

超声无线输能通道的 PSPICE 等效电路研究

王 俊^{1,2}, 黄 娟¹, 阎守国¹, 张碧星¹

(1. 中国科学院声学研究所声场声信息国家重点实验室, 北京 100190;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 根据压电晶片厚度振动一维等效电路、传输线理论和超声传播理论提出一种 PSPICE 等效电路模型. 该模型利用有损传输线可对压电晶片的机械损耗过程进行模拟仿真. 利用该模型对超声无线输能系统声电转换通道进行了 PSPICE 等效电路建模和仿真, 不仅得到了快速可靠的计算结果, 而且简化了超声无线输能系统的电路设计过程. 该方法为研究超声无线输能系统提供了有效可靠的理论和技术基础.

关键词: 超声无线输能; 压电等效电路; PSPICE 仿真; 有损传输线

中图分类号: TN384, O429

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2018)08-1884-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.08.012

Research on PSPICE Equivalent Circuit of Ultrasonic Wireless Energy Transmission Channel

WANG Jun^{1,2}, HUANG Juan¹, YAN Shou-guo¹, ZHANG Bi-xing¹

(1. State Key Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: According to the one-dimensional equivalent circuit of piezoelectric thickness-mode transducer, transmission line theory and ultrasonic propagation theory, a PSPICE equivalent circuit model was proposed. The model can model and simulate the mechanical loss process of piezoelectric transducer by using lossy transmission line. By using this method, the PSPICE equivalent circuit modeling and simulation of the electro-acoustic conversion channel of the ultrasonic wireless transmission system was carried out. The fast and reliable calculation results were obtained, and the circuit design process of the ultrasonic wireless energy transmission system was simplified. This method provides an effective and reliable theoretical and technical basis for the study of ultrasonic wireless transmission system.

Key words: ultrasonic wireless transmission; piezoelectric equivalent circuit; PSPICE simulation; lossy transmission line

1 引言

在很多特殊需求环境中, 需要对密闭金属容器内部设备进行供电, 为了保证密闭金属容器的结构完整性, 不仅不适合使用输电线, 而且因为法拉第电磁屏蔽效应的存在, 常规的无线输能方式也不适用. 利用超声无线输能技术可以很好地解决上述问题, 可在不需要物理穿透的前提下实现能量从密闭金属容器外侧传输到其内部的过程. 因为超声波是一种机械波, 可以携带较高的能量, 并以波动形式将能量定向传输到指定位置, 具有不受电磁屏蔽效应影响, 无电磁兼容问题等技

术优势. 利用超声进行无线输能是声学领域中一个极具潜力的研究方向, 目前对超声无线输能的研究依旧处于起步阶段^[1,2].

2003 年我国胡元太教授率先对超声无线输能系统的声电转换通道进行理论建模, 并利用波动方程和线性压电方程验证了利用超声透过金属板进行能量无线传输是可行的^[3]. 2005 年美国加州理工大学喷气推进实验室提出利用梅森等效电路构建超声无线输能声电转换通道的一维等效电路模型, 简化了计算过程^[4]. 随后各国科学家相继展开实验研究, 到目前为止, 国外在该方面研究已取得较大进展, 不仅利用超声波透过金

属实现了能量无线传输,而且还实现了较大速率的无线通信.而国内,在该方面的研究很少,尚处于起步阶段.

本文结合压电换能器机电等效方法对压电换能器晶片的厚度振动等效电路展开研究,基于电传输线理论和超声传播理论,提出了一种可应用 PSPICE 仿真软件进行电路仿真的压电片有损传输线等效模型,该模型可对压电晶片的机械损耗进行仿真,可为超声无线输能系统设计提供依据,简化计算过程,具有良好的实用性.我们利用该模型对超声无线输能系统的声电转换通道进行建模和仿真,得到了和理论计算相吻合的结果.

