

超声耦合无线传能系统金属介质传输效率研究

闫孝姮 姜亚雷 陈伟华 朱正印

(辽宁工程技术大学电气与控制工程学院 辽宁 葫芦岛 125105)

摘要 磁耦合谐振式的无线电能传输方式在面对需要穿透金属障碍物的传输环境时,由于产生涡流效应,导致传输能量的损失以及产生大量热量造成系统的破坏。超声耦合无线传能是利用超声波实现无线电能传输的一种方式,有望在水下金属环境中应用。为研究不同金属传输介质在这种方式下的传输性能,设计一个在金属介质下的超声耦合无线电能传输实验系统,包括信号产生模块、功率放大模块以及发射端和接收端阻抗匹配模块等部分。超声波的发射和接收均采用压电换能器。在完成硬件设计基础上,采用铁、铝、铜金属作为传输介质进行实验。实验表明,同等条件下传能系统穿透金属铝的传输效率最高。

关键词 超声耦合 金属介质 无线电能传输 阻抗匹配

中图分类号 TM92 TP3 文献标识码 A DOI:10.3969/j.issn.1000-386x.2018.11.031

STUDY ON TRANSMISSION EFFICIENCY OF METAL MEDIUM IN ULTRASONIC COUPLED WIRELESS ENERGY TRANSMISSION SYSTEM

Yan Xiaoheng Jiang Yalei Chen Weihua Zhu Zhengyin

(Faculty of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, Liaoning, China)

Abstract Magnetic coupled resonant wireless energy transmission mode leads to the loss of transmission energy and the destruction of the system by the generation of large amounts of heat because of the eddy current effect in the face of transmission environments that require the penetration of metallic obstacles. Ultrasonic coupled wireless energy transmission is a method to achieve wireless energy transmission by ultrasound, which is expected to be applied in underwater metal environments. In order to study the transmission performance of different metal transmission media in this mode, an experimental system was designed for ultrasonic coupled wireless energy transmission in metal medium, including signal generation module, power amplification module, and impedance matching module of transmitter and receiver. Transmitter and receiver of ultrasound used piezoelectric transducers. On the basis of the completion of hardware design, experiments were carried out by using iron, aluminum and copper metal as transmission media. The results show that the metal aluminum has the highest transmission efficiency in the energy transmission system under the same conditions.

Keywords Ultrasonic coupling Metal medium Wireless energy transmission Impedance matching

0 引言

在一些高温、高压、放射性及水下等特殊金属环境如汽潜艇壳体、压力容器、炮弹壳体,要对其内部的传感器进行充电,如果采用打孔引线来实现,就会破坏其结构的完整性,对其安全性造成一定的影响^[1-2]。由

于磁耦合谐振式的无线电能传输方式在金属环境中,会有涡流效应的产生,这将导致系统产生大量热量造成能量损失以及系统破坏^[3]。压电材料与金属材料比较相似的声阻抗特性,使超声波对金属具有良好的透射能力,因此超声耦合无线传能系统,可在密闭的金属环境中实现高效的能量传输^[4-5]。该技术良好的安全性和便捷性能,使它海洋、矿山、医疗、航空航天、生

物、军事、石化等比较特殊的环境中具有非常广阔的应用前景^[6-8]。为了研究不同金属介质在超声无线传能系统中的传输特性,本文设计了一套采用压电换能器的金属介质超声无线传能实验系统,其中包括高频信号产生、功率放大以及发射端与接收端阻抗匹配等模块。在该实验平台,分别对铁、铝、铜三种金属作为传输介质时的超声无线传能系统进行实验。

1 超声无线传能系统的结构

超声耦合无线电能传输系统包括函数发生器、功率放大器、发射端阻抗匹配模块、发射换能器、金属介质、接收换能器、接收端阻抗匹配模块以及负载等几部分组成。其系统结构如图 1 所示。其中函数发生器和功率放大器构成超声信号源,通过发射端阻抗匹配模块进行阻抗匹配,使发射端压电换能器能够获得理想的电信号,压电换能器将电信号转化为超声信号。超声波通过在金属介质中的传递,进入接收换能器中,接收换能器利用逆压电效应将超声波再转化为电信号,经接收端阻抗匹配模块的处理,为负载提供理想的电能,从而实现产生无线传能的效果。

