

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2020.05.002

基于等效品质因数的 MC - WPT 系统金属异物检测技术

王赛豪¹, 戴欣², 沙云鹏¹, 王智慧², 乔会杰¹

(1. 平高集团有限公司, 河南 平顶山 467001; 2. 重庆大学 自动化学院, 重庆 400044)

摘要: 无线电能传输技术已逐渐被应用于生产生活的各个领域, 当磁耦合无线电能传输系统的发射端和拾取端之间或周围存在金属异物时, 会极大影响系统传输性能, 甚至会产生安全隐患。针对 S/S 型磁耦合无线电能传输系统, 提出了一种基于等效品质因数的非铁磁性金属异物检测方法, 给出了等效品质因数的定义, 建立了存在非铁磁性金属异物下 S/S 型 MC-WPT 系统等效品质因数模型, 阐述了金属异物的检测原理和方法。最后通过仿真实验验证了提出的金属异物检测方法的可行性和有效性。

关键词: 磁耦合无线电能传输系统; 金属异物检测; 等效品质因数

中图分类号: TM724

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2020)05-011-09

Metal foreign objects detection technology of MC-WPT system based on equivalent quality factor

WANG Saihao¹, DAI Xin², SHA Yunpeng¹, WANG Zhihui², QIAO Huijie¹

(1. Pinggao Group Co. Ltd., Pingdingshan 467001, Henan, P. R. China; 2. School of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: The wireless power transfer technology has been gradually applied to various fields of production and life. When there are metal foreign objects between or around the power transmitter and the power receiver of the magnetic coupling wireless power transfer system, the transmission performance of the system is greatly affected, and even a safety hazard may occur. Aiming at the S/S type magnetic coupling wireless power transfer (MC-WPT) system, this paper proposes a non-ferromagnetic metal foreign object detection method based on equivalent quality factor, and gives the definition of equivalent quality factor. The equivalent quality factor model of S/S type MC-WPT system under ferromagnetic metal foreign objects, the principle and method of detecting metal foreign objects are expounded. Finally, the feasibility and effectiveness of the proposed metal foreign object detection method are verified by simulation and experiment.

Keywords: magnetic coupling wireless power transfer; metal object detection; equivalent quality factor

收稿日期: 2020-01-20

基金项目: 平高集团有限公司科技资助项目(PGKJ2018-164); 国家自然科学基金资助项目(51777022)。

Supported by Science and Technology Project of Pinggao Group Co. Ltd(PGKJ2018-164); National Natural Science Foundation of China(51777022).

作者简介: 王赛豪(1984—), 男, 高级工程师, 主要从事机械制造与自动化工程方向研究, (E-mail) 15537532056@163.com。

近年来,磁耦合无线电能传输(MC-WPT, magnetic coupling wireless power transfer)技术不断取得进步与突破^[1-4],它是目前国内外极为热门的研究方向之一,应用面十分广泛,被应用到生物医疗、工业、电动汽车、家用器械、航空航天和国防等诸多领域^[5-8]。

在 MC-WPT 系统的应用中,当金属异物存在于耦合机构之间或周围时,会导致系统电能传输性能降低、无法正常工作,甚至会引发安全隐患,所以金属异物检测技术十分重要。目前国内外有关 MC-WPT 系统的金属异物检测已取得很多成果,但主要集中在铁磁性金属异物检测方面^[9-11],然而生活中常见的诸如铜、铝、不锈钢等非铁磁性金属也会对 MC-WPT 系统性能产生影响。文献[12]基于电路理论研究了金属铝板等非铁磁性导电介质对 MC-WPT 系统的影响。文献[13]分析了含非铁磁性金属在内的不同磁导率的金属异物对 MC-WPT 系统的影响规律。针对非铁磁性金属异物检测技术方面,文献大多仅分析研究了对 MC-WPT 系统的影响规律和影响机理,有关非铁磁性金属异物的检测方法鲜有报道。以 S/S 型磁耦合无线电能传输系统为对象,提出一种基于等效品质因数的非铁磁性金属异物检测方法,进行相关理论建模分析,并通过仿真和实验对所提出金属异物检测方法进行验证。

