

[自控·检测]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2018.05.012

# 超声磨削中电信号非接触传输特性参数研究

周莲

(苏州科技大学机械工程学院, 江苏苏州 215009)

**摘要:**为了提高超声磨削加工系统中非接触电能传输系统电能传输的效率,建立了电信号非接触传输装置感应模型,推导了超声系统电信号非接触传输装置传输效率和总输入阻抗的表达式,从理论上分析了分布电容和线圈自感对电能传输效率和输出阻抗的影响。实验结果表明通过改变线圈绕组的结构、调整瓷罐间隙可以提高传输效率,获得最大有效功率。

**关键词:**电信号非接触传输装置;传输效率;自感;分布电容

中图分类号:TM15 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2018)05-0063-05

## Study on Non-Contact Power Transmission Characteristic Parameters of Electrical Signals in Ultrasonic Grinding

ZHOU Lian

(School of Mechanical Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, Jiangsu 215009, China)

**Abstract:** Aiming at improving the efficiency in the non-contact power transmission system of ultrasonic grinding system, an induction model of electrical signal non-contact power transmission device was established. The equation of transmission efficiency and total input impedance of the non-contact transmission power device of the electrical signals in ultrasonic system were derived. The influence of distributed capacitance and coil self-inductance on power transmission efficiency and output impedance were theoretically analyzed. The experimental results show that the transmission efficiency can be improved to obtain the maximum effective power by changing the structure of the coil winding and adjusting the gap of the porcelain tank.

**Keywords:** electrical signal non-contact transmission device; transmission efficiency; self-inductance; distributed capacitance

超声磨削加工系统的核心部件是超声磨削振动系统,超声能量传输直接影响材料去除率、刀具寿命及加工质量。传统的碳刷接触式电能传输方式会出现发热严重、寿命短及无法自动换刀等问题<sup>[1]</sup>。因此,对超声信号的传输及控制的研究至关重要。

非接触电能传输技术<sup>[2]</sup>可以实现电能的非接触传输。非接触电能传输装置的原、副边之间存在气隙,耦合形式为松耦合,传输效率一直是大家所关注的问题。为了提高非接触电能传输的效率,国内外的科研院所和高校也展开了相关的研究工作<sup>[3]</sup>:通过电容补偿网络<sup>[4]</sup>,搭建相关硬件电路<sup>[5-6]</sup>,提高传输效率;在

大功率超声信号输出中,独立地对原、副边回路进行补偿<sup>[7-8]</sup>,亦可极大地提高系统能量的传输效率。现有的研究大多只分析了补偿方式对传输效率的影响,很少考虑到高频下感应线圈的分布电容和自感对传输效率的影响。针对这一情况,课题组结合超声压电换能器的等效电路和非接触电能传输系统的互感模型,研究了线圈分布电容和自感对非接触电能传输装置传输效率的影响,并进行了理论分析及实验验证。

### 1 超声磨削系统非接触电信号传输结构与等效电路

图1(a)所示为压电换能器等效电路模型<sup>[9]</sup>,其中

收稿日期:2018-04-21;修回日期:2018-07-19

作者简介:周莲(1991),女,江苏宿迁人,硕士研究生,主要研究方向为先进制造技术。E-mail:zhoulian911230@sina.com

$R_d, L_d$  和  $C_d$  分别为换能器的等效动态电阻、动态电感和动态电容;  $C_0$  为换能器的等效静态电容;  $R_0$  为换能器的等效介电损耗阻。在谐振条件下,  $R_0$  取值趋于无穷大, 可视为开路,  $L_d$  和  $C_d$  相互抵消可视为短路, 超声电源频率为  $\omega = 1/\sqrt{L_d C_d}$ 。

在机械谐振频率下可将非接触旋转超声振动系统等效为图 1(b) 所示电路模型。  $L_1, R_1$  和  $C_1$  分别为松耦合变压器一次侧线圈绕组的电感、电阻和分布电容;  $L_2, R_2$  和  $C_2$  分别为松耦合变压器二次侧线圈绕组的电阻、电感和分布电容;  $M$  为松耦合变压器的互感。

