



引用格式: 窦智峰, 赵崇焱, 何帅彪, 等. SiC 双全桥无线电能传输系统恒功率传输效率优化研究[J]. 轻工学报, 2019, 34(1): 94 - 100.

中图分类号: TM712; TS01 文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2096-1553.2019.01.013

文章编号: 2096-1553(2019)01-0094-07

SiC 双全桥无线电能传输系统恒功率传输效率优化研究

Optimization of constant power transmission efficiency for wireless power transfer system with SiC dual full bridges

窦智峰, 赵崇焱, 何帅彪, 金楠

DOU Zhifeng, ZHAO Chongyan, HE Shuaibiao, JIN Nan

关键词:

SiC 双全桥无线电能传输; 传输功率调节; 效率优化

郑州轻工业大学 电气信息工程学院, 河南 郑州 450002

College of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China

Key words:

SiC dual full bridges wireless power transfer system; transmission power regulation; efficiency optimization

摘要: 针对不同负载下无线电能传输系统保持恒功率电能传输时的传输效率变化问题, 通过建立 SiC 双全桥结构无线电能传输系统模型, 推导出原边电压导通角与系统传输功率、副边电压导通角与传输效率的对应关系, 进而研究恒功率传输效率优化问题. 结果表明, 通过调节副边电压导通角使等效负载为最优值, 可在变负载情况下使传输效率最大. 双全桥结构和副边不控桥结构的对比实验验证了该双全桥结构可显著提升能量传输效率, 当负载为 30 Ω, 传输功率为 100 W 时, 效率提升 19%.

收稿日期: 2018-06-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1604136)

作者简介: 窦智峰(1979—), 男, 吉林省松原市人, 郑州轻工业大学讲师, 博士, 主要研究方向为大、中功率电力电子器件可靠性及多电平电能变换器故障容错及其控制策略.

Abstract: Aiming at the problem of transmission efficiency change in the wireless power transfer system constant power transmission under different loads, by establishing the SiC dual full bridge wireless power transfer system model, the corresponding relationships between the primary side voltage angle and the transmission power, the secondary side voltage angle and the transmission efficiency were deduced, and the optimization of the constant power transmission efficiency was studied. The results showed that under the condition of variable load, the equivalent load was optimized by adjusting the secondary side voltage angle to maximize the transmission efficiency. The experimental comparison between the dual full bridge structure and the uncontrolled rectifier structure proved that the dual full bridge structure could significantly improve the transmission efficiency. The efficiency was increased by 19% when the transmission power was 100 W at the load of 30 Ω .

0 引言

传统电气设备通常采用金属导线连接,存在摩擦、老化等问题,特别是在采矿工业、水下作业等特殊工业环境下,传统供电方式的可靠性和安全性存在很大隐患.无线电能传输系统实现了电气设备传输回路的非接触连接,是一种安全、可靠、灵活的电能传输方式,在医疗器械、家用电器、电子设备等领域具有广泛的应用前景^[1-5].

电磁感应式无线电能传输系统基于电磁感应定律,在感应耦合线圈之间进行能量传递.无线充电技术主要采用电磁感应式电能传输系统对电池进行充电.以往,无线充电技术多采用恒电压充电方式,充电速度慢,因此有研究人员提出恒功率充电方式,以实现电子产品的快速充电.功率和效率是衡量无线电能传输系统性能的两个重要技术指标,国内外学者针对这两方面展开了广泛的研究,特别是在实现效率提升的方法方面取得了一定的成果.单/双全桥无线电能传输系统能够对原边或双边可控全桥进行独立控制,通过调节控制信号改变原、副边电压导通角,可实现效率提升、负载电压调节和输出功率调节^[6-13].X. Liu 等^[6]研究了双全桥结构下副边不谐振的情况,通过控制原、副边可控全桥进行负载匹配,可在补偿副边电抗的同时,实现电压调节和效率优化.麦瑞坤等^[11]提出一种副边半控整流桥结构,通过分析最大传输效率