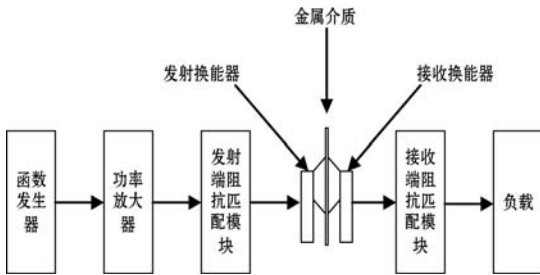


图 1 超声无线传能系统结构图

2 超声传能系统金属介质传输特性分析

由文献[9]可知,声能的衰减可分为扩散衰减、吸收衰减和散射衰减三种类型。扩散衰减主要跟换能器特性有关,而吸收衰减和散射衰减主要受介质特性的影响。从声学角度来分析,介质传输特性对超声无线传能系统的性能影响是比较复杂的物理过程。本文从机电等效原理引入的 M 值出发,通过实验直接验证不同金属介质传输特性对超声无线传能系统的性能影响。根据压电换能器工作原理和机电等效原理^[10-11],可得系统的等效电路模型如图 2 所示,超声无线传能系统由发射端和接收端组成。图中下标符号 1 和 2 的 C_p, L, C, R , 分别表示发射端和接收端的静态电容、动态电感、动态电容、换能器的机械损耗电阻与负载电阻的和。

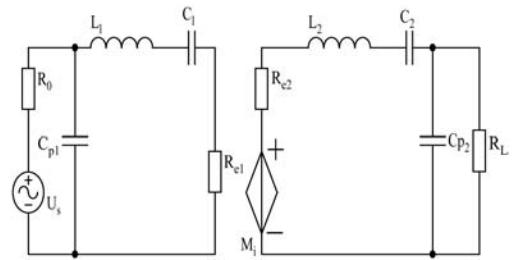


图 2 系统等效电路模型

当发射端施加激励电压的频率与换能器的串联谐振频率相同时,发射端与接收端发生机械共振。此时系统中 L_1 和 C_1, L_2 和 C_2 分别发生串联谐振时,压电换能器的振幅最大,弹性能量最大,换能器在串联谐振频率 f_s 上工作,系统可获得最大的电能传输能力。可得到简化的系统等效电路模型如图 3 所示。其中接收端输入电压可以看作是一个大小为 M_i 的电流控制电压源(ccvs),其中动态支路电流 i 和控制系数 M , 分别反映了发射换能器振子的振速和超声波在耦合介质中传播时振幅衰减的大小。

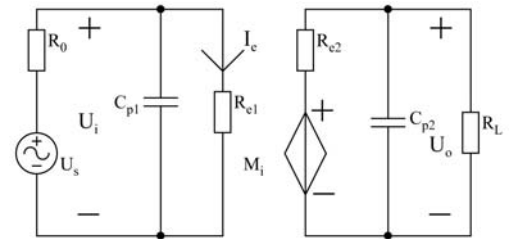


图 3 系统简化等效电路模型

由图 3 可知,接收端输出电压为:

$$\dot{U}_o = M \dot{i} \frac{Z_2}{R_2 + Z_2} \tag{1}$$

式中: $Z_2 = \frac{R_L}{(1 + j\omega_s C_{p2} R_L)}$, $\dot{i} = \frac{\dot{U}_i}{R_1}$ 。接收端输出电压与发射端输入电压之间的关系为:

$$\frac{U_o}{U_i} = M \left| \frac{Z_2}{(Z_2 + R_2) R_1} \right| \tag{2}$$

由式(1)、式(2)可知,当系统参数确定后,系统的输出电压 U_o 仅与控制系数 M 值有关,而 M 的值与超声波在金属介质中的扩散损耗、散射损耗以及金属介质对超声波的吸收损耗有关。

3 超声耦合无线传能系统设计

3.1 信号产生模块设计

本文采用的信号产生模块,是一种由单片机对高频函数发生器 MAX038 芯片进行程序控制的函数发生器。该发生器能够输出正弦波、三角波和方波三种信号波,输出信号的频率可通过程序控制在 0.1 Hz ~ 20 MHz 范围内,具有输出波形稳定,失真度小等优点。