1 S/S 型磁耦合 WPT 系统

S/S(series/series)型 MC-WPT 系统拓扑如图 1 所示。系统主要分为能量发射端和拾取端 2 部分。在能量发射端,直流电压源 U_{dc} 提供整个系统的电能输入, MOSFET S1-S4 构成高频逆变电路,发射线圈 L_p 和补偿电容 C_p 串联构成了发射端串联谐振回路。在能量拾取端,接收线圈 L_s 和补偿电容 C_s 串联构成拾取端谐振回路,二极管 D1-D4 和滤波电容 $4C_L$ 构成整流滤波电路,将拾取端接收到的交流电能转换为直流电传递给负载 R_L 。

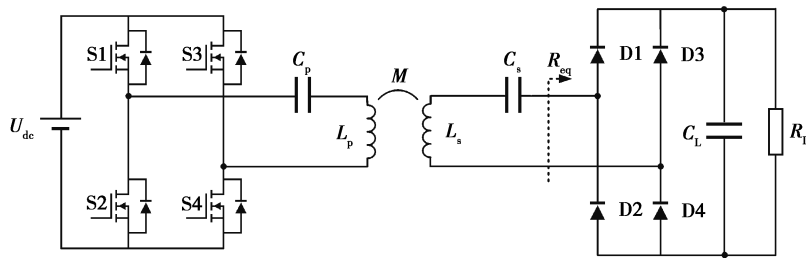


图 1 S/S 型磁耦合 WPT 系统拓扑

Fig.1 S/S-type Magnetic coupling WPT system topology

S/S 型 MC-WPT 系统主要具有结构简单、鲁棒性较强、输出电压增益较高等优点,并广泛应用于电动汽车无线充/供电、煤矿井下设备无线供电等领域^[14-15]。因此,以 S/S 型 MC-WPT 系统为对象,围绕非铁磁性金属异物检测方法展开研究。为了提高 MC-WPT 系统的电能传输性能,一般会使系统的工作角频率 ω 等于发射端、拾取端的固有谐振频率 ω_0 ,即满足如下关系

$$\omega^2 = \omega_0^2 = \frac{1}{L_p C_p} = \frac{1}{L_s C_s} \quad (1)$$

2 S/S 型 MC-WPT 系统的等效品质因数检测原理分析

2.1 等效品质因数的定义

拾取端移除后的 S/S 磁耦合 WPT 系统等效电路如图 2 所示。 \dot{U}_s 为等效逆变输出方波电压源, R_p 、 L_p 分别为发射线圈等效串联电阻和发射线圈自感, C_p 为发射端补偿电容。根据基波近似原理进行分析^[15], 图示中的 \dot{U}_2 和 \dot{U}_1 可表示为

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_p (j\omega L_p + R_p), \quad (2)$$

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_p \left(j\omega L_p + \frac{1}{j\omega C_p} + R_p \right), \quad (3)$$

当电路处于谐振状态时,将 \dot{U}_2 比上 \dot{U}_1 可得

$$\begin{cases} \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{j\omega L_p + R_p}{R_p} = 1 + jQ_p; \\ \frac{U_2}{U_1} = \sqrt{1 + Q_p^2}, \end{cases} \quad (4)$$

其中: $Q_p = \frac{\omega L_p}{R_p}$ 为图 2 所示系统的品质因数, U_2 、 U_1 分别为 \dot{U}_2 、 \dot{U}_1 的有效值。

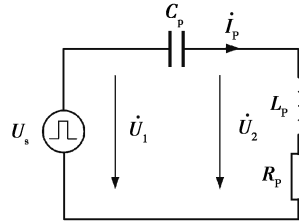


图 2 拾取端移除后 MC-WPT 系统等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuit of MC-WPT system without power receiver

由式(4)可以看出, U_2/U_1 只与系统的品质因数 Q_p 相关。对于磁耦合无线电能传输系统,系统的品质因数是其非常重要的参数,它反映的是电路谐振的强弱程度,它的大小直接影响了系统的性能,可以作为评判电路损耗情况的重要指标。因此,将 U_2/U_1 定义为等效品质因数,用 Q_e 表示