所对应的最优负载电阻,提出一种使其等效负载恒为最优交流负载电阻的控制方法.李富林等^[12]提出的拓扑为副边不控桥结构,通过在副边线圈后侧增加一个匹配馈电线圈形成新的阻抗变换结构,让负载达到最佳匹配条件,以实现系统传输效率的最大化.然而,现有文献资料大多只针对恒电压电能传输时无线电能传输系统的效率提升展开研究,没有涉及恒功率的情况.另外,在无线电能传输系统中,多选用器件损耗较小、导通关断较快的 SiC MOSFET 器件.鉴于此,本文拟针对 SiC 双全桥无线电能传输系统,采用等效电路分析系统的传输功率和效率,在负载变化情况下,保持恒功率电能传输,得到原边电压导通角与负载电压及传输功率的关系、副边电压导通角与传输效率的关系,以揭示系统效率的变化规律,并通过对比实验验证变负载恒功率输出条件下双全桥无线电能传输系统效率的提升效果.

1 SiC 双全桥无线电能传输系统模型

SiC 双全桥无线电能传输系统原理和等效电路如图 1 所示.系统由直流电压源供电,逆变后产生高频交流电,原边线圈和副边线圈通过电磁感应传输电能,副边将高频交流电整流成直流后供负载使用.在逆变器与原边线圈之间,以及副边线圈与整流电路之间,加入串联谐振补偿电路,用于抵消电路中感性元件产生的无功功率,以提高电路的功率因数.

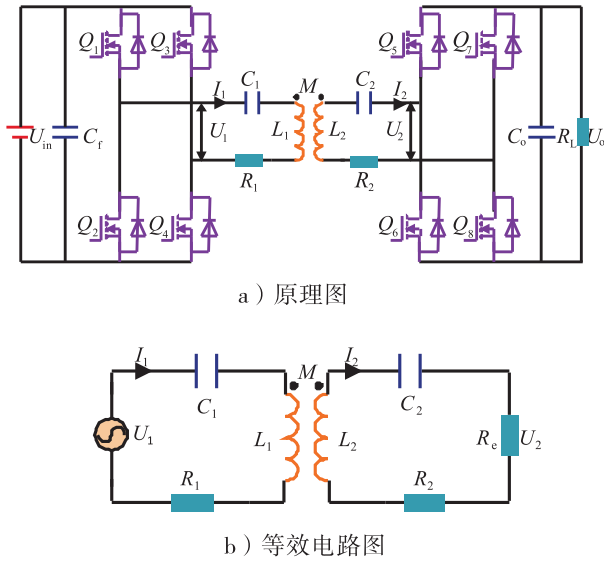


图1 SiC 双全桥无线电能传输系统原理和等效电路图
Fig. 1 Principle and equivalent circuit diagram of wireless power transfer system with SiC dual full bridges

U_{in} 为原边输入电压源, Q_1 — Q_8 组成原、副边的可控全桥结构, L_1 和 L_2 , R_1 和 R_2 , C_1 和 C_2 分别是原边和副边的线圈自感值、谐振回路电阻、串联补偿电容, C_f , C_o 为原边输入电压源、副边负载的稳压滤波电容, R_L 为负载电阻, U_o 为负载电压值, R_e 为副边等效负载。

原、副边回路的谐振频率与电能传输频率相同, 因此原、副边回路处于谐振状态, 呈现阻性。根据基尔霍夫电压定律, 可得到电路方程如下:

$$\begin{bmatrix} R_1 & j\omega M \\ j\omega M & R_2 + R_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ -I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

2 SiC 双全桥无线电能传输功率和效率分析

SiC 双全桥控制信号及原、副边谐振电压和谐振电流如图 2 所示。原、副边电压导通角为 2α 和 2β 。 Q_2 和 Q_3 的控制信号与 Q_1 和 Q_4 相反, Q_6 和 Q_7 的控制信号与 Q_5 和 Q_8 相反。由于原、副边谐振回路为阻性, U_1 与 I_1 , U_2 与 I_2 同