2 超声无线输能系统

超声无线输能技术无需依赖电磁场,利用超声实

现能量的无线传输,是能量无线传输的一种新方法.超声无线输能系统技术思路如图 1 所示.在密闭金属容器外,利用驱动电路产生一个持续的正弦波信号加载在超声发射换能器上,驱动和激励超声发射换能器发射超声波,超声波从密闭金属容器外表面透过金属壳层将能量传输到密闭容器的内表面上.在密闭容器的内表面上安有接收换能器,接收换能器将接收到机械能转换为电能并通过后续处理电路将电信号作用到所需的电子设备上,从而驱动电子设备工作.其中由发射换能器、金属壁和接收换能器构成的声电转换通道是影响整个系统能量传输效率的主要因素.在本文研究中,发射换能器与接收换能器均利用压电晶片的厚度振动模式来实现能量的转换.

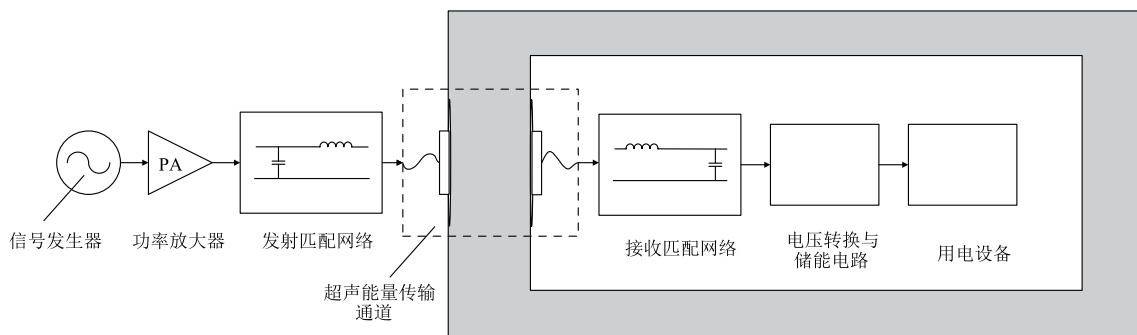


图1 超声无线输能技术框图

3 等效电路及理论推导

3.1 压电晶片等效电路

利用等效电路方法(如梅森等效电路和 KLM 等效电路^[5]等)研究压电器件,可以将复杂的机电关系简化为电路问题,在国内外相关研究中得到了广泛应用,如换能器设计^[6,7]、压电变压器研究^[8,9]和压电传感器应用^[10]等.然而,等效电路中的电器元件并非现实中真实存在的元器件,不能直接应用于电路仿真软件中,为此,国外学者开展了利用电路仿真软件实现压电器件的电路仿真研究^[11-15].

Redwood^[16]对梅森等效电路进行变形得到压电晶片厚度振动模式的无损传输线等效电路,但实际的能量传输存在损耗过程.本文在 Redwood 模型基础上引入有损传输线并提出一种新的等效电路,该方法考虑了机械损耗并可方便地应用于电路仿真软件中,如图 2 所示.图中 F_1 和 F_2 是作用在压电晶片表面的压力, v_1 和 v_2 是压电晶片表面的振动速度, A 为压电晶片表面积, d 为压电晶片厚度, V 和 i 分别为电压和电流.

等效电路中压电晶片的箝制电容和机电转换变压

比分别为^[5]:

$$\left. \begin{aligned} C_0 &= \epsilon_{33}^s \frac{A}{d} \\ \varphi &= h_{33} C_0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: ϵ_{33}^s 为压电片沿 z 轴方向的介电常数, h_{33} 为 z 轴方向的压电劲度系数.

