

阵列式无线能量传输系统的准静态电磁特性

杨 晨^{1,2}, 马光同¹, 王志涛^{1,2}, 周鹏博¹, 李兴田^{1,2}, 麦瑞坤²

(1. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 成都 610031; 2. 西南交通大学电气工程学院, 成都 610031)

摘要:磁耦合谐振式无线电能传输技术作为一种实现非接触电能传输的新技术, 由于其相对于松耦合感应技术具有高传输功率和远传输距离等优势, 成为了目前电气工程领域的一大研究热点。针对电动汽车和轨道交通车辆等大功率对象动态无线充电的应用趋势, 根据准静态下的麦克斯韦数学方程, 利用有限元电磁仿真软件, 建立了多发射线圈阵列式磁耦合谐振式无线电能传输系统的三维仿真模型, 通过实验测试验证了仿真模型的可靠性。在此基础上, 通过有限元分析的方法研究了准静态下不同系统结构时接收端负载电压的稳定性及系统的电磁场分布特征, 为电动汽车和轨道交通车辆动态无线充电系统结构的设计提供一定的理论参考。

关键词:磁耦合谐振方法; 无线电能传输; 电磁场分布特性; 有限元分析

Quasi-static Electromagnetic Characteristics of Wireless Power Transfer System with Array of Transmitters

YANG Chen^{1,2}, MA Guangtong¹, WANG Zhitao^{1,2}, ZHOU Pengbo¹, LI Xingtian^{1,2}, MAI Ruikun²

(1. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: As a new technology to realize contactless electric energy transmission, wireless power transfer based on magnetic coupling resonant method has been one of the hottest topics in the field of electrical engineering at present, which is owing to high transmission power and long transmission distance in comparison with the loose coupling sensing technology. In light of the dynamic wireless charging for high power equipment, such as electric vehicles and rail transit trains, a three-dimensional simulation model of magnetic coupling resonant wireless power transmission with an array of transmitters is established using finite element electromagnetic simulation software and based on the Maxwell equation in quasi-static condition. The reliability of the simulation model was verified by experimental tests. On this basis, the stability of load voltage at the receiving terminal and the characteristics of electromagnetic distribution in a quasi-static condition and with different system structures were studied through finite-element analysis. The research result in this paper provides certain theoretical reference for the structural design of the dynamic wireless charging system for electric vehicles and rail transit trains.

Keywords: magnetic coupling resonant method; wireless power transfer; characteristics of electromagnetic distribution; finite-element analysis

磁耦合谐振式无线电能传输技术是通过相同谐振频率的线圈之间发生共振, 使得发射与接收装置之间发生强烈的能量交换, 从而实现电能远距

离、高效率传输的一种技术^[1,2]。由于具有摆脱有形输电介质的束缚, 通过空气等介质传输电能的优势, 因此其可以在许多复杂环境中应用, 如海底探测、井下设备、滑动接触供电等, 并且应用范围广泛, 从毫瓦级的生物植入电子器件到千瓦级的电动车或机器人^[3]都具有显著的技术优势。

2007年MIT研究小组在非接触电能传输方面取得了突破性的进展, 通过利用磁耦合谐振原理和

收稿日期: 2016-10-08; 修回日期: 2018-04-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51475389); 四川省杰出青年基金资助项目(2016JQ003)

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51475389); Excellent Youth Foundation of Sichuan Province(2016JQ003)

电磁场近场的非辐射特性,实现了在几倍于谐振线圈尺寸的中等距离内较高效率的电能传输^[4,5]。Onar 等搭建了电动汽车在静态和动态下的充电实验测试平台,研究了移动物体在固定系统结构下的接收端负载电气特性^[6]。Shin 和 Ahn 等分析了无线电能传输技术在电动汽车的静态充电的应用,从电路模型和实际电路结构方面考虑,对系统的电路结构进行了测试和优化设计^[7]。目前大部分无线电能传输技术的研究主要集中于从耦合模理论或者二端口网络模型方向进行系统电气特性的仿真研究^[8-10],或者从实验测试方向进行系统结构的优化,而关于对系统充电过程电磁特性的研究较少,缺少对于电磁分布状况的直观认识。

