移 (1~4 cm) 时, 超导无线输电系统的传输效率几乎不变, 这些性能表现预示着磁耦合谐振式超导无线输电系统在电动汽车或交通领域有广阔的前景。

关键词: 超导; 无线电能传输; 电动汽车; 磁共振

中图分类号: TM724

文献标识码: A

文章编号: 2096-5427(2020)03-0040-05

doi:10.13889/j.issn.2096-5427.2020.03.008

Efficiency Analysis of Magnetically Coupled Resonant Superconducting Wireless Power Transfer System

ZOU Tanyuan, DAI Peng, SHENG Xin, GUO Yanqun, CAI Chuanbing

(Department of Physics, College of Sciences, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: It proposed a superconducting-copper magnetic coupling resonant wireless power transfer (WPT) system. The transmitting coil uses superconducting materials and the receiving coil uses copper materials, which makes the WPT system have high transfer efficiency. Firstly, the principle of magnetically coupled resonant WPT was analyzed, then the resistance of superconducting coil and copper coil was measured and the relationship between quality factor and frequency was calculated and analyzed. Finally, the transfer efficiency of superconducting-copper magnetically coupled resonant WPT system was experimentally measured, and using the conventional copper coil as a control group, the relationship between transfer efficiency and axial or radial offset distance was analyzed. Experimental results show that application of superconducting coils can significantly improve transfer efficiency of system; compared with the copper WPT system, the superconducting WPT system has an efficiency improvement of at least 12.4% during axial offset, an efficiency increase of at least 11.3% during radial offset. The transfer efficiency of the superconducting WPT system is almost unchanged when the radial distance is short (1~4 cm), and these performances indicate that the magnetic coupling resonance superconducting WPT system has broad prospects in the field of electric vehicles or transportation.

Keywords: superconductivity; wireless power transfer; electric vehicle; magnetic resonance

0 引言

无线电能传输是一种不使用导线连接就能实现能量

传输的技术。早在 1890 年, 特斯拉^[1]就提出了无线电能传输的构想, 尽管当时未能实现, 但为该技术的发展起到了良好的启头作用。在随后 100 多年里, 世界各国的科研工作者们相继进行了相关研究并取得了较大突破性发展。2007 年, 麻省理工学院 (MIT) 的研究人员利用磁耦合谐振式无线输电系统成功点亮了一盏距离电源

收稿日期: 2019-09-23

作者简介: 邹谭圆 (1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为超导无线输电。

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFF0101701); 中科院先导专项 (XDB25000000)

2 m 的灯泡^[2]，这将无线输电技术研究推向一个新高潮。相比有线电能传输，无线电能传输能够实现能量的隔空传递，避免了导线的连接和接头的插拔，极大地提高了使用的便利性。如今，该项技术已渗透到许多领域，具有广泛的应用前景，如日常生活中使用的电动牙刷、无线充电智能手机^[3]以及无尾电器^[4]，医疗上的起搏器^[5]、植入传感器^[6]，交通领域里的电动汽车^[7]、轨道列车无线供电^[8]等。

目前在交通领域，常见的轨道交通列车和电动汽车均以有线连接方式为设备供电或充电。由于存在插头、电缆线老化以及使用环境等影响因素，在一定程度上影响了有线电能传输的安全性和便利性；而无线电能传输刚好能弥补有线电能传输的这些劣势，从而提高系统的安全性和便利性^[9]。适用于电动汽车的无线输电系统通常需要几十千瓦级的输出功率，对应的线圈中会输入大电流；而常规无线输电系统中，铜线圈的损耗随着电流的增大而二次方地增加，且输入更大电流也需要更多材料来载流，导致线路传输效率的降低和线缆及接头体积的增加。铜线圈限制了无线电能传输在大功率应用领域的发展，因此亟须一种损耗更小、载流密度更高的材料来取代铜材料；而超导材料具有载流密度高及直流环境下无电阻、交流环境下小损耗的优势，刚好能够弥补铜材料在大功率应用场景下的劣势，因此线圈部分使用超导材料能够提升无线电能传输系统的性能。