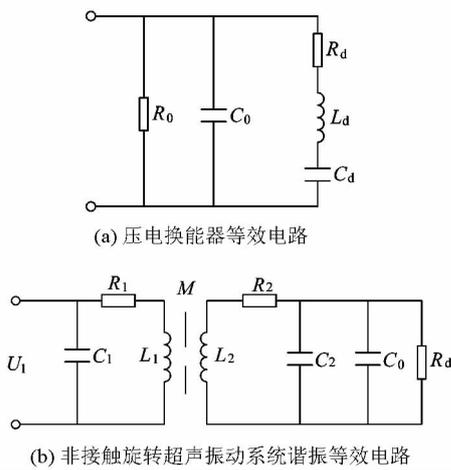


图 1 电路等效原理模型

Figure 1 Circuit equivalence model

可将并联连接的  $C_0, R_d$  和  $C_2$  进行串联等效, 如图 2 所示。

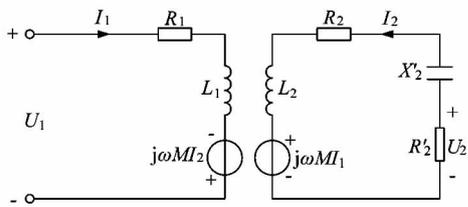


图 2 基本模型

Figure 2 Basic model

其中:

$$\left. \begin{aligned} X'_2 &= -j \frac{\omega R_d^2 (C_2 + C_0)}{1 + \omega^2 R_d^2 (C_2 + C_0)^2}; \\ R'_2 &= \frac{R_d}{1 + \omega^2 R_d^2 (C_2 + C_0)^2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

根据 Kirchhoff 电压定律, 由图 2 可建立非接触旋转超声振动系统的电压回路方程:

$$\left. \begin{aligned} \frac{U_1}{1/j\omega C_1} + \frac{U_1 - j\omega M I_2}{R + j\omega L_1} &= I_1; \\ j\omega M I_1 - (R_2 + j\omega L_2 + X'_2 + R'_2) I_2 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

可解得:

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \frac{Z_{22} U_1}{Z_{11} Z_{22} + Z_{12} Z_{21}}; \\ I_2 &= \frac{Z_{12} U_1}{Z_{11} Z_{22} + Z_{12} Z_{21}} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: 一次侧回路阻抗  $Z_{11} = \frac{1}{j\omega C_1 + 1/(R_1 + j\omega L_1)}$ ; 二次侧回路阻抗  $Z_{22} = R_2 + j\omega L_2 + X'_2 + R'_2$ ;  $Z_{12} = j\omega M$ ;  $Z_{21} = \frac{j\omega M}{j\omega C_1 R_1 + 1 - \omega^2 C_1 L_1}$ 。