对于多个发射线圈和多个接收线圈的结构,相关小组研究了一个发射线圈和多个负载线圈的传输系统,从耦合模理论出发分析发现多个独立接收线圈的总体传输效率要高于单个接收线圈的结论,但随着接收线圈个数增加,总体效率增速较慢;因此存在着一个保持最大传输效率的最佳接收线圈个数^[11]。同时一般多个接收线圈之间都是独立地对各自的负载供电,没有考虑接收线圈之间并联或者串联的关系,共同给唯一用电装置供电的情况。

为了研究移动充电设备在准静态下的系统电磁特性和接收端负载电气特性,本文针对多源线圈组成的阵列和多个接收线圈的系统结构,利用有限元软件建立仿真模型,分析系统结构参数变化与接收端负载的电气特性之间的联系,从而优化系统的结构;同时直观地显示充电设备在不同位置和系统结构下的电磁场分布特征及能量传输的变化规律。

1 电磁耦合谐振系统的仿真模型

磁耦合谐振式无线传能系统的结构可以分成 4 种类型,且对于以上不同电路结构的系统,研究表明 SS、SP 结构的共振式系统与 PS、PP 系统相比耦合性更强,且传输功率、效率和距离等特性更好^[12]。由于发射端的串联谐振电路,相对于并联结构电路,发射线圈能够获得较大的电流,从而产生较强

的交变磁场,使接收端得到更多的能量。因此,结合仿真中等效电路结构的复杂性,本文综合考虑采用 SS 结构类型来建立电路基本结构。

共振系统的等效电路如图 1 所示。图 1 中, L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 分别为 4 个发射线圈电感; L_5 、 L_6 为 2 个接收线圈电感。为了使无线传能系统中发射端和接收端谐振线圈的固有谐振频率基本一致,所有线圈的参数保持相同,即所有线圈自感相等。图 1 接收端由于 2 个线圈是串联连接,所以等效电容为 100 pF;发射端每个线圈串联的电容为 200 pF。

线圈的其他参数如表 1 所示。最终通过调节串联电容容值,使所有线圈的谐振频率保持一致。谐振频率表示为

$$f = 1 / (2\pi \sqrt{LC}) \quad (1)$$

根据式(1)计算可得谐振频率为 1.196 MHz。

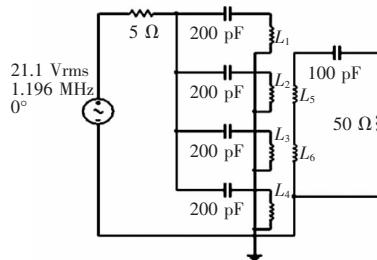


图 1 4 个发射线圈和 2 个接收线圈组成的共振系统等效电路模型

Fig.1 Equivalent circuit model of the resonant system consisting of four transmitting coils and two receiving coils

表 1 WPT 系统线圈的参数

Tab.1 Parameters of coils used in the wireless power transfer system

线圈参数	数值
环形线圈内径/mm	100
线圈截面半径/mm	5
匝数	15
线圈自感/ μ H	88.476
谐振频率/MHz	1.196

图 2 为在多物理场仿真软件 COMSOL 中建立仿真模型的三维结构,4 个发射线圈在整个结构下方沿直线以等间距排列,同时上方 2 个接收线圈从发射线圈阵列的右边向左边一起移动。

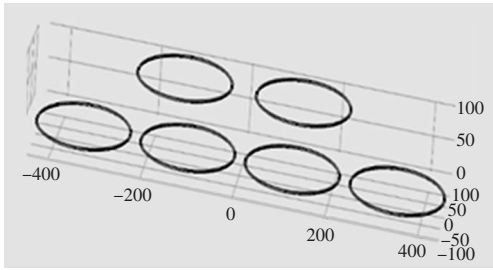


图 2 无线能量传输系统的三维仿真模型结构

Fig.2 Structure of three-dimensional simulation model for wireless power transfer system