3.2 功率放大模块设计

目前供无线电能传输系统的高频电源电路主要有全桥逆变电路和 E 类放大电路。全桥电路是对直流电源进行逆变产生正负交替的方波交流电,而 E 类放大电路是对直流电进行斩波产生正和零交替的高频方波。由于拓扑结构和控制方法的不同,两种电路适用于不同的场合。

3.2.1 全桥电路

全桥电路如图 4 所示,将开关管 VT₁、VT₄ 作为一组一起导通,VT₂、VT₃ 作为一组一起导通,两组 MOS 管轮流通断,依靠 MOS 管的通断控制电流的流通过径。这样在阻感负载上就会产生高低电平交替变化的矩形波电压信号,其幅值和输入电压相同。但是在全桥电路换流过程中,需要防止一组桥臂两个 MOS 管一起开通而致使电路短路,需要留有一定的死区时间,控制相对复杂,并且受制于开关器件开关速度的限制。因此全桥逆变电路更适合逆几百赫兹以下的大功率、低频的谐振式无线电能传输系统^[12]。

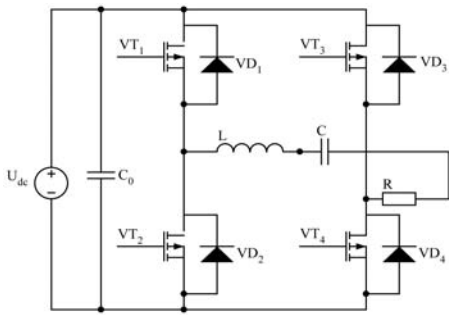


图 4 全桥逆变电路

3.2.2 E 类放大电路

E 类放大电路如图 5 所示,整个电路仅有一个开关管。与全桥电路相比,E 类电路结构简单,激励信号只控制一个开关管的开通和关断,可以产生较高频率的电源,但是开关管承受的电压为全桥电路的两倍。因此 E 类放大电路更适合为高频、中小功率的无线电能传输供电。目前的研究表明,E 类放大电路能产生高频电源(MHz),传输效率的理论值可以达到 100%,因此采用 E 类放大电路更合适。

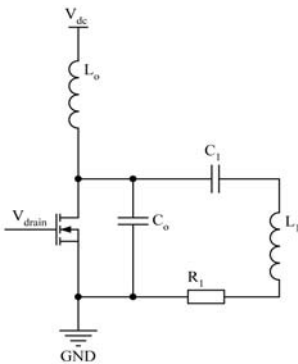


图 5 E 类放大电路

图 5 中电感 L₀ 为电源供电端的输入电感,起到扼流作用,应该足够大,以保证流过电感 L₀ 的电流 I₀ 为恒定值。C₀ 为开关管的旁路电容,可以保证开关管处于软开关状态。L₁、C₁ 为无线传输系统的发射部分,其电路的工作原理为:在信号 V_{drive} 的激励作用下,当开关管导通时,电容 C₀ 被短路,L₁、C₁ 两端的电压近似为零;当开关管关断时,电源 V_{dc} 对 L₁、C₁ 电路充电,谐振电路两端的电压为近似为 V_{ds}。在一个周期内,由于 C₀ 的存在,使开关管处于软开关状态,L₁、C₁ 的二端口网络在幅值为 V_{ds},周期为激励信号频率的方波激励下处于串联谐振状态。

3.3 发射接收端阻抗匹配模块

根据系统电路对外表现为容性的特性,可采用串、并联电感的方式进行调谐,使其电路对外成纯电阻特性,其等效电路如图 6 所示。

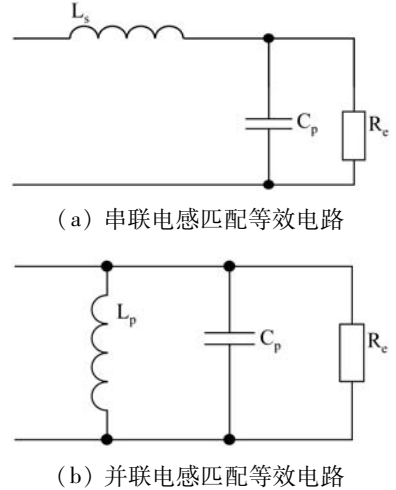


图 6 换能器匹配电路

由图 6(a) 可知在系统工作在串联谐振频率 f_s 处时,其等效总输入阻抗 Z_i 可表示为:

$$Z_i = \frac{R_c}{1 + (\omega_s C_p R_c)^2} + j \left(\omega_s L_s - \frac{\omega_s C_p R_c^2}{1 + (\omega_s C_p R_c)^2} \right) \quad (3)$$