对一次侧、二次侧进行解耦, 形成等效电路, 如图 3 所示。

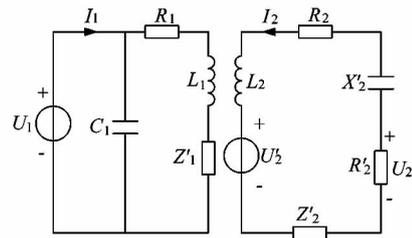


图 3 解耦模型

Figure 3 Decoupled model

可得一次侧输入阻抗

$$Z_1 = U_1 / I_1 = Z_{11} + Z'_1 \quad (4)$$

式中:  $Z_{11}$  是一次侧的自阻抗; 二次侧在一次侧中的反映阻抗为  $Z'_1 = \omega^2 M^2 / Z_{22}$ 。

将  $Z'_1$  写成实部与虚部的形式:  $Z'_1 = R'_1 + jX'_1$ 。

$$\left. \begin{aligned} R'_1 &= \frac{\omega^2 M^2 (R_2 + R'_2)}{(R_2 + R'_2)^2 + \left( \omega L_2 - \frac{\omega R_d^2 (C_2 + C_0)}{1 + \omega^2 R_d^2 (C_2 + C_0)^2} \right)^2}; \\ X'_1 &= \frac{\omega^2 M^2 \left( \omega L_2 - \frac{\omega R_d^2 (C_2 + C_0)}{1 + \omega^2 R_d^2 (C_2 + C_0)^2} \right)}{(R_2 + R'_2)^2 + \left( \omega L_2 - \frac{\omega R_d^2 (C_2 + C_0)}{1 + \omega^2 R_d^2 (C_2 + C_0)^2} \right)^2} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

可得

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \frac{U'_2}{Z_{22} + Z'_2}; \\ U'_2 &= \frac{j\omega M U_1}{Z_{11}}; \\ Z'_2 &= \frac{\omega^2 M^2}{Z_{11}} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中:  $U'_2$  为二次侧等效电压源;  $Z'_2$  为等效电压源的内阻抗。

所以超声系统中电信号传输效率

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 \cdot I_2}{U_1 \cdot I_1} = \frac{R'_2 U'_2}{Z_{22} + Z'_2} \cdot \frac{Z_{12} U_1}{Z_{11} Z_{22} + Z_{12} Z_{21}} = \frac{R'_2 Z_{12} Z_{12}}{(Z_{11} Z_{22} + \omega^2 M^2) \cdot Z_{22}} = \frac{R_d \omega^2 M^2}{[1 + \omega^2 R_d^2 (C_2 + C_0)] (Z_{11} Z_{22} + \omega^2 M^2) \cdot Z_{22}} \quad (7)$$

非接触电能传输装置和超声磨削振子的总输入阻抗  $Z_1$  可以表示为:

$$Z_1 = Z_{11} + R'_1 + jX'_1 = \frac{XR_1}{R_1^2 + \omega^2 (C_1 X - L_1)^2} + \frac{\omega^2 M^2 (R_2 + R'_2)}{(R_2 + R'_2)^2 + \left( \omega L_2 - \frac{\omega R_d^2 (C_2 + C_0)}{1 + \omega^2 R_d^2 (C_2 + C_0)^2} \right)^2} + j \left[ \frac{\omega^2 M^2 \left( \omega L_2 - \frac{\omega R_d^2 (C_2 + C_0)}{1 + \omega^2 R_d^2 (C_2 + C_0)^2} \right)}{(R_2 + R'_2)^2 + \left( \omega L_2 - \frac{\omega R_d^2 (C_2 + C_0)}{1 + \omega^2 R_d^2 (C_2 + C_0)^2} \right)^2} - \frac{\omega X (C_1 X - L_1)}{R_1^2 + \omega^2 (C_1 X - L_1)^2} \right] \quad (8)$$

式中,  $X = R_1^2 + \omega^2 L_1^2$ 。

## 2 阻抗匹配补偿

要使超声磨削换能器获得最大输出功率, 必须使其一直处于谐振频率下工作, 所以需要对所有电抗元件进行阻抗匹配, 如图 4 所示。

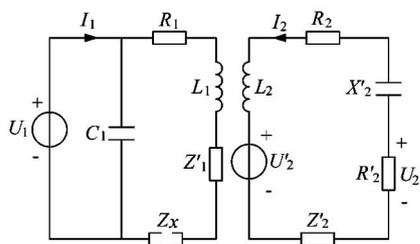


图 4 谐振匹配模型

Figure 4 Resonance matching model

从一、二次侧等效电路可以看出, 两侧同时存在感性元件和容性元件, 须使一、二次侧回路呈纯阻性。将非接触电能传输装置和超声磨削振子的总输入阻抗  $Z_1$  进行阻抗匹配,  $Z_x$  是匹配元件, 加入后总输入阻抗

$$Z_s = Z_1 + Z_x \quad (9)$$

为了使超声磨削振子获得最大有效功率, 要求  $Z_s$  为纯阻性, 即

$$Z_x = \text{Im}(\bar{Z}_1) = \frac{\omega X (C_1 X - L_1)}{R_1^2 + \omega^2 (C_1 X - L_1)^2} - \frac{\omega^2 M^2 \left( \omega L_2 - \frac{\omega R_d^2 (C_2 + C_0)}{1 + \omega^2 R_d^2 (C_2 + C_0)^2} \right)}{(R_2 + R'_2)^2 + \left( \omega L_2 - \frac{\omega R_d^2 (C_2 + C_0)}{1 + \omega^2 R_d^2 (C_2 + C_0)^2} \right)^2} \quad (10)$$