对于线圈之间的电磁关系，通过磁矢势 A 构建其电磁控制方程来表达其物理关系。线圈的电磁关系用安培定律表达，由于准静态条件而假设位移电流的时间偏导为 0，因此有

$$\sigma(\partial A/\partial t) + \nabla \times (\mu_0^{-1}\mu_r^{-1}\nabla \times A) = J_e \quad (2)$$

$$J_e = (NI_{cir})/A_{coil} \quad (3)$$

式中： μ_0 、 μ_r 和 σ 分别为空气磁导率、相对磁导率和线圈导电率； N 、 I_{cir} 和 A_{coil} 分别为匝数、单根导线中电流和线圈截面积； J_e 为外部电路给定的电流密度。对于整个空间边界条件定义为磁绝缘。

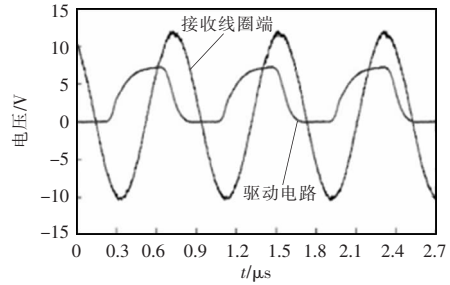
在以上建立的数值模型基础上，通过软件中电磁场和电路的耦合关系建立仿真模型，并研究接收线圈在不同位置处接收电压的变化情况及系统整体电磁场的分布状况。

2 仿真分析与实验验证

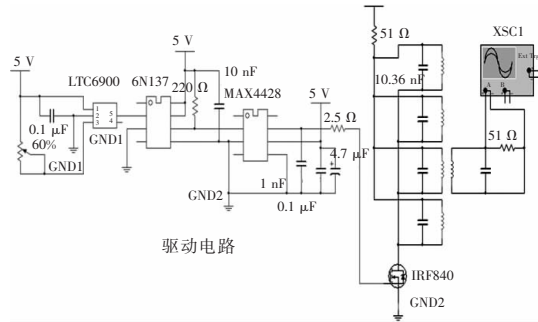
为了验证仿真模型的正确性，搭建了实验平台，进行了相应的实验测量，其中所有线圈通过调节所接电容使线圈的谐振频率相同。

实验所测电压波形及实验电路原理如图 3 所示。其中，图(a)为接收线圈端电压波形和驱动电路的电压波形，由于开关频率较高，场效应管导通过程中上升时间在一个周期内所占比例较大，所以图中驱动电路的波形不是标准的方波，同时黑色波形为接收线圈端电压(即负载电阻的电压)；图(b)中，驱动电路产生高频方波控制功率场效应管的通断。

实验结构中 4 个发射线圈在同一水平面上沿直线保持间距 6 cm 排列，而发射线圈与接收线圈



(a)接收线圈端与驱动电路的电压波形



(b)实验电路原理

图 3 实验所测电压波形及实验电路原理

Fig.3 Experimental waveform of measured voltage and principle of electric circuit

间垂直方向的传输距离为 8 cm。图 4 为所建数值模型所得仿真结果与实验过程中测量数据的对比，可以看出两者数据拟合的曲线吻合度较好，从而证实了仿真数值模型的可靠性。

图 4 中，由于发射线圈间距较大，接收线圈处于相邻发射线圈中间时接收能量很少，而接收线圈与某一个发射线圈正对时，接收线圈端电压最大，所以电压曲线在中间位移范围内近似正弦曲线一

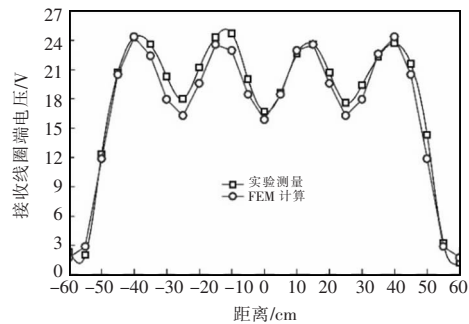


图 4 不同位置实验测量和仿真的接收线圈端电压对比曲线

Fig.4 Contrastive curves of terminal voltages of the receiving coil at different positions obtained by experimental measurement and simulation

样上下起伏。

3 仿真结果分析

考虑到对于轨道交通车辆和电动汽车无线充电的应用,发射线圈与接收线圈之间传输距离一般要求较大,本文设定为 10 cm,接收线圈之间的间距为线圈半径的一半 5 cm。由于系统工作在共振状态时最佳,因此对发射线圈间距 3 cm、接收线圈间距 5 cm 的结构进行了仿真,研究了接收端电阻电压与工作频率的关系。当负载电阻的电压最大时系统的工作频率为 1.22 MHz,与式(1)计算所得频率的偏差为 5%,所以以下仿真的工作频率都设置为 1.22 MHz。

