

DOI:10.15923/j.cnki.cn22-1382/t.2017.3.07

# 纵振式超声波无线电能传输装置仿真与实验

赵 鑫

(长春工业大学 机电工程学院, 吉林 长春 130012)

**摘 要:** 利用 ANSYS 有限元仿真软件, 分析了纵振式超声波无线电能传输装置模型的纵振模态及其共振频率。加工了实验样机, 样机的能量发射端采用锥形结构以增强对于空气激振的输出效果。搭建了实验测试系统, 对发射与接收端的距离、角度及激振频率等参数进行调节并采集了实验数据。实验结果表明, 当增大接收与发射端距离时能量传输效果减弱, 装置对心时能量传输具有最佳效果。在最佳传输频率 29.88 kHz 下的能量传递效率可达 24%。

**关键词:** 纵振模态; 无线电; 传输; 超声波; 能量传递

**中图分类号:** TH 49      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1674-1374(2017)03-0251-05

## Simulation and experiment of wireless power transmission device with longitudinal ultrasonic vibration

ZHAO Xin

(School of Mechatronic Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China)

**Abstract:** With ANSYS software, the longitudinal vibration mode and resonant frequency of a longitudinal vibration ultrasonic wireless power transfer model are analyzed. The experimental mechanism is developed, in which the energy transmitter applies a tapered structure to enhance air excitation. A test system for the mechanism is established to measure the transmission distance, angle and excitation frequency. The results indicated that the energy transferred would be weaker when the transmission distance increases. The optimal transmission is obtained when the transmitter and receiver are calibrated in center. The transmission rate is up to 24% at the optical when transmission frequency 29.88 kHz.

**Key words:** longitudinal vibration mode; wireless; transmission; ultrasonic wave; energy transfer.

### 0 引 言

无线电能传输与无线通信技术类似, 是人类

摆脱有形介质的束缚, 实现电能无线传输的美好追求。无线电能传输技术 (Wireless Power Transfer, WPT) 也称之为非接触电能传输技术

收稿日期: 2016-12-15

作者简介: 赵 鑫(1972—), 男, 汉族, 吉林白山人, 长春工业大学实验师, 主要从事机械制造工艺与设备、压电技术、数控技术、模具设计方向研究, E-mail: zhaoxinzgf@163.com.

(Contactless Power Transmission, CPT), 是一种借空间无形软介质(如电场、磁场、微波等)实现将电能由电源端传递至用电设备的一种供电模式, 该技术是集电磁场、电力电子、高频电子和电磁感应等多学科交叉的拓展性研究, 是能源传输和接入的一次革命性进步<sup>[1-4]</sup>。目前可实现的无线电能传输方式按传输距离可分为短距离、中短距离及长距离无线电力传输三种<sup>[5-7]</sup>。短距离无线电力传输的输电距离处在毫米量级, 其传输形式主要以电磁感应方式为主<sup>[8]</sup>。中短距离无线电力传输的输电距离处在米级, 其传输形式包括电磁共振、超声波等形式。麻省理工学院的 Soljaci 小组实现利用电磁共振感应技术成功点亮一盏距发射器 2.13 m 的 60 W 电灯<sup>[9]</sup>。长距离无线电力传输的输电距离可达千米量级, 主要包括微波和激光两种方式, 美国的 SBSP (Space-based Solar Power) 系统和 SSPS (Satellite Solar Power System) 系统基于微波的无线电力传输实现了利用太阳能为地球和卫星及空间航天器无线供电<sup>[10-11]</sup>。

超声波无线输电方式属于中短距离输电, 超声波是指频率大于 20 kHz 的声波, 它具有方向性强、能量易于集中、可在各种介质中传播且无电磁干扰<sup>[12]</sup>。上世纪初, 正、逆压电效应相继被发现之后, 超声技术开启了深入且广泛的研究历程<sup>[13-15]</sup>。目前, 国内外的研究主要集中在医疗、传感等领域, 如日本学者 Ishiyama<sup>[16]</sup> 论述了通过超声波给低功率移动设备无线充电的方法, 国内学者胡元太<sup>[17]</sup> 等研究在密封环境下通过超声波定期给电子设备进行充电。