有损传输线在输入信号频率较高时可看作分布参数等效电路^[17]如图 3 所示.沿线的每个无限小单元长度 (Δz) 中都包含串联的电阻、电感和并联的电导、电容,其中 R 、 L 、 G 、 C 分别代表每单位长度的电阻、电感、电导、电容.对 Δz 微分段进行分析,根据 KVL 和 KCL 定理可得^[17]:

$$\left. \begin{aligned} v(z, t) &= i(z, t)R\Delta z + L\Delta z \frac{\partial i(z, t)}{\partial t} + v(z + \Delta z, t) \\ i(z, t) &= v(z + \Delta z, t)G\Delta z + C\Delta z \frac{\partial v(z + \Delta z, t)}{\partial t} + i(z + \Delta z, t) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

两边整理后同除以 Δz , 令 $\Delta z \rightarrow 0$, 得均匀传输线方程^[17]:

$$\left. \begin{aligned} -\frac{\partial v(z, t)}{\partial z} &= Ri(z, t) + L \frac{\partial i(z, t)}{\partial t} \\ -\frac{\partial i(z, t)}{\partial z} &= Gv(z, t) + C \frac{\partial v(z, t)}{\partial t} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

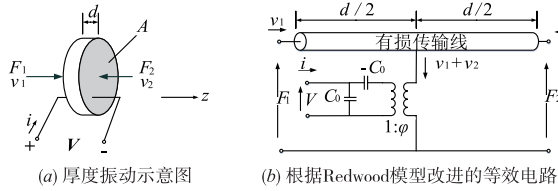


图2 压电晶片等效电路

因为传输信号为正弦信号,所以电压和电流的瞬时值可表示为:

$$\begin{cases} v(z, t) = \text{Re}[V(z)e^{j\omega t}] \\ i(z, t) = \text{Re}[I(z)e^{j\omega t}] \end{cases} \quad (4)$$

整理得均匀传输线的波动方程^[17]:

$$\begin{cases} -\frac{d^2 V}{dz^2} - \gamma^2 V = 0 \\ -\frac{d^2 I}{dz^2} - \gamma^2 I = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中:

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \alpha + j\beta \quad (6)$$

γ 为传播线上波的传播常数,一般情况下为复数,实部 α 称为衰减常数,虚部 β 为相移常数. 解方程可得^[17]:

$$\begin{cases} V(z) = A_1 e^{-\gamma z} + A_2 e^{\gamma z} \\ I(z) = \frac{1}{Z_0}(A_1 e^{-\gamma z} - A_2 e^{\gamma z}) \end{cases} \quad (7)$$

式中特征阻抗:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (8)$$

对于低损耗传输线,有 $G=0, R \ll \omega L$, 从而传播常量可简化为:

$$\gamma \cong \frac{R}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} + j\omega \sqrt{LC} \quad (9)$$

此时相速度:

$$v_p = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (10)$$

特征阻抗^[17]:

$$Z_0 \cong \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (11)$$

又因为压电陶瓷振子的机械品质因数与压电振子参数之间的存在关系:

$$Q = \frac{\omega L}{R} = \frac{1}{\delta} \quad (12)$$

得:

$$R = \omega L \delta \quad (13)$$

在无限均匀媒质里有一个无限大平面刚性物体沿法线方向来回振动,这时所产生的声场显然就是平面声波,讨论这种声场,归结为求解一维声波方程^[18].

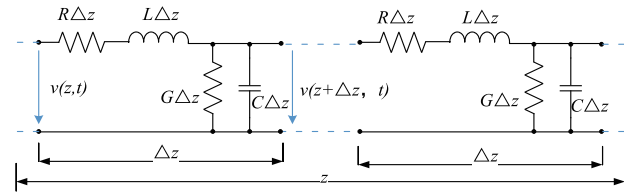


图3 有损传输线等效电路

$$\frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (14)$$

因为随时间简谐变化的声场是分析随时间复杂变化声场的基础,所以不妨取:

$$p = p(z) e^{j\omega t} \quad (15)$$

得关于空间部分 $p(z)$ 的常微分方程^[18].

$$\frac{d^2 p(z)}{dz^2} + k^2 p(z) = 0 \quad (16)$$

其中 $k = \frac{\omega}{c_0}$ 称为波数. ω 为声源简谐振动的圆频率, c_0 为声传播速度.

$$\text{声阻抗: } Z_a = \rho v_a A_a \quad (17)$$

$$\text{速度: } v_a = \sqrt{c_{33}^D / \rho} \quad (18)$$

由式(10)~(11)和式(17)~(18)可得电学传输线系统和声学传输线系统特性阻抗和相速度的值,再根据电-力-声线路类比原理^[18]可得电学传输线系统与声学传输线系统各参数的对应关系,具体如表1所示.