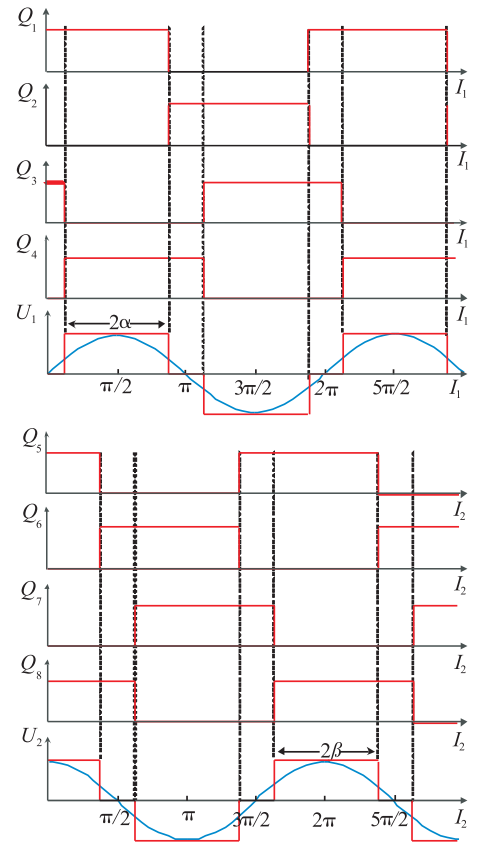


图2 SiC 双全桥控制信号及原、副边谐振电压电流

Fig. 2 Control signals of dual full bridges and resonant voltage and current of dual side

相位, 其中 U_2 滞后 U_1 90° 。由图 2 可知, 原边电压导通角 α 和副边电压导通角 β 会分别影响原边电压 U_1 和副边电压 U_2 , 从而影响传输功率和效率。

2.1 负载电压与传输功率的关系分析

原边可控全桥将直流电压 U_{in} 逆变为高频交流电压 U_1 , 原边谐振回路的输入电压 U_1 的基波分量有效值为

$$U_1 = \frac{2\sqrt{2}U_{in}}{\pi} \sin\alpha \quad (2)$$

副边等效负载 R_e 与 β 的关系表达式为

$$R_e = \frac{8}{\pi^2} R_L \sin^2\beta \quad (3)$$

副边等效负载 R_e 的两端电压 U_2 可表示为

$$U_2 = j\omega MI_1 \cdot \frac{R_e}{R_e + R_2} = \frac{j\omega MR_e U_1}{\omega^2 M^2 + R_1 R_2 + R_1 R_e} \quad (4)$$

假设副边传输功率等于负载功率,即 $U_2^2/R_e = U_o^2/R_L$,结合公式(2)(4), α 与 U_o 的关系表达式为

$$U_o = \frac{2\omega M U_{in} \sin\alpha \sqrt{2R_e R_L}}{\pi[\omega^2 M^2 + R_1 R_2 + R_1 R_e]} \quad (5)$$

系统传输功率可表示为

$$P_o = \frac{U_o^2}{R_L} \quad (6)$$

由公式(5)(6)可知,控制 α 可调节负载电压 U_o ,从而进一步调节系统传输功率 P_o .

2.2 电能传输效率分析

根据公式(1)(5)(6),系统传输效率 η 可表示为

$$\eta = \frac{P_o}{R_e (U_1 I_1^*)} = \frac{\omega^2 M^2 R_e}{R_1 (R_2 + R_e)^2 + \omega^2 M^2 (R_2 + R_e)} \quad (7)$$

无线电能传输系统在不同的工作环境中,负载大小会发生变化,因此需要研究不同负载下的效率优化.无线电能传输系统参数如下:线圈自感值 $L_1 = L_2 = 124 \mu\text{H}$,原、副边串联电容 $C_1 = C_2 = 0.25 \mu\text{F}$,线圈寄生电阻 $R_1 = R_2 = 0.15 \Omega$,电能传输频率 $f = 28.6 \text{ kHz}$,输入电压 $U_{in} = 40 \text{ V}$,线圈互感 $M = 36 \mu\text{H}$,线圈距离为 5.5 cm .根据公式(3)(7),电能传输效率 η 与负载 R_L ,副边电压导通角 β 的关系如图3所示.