针对电动汽车，本文提出一种超导-铜磁耦合谐振式无线输电系统（其发射线圈采用超导材料，接收线圈采用铜材料），设立了铜-铜无线输电系统（其发射线圈和接收线圈均使用铜材料）对照组，对比分析了两组系统在轴向偏移和径向偏移时的传输效率。

1 磁耦合谐振式无线输电原理

常见的无线电能传输方式有3种：微波辐射式、电磁感应式以及磁耦合谐振式。微波辐射式传输距离远，但线圈需要对准，系统传输效率低。电磁感应式传输效率高，但传输距离较近（不超过10 cm）。磁耦合谐振式是在2007年由MIT的研究人员提出，相对于微波辐射式系统其传输效率更高，相比电磁感应式系统其传输距离更远，目前在中距离传输领域应用较多。针对电动汽车，本文采用磁耦合谐振式无线输电系统。

1.1 电动汽车无线充电介绍

电动汽车无线充电系统一次侧线圈和供电装置被置于地下，其将市电转化为高频交流电供给发射线圈并被

位于车内的接收线圈接收，经整流变换为直流电后向电池充电^[10]（图1）。

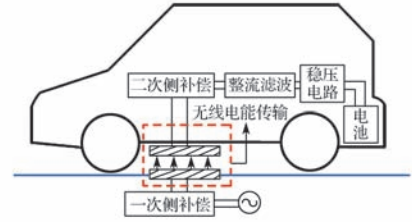


图1 电动汽车无线充电示意

Fig. 1 Schematic diagram of wireless charging for electric vehicles

1.2 磁耦合谐振式无线输电原理

磁耦合谐振式无线输电系统基本电路如图2所示。图中， U_{in} 为高频电源的输出电压； L_1 、 R_1 和 C_1 分别为发射线圈的电感、内阻和串联电容； L_2 、 R_2 和 C_2 分别为接收线圈的电感、内阻和串联电容； M 为互感。

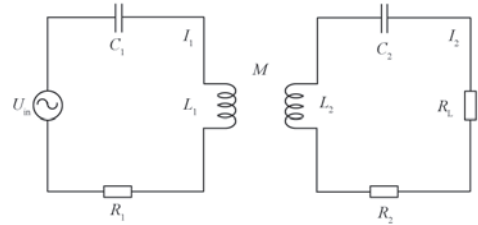


图2 磁耦合谐振式无线输电基本电路

Fig. 2 Basic circuit of magnetically coupled resonant wireless power transfer

当发射线圈和接收线圈发生串联谐振时，整个回路的等效阻抗最小、流过的电流最大、传输效率最高、能量在2个线圈间进行高效地传输^[11]，此时高频电源的角频率 ω 与线圈回路的固有谐振频率相等：

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}} \quad (1)$$

在该输电系统中， Z_i 为系统一次侧和二次侧的等效阻抗（ $i=1$ 为一次侧， $i=2$ 为二次侧）， U 为输入电压相量， I_1 和 I_2 分别为发射线圈和接收线圈的电流相量。基于基尔霍夫定律对电路，整个传输系统的电路方程为

$$\begin{pmatrix} U \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_1 & j\omega M \\ j\omega M & Z_2 + R_L \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中： $Z_i = R_i + j\omega L_i + \frac{1}{j\omega C_i}$ ， $i=1, 2$ 。

当系统处于谐振状态时，等效阻抗的虚部为0，对外表现为纯阻态。根据式（1）和式（2）可求得系统的输入阻抗 Z_{in} 、输出功率（负载功率） P_L 和电源的输入功率 P_{in} ：

$$Z_{in} = R_1 + \frac{(\omega R)^2}{R_2 + R_L} \quad (3)$$

$$P_{in} = \frac{U_{in}^2}{R_{in}} = \frac{U_{in}^2 (R_2 + R_L)}{R_1 (R_2 + R_L) + (\omega M)^2} \tag{4}$$

$$P_L = I_2^2 R_L = \frac{U_{in}^2 (\omega M)^2 R_L}{[R_1 (R_2 + R_L) + (\omega M)^2]^2} \tag{5}$$