文中提出一种纵振式超声波无线电能传输装置, 以实现利用空气为介质进行电能的传递。结合了正、逆压电效应的作动机理, 理论上分析了纵振式超声波能量传递与转化的可行性, 设计了纵振式超声波无线电能传输装置模型, 利用 ANSYS 有限元仿真软件分析了模型纵振模态及其共振频率, 仿真结果表明, 最佳的共振频率为 30.59 kHz, 即该设计处于超声频段, 符合理论要求。加工了实验样机, 且样机能量发射端采用锥形结构以增强对于空气激振的输出效果。搭建了实验测试系统, 对发射与接收端的距离、角度及激振频率等参数进行调节并采集了实验数据。实验结果表明, 当增大接收与发射端距离时, 能量传输效果减弱, 装置对心时能量传输具有最佳效果, 该装置的最

佳传输频率为 29.88 kHz, 其在该传输频率下的能量传递效率可达 24%。

## 1 超声波无线电能传输原理

超声波是指超过人耳可听阈值的声波 (> 20 kHz), 目前产生超声波的方法有流体动力法、压电效应法和磁致伸缩效应法。随着压电材料的发展, 利用压电材料逆压电效应激励金属弹性体振动是一种简单快捷的激超声波的方式。基于压电材料的无线电能传输系统原理如图 1 所示。

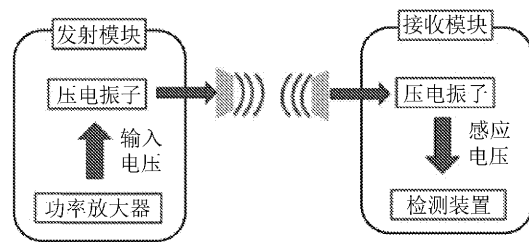


图 1 超声波无线电能传输系统原理图

超声波无线电能传输系统分为发射和接收两个模块, 通过功率放大器对发射端压电振子激励产生超声波振动, 超声波振动带动周围空气振动, 从而进行能量传递。在正压电效应的作用下, 接收模块压电振子可接收空气振动所传递的能量, 将振动能量转化为电能, 感应电压可通过检测装置进行检测。

单纯从机电耦合的角度考虑, 压电材料通常分别为机械自由和机械夹持两种固定边界条件。针对机械自由条件很难承受较大负载力的特点, 文中所设计的无线电能传输装置采用夹心式安装, 属于机械夹持方式对盘型压电片进行固定。由于机械夹持的特点在于其不能自由形变, 因此压电材料的应变为零或常数。压电本构方程可以揭示压电材料的能量转化特性, 其集中反映了压电元件所受外力引起的机械形变与输出电能之间的关系。机械夹持类压电方程根据其电学特性可分为电学短路与电学开路, 二者可根据外接负载的阻值与内阻相比较而进行区分。

电学短路型压电本构方程为:

$$\mathbf{T}_j = c_{ji}^E \mathbf{S}_i - e_{nj} \mathbf{E}_n \quad (1)$$

$$\mathbf{D}_m = e_{mi} \mathbf{S}_i + \epsilon_{mn}^s \mathbf{E}_n \quad (2)$$

电学开路型压电本构方程为:

$$\mathbf{T}_j = c_{ji}^D \mathbf{S}_i - h_{mj} \mathbf{D}_m \quad (3)$$

$$\mathbf{E}_n = -h_m \mathbf{S}_i + \beta_{nm}^s \mathbf{D}_m \quad (4)$$

式中:  $S$  ——应变矢量;

$D$  ——电荷密度矢量;

$E$  ——电场强度矢量;

$T$  ——应力矢量;

$c$  ——恒电场强度下弹性系数;

$e$  ——压电应力常数;

$h$  ——刚度常数;

$\beta$  ——介电常数。

根据式(1)~式(4)可以看出,当施加外加单场后,压电材料会产生相应的形变,从而带动周围空气进行振动,当其形变达到超声频率时会产生超声波振动。同时,压电材料承受外力的作用而产生形变时会有电位移产生,进而电位移推动内部电荷溢出压电材料进而形成电流。压电材料属于智能材料且具有较高的能量密度,其动态电阻随压电材料的形变程度而变,因此,当高能量空气振动机理压电振子振动时,压电振子可完成振动能量到电能的转化,即完成整个无线电能传输过程,整个过程仅以空气为媒介。