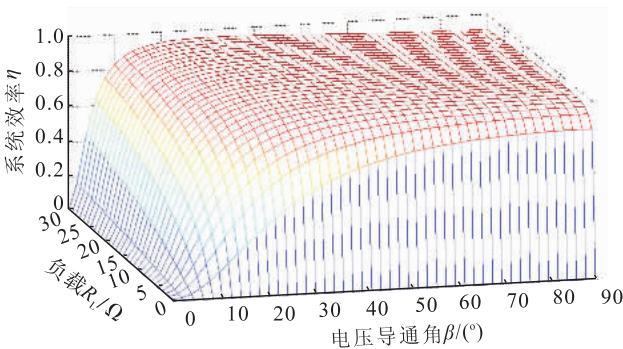


图3 η 与 R_L, β 的关系

Fig. 3 The relationship between η, R_L and β

由图3可知, R_L 在较大范围内,每一个负载阻值都对应特定的 β 角,能够使传输效率达到最大.当 R_L 过小时, β 角在 $0 \sim 90^\circ$ 可调范围内达不到效率最大值,且负载越小,效率越低.因此, R_L 存在一定的范围,在此范围内,通过调节 β 角,可以使系统效率达到最大.

通过上述分析可知,系统存在对应最大效率的最优等效负载.对效率表达式(7)求导,令其导数等于0,即

$$\frac{d\eta}{dR_e} = 0$$

可得传输效率最大时所对应的最优等效负载值 R_{eOPT} 的表达式,即

$$R_{eOPT} = \sqrt{R_2^2 + \frac{\omega^2 M^2 R_2}{R_1}} \quad (8)$$

根据无线电能传输系统参数可得 $R_{eOPT} = 6.5 \Omega$.

为实现效率最大,通过调节 β 使等效负载达到最优值,即

$$\frac{8}{\pi^2} R_L \sin^2 \beta = R_{eOPT} \quad (9)$$

根据公式(9),通过调节副边电压导通角 β 可使负载 R_L 等效为 R_{eOPT} .由于 β 调节范围为 $0 \sim 90^\circ$, β 为 90° 时对应负载临界值 R_{LTH} .当负载低于 R_{LTH} 时,即使 $\beta = 90^\circ$,副边等效负载仅为负载电阻的 $8/\pi^2$ 倍,不能得到最优等效负载值.当负载大于 R_{LTH} 时,通过调节 β 得到最优负载.根据无线电能传输系统参数,由公式(9)计算出 $R_{LTH} = 8 \Omega$.

结合公式(8)(9),可得传输效率最优的 β_{OPT} 表达式为

$$\beta_{OPT} = \arcsin \sqrt{\frac{\pi^2 R_2}{8 R_L} \sqrt{1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_1 R_2}}}$$

R_L 与 β_{OPT} 的关系曲线如图4所示.当 $R_L \geq R_{LTH}$ 时,存在对应的最优副边电压导通角 β_{OPT} 使等效负载达到最优值,且随着负载 R_L 的增

大, β_{OPT} 随之减小. 当 $R_L = R_{LTH}$ 时, $\beta = 90^\circ$, 副边可控全桥等效为不控桥. 当 $R_L < R_{LTH}$ 时, 即使 β 最大调节至 90° , 等效负载始终小于最优值.