## 3 仿真与实验分析

从上述公式可以看出, 电信号非接触传输装置的传输效率和总阻抗跟很多因素有关, 课题组从电信号非接触传输装置的几个特性参数来进行分析研究。采用自主研发的超声振动磨削系统进行理论分析和实验研究。图 5(a) 为超声磨削振子, 其设计参数如表 1 所示; 图 5(b) 为非接触磁芯分离体, 其设计参数如表 2 所示。



图 5 实验装置

Figure 5 Experimental device

表 1 超声振子设计参数

Table 1 Ultrasonic oscillator design parameters

谐振频率 $F_s$ /kHz	静态电容 $C_0$ /nF	动态电阻 $R_m$ /Ω
21.779	5.485	58.048

表 2 电信号非接触传输装置相关参数

Table 2 Electrical signal non-contact transmission device related parameters

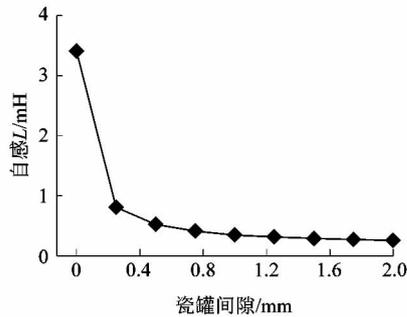
外圈直径/mm	外圈厚度/mm	内圈直径/mm	内圈厚度/mm	高度/mm	$R_1$ /Ω	$R_2$ /Ω
40	2	20	3.5	10	0.464	0.459

注:  $R_1$  为固定部分线圈直流内阻;  $R_2$  为旋转部分线圈直流内阻。

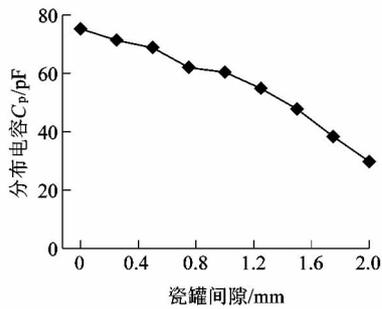
电信号非接触传输装置中, 固定部分和旋转部分之间的瓷罐间隙对其特性影响最大。如图 6 所示, 电信号非接触传输装置的瓷罐间隙越大, 线圈的自感和分布电容值越小。

从公式(7)和(10)中并不能直接体现瓷罐间隙对其特性的影响, 因此通过自感和分布电容来间接表示。

结合表1和表2的相关参数,进行传输特性仿真。



(a) 瓷罐间隙与自感关系

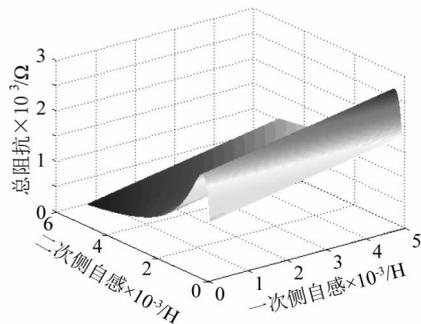


(b) 瓷罐间隙与分布电容关系

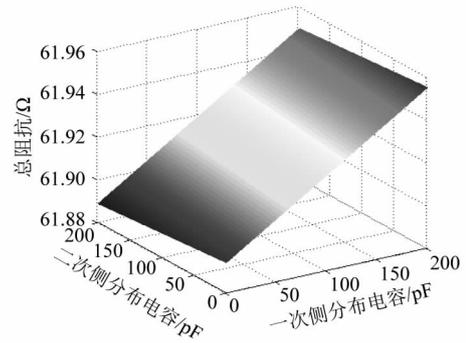
图6 瓷罐间隙对电信号非接触传输装置特性参数的影响

Figure 6 Effect of porcelain gap clearance on characteristic parameters of non-contact transmission device for electrical signals