$$Q_e = \frac{U_2}{U_1}. \quad (5)$$

2.2 S/S 型 MC-WPT 系统的等效品质因数

典型 S/S 型 MC-WPT 系统的等效电路图如图 3 所示。

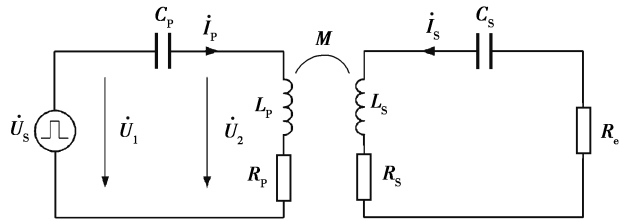


图 3 S/S 型 MC-WPT 系统等效电路图

Fig. 3 Equivalent circuit of S/S-type MC-WPT system

\dot{U}_s 为等效逆变输出方波电压源, R_p 、 L_p 分别为发射线圈等效串联电阻和发射线圈自感, C_p 为发射端补偿电容。 R_s 、 L_s 分别为接收线圈等效串联电阻和接收线圈自感, C_s 拾取端串联补偿电容, R_{eq} 为整流滤波电路与负载的等效电阻, $R_{eq} = R_L \cdot 8/\pi^2$ 。 M 为耦合机构的互感,流经发射端和拾取端的电流分别为 \dot{I}_p 和 \dot{I}_s 。根据电路基本理论可得发射端和拾取端的 KVL 方程

$$\begin{cases} \dot{U}_s = \dot{I}_p \left(j\omega L_p + \frac{1}{j\omega C_p} + R_p + \frac{\omega^2 M^2}{Z_s} \right); \\ 0 = \dot{I}_s \left(j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s} + R_s + R_{eq} + \frac{\omega^2 M^2}{Z_p} \right); \end{cases} \quad (6)$$

$$Z_p = j\omega L_p + \frac{1}{j\omega C_p} + R_p; \quad (7)$$

$$Z_s = j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s} + R_s + R_{eq}, \quad (8)$$

其中, Z_p 和 Z_s 分别是发射端和拾取端的阻抗。

由式(6)可求得流经发射端电流 \dot{I}_p 表达式为

$$\dot{I}_p = \frac{\dot{U}_s (R_{eq} + R_s)}{M^2 \omega^2 + R_p R_s + R_p R_{eq}} \quad (9)$$

此时的 \dot{U}_2 和 \dot{U}_1 可分别表示为

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_s - \frac{1}{j\omega C_p} \dot{I}_p, \quad (10)$$

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_p \left(j\omega L_p + \frac{1}{j\omega C_p} + R_p + \frac{\omega^2 M^2}{Z_s} \right) = \dot{U}_s. \quad (11)$$

由式(10)和式(11)可得, S/S 型 MC-WPT 系统无金属异物时等效品质因数 Q_e 为

$$Q_e = \frac{U_2}{U_1} = \sqrt{1 + \left(\frac{\omega L_p (R_{eq} + R_s)}{M^2 \omega^2 + R_p R_s + R_p R_{eq}} \right)^2}. \quad (12)$$

由式(12)可以看出, 当 SS 型 MC-WPT 系统不存在金属异物时, 系统的等效品质因数值仅与本身系统参数相关联, 当系统参数一旦确定, 电路的等效品质因数 Q_e 则是个定值。

2.3 非铁磁性金属异物影响下 S/S 型 MC-WPT 系统的等效品质因数

MC-WPT 系统耦合机构之间或周围出现的非铁磁性导电介质可以被等效为一个电感 L_m 和电阻 R_m 串联的涡流计算回路^[12-16], 含非铁磁性金属异物的 S/S 型 MC-WPT 系统等效电路图如图 4 所示。在非铁磁性金属异物的等效电路中, R_m 为涡流计算回路内阻, 表示涡流引起的能量损耗, L_m 为涡流计算回路等效电感, 表示涡流磁场对谐振线圈磁场的影响, M_{pm} 和 M_{sm} 分别代表金属异物与发射线圈和接收线圈的耦合互感。当电路处于谐振状态时, 原边电路、副边电路和金属异物等效回路方程可分别表示为

$$\begin{cases} \dot{U}_s = \dot{I}_p \left(j\omega L_p + \frac{1}{j\omega C_p} + R_p \right) + j\omega M \dot{I}_s + j\omega M_{pm} \dot{I}_m; \\ 0 = \dot{I}_s \left(j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s} + R_s + R_{eq} \right) + j\omega M \dot{I}_p + j\omega M_{sm} \dot{I}_m; \\ 0 = \dot{I}_m (j\omega L_m + R_m) + j\omega M_{pm} \dot{I}_p + j\omega M_{sm} \dot{I}_s; \\ Z_m = j\omega L_m + R_m, \end{cases} \quad (13)$$

