

文章编号:1671-251X(2019)01-0081-06

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2018090005

磁耦合谐振式无线电能传输系统的 阻抗匹配方法研究

元士强^{1,2}, 崔玉龙^{3,4}, 王景芹^{1,2}, 范好亮⁴, 樊亚超^{1,2}

(1. 河北工业大学 省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室, 天津 300130;

2. 河北工业大学 河北省电磁场与电器可靠性重点实验室, 天津 300130;

3. 北京化工大学 信息科学与技术学院, 北京 100029;

4. 河北长孚电气设备有限公司, 河北 保定 071052)

摘要:针对磁耦合谐振式无线电能传输系统中传输距离或负载的改变会导致输入阻抗与射频内阻不匹配,引起输出功率下降的问题,以L型匹配网络为例,提出了一种基于Smith圆图理论的阻抗匹配方法。该方法根据等效电路理论和Smith圆图理论推导出了关于匹配电感和匹配电容的参数表达式,在阻抗失配的情况下通过调节归一化电阻变量即可控制匹配网络参数,从而实现系统的阻抗匹配。仿真和实验结果表明,该匹配方法网络结构简单,避免了复杂的计算过程;相同条件下,匹配后的系统输出功率相较匹配前得到了明显提高,且可有效抑制系统的频率分裂。

关键词:矿井;磁耦合谐振式无线电能传输;阻抗匹配网络;匹配电感;匹配电容;Smith圆图;归一化电阻

中图分类号:TD60

文献标志码:A

网络出版地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20181228.1155.002.html>

Research on impedance matching method for magnetic resonant coupling wireless power transmission system

YUAN Shiqiang^{1,2}, CUI Yulong^{3,4}, WANG Jingqin^{1,2}, FAN Haoliang⁴, FAN Yachao^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China; 2. Key Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical

Apparatus Reliability of Hebei Province, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

3. College of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 4. Hebei Changfu Electric Equipment Corporation, Baoding 071052, China)

Abstract:In view of the problem that the input impedance does not match the RF internal resistance and the output power decreases due to the change of transmission distance or load in magnetic resonant coupling wireless power transmission system, an impedance matching method based on Smith chart theory was proposed taking L-type matching network as an example. Based on equivalent circuit theory and Smith chart theory, a parameter expression of matching inductance and matching capacitance is derived. In the case of impedance mismatch, the matching network parameters can be controlled by adjusting normalized resistance variables, so as to realize the impedance matching of the system. The simulation and experimental results show that the network structure of the matching method is simple and the complex

收稿日期:2018-09-03;修回日期:2018-11-20;责任编辑:张强。

基金项目:河北省科技型中小企业技术创新基金项目(16C1303121010,15C1303121014)。

作者简介:元士强(1993—),男,河北邢台人,硕士研究生,主要研究方向为无线电能传输,E-mail:271465903@qq.com。

引用格式:元士强,崔玉龙,王景芹,等.磁耦合谐振式无线电能传输系统的阻抗匹配方法研究[J].工矿自动化,2019,45(1):81-86.

YUAN Shiqiang, CUI Yulong, WANG Jingqin, et al. Research on impedance matching method for magnetic resonant coupling wireless power transmission system[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(1): 81-86.

computation process is avoided. Under the same conditions, the output power of the system after matching is significantly improved compared with that before matching, and the frequency splitting of the system can be effectively suppressed.

Key words: mine; magnetic resonance coupling wireless power transmission; impedance matching network; Smith chart; matching inductance; matching capacitance; normalized resistance