## 2 纵振式能量传输装置设计与仿真

夹心式纵向振动能量传输装置内部使用螺栓将压电陶瓷夹在中间,并给螺栓施加一定的预紧力,防止压电陶瓷在振动的过程中发生破损,提高纵向振动的功率容量。锥形能量发射端与夹心式纵向振动能量传输装置相连接,由于整个装置在压电陶瓷的带动下会产生超声振动,其声阻抗与空气匹配,最终可将压电陶瓷的振动传递给空气并产生超声波。接收超声波时,则是以上过程的逆过程。

在设计该换能器时,首先需确定其工作频率,超声波在传输过程中的衰减方程式为:

$$\epsilon_1 = \epsilon_0 \times e^{-\alpha l} \quad (5)$$

式中:  $\epsilon_0$ 、 $\epsilon_1$  ——发射和接收端质点的振幅;

$f$  ——超声波频率;

$l$  ——传输的距离;

$\alpha$  ——衰减因子。

在垂直于超声波传播方向上单位面积( $\text{cm}^2$ )超声波所传送的输出功率为:

$$I = \frac{1}{2} \rho c \omega^2 \epsilon_m^2 \quad (6)$$

式中:  $\rho$  ——空气的密度;

$c$  ——声波在空气中的传播速度;

$\omega$  ——声波振动的角频率;

$\epsilon_m$  ——质点的振幅。

由式(5)、(6)可见,共振频率越高,输出的功率越高,但由于其振幅下降导致传输效率越低。综合以上考虑,取频率  $f = 30 \text{ kHz}$  较为合理。

纵振式超声波电能传输装置模型如图2所示。

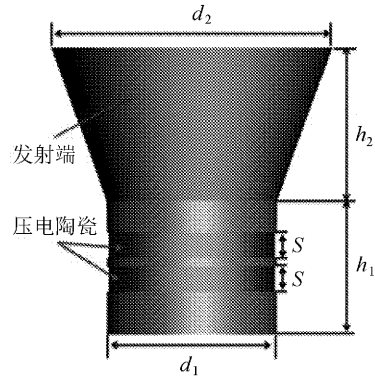


图2 纵振式超声波电能传输装置模型示意图

其主要由发射端与压电陶瓷构成,通过计算与查表可得出各部分尺寸分别为:  $h_1$  是 25 mm,  $h_2$  是 37 mm,总高度为 62 mm,  $d_1$  为 38 mm,  $d_2$  为 60 mm。压电陶瓷的直径为 36 mm,厚度  $S$  为 6 mm。

利用 ANSYS 有限元仿真软件对纵振式超声波电能传输装置进行模态仿真分析。在所建立的有限元模型中,压电陶瓷材料和其他金属材料分别采用 solid45 单元和 solid226 单元进行定义,在材料设置面板进行压电材料属性设定,其具体的材料参数见表1。

表1 压电片材料参数

序号	参数名称	压电陶瓷
1	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	7 500
2	厚度/mm	6
3	直径/mm	36

建立纵振式超声波电能传输装置三维实体模型,并假定压电陶瓷片与其他金属材料间接触且无干涉,并且两种材料在粘结层上的位移和力是连续形式。压电材料采用 swap 网格划分形式,金属材料采用 free 网格划分形式,最小的网格单元为 1 mm。超声波无线电能传输装置仿真模态如图3所示。

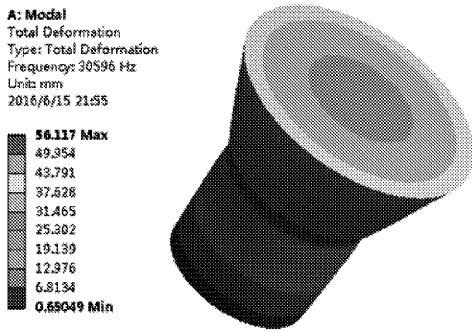


图 3 超声波无线电能传输装置仿真模式

根据所设计模型进行仿真分析,得出其共振频率为 30.59 kHz,与设定的理想值 30 kHz 稍有偏差,且此偏差在允许范围内。在此频率下超声波无线电能传输装置会产生纵振模式,此种模式可有效地激发轴向空气产生超声波振动,是能量传输的最佳模式。根据所设计模型进行了样机的加工与装配。