其中, Z_m 为异物电路等效电抗。

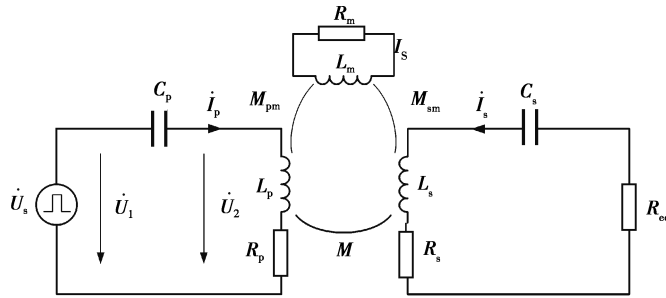


图 4 非铁磁性金属异物影响下的 S/S 型 MC-WPT 系统等效电路图

Fig. 4 Equivalent circuit of S/S-type MC-WPT system with Non-ferromagnetic foreign metal object

同理, 由式(13)可求得存在非铁磁性金属异物时等效品质因数 Q_e 为

$$\begin{aligned} Q_e = \frac{U_2}{U_1} &= \sqrt{\left(1 + \omega L_p \frac{ad - bc}{c^2 + d^2} \right)^2 + \left(\omega L_p \frac{ac + bd}{c^2 + d^2} \right)^2}; \\ a &= M_{sm}^2 \omega^2 + (R_s + R_{eq}) R_m; \\ b &= \omega L_m (R_s + R_{eq}); \\ c &= R_p M_{sm}^2 \omega^2 + M^2 R_m \omega^2 + M_{pm}^2 (R_s + R_{eq}) \omega^2 + R_p (R_s + R_{eq}) R_m; \\ d &= L_m M^2 \omega^3 - 2MM_{pm} M_{sm} \omega^3 + \omega R_p (R_s + R_{eq}) L_m. \end{aligned} \quad (14)$$

从上述分析中可以看出,在存在非铁磁性金属异物的 MC-WPT 系统等效品质因数表达式中,除了金属异物等效回路中的参数 R_m 、 L_m 、 M_{pm} 和 M_{sm} 以外,其他均为系统参数。系统参数一旦确定,电路的等效品质因数 Q_e 只与非铁磁性金属异物的参数相关。因此当耦合机构之间或周围出现非铁磁性金属异物后,等效品质因数 Q_e 会发生改变,变化程度仅与非铁磁性金属异物的尺寸和种类有关,因此可将 Q_e 作为判断系统中是否存在非铁磁性金属异物的评判依据,根据非铁磁性金属异物的种类和尺寸以及式(12)和式(14)确定是否存在非铁磁性金属异物的阈值。

3 仿真与实验验证

基于上述分析,通过 MATLAB/Simulink 建立存在非铁磁性金属异物的 S/S 型磁耦合 WPT 系统仿真模型如图 5 所示,参照文献[17]得到系统的主要参数如表 1。通过仿真对基于等效品质因数的非铁磁性金属异物检测方法进行验证。