0 引言

为保证煤矿安全生产,通常采用无线传感器网络系统对井下隧道的环境参数进行检测。磁耦合谐振式无线电能传输(Magnetic Resonance Coupling Wireless Power Transmission, MRC-WPT)相较感应耦合式无线电能传输,在中距离仍有着较高的功率和效率,且不受空间障碍物的影响,对矿井巷道中等传输距离下的安全监测及解决煤矿井下大量无线传感器节点电池更换难、维护难的问题具有重要意义。阻抗匹配网络是优化 WPT 系统传输效率和输出功率的重要组成部分,有不少研究者对其进行了研究。文献[1]提出了一种用 WPT 整流实现负载阻抗匹配的方法,通过调节整流电路占空比达到最佳匹配条件,但整流电路本身元件较多,大大增加了系统的损耗。文献[2]利用电路理论对 WPT 系统进行建模,建立了系统传输效率与输出功率表达式,但其只分析了在传输效率和输出功率最大时负载的阻抗匹配特性,没有给出一种实用的阻抗匹配电路。文献[3]提出用电容阵列的自动阻抗匹配方法来提高 WPT 系统性能,但匹配电路所需器件多,且迭代过程复杂。文献[4]针对传输效率随传输距离增加而显著下降的问题,研究了二端口模型下符合最大传输功率理论的 L 型匹配电路,但所推匹配参数公式冗杂,不具有实用性。

基于上述研究存在的问题,本文提出了一种匹配过程较为简单的 MRC-WPT 系统的阻抗匹配方法。该方法根据等效电路理论和 Smith 圆图理论推导出了匹配电感和匹配电容的参数表达式,在阻抗失配的情况下,通过调节归一化电阻变量即可控制匹配网络参数,实现系统的阻抗匹配。最后建立了相应的匹配电路,通过添加该匹配电路,对传输距离和负载影响下的 MRC-WPT 系统输出功率进行了分析,仿真与实验验证了该方法的正确性。

1 MRC-WPT 系统基本理论及匹配模型分析

1.1 磁耦合谐振系统工作原理

以二线圈等效电路为例来分析 MRC-WPT 系统的工作原理。二线圈 MRC-WPT 系统等效电路模型如图 1 所示,系统由高频电源、发射线圈、接收

线圈及负载组成。从图 1 可以看出,电源给发射线圈供电,频率为系统的谐振频率,在谐振频率下发射线圈发生谐振,建立起很强的电磁场,发射线圈电容电场和线圈磁场进行能量交换,发射线圈一部分磁场传递到接收线圈产生感应电流。接收端电容电场和线圈磁场在谐振下进行能量交换,最终把电能传递给负载^[5-6]。

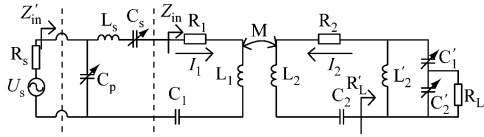


图 1 二线圈 MRC-WPT 系统等效电路模型
Fig. 1 Equivalent circuit model of two-coil MRC-WPT system

1.2 匹配网络分析

图 1 中, R_s 为电源内阻, R_L 为负载电阻, M 为两线圈间的互感, R_1 、 L_1 、 C_1 分别为发射线圈损耗电阻、电感和电容, R_2 、 L_2 、 C_2 分别为接收线圈损耗电阻、电感和电容。设两线圈结构对称,即 $R_1 = R_2$, $L_1 = L_2$, $C_1 = C_2$ 。电源与发射线圈之间采用 L 型阻抗匹配电路, C_p 、 C_s 为匹配电容, L_s 为匹配电感。接收线圈与负载间采用电容分压式阻抗变换电路, R'_L 为匹配后的等效负载。

设 P_{in} 为系统输入功率, Z_{in} 为电路输入阻抗, R_{in} 为输入电阻。由最大功率传输定理可知,当 $Z_{in} = R_s$ 时, P_{in} 最大,此时 $P_{in} = U_s^2 / 4R_s$ 。在谐振状态下,输入阻抗为

$$Z_{in} = R_{in} = R_1 + \frac{(\omega M)^2}{R_2 + R_L} \tag{1}$$

为简化计算,设:

$$\begin{cases} jX_1 = \frac{1}{j\omega C_p} \\ jX_2 = j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s} \end{cases} \tag{2}$$

式中: X_1 , X_2 为系统的匹配电抗; ω 为系统角频率。

令 Z_{in} 经阻抗匹配后的等效阻抗为 Z_{eqr} , $Z_{eqr} = R_{eqr} + jX_{eqr}$, 其中 R_{eqr} 、 X_{eqr} 为匹配后的等效电阻和等效电抗。匹配需满足式(3)所示条件:

$$\begin{cases} X_{eqr} = \frac{X_1 R_L^2 + X_1 X_2 (X_1 + X_2)}{(X_1 + X_2)^2 + R_{in}^2} = 0 \\ R_{eqr} = \frac{X_1^2}{(X_1 + X_2)^2 + R_{in}^2} R_{in} = R_s \end{cases} \tag{3}$$