图7(a)表明二次侧电感值对总输入阻抗影响较大,一次侧自感相对较小;从图7(b)可知,二次侧线圈的分布电容对总阻抗影响较小,一次侧分布电容与总阻抗呈正增长关系。图8(a)表明传输效率与一、二次侧自感值呈负增长关系;图8(b)表明传输效率与一、二次侧线圈分布电容呈负增长关系,二次侧分布电容的影响更大一些。要实现超声磨削振子的最大有效功率及传输效率的提高,必须降低一次侧电感和分布电容,增大二次侧电感,进行综合优化。



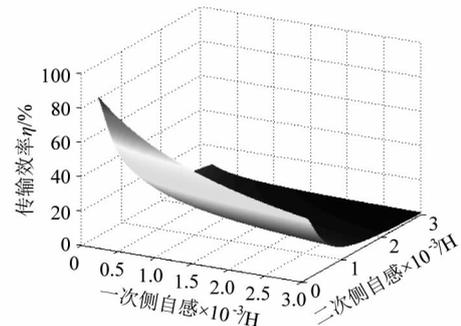
(a) 线圈自感与总阻抗关系



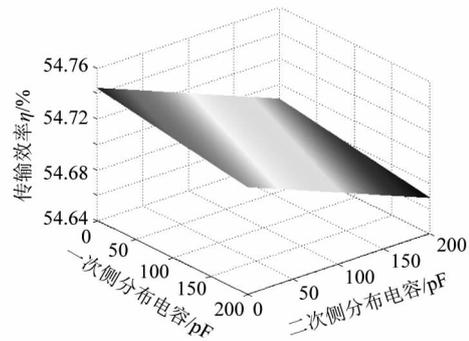
(b) 分布电容与传输效率关系

图7 电信号非接触传输装置特性参数对电抗的影响

Figure 7 Influence of the characteristic parameters of electrical signal non-contact transmission device on reactance



(a) 线圈自感与传输效率关系



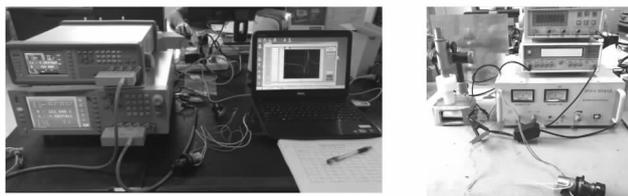
(b) 分布电容与传输效率关系

图8 电信号非接触传输装置特性参数对传输效率的影响

Figure 8 Influence of characteristic parameters of electrical signal non-contact transmission device on transmission efficiency

基于图9(a)所示测试平台,对非接触超声振动磨削系统整体进行性能测试,获得了磁间隙与系统整体特性的曲线,如图10(a)所示。用图9(b)所示测试平台测试传输效率,可以得到罐间隙与传输效率关系的曲线,

如图 10(b) 所示。实验表明磁罐间隙对系统整体特性和传输效率影响很大, 增大磁罐间隙将引起超声磨削振子的有效功率和传输效率急剧下降。瓷罐间隙范围为 0.0 ~ 0.5 mm, 谐振点传输效率可保持在 60% 以上。