将公式⑧代入公式⑦, 得到系统最大效率表达式为

$$\eta_{OPT} = \frac{\omega^2 M^2}{\omega^2 M^2 + 2R_1 R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2}(\omega^2 M^2 + R_1 R_2)}$$

3 实验结果与分析

搭建 SiC 双全桥无线电能传输实验平台如图 5 所示, 实验平台参数同 2.2 无线电能传输系统参数. 直流电压源为 Myway APL - II, 控制

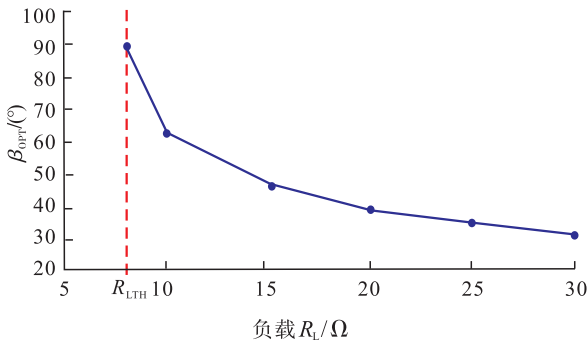


图 4 R_L 与 β_{OPT} 的关系曲线

Fig. 4 The relationship between R_L and β_{OPT}

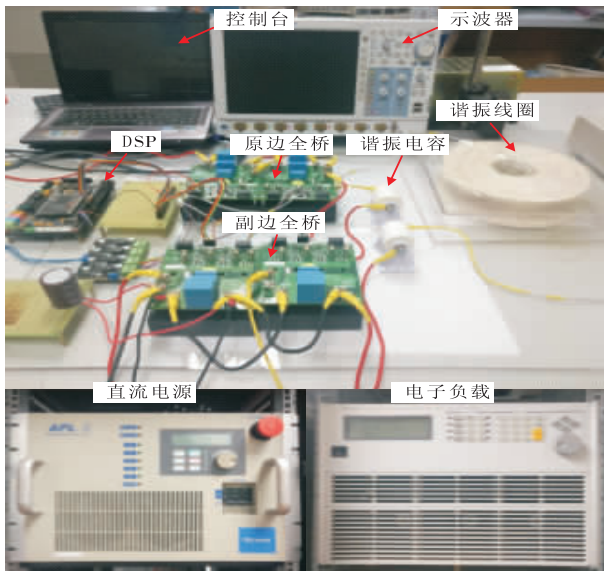
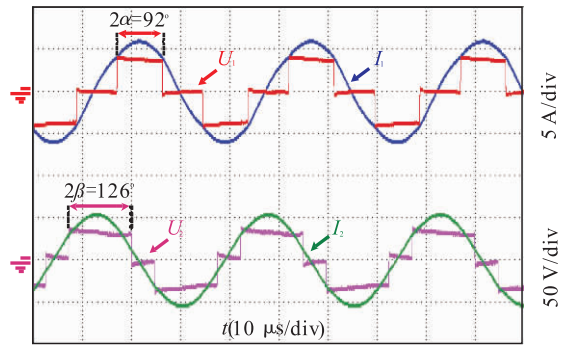


图 5 实验平台

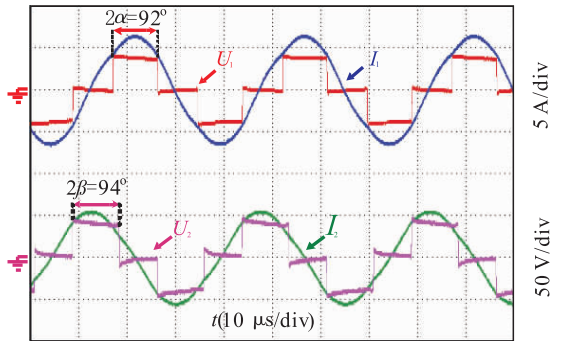
Fig. 5 Experimental platform

芯片为 TMS320F28335 DSP, MOSFET 管为 C2M0080120D, 功率二极管为 C4D20120D, 负载电阻使用电子负载 Chroma 63804, 使用示波器 YOKOGAWA DLM4058 采集波形.