简化式(3),可得

$$\begin{cases} X_1 = -\sqrt{\frac{R_{in}}{R_s - R_{in}}} R_s \\ X_2 = \sqrt{R_{in}(R_s - R_{in})} \end{cases} \quad (4)$$

结合式(1)、式(2)、式(4)可得匹配参数为

$$\begin{cases} C_p = \sqrt{\frac{R_s}{R_1 + \frac{(\omega M)^2}{R_2 + R_L'}} - 1} \frac{1}{R_s \omega} \\ C_s = \frac{1}{\omega^2 L_s - \omega \sqrt{\left(R_1 + \frac{(\omega M)^2}{R_2 + R_L'}\right) \left(R_s - R_1 - \frac{(\omega M)^2}{R_2 + R_L'}\right)}} \end{cases} \quad (5)$$

一般情况下系统中的 R_1 、 R_2 、 R_s 、 L_s 为常数。由式(5)可看出,当系统频率为固定值时, C_p 、 C_s 是关于 R_L 、 M 的函数^[7-10],即匹配参数随着负载阻抗和传输距离的变化而变化。要使上述匹配有意义,需满足条件 $R_s > R_{in}$ 。

1.3 基于 Smith 圆图的阻抗匹配方法

基于 Smith 圆图的阻抗匹配方法如图 2 所示, Smith 圆图中 A 点为匹配前阻抗值对应点, C 点为 Smith 圆图的圆心, 阻抗匹配的目的就是通过增加匹配元件使 A 点移动到 C 点。在阻抗圆图上顺时针移动表示串联一个电感元件, 逆时针移动表示串联一个电容元件。在导纳圆图上顺时针移动表示并

联一个电容元件, 逆时针移动表示并联一个电感元件。

根据 Smith 圆图基本原理, 结合 MCR-WPT 系统在谐振时输入阻抗 Z_{in} 成阻性的特性可知, A 点必在 Smith 圆图的横轴上。本文选用简单的二元件组成匹配网络, 即从 A 点移动到导纳均为 1 的导纳圆上或归一化电阻均为 1 的阻抗圆上, 再移动到 C 点完成阻抗匹配^[11]。

设归一化电阻 $r = Z_{in}/R_s$, 归一化电导 $g = 1/r$, 如图 2(a) 所示。当 $r \in (1, \infty)$ 时, 设 A 点处对应的电阻为 r , 电感为 x , 电导为 g , 电纳为 b , B 点处对应的电阻为 r' , 电感为 x' , 电导为 g' , 电纳为 b' , 满足条件: $x=0, b=0, r'=1, g'=g, b+b_p=b', x'+x_p=0$, 其中 b_p 表示从 A 点移动到 B 点并联电容的电纳, $b_p = 2\pi f C_p / R_s$; L_p 表示从 B 点移动到 C 点的串联电感; x_p 为对应电抗, $x_p = 2\pi f L_p R_s$ 。根据上述条件并结合 $\frac{1}{g' + j(b+b')} = r' + jx'$, 可得图 2(a) 对应的元件参数表达式为^[12]

$$\begin{cases} L_p = \frac{\sqrt{g - g^2}}{g} \frac{R_s}{2\pi f} \\ C_p = \frac{\sqrt{g - g^2}}{2\pi f R_s} \end{cases} \quad (6)$$

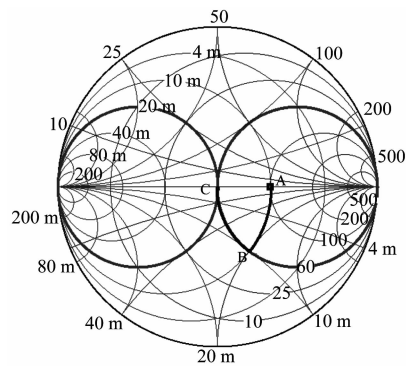
同理, 当 $r \in (0, 1)$ 时, 图 2(b) 对应的元件参数表达式为

$$\begin{cases} L_p = \frac{\sqrt{r - r^2}}{r} \frac{R_s}{2\pi f} \\ C_p = \frac{\sqrt{r - r^2}}{2\pi f R_s} \end{cases} \quad (7)$$