表1 电学传输线系统与声学传输线系统各参数类比

电学传输线系统	声学传输线系统
特性阻抗 $Z_0 = \sqrt{L/C}$	特性阻抗 $Z_a = \rho v_a A_a$
相速度 $v_p = \sqrt{1/LC}$	相速度 $v_a = \sqrt{c_{33}^D / \rho}$
电感 $L = Z_0 / v_p$	质量 $M_a = \rho A_a = Z_a / v_a$
电容 $C = 1 / (v_p Z_0)$	力顺 $C_a = 1 / (\rho v_a A_a v_a) = 1 / (c_{33}^D A_a)$
电阻 $R = \omega L \delta$	声阻 $R_a = \omega \rho A_a \delta_m$

3.2 压电晶片等效电路的 PSPICE 实现

等效电路中用于实现机电变压比的理想变压器电路模型如图4(a)所示,按图中设定的电压、电流参考方向、理想变压器原、副边电压和电流满足:

$$\begin{cases} \frac{u_1}{u_2} = \frac{N_1}{N_2} = n \\ \frac{i_1}{i_2} = -\frac{1}{n} \end{cases} \quad (19)$$

在 PSPICE 仿真库中并没有理想变压器模型,为此利用受控电压源和电流源组成电路使之满足上式关系构成理想变压器,如图4(b)所示,其 PSPICE 实现如图4(c)所示.

图5(a)是为了模拟负电容而设计的近似电路,根据电路理论可知:

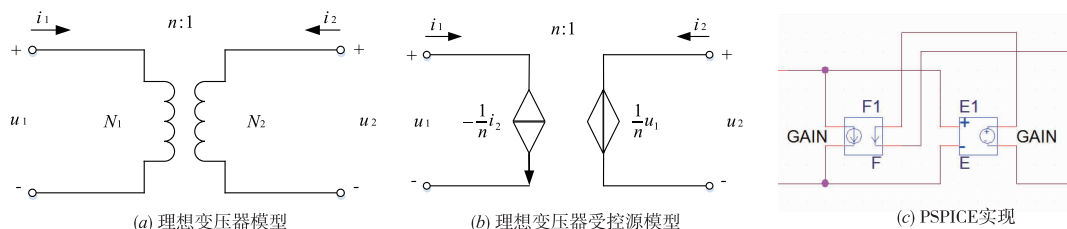


图4 理想变压器的PSPICE实现

$$I_c = -C_0 \frac{dV_c}{dt} \left| 1 - \frac{C_s}{C_0} \right| \quad (20)$$

当 $C_0 \gg C_s$ 时

$$I_c = -C_0 \frac{dV_c}{dt} \quad (21)$$

与理论上负电容 $-C_0$ 的电路特性一致. 该电路的 PSPICE 实现如图 5(b) 所示.

在 PSPICE 中有损传输线包含 C, G, R 和 L 四个参数, 分别代表每段传输线的分布电容, 线间电导, 线上电阻以及杂感电感四个参数, 其它各参数值可根据表 1 关系进行设置, 其中 $R_a = \omega \rho A_a \delta_m$. 因为含有频率变量 ω , PSPICE 并不支持, 所以利用拉普拉斯变换引入拉氏

算子 s 进行表示得^[11]:

$$R_a = \rho A_a \delta_m \cdot \sqrt{-s \cdot s} \quad (22)$$

最终利用理想变压器、负电容和有损传输线的 PSPICE 模型对本文提出的等效电路进行建模, 得到压电晶体厚度振动的 PSPICE 模型如图 6(a) 所示. 其中 ZB 端连接背衬, ZF 端连接负载, INPUT 端为信号输入端. 为了应用方便将该模型进行封装, 如图 6(b) 所示.