### 3 实验系统搭建与测试

纵振式超声波无线电能传输装置测试实验系统如图 4 所示。

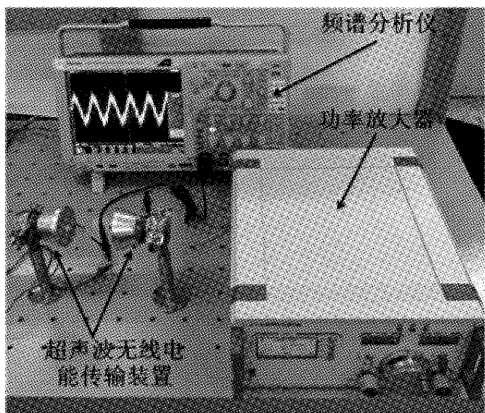


图 4 纵振式超声波无线电能传输装置测试实验系统

为了准确测量无线电能传输效果,所设计装置需准确对心以避免由装备带来的实验误差。由图中可以看出,通过功率放大器对超声波无线能量传输装置的发射端施加激励信号,使其产生纵向振动,接收端接收由空气介质传递的能量,再通过频谱分析仪进行采集。实验中,对发射与接收端的距离、角度及激励频率等参数进行调节并采集了实验数据。

传输间隔距离—激励电压关系曲线如图 5 所示。

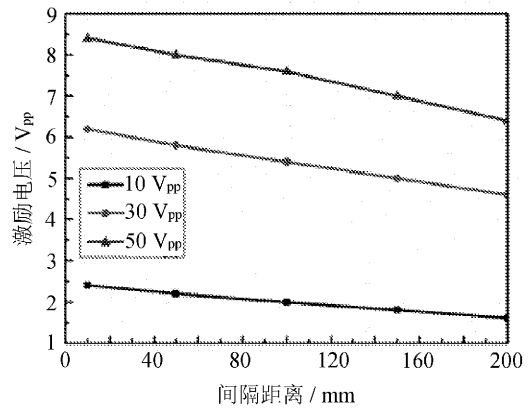


图 5 传输间隔距离-激励电压关系曲线

试验时将激励频率设定为 29.86 kHz。由图中可知,当距离增加时,超声波无线电能传输的效果会减弱,而随着所施加峰-峰值电压的增大,接收端产生的激励电压亦会增加。当施加峰-峰值电压为 50 V<sub>pp</sub>,测试间隔距离为 10 mm 时,接收端激励电压为 8.4 V<sub>pp</sub>。

为了更好地研究接收与发射端的位置关系,实验中还进行了不同夹角与激励电压之间的关系,如图 6 所示。

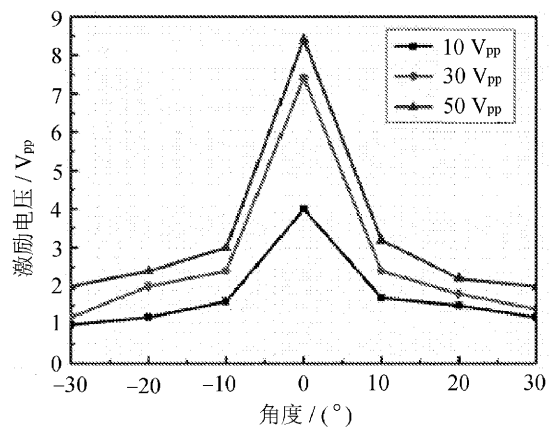


图 6 装置间夹角-激励电压关系曲线

由图中可以看出,当接收端与发射端对心,并且夹角为 0°时,电能传输效果最佳,而当夹角由 0°增加时,可以看出传输效率明显下降。实验中当夹角超过 30°后几乎没有能量传递,因此为保证能量传输的效率,在装配时要尽量保证发射端与接收端间夹角为 0°。