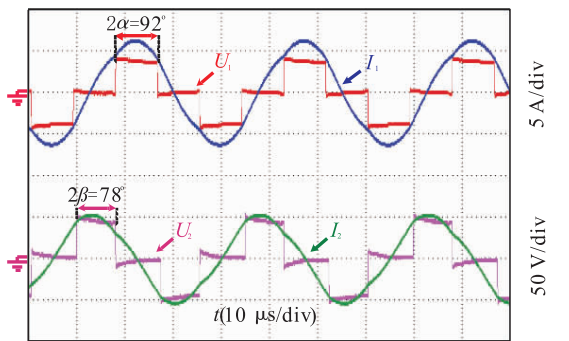
调节 β 至最优等效负载, 调节 α 角使负载电压为 31.6 V, 即传输功率为 100 W, SiC 双全桥无线电能传输系统在 100 W 功率时不同负载下的原、副边电压电流波形如图 6 所示. 图 6a)



a) $R_L = 10 \Omega, P_o = 100 \text{ W}$ 时原副边波形



b) $R_L = 15 \Omega, P_o = 100 \text{ W}$ 时原副边波形



c) $R_L = 20 \Omega, P_o = 100 \text{ W}$ 时原副边波形

图 6 SiC 双全桥无线电能传输系统实验波形

Fig. 6 Experimental waveform of dual full bridges wireless power transfer system

为 $R_L = 10 \Omega$, $P_o = 100 \text{ W}$ 时原副边波形, 此时 $2\alpha = 92^\circ$, $2\beta = 126^\circ$. 图 6b) 为 $R_L = 15 \Omega$, $P_o = 100 \text{ W}$ 时原副边波形, 此时 $2\alpha = 92^\circ$, $2\beta = 94^\circ$. 图 6c) 为 $R_L = 20 \Omega$, $P_o = 100 \text{ W}$ 时原副边波形, 此时 $2\alpha = 92^\circ$, $2\beta = 78^\circ$. 由图 6 可知, 随着负载的增大, β 逐渐减小, 使等效负载趋于最优值, 控制 α 保持 100 W 恒功率输出.

通过前文分析可知, 双全桥无线电能传输系统控制 β 可使等效负载达到最优值, 从而提升系统传输效率. 为验证上述分析结果, 在系统参数一致的情况下, 在传输功率均为 100 W , 负载 R_L 在 $5 \sim 30 \Omega$ 范围内变化时, 对双全桥结构和副边不控桥结构的传输效率进行比较. 其中双全桥结构的 β 调至图 4 所示的 β_{OPT} , 效率对比结果如图 7 所示.

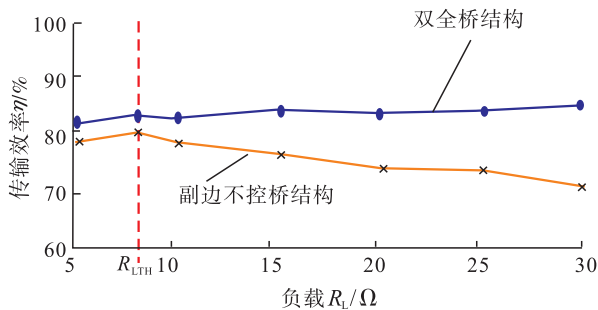


图 7 双全桥结构与副边不控桥结构的传输效率对比

Fig. 7 Efficiency comparison between dual full bridges and uncontrolled rectifier system

由图 7 可知, 在 $R_L \geq R_{L,TH}$ 时, 双全桥结构的副边等效负载可调至最优值, 效率保持在 84% 左右. 随着负载的增大, 副边不控桥结构的效率有较大下降. $R_L = R_{L,TH}$ 时, 副边不控桥结构等效负载处于最优值, 此时副边不控桥结构效率最高. $R_L < R_{L,TH}$ 时, 两种结构的效率相比 $R_{L,TH}$ 时均有下降. 总体来说, 双全桥结构的效率优于副边不控桥结构, 且在 $R_L = 30 \Omega$ 时, 前者比后者效率提升了 19%.