与 Puttmer^[11] 和 Leach^[12,13] 的有损传输线等效电路模型相比, 本模型的受控源不具有频率依赖性, 结构更加简单, 更易实现, 而且在不同频率下对损耗仿真都能得到较精确的结果.

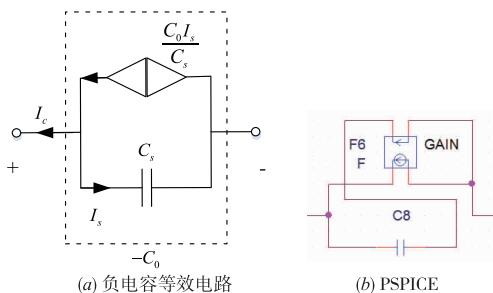


图5

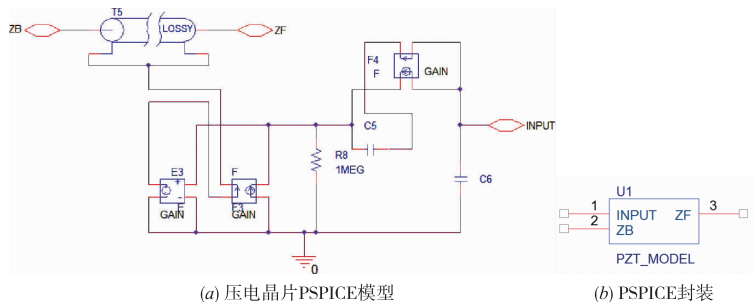


图6

3.3 超声无线输能通道 PSPICE 实现

超声无线输能声电转换通道的结构示意图如图 7 所示, 中间是金属层, 其两边分别是通过超声耦合剂与金属层相连的发射和接收换能器. 根据电-力-声线路类比原理, 金属层和耦合剂可等效为有损传输线, 最终得到的超声无线输能通道的 PSPICE 模型如图 8 所示. 其中 U_1 和 U_2 分别是发射换能器和接收换能器, R_1 和 R_2 为发射和接收换能器的背衬阻抗, R_3 为接收换能器端连接的负载电阻, 有损传输线 T_2 和 T_3 模拟超声耦合剂, T_1 为金属层, V_1 和 R_4 组成信号源.

4 模型有效性验证

Hayward 和 Jackson 提出的压电晶片仿真模型^[14] 仿真结果的频率响应与实验验证高度一致, 如图 9(a)、9(b) 和 9(c) 所示, 因而常被人们用作对仿真模型准确性的验证和参考, 如 Morris^[15] 和 Leach^[12] 等. 图 10 是根据文献[14]利用本文模型重现的 PSPICE 实验模型, 其中

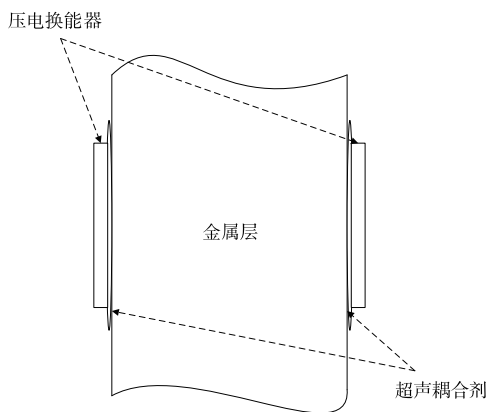


图7 超声无线输能声电转换通道的结构示意图

脉冲源 V_{11} 用于产生一个峰值为 300V 压降时间持续 100ns 的脉冲激励信号, 经由匹配阻抗电阻 R_{14} 和电容 C_6 激励压电晶片工作, 观察压电晶片的响应. R_{12} 和 R_{13} 分别是压电晶片的背衬阻抗和负载阻抗. 根据文献