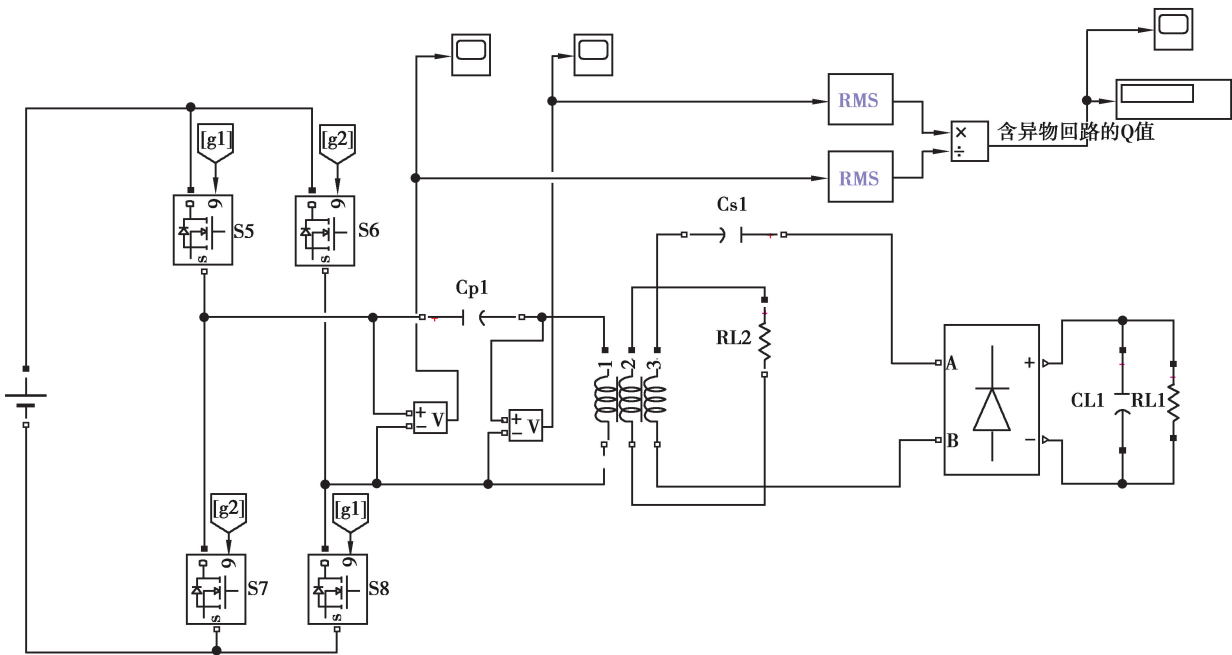


图 5 存在非铁磁性金属异物的 S/S 型磁耦合 WPT 系统仿真模型

Fig. 5 Simulation model of S/S-type MC-WPT system with the foreign metal object

表 1 系统仿真参数

Table 1 System simulation parameters

参数	单位	数值
谐振频率	Hz	85 000
直流电源电压	V	15
发射端线圈自感	H	150e-6
发射端线圈电阻	Ω	0.5
接收端线圈自感	H	150e-6
接收端线圈电阻	Ω	0.5
耦合机构互感	H	18e-6
接收端负载电阻	Ω	25

基于图 4 所建立的等效电路模型,将非铁磁性金属异物以一个新介入电路的形式体现到仿真模型中,如图 5 所示,涡流计算回路仿真参数见表 2。在仿真验证时,只需将电阻模块“RL2”设置为开路,即可进行不存在非铁磁性金属异物的 S/S 型磁耦合 WPT 系统仿真。

表 2 金属异物等效回路仿真参数

Table 2 simulation parameters of equivalent metal circuit

参数	单位	数值
耦合机构互感	H	18e-6
金属回路自感	H	1e-5
金属回路电阻	Ω	1

经过仿真,无金属异物回路 MC-WPT 系统和加入金属异物回路的 MC-WPT 系统的等效品质因数变化曲线如图 6 所示,其中实线表示无金属异物回路的等效品质因数 Q_e 曲线,虚线表示含金属异物回路的等效品质因数 Q_e 曲线。从仿真结果中可以看出,当系统不含金属异物时,其等效品质因数约为 14.88,在加入金属异物后,系统的等效品质因数值有较大幅度降低,约为 9.65。从仿真结果可以看出提出基于等效品质因数的变化能够有效实现金属异物的检测。