3.1 接收线圈数量对接收端负载电压的影响

由于大部分研究工作的接收线圈为 1 个或者多个,但其线圈之间没有直接电路连接的情况,本文仿真计算了接收线圈之间串联,且线圈个数为 2 个或者 3 个的系统结构,研究了负载端电压变化,并与 1 个接收线圈结构的数据结果做了比较及分析。3 种不同结构下,发射端线圈之间间距都为 3 cm,传输距离都为 10 cm,其接收端负载电压随不同位置的变化曲线如图 5 所示。

图 5 中,2 个接收线圈结构的负载电压最大值比 1 个接收线圈的大 10 V 左右。对比图 4 和图 6 中的 1 个接收线圈结构的仿真结果发现,图 6 中发

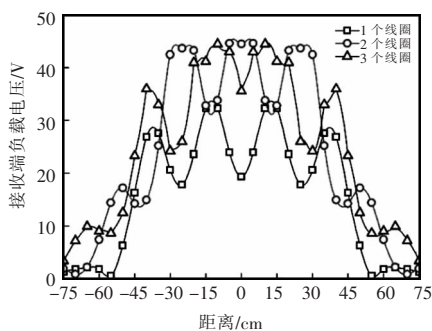


图 5 接收线圈个数分别为 1、2 和 3 时接收端负载电压随不同位置的变化曲线

Fig.5 Load voltage curves of receiving terminal at different positions when the numbers of receiving coils are 1, 2 and 3, respectively

射线圈间距 3 cm 时接收线圈能够受到相邻发射线圈的电磁影响,所以图 5 中接收电压出现 4 个波峰且不相同,两端的峰值电压小于中间 2 个峰值电压。而图 4 中接收线圈由于发射线圈间距太大,只受到其有正对关系的发射线圈影响,所以 4 个电压峰值相同。图 5 中 2 个线圈和 3 个线圈结构的最大电压基本相同,可能是由于随着线圈个数增加导致电路总阻抗变大,从而发射线圈中电流减小,接收线圈的感应电压也相应变小,但接收线圈增加了,所以二者的最大电压相等。但 2 个线圈结构的电压在 -30 cm 到 30 cm 位移内波动较小,3 个波峰的电压值变化也较小。由上述仿真结果,在中间位移范围内 2 个接收线圈结构的负载接收电压最小值和 1 个接收线圈结构的最大电压值基本相等,且前者的整体接收功率较多,同时 2 个接收线圈结构的电压波动相对较小,因此 2 个接收线圈结构的无线传能系统较好。

3.2 发射线圈间距对接收端负载电压的影响

为了研究对于 2 个接收线圈结构的相邻发射线圈间距与接收端负载电压的关系,本文对发射端相邻线圈的间距为 1 cm、3 cm 和 5 cm 的系统结构进行了仿真分析,其在不同位置处的接收电压峰值如图 6 所示。由图 6 可见,随着发射线圈间距增加,接收端电阻的最大电压缓慢减小;同时中间位移段电压随线圈位置的变化波动越来越剧烈,这是因为间距增大导致 2 个接收线圈都处于发射线圈的中

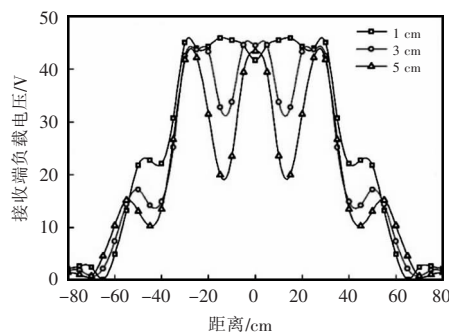


图 6 不同发射线圈间距的接收端负载电压随不同位置的变化关系曲线

Fig.6 Load voltage curves of receiving terminal at different positions with different spacings between transmitter coils

间时,接收能量急剧下降。而当间距为 1 cm,接收线圈在中间位移范围内,无论在哪个位置处,与发射线圈的正对面积变化较小,所以其接收端负载电压波动较小,能量接收稳定。