[15]中公布的参数数据,换算得到本模型中各参数如表2所示,将这些参数代入实验模型,得到不同压电晶片在不同介电损耗条件下的仿真结果,如图11所示,其中不引入介电损耗的结果与文献[15]的实验结果[图9(d)]一致.因为介电损耗 δ_m 范围在0.002到0.02之间^[9],不确定原实验材料的介电损耗参数,所以分别取

了介电损耗为0.002和0.004的情况与无介电损耗情况进行仿真,可以发现引入不同的介电损耗,对仿真结果的幅值产生了影响,介电损耗变大,幅值减小,但对其基本形状影响不大.引入介电损耗后的仿真结果与文献[15]的仿真结果相比更接近于文献[14]的结果.

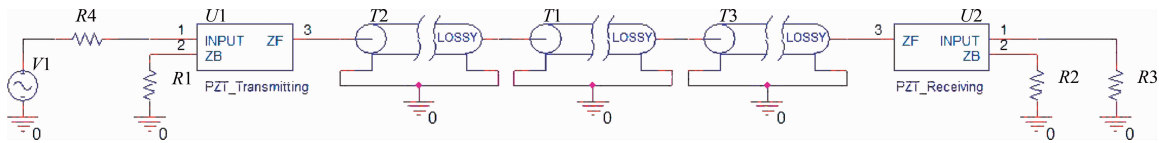


图8 超声无线输能通道的PSPICE模型

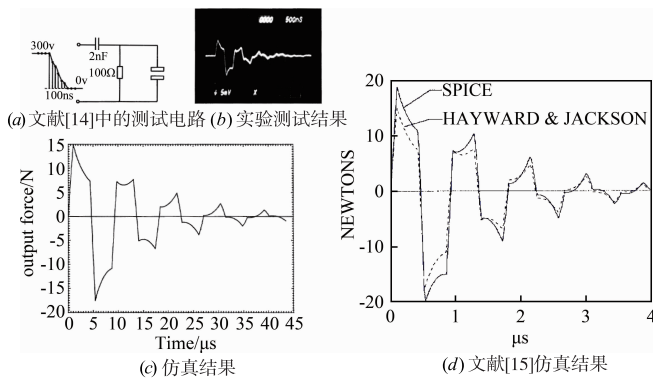


图9

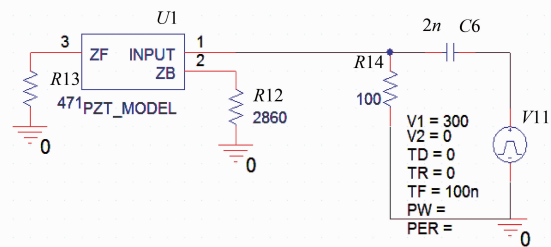


图10 测试电路的PSPICE模型

表2 换算得到的模型参数表

参数	C_0 (pF)	ZF (Ω)	ZB (Ω)	φ	C (nF)	G (S)	L (H)	LEN (mm)	R (Ω)
值	1230pF	2860	471	2.643	21.73	0	2.432	1.871	$2.432\delta \sqrt{-s * s}$