为使换能器系统对外表现为纯电阻的工作状态,可令 Z_i 的虚部等于零,进而得串联电感 L_s 的大小为:

$$L_s = \frac{C_p R_c^2}{1 + (\omega_s C_p R_c)^2} \quad (4)$$

由图 6(b) 可得,在 f_s 处换能器的等效输入阻抗 Z_i 为:

$$Z_i = \frac{j \omega_s L_p R_c}{j \omega_s L_p + R_c (1 - \omega_s^2 L_p C_p)} \quad (5)$$

令虚部为零,得并联电感 L_p 的大小为:

$$L_p = \frac{1}{\omega_s^2 C_p} \quad (6)$$

对于系统的发射端而言,发射换能器的阻抗匹配网络不但要能消除换能器的容性无功,还应起到阻抗

变换的作用,使其等效电阻 R_e 上获得可控的功率。本文采用 LC 阻抗匹配网络如图 7 所示,由并联电容和串联电感构成。通过调整匹配电感 L 和匹配电容 C 的值,系统可以实现调谐和阻抗变换,使输入电压电流同相位和等效输入阻抗 Z_i 的值可控,进而获得可控的系统功率。

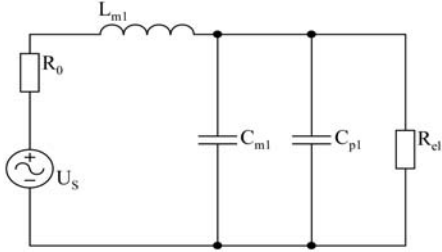


图 7 发射换能器 LC 匹配电路

匹配后换能器的输入阻抗为:

$$Z_i = \frac{R_{e1}}{1 + \omega_s^2 (C_{m1} + C_{p1})^2 R_{e1}^2} + j \left[\omega_s L_{m1} - \frac{R_{e1}^2 \omega_s (C_{m1} + C_{p1})}{1 + \omega_s^2 (C_{m1} + C_{p1})^2 R_{e1}^2} \right] \quad (7)$$

为消除系统容性无功,可令阻抗虚部为零,设系统等效输入阻抗的期望值为 R_T ,则有:

$$\omega_s L_{m1} = \frac{R_{e1}^2 \omega_s (C_{m1} + C_{p1})}{1 + \omega_s^2 (C_{m1} + C_{p1})^2 R_{e1}^2} \quad (8)$$

$$\frac{R_{e1}}{1 + \omega_s^2 (C_{m1} + C_{p1})^2 R_{e1}^2} = R_T \quad (9)$$

故匹配电容和电感的值分别为:

$$C_{m1} = \frac{1}{\omega_s R_{e1}} \sqrt{\frac{R_{e1}}{R_T} - 1} - C_{p1} \quad (10)$$

$$L_{m1} = \frac{R_{e1}^2 (C_{m1} + C_{p1})}{1 + \omega_s^2 (C_{m1} + C_{p1})^2 R_{e1}^2} \quad (11)$$

匹配后,换能器与匹配网络整体的电品质因数为:

$$Q_e = \frac{\omega_s L_{m1}}{R_{e1}} [1 + \omega_s^2 (C_{m1} + C_{p1})^2 R_{e1}^2] \quad (12)$$

对于系统接受端而言,要求得到稳定的输出、较大的有功功率,同样需要做匹配网络。由前文分析可知,接收端可等效为受控电压源,故匹配后系统的等效输出阻抗应为纯电阻。本文采用 LC 匹配网络,对系统进行调谐和阻抗变换,以满足系统的要求。其等效电路如图 8 所示。