式中： R_L ——负载电阻。

无线电能传输系统的传输效率为输出功率 P_L 与输入功率 P_{in} 之比：

$$\eta = \frac{P_L}{P_{in}} = \frac{(\omega M)^2 R_L}{(R_2 + R_L) [R_1 (R_2 + R_L) + (\omega M)^2]} \tag{6}$$

电源角频率 ω 和负载电阻 R_L 为定值，当 M 确定时，由式（6）可以看出，传输效率 η 仅与线圈的阻值（ R_1 和 R_2 ）有关系，即线圈的阻值大小直接影响系统的传输效率。当超导线圈仅作为发射线圈时， R_1 值显著降低， η 则得以提升；如果将一次侧和二次侧线圈都采用超导材料代替，那么系统中的线圈阻值（ R_1 和 R_2 ）均会降低且趋近于 0，系统的传输效率则趋近于 1。由此可见，超导材料被用于无线电能传输系统时，由于其低电阻的性能优势，能够提高系统的传输效率，从而提升系统性能^[12]。

2 超导线圈和铜线圈测量性能比较

线圈的电阻和品质因数是影响无线输电系统性能的重要因素。通过测量超导线圈和铜线圈的电阻和品质因数，可以定量对比两组线圈的基础性能，以便后续对系统传输效率进行比较分析。其中，线圈匝数为 10.5 匝，半径为 8 cm。

2.1 线圈阻值

利用桥式 LCR 测量仪直接测量线圈的参数。图 3 示出超导线圈和铜线圈在 1~200 kHz 时线圈电阻随频率的变化关系，两组线圈均有 15 cm 左右的铜引线。可以看出，超导线圈电阻一直维持在较小值范围，而铜线圈的电阻随着频率的升高而显著增大。当频率为 200 kHz 时，超导线圈阻值为 0.49 Ω ，而铜线圈阻值为 1.57 Ω ，比超导线圈阻值大 2 倍多。

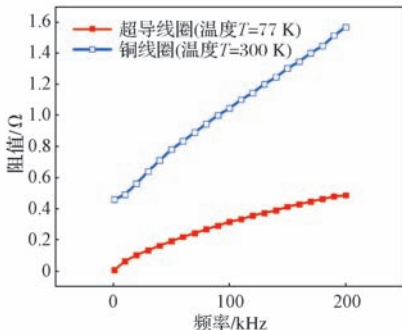


图 3 线圈电阻随频率变化关系
Fig. 3 Coil resistance as a function of frequency

2.2 线圈品质因数

线圈的品质因数是衡量无线输电系统中线圈性能的重要参数之一，具体计算如下：

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{\omega L}{R} = \frac{2\pi f L}{R} = 2\pi f \frac{E_s}{E_l} \tag{7}$$

式中： E_s ——存储的能量； E_l ——损耗的能量。

品质因数越高，存储能量与损耗比则越高，意味着线圈性能越佳，越能实现更高的传输效率。图 4 示出超导线圈和铜线圈的品质因数与频率变化关系，可以看出，超导线圈的品质因数在全频率范围内均高于铜线圈的；在频率为 200 kHz 时，超导线圈的品质因数为 136.49，铜线圈的品质因数为 44.21，超导线圈的品质因数约为铜线圈的 3 倍。

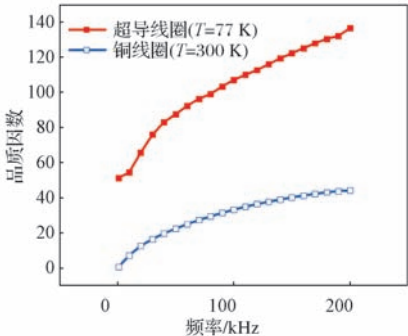


图 4 线圈品质因数随频率变化关系
Fig. 4 Coil quality factor as a function of frequency

3 无线输电实验

线圈电阻和品质因数测量结果表明，超导线圈比铜线圈具有更优异的基础性能。下面分别对铜-铜无线输电系统和超导-铜无线输电系统进行无线输电性能实验（实验参数如表 1 所示），测量系统在轴向偏移和径向偏移时的传输效率，同时对两组系统在同等实验条件下的性能进行比较。