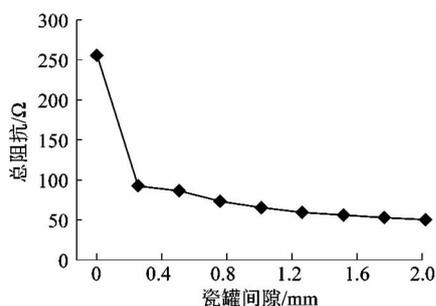


(a) 整体特性测试

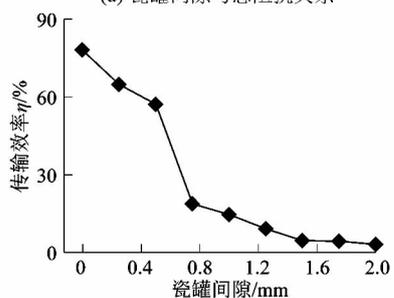
(b) 传输效率测试

图 9 测试平台

Figure 9 Testing platform



(a) 瓷罐间隙与总阻抗关系



(b) 瓷罐间隙与传输效率关系

图 10 电信号非接触传输装置性能测试曲线

Figure 10 Electrical signal non-contact transmission device performance test curve

#### 4 结语

1) 课题组通过建立超声磨削系统中电信号非接触传输装置的松耦合互感理论模型, 获得了多因素耦合影响系统传输效率和总输入阻抗的关系式。

2) 通过自主研发的非接触超声振动磨削系统进行参数仿真及实验研究, 结果表明瓷罐间隙会影响电信号非接触传输装置的性能参数, 进而影响传输效率。通过调整瓷罐间隙可以提高系统传输效率和有效功率, 满足了设计要求, 证明了系统方案的可行性。

#### 参考文献:

- [1] 谢鸥, 李华, 曹洋, 等. 旋转超声振动加工中非接触电能传输特性研究[J]. 机械科学与技术, 2017, 36(5): 736 - 740.
- [2] SCHUDER J C, STEPHENSON H E. Energy transport to a coil which circumscribes a ferrite core and is implanted within the body[J]. IEEE Transactions on biomedical engineering, 1965, 12(3): 154 - 163.
- [3] 袁文, 隆志力, 张建国, 等. 新型非接触式电能传输装置在超声加工中的应用[J]. 电工技术学报, 2015, 30(10): 52 - 57.
- [4] 王志涛, 杨晨, 马光同, 等. 轴对称结构非接触供电动态特性研究[J]. 电工电能新技术, 2017, 36(2): 21 - 29.
- [5] 隆志力, 蔺祥伟, 王舒野, 等. 超声加工的非接触能量传输仿真与实验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(9): 8 - 12.
- [6] 陈文仙, 陈乾宏. 共振式无线电能传输技术的研究进展与应用综述[J]. 电工电能新技术, 2016, 35(9): 35 - 47.
- [7] 张俊伟, 张永俊, 梁远标, 等. 旋转超声加工非接触供电模型研究[J]. 电加工与模具, 2016(2): 45 - 49.
- [8] 申昊, 冯平法, 张建富, 等. 超声振动系统非接触式高效电能传输的电路补偿[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2015, 55(7): 728 - 733.
- [9] PARRINI L. Design of advanced ultrasonic transducers for welding devices[J]. IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, 2001, 48(6): 1632 - 1639.

[ 信息 · 简讯 ]

### · 行业简讯 · 西门子为中泰集团打造年产 120 万吨 PTA 数字化工厂

西门子与新疆中泰(集团)有限责任公司携手打造年产 120 万吨 PTA(聚酯纤维原材料)数字化工厂项目启动仪式于 2018 年 7 月 18 日在新疆乌鲁木齐举行, 将双方在今年 6 月初于西门子“一带一路”国际合作论坛上签署的战略合作协议进一步落到实处。

西门子将为中泰集团提供从一体化工程到一体化运营的数字化解决方案, 涵盖生产执行系统、实验室管理系统、能源管理系统、中央决策系统及操作培训系统等软件解决方案, 以及过程自动化系统、工业通讯网络、智能仪表、智能电气解决方案和信息安全解决方案。

此次数字化项目启动后, 将全面提升中泰石化项目智能化、数字化和网络化水平, 对中泰集团深化创新驱动、实现产业转型升级和跨越式发展产生极大的推动作用。

( 朱建芸 )