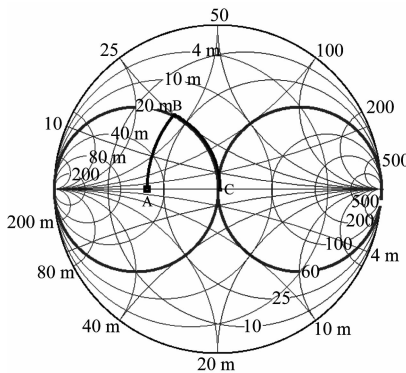
本文采用的匹配方法中归一化电阻 r 的范围为 $(0, \infty)$, 即不存在匹配禁区, 同时选用简单的二元件网络, 减少了由元件本身所产生的附加损耗。

分析式(6)和式(7)可以看出, 当电源内阻和系统频率固定时, 只要知道归一化电阻(归一化电导), 即只要测得输入电阻 R_{in} 就可求出匹配参数 L_p 、 C_p , 对比式(5), 求解计算量大大降低。

改进后的二线圈 MCR-WPT 系统等效电路模型如图 3 所示。通过检测发射端电压和电流可判断 r 的范围, 当 $0 < r < 1$ 时, s_1 导通, s_2 断开; 当 $r > 1$ 时, s_2 导通, s_1 断开, 再通过所推参数公式调节匹配



(a) 归一化电阻 $r \in (1, \infty)$



(b) 归一化电阻 $r \in (0, 1)$

图 2 基于 Smith 圆图的阻抗匹配方法

Fig. 2 Impedance matching method based on Smith chart

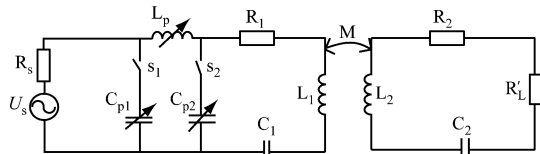


图 3 改进后的二线圈 MCR-WPT 系统等效电路模型

Fig. 3 Equivalent circuit model of improved two-coil MCR-WPT system

系数,从而实现系统的阻抗匹配。

2 仿真分析

在 MRC-WPT 系统的工程实践中,传输距离的改变较为常见,仿真实验通过调节耦合系数改变系统的传输距离,比较匹配前后系统负载接收到的功率,验证匹配方法的正确性。本文采用 Matlab/Simulink 仿真软件进行仿真,利用图 3 所示的二线圈 MRC-WPT 系统等效电路模型搭建仿真电路。电路仿真参数: $R_1=R_2=7\ \Omega$, $L_1=L_2=15\ \mu\text{H}$, $C_1=C_2=58\ \text{pF}$, $R_s=50\ \Omega$, $f=5.4\ \text{MHz}$,电源电压 $U_s=100\ \text{V}$ 。

固定系统频率不变,令等效负载 R'_L 取值为 25, 50,150 Ω ,通过检测输入端电压与电流,将归一化电阻代入相应的匹配参数公式调节 L_p 和 C_p 值,可以得到不同负载条件下,匹配前后接收功率随耦合系数 k 变化的曲线,如图 4 所示。