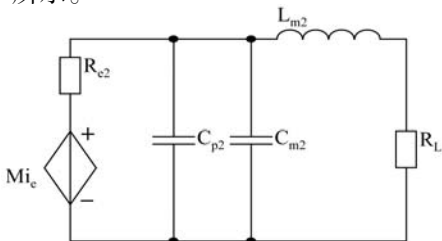


图 8 接收换能器 LC 匹配电路

令 $Mi_e = 0$, 则其分析过程与发射端 LC 匹配一致, 则可得匹配电容、电感为:

$$C_{m2} = \frac{1}{\omega_s R_{e2}} \sqrt{\frac{R_{e2}}{R_L} - 1} - C_{p2} \quad (13)$$

$$L_{m2} = \frac{R_{e2}^2 (C_{m2} + C_{p2})}{1 + \omega_s^2 (C_{m2} + C_{p2})^2 R_{e2}^2} \quad (14)$$

式中: R_L 为接收换能器等效输出阻抗的期望值。

4 超声无线传能系统实验

4.1 实验装置

系统发射和接收换能器均采用同型号压电换能器,换能器参数为:中心频率 28 kHz,电容 C_p 值为 5.2 nF,电阻 R_e 值为 200 Ω 。负载为纯阻性滑动变阻器,阻值在 0 ~ 100 Ω 之间。发射端换能器激励电压为 50 V。实验平台如图 9 所示。

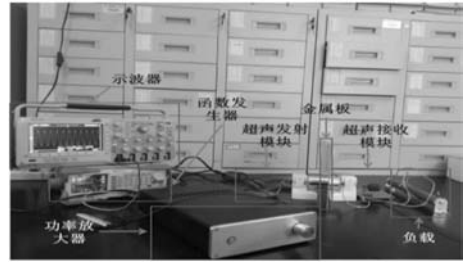


图 9 超声无线传能系统实物图

发射端输入阻抗 R_T 取 50 Ω ,换能器参数代入式(10)、式(11),即可求出匹配电容值为 44.05 nF,电感值为 0.66 mH。同理,接收端 R_L 取 100 Ω ,换能器参数代入式(13)、式(14),即可求出匹配电容值为 23.20 nF,电感值为 0.57 mH。

系统中金属介质分别采用长宽为 20 cm \times 20 cm,厚度为 2 mm 的铜板、铝板和铁板作为超声传能系统中超声传播的介质材料进行实验。板子材料如图 10 所示。



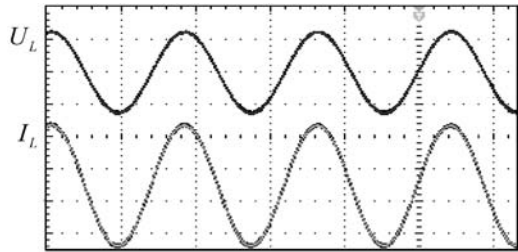
① 铜板 ② 铝板 ③ 铁板

图 10 金属介质

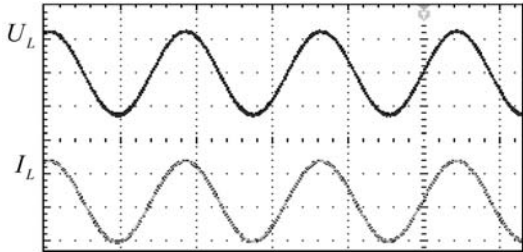
4.2 实验分析

该超声无线传能系统的负载 $R_L = 100 \Omega$ 时,三种金属接收端电压电流波形如图 11 所示。金属铝为介

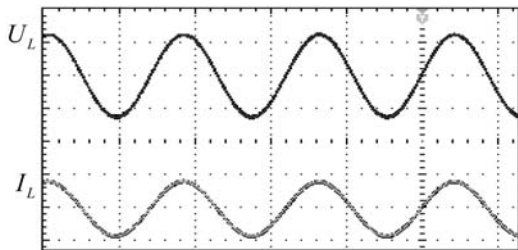
质时发射端输入电压有效值 $U_i = 36.8 \text{ V}$, 输入电流 $I_i = 138.6 \text{ mA}$, 电压电流相位差 $\varphi = -6^\circ$, 接收端电压 $U_L = 3.28 \text{ V}$; 金属铁为介质时发射端输入电压有效值 $U_i = 36.8 \text{ V}$, 输入电流 $I_i = 123.0 \text{ mA}$, 电压电流相位差 $\varphi = -4^\circ$, 接收端电压 $U_L = 2.66 \text{ V}$; 金属铜为介质时发射端输入电压有效值 $U_i = 36.8 \text{ V}$, 输入电流 $I_i = 108.2 \text{ mA}$, 电压电流相位差 $\varphi = -4^\circ$, 接收端电压 $U_L = 2.09 \text{ V}$ 。