表 1 无线输电实验参数

Tab. 1 Wireless transmission experimental parameters

参数	数值
逆变器频率 /kHz	199
逆变器功率 /W	100
铜带（宽 × 厚）/mm × mm	4 × 0.1
超导带（宽 × 厚）/mm × mm	4 × 0.1
线圈匝数 / 匝	10.5
线圈半径 /cm	8
线圈电感 /μH	51.2
串联电容 /μF	0.012 5

3.1 实验装置

无线电能传输实验装置包括直流电源、高频逆变器、接收线圈、发射线圈、负载及示波器等。图 5 所示为铜-铜无线电能传输实验装置实物图。直流电源输出经过高频逆变器逆变为高频交流电供给一次侧线圈，

然后能量经一次侧与二次侧线圈之间的磁耦合进行传递，最后供给负载电阻。负载与电源的电压、电流由示波器测量。

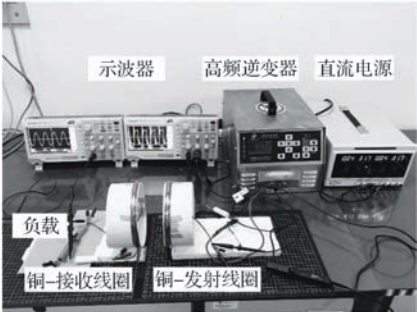


图 5 常规无线输电实验实物图
Fig. 5 Practical picture of conventional wireless transmission experiment

超导-铜无线电能传输实验实物如图 6 所示。为使超导线圈处于低温环境，将超导线圈置于泡沫箱中并在泡沫箱中加入液氮，使温度为 77 K。

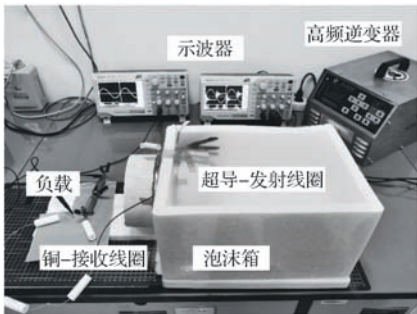


图 6 超导无线输电实验实物图
Fig. 6 Practical picture of superconducting wireless transmission experiment

受实验条件限制，本实验所选择的工作频率为 199 kHz，按 100 W 功率级别进行实验。由于绕制完成后线圈电感为定值，可通过选择不同容值的串联电容器来调整固有频率，利用式 (1) 计算选择合适的串联电容值。

3.2 传输效率

3.2.1 轴向偏移时传输效率

在发生偏移时，系统中的互感 M 会发生改变，由式 (6) 可以发现，这会引起效率的变化，两组系统的传输效率均随着轴向距离的增加而减小。图 7 示出超导-铜和铜-铜无线电能传输系统在 100 W 输入功率下传输效率随轴向距离变化的曲线。可以看出，在轴向距离为 4 cm 时，两组系统的传输效率均达到最高值，铜-铜无线电能系统的传输效率为 76.5%，而超导-铜无线电能系统的传输效率达到 89.7%，比铜-铜系统的高 13.2%，超导无线电能系统相比铜无线电能系统性能优异是因为其具有更低的阻值和更高的品质因数。随着轴向偏移的增大，传输效

率一直在降低，而效率差 $\Delta\eta$ 则基本保持平稳，并在 7 cm 时达到峰值，为 15.5%。在本实验中，超导-铜系统对比铜-铜传输系统在全距离范围内有 12.4%~15.5% 的效率提升。