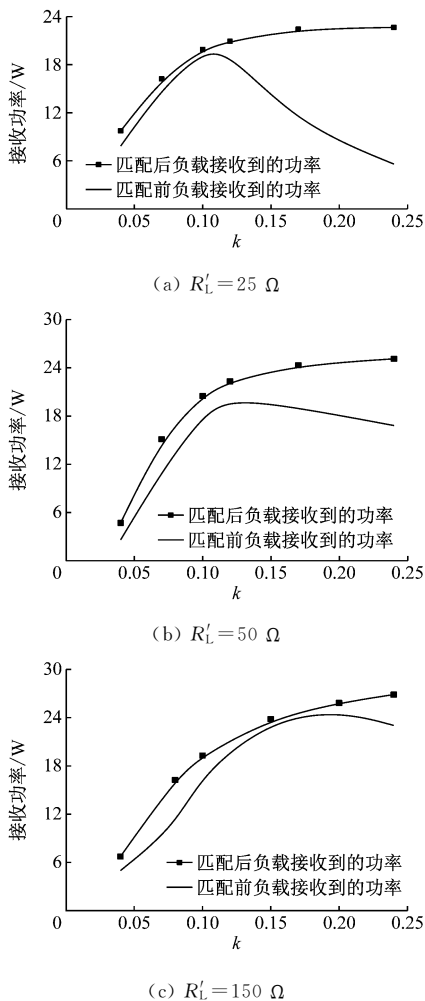


图 4 不同负载时,匹配前后接收功率随耦合系数变化的曲线

Fig. 4 Change curve of received power with coupling coefficient before and after matching under different loads

从图 4 可以看出,对于不同的负载电阻,接收功

率随耦合系数增加而先增大后趋于减小,原因是随着耦合系数增加,发射线圈与接收线圈的耦合强度增加,负载的接收功率先增加,当达到临界耦合系数后,系统处于过耦合,出现频率分裂,导致接收功率下降。从图 4 还可以看出,经公式推导后的匹配系统功率要优于未匹配的系统,且阻抗匹配对系统频率分裂有一定的抑制作用^[13-15]。

3 实验分析

3.1 实验装置

为验证阻抗匹配方法的正确性,搭建如图 5 所示实验装置。电源由 $f=5.4\ \text{MHz}$ 的信号发生器和功率放大器组成,电源电压 $U_s=100\ \text{V}$, $R_s=R_L=50\ \Omega$ 。发射、接收线圈参数:发射线圈 $L_1=15\ \mu\text{H}$, $R_1=7.1\ \Omega$, $C_1=58\ \text{pF}$;接收线圈 $L_2=15\ \mu\text{H}$, $R_2=7.3\ \Omega$, $C_2=58\ \text{pF}$ 。



图 5 无线电能传输实验装置

Fig. 5 Experiment device of wireless power transmission

3.2 实验分析

利用 R&S ZVL (9 kHz-6 GHz) 矢量网络分析仪对所设计的阻抗匹配参数进行验证。表 1 为传输距离 d 变化时通过公式计算和利用矢量网络分析仪测出的匹配参数值。由表 1 可知,随着传输距离 d 的改变,利用公式求得的阻抗匹配参数与实验结果基本一致。

设实验中发射线圈与接收线圈之间的初始距离为 6 cm,每移动一次,检测系统输入电压和输入电流的状况,通过所推参数公式调节匹配电感和匹配电容,使其满足匹配条件。记录 MRC-WPT 系统匹配前后的输出功率值,功率随距离变化的趋势如图 6 所示。从图 6 可看出,在相同距离下,匹配后得到的系统功率要明显大于未匹配的系统功率,实验结果和仿真结果基本一致。通过检测匹配前后系统发射端的功率,发现匹配前发射端发出的功率是一条略高于匹配前负载接收功率的曲线,且随距离的增大,2 条曲线差距越来越大,而匹配后发射端发出的功率基本稳定在一个固定值,且明显高于匹配前发射端发出的功率,进一步说明了所提方法的合理性。

表1 阻抗匹配参数计算与实验结果

Table 1 Impedance matching parameters calculation and experimental results

传输距离 d/cm	k	L_p/H		C_p/F	
		计算结果	实验结果	计算结果	实验结果
4	0.26	3.65×10^{-6}	3.50×10^{-6}	2.05×10^{-10}	2.13×10^{-10}
6	0.21	2.95×10^{-6}	2.90×10^{-6}	2.36×10^{-10}	2.39×10^{-10}
9	0.16	2.25×10^{-6}	2.20×10^{-6}	2.70×10^{-10}	2.73×10^{-10}
14	0.14	1.50×10^{-6}	1.50×10^{-6}	2.95×10^{-10}	2.98×10^{-10}
20	0.10	2.77×10^{-7}	2.65×10^{-7}	1.07×10^{-10}	1.12×10^{-10}
26.5	0.06	7.13×10^{-7}	7.07×10^{-7}	7.65×10^{-10}	7.66×10^{-10}