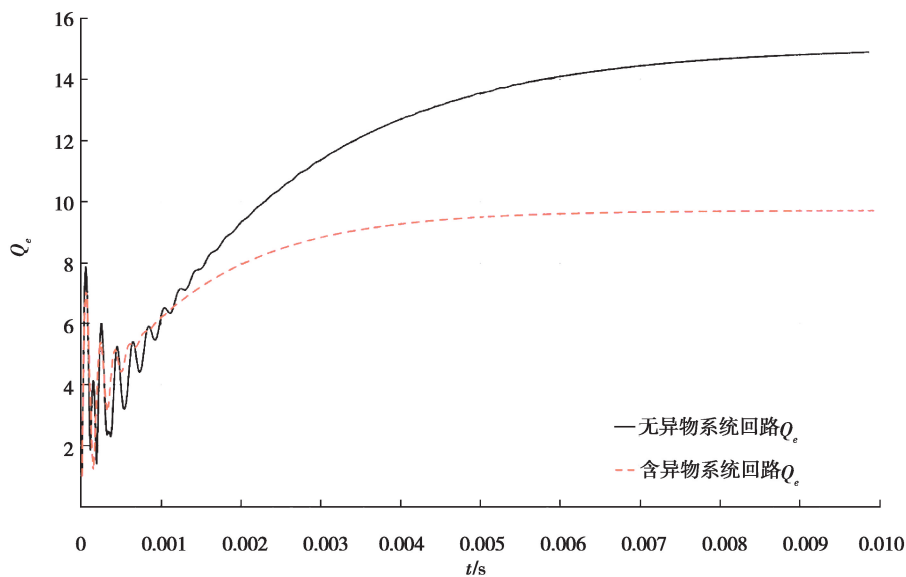


图 6 无异物/含异物回路的 Q_e 波形图

Fig. 6 Q_e waveform diagram without foreign object/with foreign object

为进一步验证其可行性,根据图 1 的系统拓扑和表 1 的系统参数,研究搭建了具有非铁磁性金属异物检测功能的 S/S 型 MC-WPT 系统样机,如图 7 所示。实验装置主要包含直流电源、逆变电路、FPGA 最小系统板、STM32 开发板、耦合机构、发射端/拾取端补偿电容、整流桥和负载功率电阻几部分。其中,FPGA 控制频率合成模块产生高频方波信号,用以驱动逆变电路中的 MOSFET IRPF460,STM32 开发板用于系统中 \dot{U}_2 和 \dot{U}_1 数据的实时采集和等效品质因数计算,并给出显示结果。

当系统工作于无金属异物状态下,通过示波器测量出 \dot{U}_2 和 \dot{U}_1 波形如图 8 所示,A 为发射线圈 2 端电压 \dot{U}_2 ,其有效值为 43.4 V,B 为逆变输出方波电压 \dot{U}_1 ,其有效值为 4.91 V。由此可测得本系统在无非铁磁性金属异物状态下的等效品质因数为 8.8。

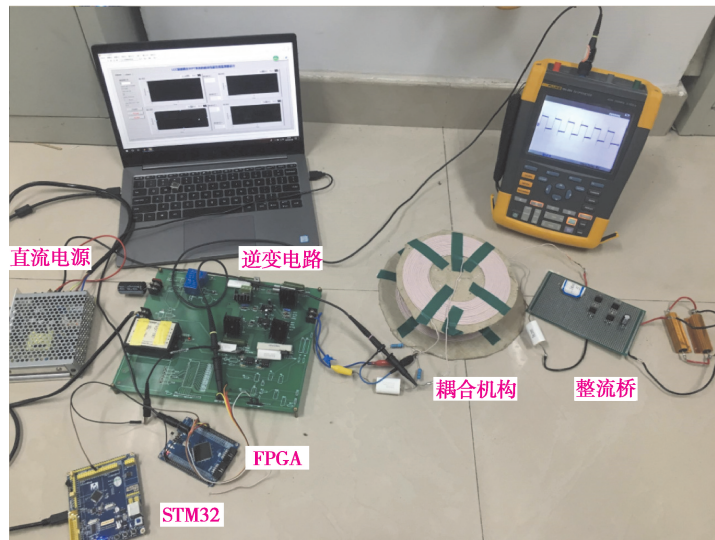


图 7 S/S 型 MC-WPT 系统及金属异物检测装置样机

Fig. 7 Prototype of S/S type MC-WPT system with metal foreign object detecting device

将铜质散热片、铝质保护壳、不锈钢方形薄片(具体尺寸见表 3)3 种非铁磁性金属异物分别放置于系统传能通道之间的同一位置进行检测,通过示波器测量出 \dot{U}_2 和 \dot{U}_1 的波形如图 9~11 所示。