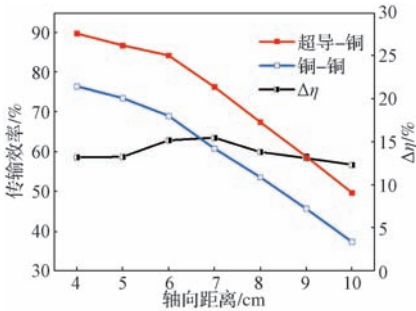
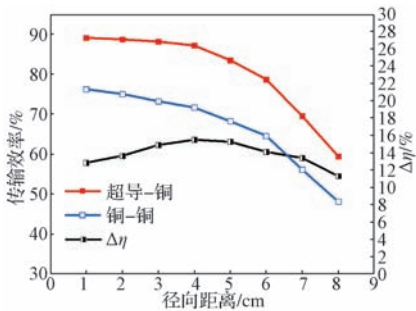


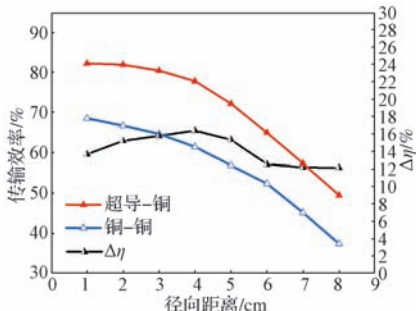
图 7 传输效率随轴向偏移变化关系
Fig. 7 Transmission efficiency varying with axial offset

3.2.2 径向偏移时传输效率

图 8 为超导-铜和铜-铜两组系统在固定轴向距离条件下，传输效率随径向距离变化的曲线。与轴向偏移一样，径向偏移也引起 M 的变化，导致系统效率变化。不同的是，在进行径向偏移时，初始阶段 (1~4 cm) 传输效率趋于平缓，从式 (6) 可以发现，此时 M 变化不明显；当偏移距离大于 4 cm 时，偏移会引起较明显的效率变化，变化趋势与轴向偏移的类似。在整个过程中，效率差 $\Delta\eta$ 在 11.3%~16.4% 范围内变化。



(a) 轴向距离为 4 cm 时



(b) 轴向距离为 6 cm 时

图 8 传输效率随径向偏移变化关系
Fig. 8 Transmission efficiency varying with radial offset

通过径向偏移实验结果可以看出，超导-铜系统在发生线圈径向偏移时表现更为优异。在本文实验中，超导-铜系统在 4 cm 和 6 cm 固定轴向距离时进行径向偏移，其传输效率差在 11.3%~16.4% 范围内；且在短距

离径向偏移时, 超导-铜系统的传输效率降低得很少, 这在实际场景中有很大的实用性。

4 结语

降低线圈电阻可以提高无线电能传输系统的传输效率, 而超导材料的低电阻正好可达到该技术要求。本文针对电动汽车用磁耦合谐振式超导无线输电系统, 通过具体实验得出以下结论:

(1) 线圈偏移时引起互感的变化, 导致传输效率发生改变;

(2) 超导线圈电阻远低于铜线圈电阻, 使用超导线圈可提高无线电能传输系统的性能, 4 cm 轴向距离时应用超导线圈可将传输效率由 76.5% 提高到 89.7%;

(3) 轴向偏移时, 超导线圈组成的无线输电系统在全范围内有不低于 12.4% 的效率提升; 径向偏移时, 超导线圈组成的无线输电系统在全范围内有不低于 11.3% 的效率提升, 且在短距离偏移 (1~4 cm) 时传输效率几乎不变, 这些性能预示磁耦合谐振式超导无线输电系统在电动汽车或交通领域无线输电场景中有很好的应用前景。

由于本文选用的实验功率为 100 W, 与实际应用还存在较大差距, 后续我们将利用利兹线制作载流能力更强的线圈来搭建样机。此外, 我们还将对超导线圈的高

频特性进行研究。

参考文献:

- [1] TESLA N. Apparatus for transmission of electrical energy: US649621[P]. 1900-05-15.
- [2] KURS A, KARALIS A, MOFFATT R, et al. Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances[J]. Science, 2007, 5834(317):83-86.
- [3] 唐曼玲, 包桦楠, 何清, 等. 手机无线充电技术综述 [J]. 电子世界, 2018(8): 91.
- [4] 许红霞, 付益超. 无线充电技术的应用 [J]. 电子技术与软件工程, 2017, (12):112.
- [5] 张春杨, 许佳琪, 张菁霓, 等. 心脏起搏器超声波体外无线充电技术研究 [J]. 透析与人工器官, 2018,29(1):21-24.
- [6] 凯瑟琳·波尔扎克. 新技术为微小医疗植入设备进行无线供电 [J]. 科技创业, 2014(8):12.
- [7] 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.
- [8] 陈硕翼, 张丽, 唐明生, 等. 无线电能传输技术发展现状与趋势 [J]. 科技中国, 2018(7): 7-10.
- [9] CHUNG Y D, LEE C Y, KANG H K, et al. Design Consideration and Efficiency Comparison of Wireless Power Transfer With HTS and Cooled Copper Antennas for Electric Vehicle[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2015, 25(3):1-5.
- [10] 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.
- [11] 唐治德, 徐阳阳, 赵茂, 等. 耦合谐振式无线电能传输的传输效率最佳频率 [J]. 电机与控制学报, 2015,19(3):8-13.
- [12] 张国民, 余卉, 刘国乐, 等. 超导无线电能传输技术 [J]. 南方电网技术, 2015, 9(12):3-10.

.....

(上接第 39 页)

- [5] UNSIHUAY-VILA C, MARANGON-LIMA J W, SOUZA A C, et al. A model to long-term, multiarea, multistage, and integrated expansion planning of electricity and natural gas systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(2): 1154-1168.
- [6] BARATI F, SEIFI H, SEPASIAN M S, et al. Multi-period integrated framework of generation, transmission, and natural gas grid expansion planning for large-scale systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(5): 2527-2537.
- [7] 贾宏杰, 王丹, 徐宪东, 等. 区域综合能源系统若干问题研究 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7): 198-207.
- [8] 王伟亮, 王丹, 贾宏杰, 等. 能源互联网背景下的典型区域综合能源系统稳态分析研究综述 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 3292-3305.
- [9] 程耀华, 张宁, 康重庆, 等. 低碳多能源系统的研究框架及展望 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(14): 4060-4069.
- [10] 丁一, 江艺宝, 宋永华, 等. 能源互联网风险评估研究综述 (一): 物理层面 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3806-3816.
- [11] 江艺宝, 宋永华, 丁一, 等. 能源互联网风险评估研究综述 (二): 信息及市场层面 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(15): 4023-4033.
- [12] 李阳, 邹嘉嘉, 曹华珍, 等. 基于综合能源协同优化的配电网规划策略 [J]. 电网技术, 2018, 42(5): 1393-1400.
- [13] 别朝红, 王旭, 胡源. 能源互联网规划研究综述及展望 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(22): 6445-6462.
- [14] 王珺, 顾伟, 陆帅, 等. 结合热网模型的多区域综合能源系统协同规划 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40(15): 17-24.
- [15] 熊文, 刘育权, 苏万煌, 等. 考虑多能互补的区域综合能源系统多种储能优化配置 [J]. 电力自动化设备, 2019, 39(1): 118-126.
- [16] 张磊, 罗毅, 罗恒恒, 等. 基于集中供热系统储热特性的热电联产机组多时间尺度灵活性协调调度 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(4): 985-998.
- [17] 孙可, 段光, 李晓春, 等. 综合能源服务系统结构描述及设计优化 [J]. 热力发电, 2017, 46(12): 33-39.
- [18] 陆伟. 城市能源环境中分布式供能系统优化配置研究 [D]. 北京: 中国科学院, 2007.
- [19] 刘贞, 张希良, 高虎, 等. 区域可再生能源规划基本框架研究 [J]. 中国能源, 2010, 32(2): 38-41.
- [20] 顾伟, 陆帅, 王珺, 等. 多区域综合能源系统热网建模及系统运行优化 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37 (5): 1305-1315.
- [21] 周孝信, 曾嵘, 高峰, 等. 能源互联网的发展现状与展望 [J]. 中国科学: 信息科学, 2017, 47(2): 149-170.