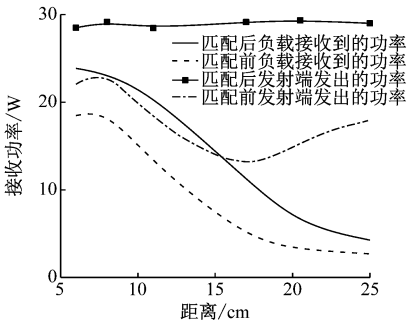


图6 功率随距离的变化曲线

Fig. 6 Change curve of power with distance

4 结语

运用等效电路理论和 Smith 圆图基本原理,推导出匹配网络的元件参数表达式,通过控制阻抗失配下的归一化电阻来调节匹配网络参数,实现 MCR-WPT 系统的阻抗匹配,该匹配方法网络结构简单且避免了复杂的计算过程。通过仿真和实验分析得出,相同条件下,采用该阻抗匹配方法的系统负载功率较匹配前得到了显著优化。该方法为实现 MCR-WPT 系统阻抗匹配的自适应控制提供了理论依据。

参考文献 (References):

[1] 李福林. 强磁耦合谐振无线电能传输系统中最佳阻抗匹配方法研究[D]. 长沙:长沙理工大学,2015.

[2] GONG Lijiao, LI Xinheng, CHAO Xuwei, et al. Study on load impedance matching characteristics of magnetic coupled resonant wireless power transfer system[J]. Journal of Magnetism, 2017, 22(3): 497-502.

[3] 邱丽莎, 磁耦合谐振式无线电能传输的阻抗匹配研究[D]. 长沙:湖南大学,2016.

[4] 邱丽莎, 黄守道, 李中启, 等. 磁耦合谐振式无线输电系统的阻抗匹配研究[J]. 电力电子技术, 2015, 49(10): 86-88.

QIU Lisha, HUANG Shoudao, LI Zhongqi, et al.

Research on impedance matching of wireless power transfer system via coupled magnetic resonances[J]. Power Electronics, 2015, 49(10): 86-88.

[5] 赵争鸣, 张艺明, 陈凯楠, 等. 磁耦合谐振式无线电能传输技术新进展[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(3): 1-13.

ZHAO Zhengming, ZHANG Yiming, CHEN Kainan, et al. New progress of magnetically-coupled resonant wireless power transfer technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(3): 1-13.

[6] 范兴明, 莫小勇, 张鑫, 等. 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): 2584-2600.

FAN Xingming, MO Xiaoyong, ZHANG Xin, et al. Research status and application of wireless power transmission technology [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(10): 2584-2600.

[7] 张国圆, 王习, 赵端, 等. 磁耦合谐振式无线电能传输系统传输特性分析[J]. 工矿自动化, 2015, 41(8): 85-88.

ZHANG Guoyuan, WANG Xi, ZHAO Duan, et al. Analysis of transmission characteristics of magnetically-coupled resonant wireless power transmission system [J]. Industry and Mine Automation, 2015, 41(8): 85-88.

[8] QIANG Hao, HUANG Xueliang, TAN Linlin, et al. Achieving maximum power transfer of inductively coupled wireless power transfer system based on dynamic tuning control [J]. Science China: Technological Sciences, 2012, 55(7): 1886-1893.

[9] 李福林, 潘绍胜, 李森涛, 等. 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): 105-108.

LI Fulin, PAN Shaosheng, LI Sentao, et al. Research on impedance matching method under the optimal efficiency of wireless power transfer [J]. Power Electronics, 2015, 49(4): 105-108.

[10] 田子建, 曹阳阳, 樊京, 等. 磁耦合谐振式无线电能传输系统功率优化[J]. 工矿自动化, 2016, 42(6):

33-37.

TIAN Zijian, CAO Yangyang, FAN Jing, et al. Transmission power optimization of magnetic resonance coupling wireless power transmission system [J]. Industry and Mine Automation, 2016, 42(6): 33-37.