另外,图 6 中 3 条曲线在 40~60 cm 或者 -40~-60 cm 位移内时,其中 1 个接收线圈与最外侧的发射线圈没有正对关系,而另外 1 个接收线圈与最外侧的发射线圈正对面增多,因此负载电压会出现一个微小增加;但随着继续移动,只有 1 个接收线圈与发射线圈有正对面,并且正对面也再慢慢减小,因此电压则随着快速地减小。所以看到在 50 cm 位置附近电压有一个较小的起伏。

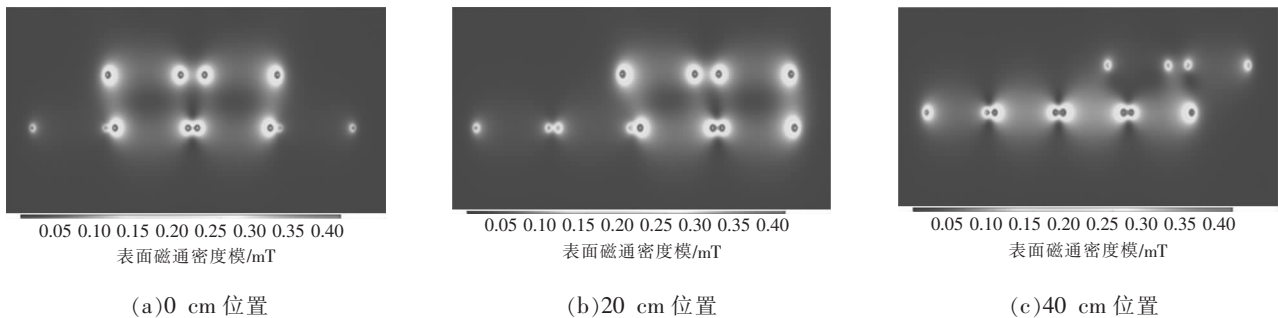


图 7 接收线圈在 0、20 和 40 cm 位置磁通密度模的分布

Fig.7 Distribution of magnetic flux density norm when the receiving coil is at 0, 20 and 40 cm, respectively

供电,因此接收端电流较小,接收线圈产生的磁场也较弱。

4 结语

本文根据 SS 型谐振电路结构,通过有限元仿真软件分析了 2 个接收线圈相对于多个发射线圈组成的阵列时,接收端负载电压随发射线圈间距的变化情况及磁场分布状况。由仿真结果分析得到,两个接收线圈结构时系统的负载端电压相比于 1 个接收线圈结构时较大,且系统的接收功率较多,且相对 3 个接收线圈结构,接收电压波动较小;接收线圈间距一定时,存在一个合理的发射线圈阵列结构,即合适的发射线圈间距,使得接收端负载电压在某个位移区间内波动较小,基本保持不变,这样可以维持接收端负载稳定充电,且保持较高的传

3.3 磁场分布云图

图 7 为发射线圈间距 1 cm、工作频率为 1.22 MHz 时 3 个位置处磁通密度模的截面分布云图,从上到下依次为在 0、20 和 40 cm 位置。虽然 0 cm 和 20 cm 处接收线圈所处位置不同,但与发射线圈阵列的耦合面积没有发生变化,由于两者之间产生了磁共振,接收线圈从其正下方的发射线圈接收大部分能量;而与其没有正对关系的发射线圈和接收线圈之间耦合很弱,则线圈中电流较小,其传输能量相应地也很少。在 40 cm 位置处时,由于只有 1 个发射线圈和接收线圈有正对关系,能量大部分通过该发射线圈传输给接收线圈,并给整个接收端电路

输效率。同时,本文准静态的分析内容可以作为接收线圈动态充电研究的基础,后续可进一步研究接收线圈间距与发射线圈的间距关系、接收线圈动态充电时其移动速度对充电稳定性的影响等。

参考文献:

- [1] 杨庆新,陈海燕,徐桂芝,等.无接触电能传输技术的研究进展[J].电工技术学报,2010,25(7):6-13.
Yang Qingxin, Chen Haiyan, Xu Guizhi, et al. Research progress in contactless power transmission technology [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25 (7): 6-13(in Chinese).
- [2] 张波,黄润鸿,丘东元.磁谐振中距离无线电能传输及关键科学问题[J].电源学报,2015,13(4):1-7.
Zhang Bo, Huang Runhong, Qiu Dongyuan. Key problems of midrange wireless power transfer via magnetic resonances[J]. Journal of Power Supply, 2015, 13(4): 1-7(in Chinese).