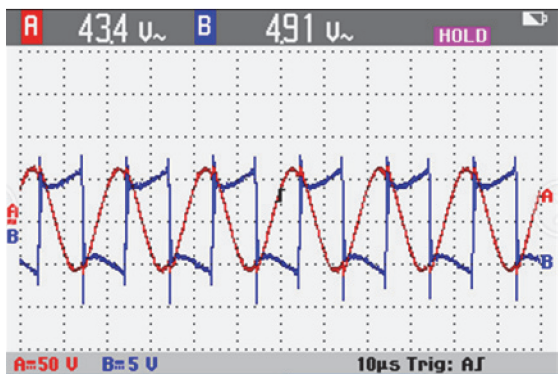


图 8 无金属异物波形图

Fig. 8 Waveforms of MC-WPT system without foreign metal objects

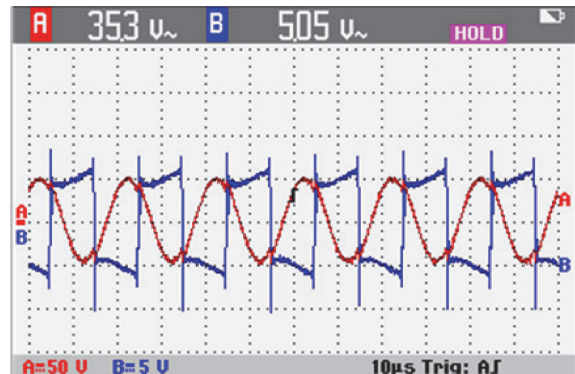


图 9 金属物为铜质散热片的波形图

Fig. 9 Waveform of MC-WPT system with a copper heat sink

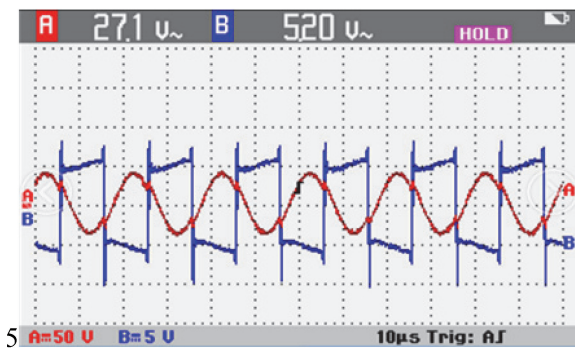


图 10 金属物为铝质保护壳的波形图

Fig. 10 Waveform of MC-WPT system with an aluminum alloy protective case

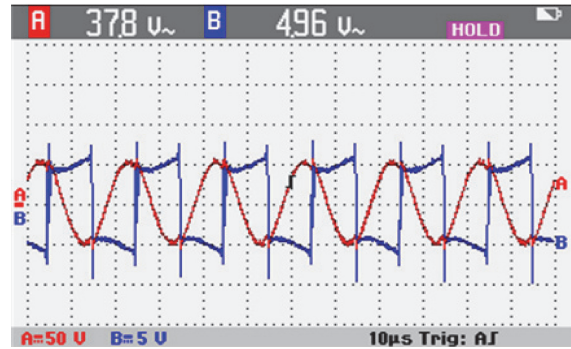


图 11 金属物为不锈钢方形薄片的波形图

Fig. 11 Waveform of MC-WPT system with a stainless steel square sheet

不同异物情况下等效品质因数如表 3 所示,其与系统样机测试的显示结果基本一致,相比于无非铁磁性金属异物状态下的等效品质因数都有一定程度降低。实验结果进一步证明,非铁磁性金属异物对等效品质因数 Q 存在较大程度影响,可通过检测等效品质因数判断非铁磁性金属异物的有无。

表 3 等效品质因数测量结果

Table 3 equivalent quality factor measurement results

异物尺寸/mm	等效品质因数
无	8.8
铜质散热片(65×45×5)	6.99
铝质保护壳(50×50×10)	5.2
不锈钢方形薄片(40×40×4)	7.62

4 结 论

对 MC-WPT 系统非铁磁性金属异物检测技术进行了研究。以 S/S 型磁耦合 WPT 系统为对象,提出了一种基于等效品质因数的金属异物检测方法。通过对不存在和存在非铁磁性金属异物情况下 MC-WPT 系统的理论分析,建立了 S/S 型磁耦合 WPT 系统等效品质因数模型,给出了判定是否存在非铁磁性金属异物的阈值确定方法;通过 MATLAB/Simulink 建立含有非铁磁性金属异物的 S/S 型 MC-WPT 系统仿真模型,给出了仿真验证结果;搭建了相应的实验装置,进行实验验证。仿真和实验结果均表明,等效品质因数可作为非铁磁性金属异物检测的依据,基于等效品质因数的金属异物检测方法可有效检测发射端和接收端之间或周围的非铁磁性金属异物,并且实现比较简单。

参考文献:

- [1] 苏玉刚, 陈龙, 吴学颖, 等. 基于遗传算法的 SS 型磁耦合 WPT 系统负载与互感识别方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(18): 4199-4206.
SU Yugang, CHEN Long, WU Xueying, et al. Load and mutual inductance identification method of SS-type magnetically-coupled WPT system based on genetic algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(18): 4199-4206. (in Chinese)
- [2] 杨芳勋, 孙跃, 夏晨阳. 求解 ICPT 电源规划问题的改进混合蛙跳算法[J]. 重庆大学学报, 2012, 35(6): 105-111.
YANG Fangxun, SUN Yue, XIA Chenyang. A novel shuffled frog leaping algorithm for ICPT power programming [J]. Journal of Chongqing University, 2012, 35(6): 105-111. (in Chinese)
- [3] Song K, Li Z, Jiang J, et al. Constant current/voltage charging operation for series-series and series-parallel compensated wireless power transfer systems employing primary-side controller[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(9): 8065-8080.
- [4] Su Y, Chen L, Wu X, et al. Load and mutual inductance identification from the primary side of inductive power transfer system with parallel-tuned secondary power pickup [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(11): 9952-9962.
- [5] Qian Z, Yan R, Wu J, et al. Full-duplex high-speed simultaneous communication technology for wireless EV charging [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(10): 9369-9373.
- [6] 苏玉刚, 王小飞, 唐春森, 等. 非接触电能传输系统双模控制式交直交变换器[J]. 重庆大学学报, 2010, 33(8): 12-16.
SU Yugang, WANG Xiaofei, TANG Chunsen, et al. Dual-mode AC-DC-AC converter for contactless power transfer system[J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(8): 12-16. (in Chinese)
- [7] Mohammad M, Wodajo E T, Choi S, et al. Modeling and design of passive shield to limit EMF emission and to minimize shield loss in unipolar wireless charging system for EV [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(12): 12235-12245.

- [8] 王智慧,孙跃,戴欣,等. DC-AC型非接触电能传输系统变换器设计[J]. 重庆大学学报,2011,34(2):38-43.
WANG Zhihui, SUN Yue, DAI Xin, et al. Design of converter of DC-AC type contactless power transfer system[J]. Journal of Chongqing University,2011,34(2):38-43. (in Chinese)
- [9] Jeong J W, Ryu S H, Lee B K, et al. Tech tree study on foreign object detection technology in wireless charging system for electric vehicles[C/OL]. 2015 IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC). New York, USA: IEEE,2016(2016-09-22)[2020-02-15]. <https://doi.org/10.1109/INTLEC.2015.7572294>.
- [10] 陈琛,黄学良,孙文慧,等. 金属障碍物对磁耦合谐振无线电能传输系统的影响[J]. 电工技术学报,2014,29(9):22-26.
CHEN Chen, HUANG Xuiliang, SUN Wenhui, et al. Impact of metal obstacles on wireless power transmission system based coupled resonance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2014,29(9):22-26. (in Chinese)
- [11] Kuyvenhoven N, Dean C, Melton J, et al. Development of a foreign object detection and analysis method for wireless power systems[C/OL]. 2011 IEEE Symposium on Product Compliance Engineering Proceedings. New York, USA: IEEE,2011(2011-11-01)[2020-02-15]. <https://doi.org/10.1109/PSES.2011.6088250>
- [12] 景无为. 非铁磁性导电介质影响下无线传能系统的分析及优化[D]. 南京:东南大学,2016.
JING Wuwei. Research on characteristic and optimization design of wireless power transfer through non-ferromagnetic conductive medium[D]. Nanjing: Southeast University,2016. (in Chinese)
- [13] 章鹏程. 金属障碍物对无线电能传输系统扰动机理研究[D]. 天津:天津工业大学,2016.
ZHANG Pengcheng. Study on the disturbance mechanism of metal obstacles to wireless energy transmission system [D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University,2016. (in Chinese)
- [14] 麦瑞坤,陈阳,刘野然. 基于变补偿参数的IPT恒流恒压电池充电研究[J]. 中国电机工程学报,2016,36(21):5816-5821.
MAI Ruikun, CHEN Yang, LIU Yeran. Compensation capacitor alteration based IPT battery charging application with constant current and constant voltage control[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(21):5816-5821. (in Chinese)
- [15] 夏晨阳,庄裕海,卢振洲,等. 高瓦斯矿井无线供电系统安全容量研究[J]. 电工技术学报,2013(S2):71-74.
XIA Chenyang, ZHUANG Yuhai, LU Zhenzhou, et al. Research of safety capability for wireless power supply system used in high gas mine[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2013(S2):71-74. (in Chinese)
- [16] Bihan Y L. Study on the transformer equivalent circuit of eddy current nondestructive evaluation [J]. NDT & E international, 2003,36(5):297-302.
- [17] 崔硕. 基于频率跟踪的磁耦合谐振式电动汽车无线充电技术研究[D]. 青岛:山东大学,2019.
CUI Shuo. Research on frequency tracking technology for wireless charging System of magnetically coupled resonant electric vehicle[D]. Qingdao: Shandong University,2019. (in Chinese)

(编辑 侯 湘)