(a) 金属铝电压电流波形



(b) 金属铁电压电流波形



(c) 金属铜电压电流波形

图 11 接收端电压电流波形

金属铝为介质时发射端功率:

$$P_{s1} = U_i I_i \cos \varphi = 3.334 \text{ W}$$

金属铝为介质时接收端功率:

$$P_{L1} = \frac{U_L^2}{R_L} = 0.108 \text{ W}$$

金属铝为介质时系统效率为:

$$\eta_1 = \frac{P_{L1}}{P_{s1}} = 3.23\%$$

金属铁为介质时发射端功率:

$$P_{s2} = U_i I_i \cos \varphi = 3.200 \text{ W}$$

金属铁为介质时接收端功率:

$$P_{L2} = \frac{U_L^2}{R_L} = 0.071 \text{ W}$$

金属铁为介质时系统效率为:

$$\eta_2 = \frac{P_{L2}}{P_{s2}} = 2.22\%$$

金属铜为介质时发射端功率:

$$P_{s3} = U_i I_i \cos \varphi = 2.603 \text{ W}$$

金属铜为介质时接收端功率:

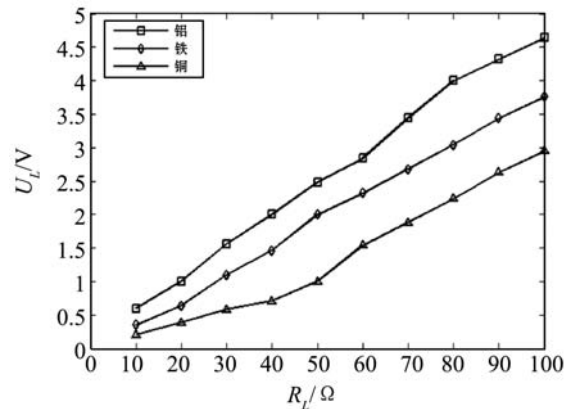
$$P_{L3} = \frac{U_L^2}{R_L} = 0.044 \text{ W}$$

金属铜为介质时系统效率为:

$$\eta_3 = \frac{P_{L3}}{P_{s3}} = 1.69\%$$

由以上数据可知,金属铝为介质时的传输效率比金属铁金属铜分别增加了 45.5%, 91.1%。铝金属在超声无线传输系统中的传输性能明显优于其他两种。

在不同金属介质情况下,最终得出负载 R_L 变化时负载电压 U_L 的变化情况,如图 12 所示。由图可知,随着负载的增大,负载端接收到的负载电压整体趋向于增大;同时,在同一负载情况下,超声波经过不同介质传输到负载端的负载电压不同,经过铜板和铁板传输的超声波转化到负载端时电压值都比较低,而经过铝板传输的负载电压值均高于铜板和铁板。

图 12 负载 R_L 变化时负载电压 U_L 的变化趋势

目前,该系统在金属铝为介质时,发射端功率可达到 3.334 W,接收端功率可达到 0.108 W,系统传输效率还比较低。系统的高频信号产生模块未进行频率自动跟踪的设计,故对于系统中的谐振频率漂移问题还不能有效解决。而且,目前对于系统的阻抗匹配问题仅采用静态匹配方式,对于系统长时间工作等因素产生的系统参数变化问题,还不能得到有效的调整。

5 结 语

本文搭建了采用压电换能器的金属介质超声无线传能系统实验平台,实现了超声波隔金属介质的无线电能传输。该系统以超声波作为能量传输媒介,基于

机械共振实现能量的无线传输,可用于对无线传感器等低功耗电子设备进行无线供电。而利用超声波无线能量传输这种方式与磁耦合、磁共振、微波等无接触能量传输方式相比,不会产生电磁干扰,因此不会给无线传感器带来电磁干扰。同时,实验在系统参数确定的情况下,对铁、铝、铜三种介质下的系统输出电压以及负载变化时输出电压的变化趋势做了对比,实验结果表明,金属铝具有良好的传输特性。