激励频率是本实验中最重要影响因素之一,为了更好地研究能量传输装置最佳的激励频率,激励频率与激励电压的关系如图 7 所示。

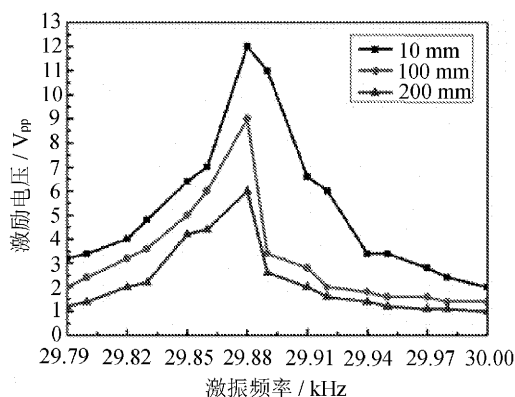


图7 激振频率与激励电压关系曲线

由图中可以看出,激励电压存在一个峰值点,当激振频率为 29.88 kHz 时,具有最佳的电能传输效果。而在该频率两边的其他频率下的激励电压会有明显的下降,因此激振频率可极大地影响电能传输的效果。当激振频率为 29.88 kHz,距离为 10 mm 时,会有最大 24% 的无线电能传输效率。

#### 4 结 语

设计了一种纵振式超声波无线电能传输装置,以实现利用空气为介质进行电能的传递。对该装置进行了理论分析,仿真设计与实验研究得到的结论如下:

1) 经分析认为实际材料参数和仿真输入参数间存在差异,导致仿真结果有 0.71 kHz 的偏差,但总体上偏差在可接受的范围内。

2) 设计的纵振式超声波无线电能传输装置可以通过对试验参数,如发射与接收端的距离、角度及激振频率等改变来对其能量传输效率进行调节。

3) 当增大接收与发射端距离时,能量传输效果减弱,装置对心时能量传输具有最佳效果,该装置的最佳传输频率为 29.88 kHz,其在该传输频率下的能量传递效率可达 24%。

#### 参考文献:

[1] H L Li, A P Hu, G A Covic, et al. Optimal coupling condition of IPT system for activeing maximum power transfer[J]. *Electronics Letters*, 2009, 45(1):76-77.

[2] C S Wang, O H Stielau, G A Covic. Design considerations for a contactless electric vehicle battery charger[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2005, 52(5):1308-1314.

[3] J J Joaquin, Z N Low, J Lin, et al. Design and opti-

mization of a class-e amplifier for a loosely coupled planar wireless power system[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 2009, 56(11):830-834.

- [4] C Manolatou, M J Khan, S H Fan, et al. Coupling of modes analysis of resonant channel add-drop filters[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1999, 35(9):1322-1331.
- [5] Z N Low, R A Chinga, R Tseng, et al. Design and test of a high-power high-efficiency loosely coupled planar wireless power transfer system[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(5):1802-1812.
- [6] 黄学良, 吉青晶, 谭琳琳, 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.
- [7] 朱春波, 于春来, 毛银花, 等. 磁共振无线能量传输系统损耗分析[J]. *电工技术学报*, 2012, 27(4):13-17.
- [8] 李阳, 杨庆新, 闫卓, 等. 无线电能有效传输距离及其影响因素分析[J]. *电工技术学报*, 2013, 28(1):106-112.
- [9] A Kurs, A Karalis, R Moffatt, et al. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances[J]. *Science*, 2007, 317(5834):83-86.
- [10] C A Schfer, D Gray. Transmission media appropriate laser-microwave solar power satellite system[J]. *Acta Astronautica*, 2012, 79:140-156.
- [11] L W Wood. Projecting power: the security implications of space-based solar power[J]. *Bulletin of the Atomic Scientists*, 2012, 68(1):70-78.
- [12] 张建华, 黄学良, 邹玉炜, 等. 利用超声波方式实现无线电能传输的可行性的研究[J]. *电工电能新技术*, 2011(2):66-69.
- [13] 林书玉. 超声换能器的原理及设计[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [14] 林书玉. 弯曲振动气介式超声换能器的振动特性及辐射声场研究[J]. *声学与电子工程*, 2004, 75(3):1-7.
- [15] T E Gomez. Acoustic impedance matching of piezoelectric transducers to the air[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*, 2004, 51(5):624-633.
- [16] T I Iama, Y Kanai, J Ohwaki, et al. Impact of a wireless power transmission system using an ultrasonic air transducer for low power mobile applications[J]. *IEEE Ultrason Symp*, 2003:1368-1371.
- [17] 胡元太, 陈传尧, 杨新华, 等. 两层压电换能器之间的电能传输[J]. *固体力学学报*, 2003, 24(3):304-312.