[11] 李阳, 张雅希, 闫卓, 等. 磁耦合谐振式无线电能传输系统阻抗分析与匹配电路设计方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(22): 12-18.

LI Yang, ZHANG Yaxi, YAN Zhuo, et al. Impedance analysis and design of matching circuit in wireless power transfer system via coupled magnetic resonances[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(22): 12-18.

[12] 贾男, 宋玮, 王艳. 电力线载波通信自适应阻抗匹配电路设计[J]. 华北电力大学学报, 2017, 44(6): 55-60.

JIA Nan, SONG Wei, WANG Yan. Design of adaptive impedance matching network in power-line communication[J]. Journal of North China Electric Power University, 2017, 44(6): 55-60.

[13] 薛慧, 刘晓文, 孙志峰, 等. 基于磁耦合谐振式的无线电能传输系统负载特性研究[J]. 工矿自动化, 2015, 41(3): 66-70.

XUE Hui, LIU Xiaowen, SUN Zhifeng, et al. Research of load characteristics of wireless power transmission system based on magnetic coupling resonance[J]. Industry and Mine Automation, 2015, 41(3): 66-70.

[14] SAMPLE A P, MEYER D T, JOSHUA R S. Analysis, experimental results, and range adaptation of magnetically coupled resonators for wireless power transfer [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(2): 544-554.

[15] 兰永均, 龚立娇, 蔡新红, 等. 磁耦合谐振式无线电能传输系统频率特性分析[J]. 工矿自动化, 2016, 42(5): 67-70.

LAN Yongjun, GONG Lijiao, CAI Xinhong, et al. Analysis of frequency characteristics of magnetic coupled resonant wireless power transmission system [J]. Industry and Mine Automation, 2016, 42(5): 67-70.

~~~~~

(上接第 21 页)

HUANG Zenghua, MIAO Jianjun. Application research of equipment centralized control technology in fully-mechanized coal face [J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(11): 14-17.

[10] 王国法, 庞义辉. 综采成套技术与装备集成配套设计创新与实践[J]. 煤炭工程, 2018, 50(5): 1-5.

WANG Guofa, PANG Yihui. Integrated matching design innovation and practice of fully mechanized mining technology and equipment [J]. Coal Engineering, 2018, 50(5): 1-5.

[11] 张翠平, 孙志刚, 霍俊杰, 等. 新型煤岩识别技术在薄煤层无人综采工作面中的应用[J]. 煤矿安全, 2012, 43(1): 93-96.

ZHANG Cuiping, SUN Zhigang, HUO Junjie, et al. The application of new coal rock identification technology in unmanned full mechanized face of the thin coal seam[J]. Safety in Coal Mines, 2012, 43(1): 93-96.

[12] 孙永锋, 王亮, 党景锋. 薄煤层无人工作面采煤机关键技术及实现方法[J]. 煤矿机电, 2012(5): 30-32.

SUN Yongfeng, WANG Liang, DANG Jingfeng. Key technology and implementation method of unmanned thin seam shearer face [J]. Colliery Mechanical & Electrical Technology, 2012(5): 30-32.

[13] 黄乐亭, 黄曾华, 张科学. 大采高综采智能化工作面开采关键技术研究[J]. 煤矿开采, 2016, 21(1): 1-6.

HUANG Leting, HUANG Zenghua, ZHANG Kexue. Key technology of mining in intelligent fully mechanized coal mining face with large mining height [J]. Coal Mining Technology, 2016, 21(1): 1-6.

[14] 葛世荣. 智能化采煤装备的关键技术[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(9): 7-11.

GE Shirong. Key technology of intelligent coal mining equipment [J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(9): 7-11.

[15] 王刚, 方新秋, 谢小平, 等. 薄煤层无人工作面自动化开采技术应用[J]. 工矿自动化, 2013, 39(8): 9-13.

WANG Gang, FANG Xinqiu, XIE Xiaoping, et al. Application of automatic mining technology of unmanned coal face of thin seam [J]. Industry and Mine Automation, 2013, 39(8): 9-13.