参 考 文 献

- [1] Hu Y, Zhang X, Yang J, et al. Transmitting electric energy through a metal wall by acoustic waves using piezoelectric transducers[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2003, 50(7): 773 - 781.
- [2] Sherrit S, Badescu M, Bao X, et al. Efficient electromechanical network models for wireless acoustic-electric feed-throughs[C]//Proceedings of the SPIE Smart Structures Conference, 2005: 362 - 372.
- [3] 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.
- [4] 牛今丹. 超声换能器声匹配层设计方法及其声学特性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
- [5] 刘丹宁. 基于超声波的隔金属介质无线电能传输技术研究[D]. 大连:大连理工大学,2015.
- [6] 林书玉. 弯曲振动超声换能器的振动特性及辐射声场研究[J]. 陕西师范大学学报,2003,31(3):32 - 39.
- [7] 邹玉炜,黄学良,柏杨,等. 基于 PZT 的超声波无接触能量传输系统的研究[J]. 电工技术学报,2011,26(9):144 - 150.
- [8] Leung H F, Willis B J, Hu A P. Wireless electric power transfer based on Acoustic Energy through conductive media [C]//2014 IEEE 9th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA) . Hangzhou, China; IEEE, 2014: 1555 - 1560.
- [9] 徐猛. 多层金属粘接结构粘接质量的超声检测[D]. 绵阳:中国工程物理研究院,2007.
- [10] 林书玉. 超声换能器的原理及设计[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [11] 柏杨. 基于 PZT 的无线能量传输电路模型和效率研究 [D]. 南京:东南大学,2011.
- [12] 宋显锦. 多负载分组磁谐振耦合无线电能传输研究[D]. 北京:中国科学院大学,2015.
- [13] Long Short-Term Memory Networks for Relation Classification [C]//Meeting of the Association for Computational Linguistics. 2016:207 - 212.
- [7] Lin Y, Shen S, Liu Z, et al. Neural Relation Extraction with Selective Attention over Instances[C]//Meeting of the Association for Computational Linguistics. 2016:2124 - 2133.
- [8] Li W, Zhang P, Wei F, et al. A novel feature-based approach to Chinese entity relation extraction[C]//Meeting of the Association for Computational Linguistics on Human Language Technologies: Short Papers. Association for Computational Linguistics, 2008:89 - 92.
- [9] Che W, Jiang J, Su Z, et al. Improved-Edit-Distance Kernel for Chinese Relation Extraction[C]//Natural Language Processing—IJCNLP 2005. Second International Joint Conference, Jeju Island, Korea, October 11 - 13, 2005. Proceedings. 2005:132 - 137.
- [10] Liu K, Fang L, Lei L, et al. Implementation of a Kernel-Based Chinese Relation Extraction System[J]. Journal of Computer Research & Development, 2007, 44(8):1406 - 1411.
- [11] Chen Y, Zheng D Q, Zhao T J. Chinese Relation Extraction Based on Deep Belief Nets[J]. Journal of Software, 2012, 23(10):2572 - 2585.
- [12] 彤博辉,付琨,黄宇,等. 基于多通道卷积神经网络的实体关系抽取[J]. 计算机应用研究,2017,34(3):689 - 692.
- [13] Nguyen T H, Grishman R. Relation Extraction: Perspective from Convolutional Neural Networks[C]//The Workshop on Vector Space Modeling for Natural Language Processing. 2015:39 - 48.
- [14] Zeng D, Liu K, Chen Y, et al. Distant Supervision for Relation Extraction via Piecewise Convolutional Neural Networks [C]//Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing. 2015:1753 - 1762.
- [15] Zhao S, Grishman R. Extracting relations with integrated information using kernel methods[C]//ACL 2005, Meeting of the Association for Computational Linguistics, Proceedings of the Conference, 25 - 30 June 2005, University of Michigan, Usa. DBLP, 2005:419 - 426.
- [16] Culotta A, McCallum A, Betz J. Integrating probabilistic extraction models and data mining to discover relations and patterns in text [C]//Main Conference on Human Language Technology Conference of the North American Chapter of the Association of Computational Linguistics. Association for Computational Linguistics, 2006:296 - 303.
- [17] Hochreiter S, Schmidhuber J. Long short-term memory[J]. Neural Computation, 1997, 9(8):1735 - 1780.