4 结论

本文分析了 SiC 双全桥无线电能传输系统在可变负载条件下恒功率电能传输的效率变化规律, 推导了最高效率点的实现条件, 揭示了不同负载下最优副边电压导通角与最大传输效率的对应关系, 并得出负载电阻最优副边电压导通角关系曲线. 分析表明, 通过改变副边电压导通角, 可将副边等效负载控制在最优值附近, 从而使系统效率达到最高. 实验验证了 SiC 双全桥结构可有效提高无线电能传输系统的传输效率. 文中理论分析结果与实验结果一致, 所得结论对于高效率无线电能传输结构设计具有一定参考意义, 同时也为能量和信息同时双向传输的研究奠定了理论和实验基础.

参考文献:

- [1] GARCIA D T, VAZQUEZ J, RONCERO S P. Design, implementation issues and performance of an inductive power transfer system for electric vehicle chargers with series-series compensation[J]. IET Power Electron, 2015, 8(10): 1920.
- [2] 高键鑫, 吴旭升, 高崑. 电磁感应式非接触电能传输技术研究综述[J]. 电源学报, 2017, 15(2): 166.
- [3] 廖承林, 李均锋, 陶成轩, 等. 无线电能传输系统控制方法综述[J]. 电气工程学报, 2015, 10(6): 1.
- [4] 范兴明, 莫小勇, 张鑫. 无线电能传输技术的研究现状与应用[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(10): 2584.
- [5] 张波, 疏许健, 黄润鸿. 感应和谐振无线电能传输技术的发展[J]. 电工技术学报, 2017, 32(18): 3.
- [6] LIU X, WANG T F, YANG X. Analysis and design of wireless power transfer system with

- dual active bridges [J]. *Energies*, 2017, 10 (10):1588.
- [7] ZHONG W X, HUI S Y R. Maximum energy efficiency tracking for wireless power transfer systems [J]. *IEEE Trans Power Electron*, 2015 (7):4025.
- [8] LI H C, LI J, WANG K P. A maximum efficiency point tracking control scheme for wireless power transfer systems using magnetic resonant coupling [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, 30(7):3998.
- [9] 蔡华, 史黎明, 李勇, 等. 基于谐波移相闭环控制的无线电能传输技术[J]. *电工技术学报*, 2018, 33(1):1.
- [10] 宋显锦, 张超, 徐小宇. 无线电能传输中的高频阻抗匹配特性分析[J]. *电源学报*, 2018, 12(17):1.
- [11] 麦瑞坤, 刘野然, 陈阳. 基于最优等效负载控制的感应电能传输系统效率优化方法研究[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(23):6468.
- [12] 李富林, 樊绍胜, 李森涛. 无线电能传输最优效率下的阻抗匹配方法研究[J]. *电力电子技术*, 2015, 49(4):105.
- [13] 张焱强, 金楠, 唐厚君. 无线电能传输基于负载阻抗匹配的最大效率追踪[J]. *电力电子技术*, 2018, 52(5):25.

(上接第78页)

- [9] 罗天洪, 李德山, 黄兴刚, 等. 轮式挖掘机驱动桥壳疲劳失效分析[J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2013, 27(5):1.
- [10] 陈元华. 矿用自卸车驱动桥壳有限元疲劳分析与优化[J]. *煤炭技术*, 2012, 31(7):30.
- [11] 周广廷. 基于变截面驱动桥壳的静强度和动应力分析[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2011.
- [12] 雷刚. 基于 ADAMS 的麦弗逊式悬架系统的虚拟仿真分析及其优化设计[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
- [13] 陈乾. 汽车可靠性试验的影响因素及改进措施初探[J]. *企业科技与发展*, 2009(22):57.
- [14] 王延克. 基于响应面法的汽车悬架系统优化设计[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
- [15] 李欣. 重型货车驱动桥壳结构分析及其轻量化研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006.