- [3] Esser A, Skudelny H C. A new approach to power supplies for robots[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1991, 27(5): 872-875.
- [4] Karalis A, Jocannopoulos J D, Soljačić M. Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer[J]. Annals of Physics, 2008, 323(1): 34-48.
- [5] Kurs A, Karalis A, Moffatt R, et al. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances[J]. Science, 2007, 317(5834): 83-86.
- [6] Onar O C, Chinthavali M, Jones P T. ORNL developments in stationary and dynamic wireless charging applications [C]. IEEE Applied Power Electronics Conference & Exposition (APEC), 2014.
- [7] Ahn S, Cho D H. Future wireless power transportation system[C]. Microwave Conference Proceedings (APMC), 2013 Asia-Pacific. IEEE, 2013: 468-469.
- [8] 张献, 杨庆新, 陈海燕, 等. 电磁耦合谐振式无线电能传输系统的建模, 设计与实验验证[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(21): 153-158.
Zhang Xian, Yang Qingxin, Chen Haiyan, et al. Modeling and design and experimental verification of contactless power transmission systems via electromagnetic resonant coupling[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(21): 153-158(in Chinese).
- [9] Haus H A. Waves and fields in optoelectronics[M]. New Jersey: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1984: 211-216.
- [10] 蔡涛, 沈锦飞. 带中继线圈无线电能传输的效率分析方法[J]. 电源学报, 2014(5): 67-71.
Cai Tao, Shen Jinfei. Efficiency analysis method of wireless power transmission with relay coil[J]. Journal of Power Supply, 2014, (5): 67-71(in Chinese).
- [11] Cannon B L, Hoburg J F, Stancil D D, et al. Magnetic resonant coupling as a potential means for wireless power transfer to multiple small receivers[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(7): 1819-1825.
- [12] 黄学良, 吉青晶, 谭林林, 等. 磁耦合谐振式无线电能传输系统串并式模型研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(3): 171-176.
Huang Xueliang, Ji Qingjing, Tan Linlin, et al. Study on series-parallel model of wireless power transfer via magnetic resonance coupling[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(3): 171-176(in Chinese).



杨晨

作者简介:

杨晨(1988-),男,硕士研究生,研究方向:高温超导磁传能,E-mail:element_young@163.com。

马光同(1982-),男,通信作者,博士,副研究员,博士生导师,研究方向:高温超导磁悬浮、磁推进和磁传能,E-mail:gtma@swjtu.com。

王志涛(1993-),男,硕士研究生,研究方向:高温超导磁传能和超导直线电机,E-mail:zhitaowong@163.com。

周鹏博(1992-),男,博士研究生,研究方向:高温超导磁传能和超导磁屏蔽,E-mail:chrishouchina@163.com。

李兴田(1988-),男,硕士研究生,研究方向:高温超导磁传能,E-mail:xingtian_lee@163.com。

麦瑞坤(1980-),男,博士,副教授,博士生导师,研究方向:无线电能传输在轨道交通中的应用、信号处理及电力系统中的应用,E-mail:mairk@swjtu.cn。

(上接第88页)

- [5] 李珍国, 章松发, 周生海, 等. 考虑转矩脉动最小化的无刷直流电机直接转矩控制系统[J]. 电工技术学报, 2014, 29(1): 139-146.
Li Zhenguo, Zhang Songfa, Zhou Shenghai, et al. Direct torque control of brushless DC Motor considering torque ripple minimization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(1): 139-146(in Chinese).



王祖靖

作者简介:

王祖靖(1990-),男,通信作者,硕士研究生,研究方向:现代调速系统,E-mail:594471002@qq.com。

周扬忠(1971-),男,中国电源学会高级会员,博士,教授,博士生导师,研究方向:现代调速系统、新能源发电系统,E-mail:zhzy_75313@sina.com。

陈旭东(1991-),男,硕士研究生,研究方向:现代调速系统,E-mail:874956931@qq.com。