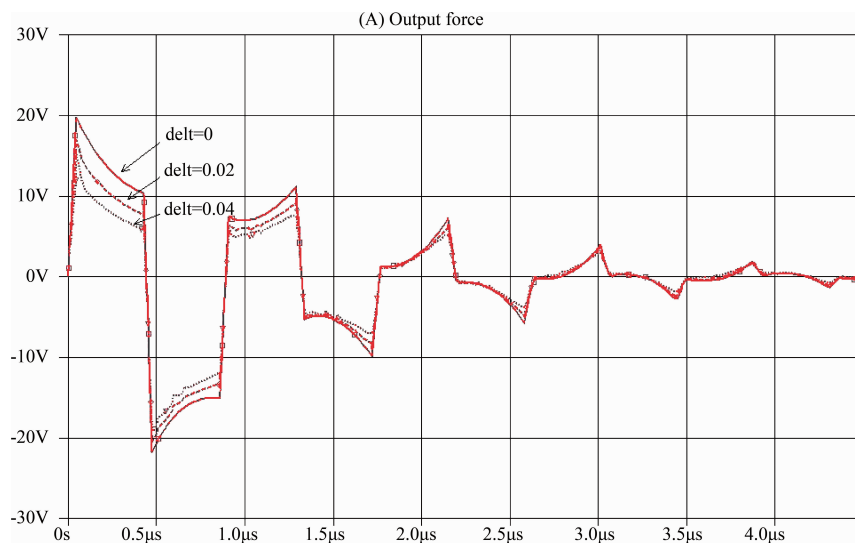


图11 PSPICE模型仿真结果

分别利用 Morris^[15]和 Leach^[12]模型以及本文模型对文献[3]中的超声无线输能声电转换通道进行建模和仿真,我们得到了整个通道的电压增益(即输出电压与输入电压的比值)与频率的关系,如图12(a)所示,

为了更好地进行对比,对图12(a)局部进行放大后得到图12(b).通过对图12中的仿真结果进行分析可以发现 Morris的无损传输模型因为无法引入介电损耗参数,仿真结果与文献[3]中的理论计算结果差距很大,

不仅谐振频率发生了偏移,而且电压增益的最高点比理论值高了近 3 倍. 而 Leach 和本文提出的模型因为正常引入介电损耗参数,仿真结果的谐振频率点与理论计算结果基本一致,仅在电压增益幅度上存在微小差

异. 因为本文模型中有损传输线对机械损耗的模拟具有频率依赖性,从图 12(b)中可以看到,和 Leach 模型相比,本文模型的仿真结果与理论计算结果之间的误差更小,更加精确.

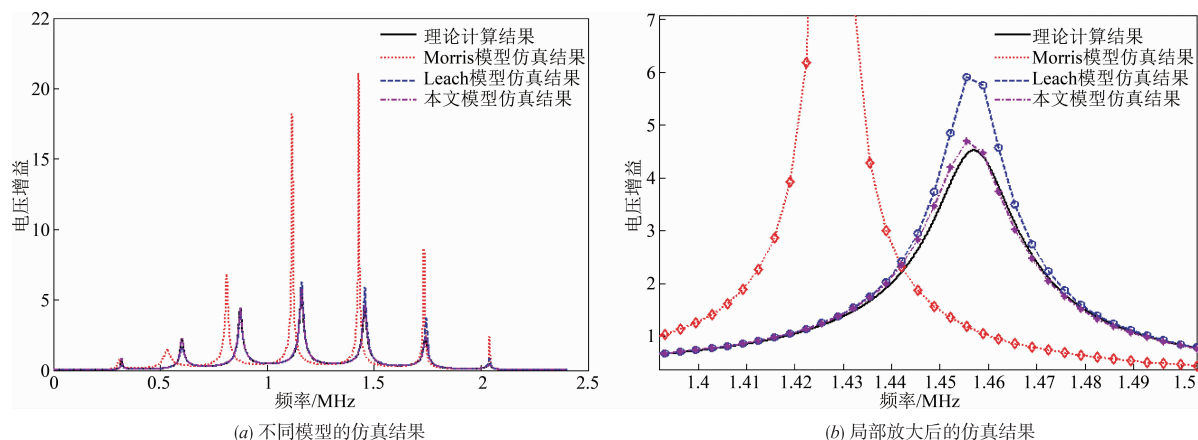


图12

5 结论

本文通过声电类比,将电路中的有损传输线引入到压电晶片厚度振动的等效电路中,通过有损传输线内部的串联电阻实现对材料介电损耗参数的仿真. 本模型中的所有电器元件均可利用真实元器件实现,可通过 PSPICE 软件进行建模,从而可对压电晶片的带宽特性、阻抗匹配、传输特性和响应特性等能直接进行仿真研究,为压电换能器的设计和性能分析提供依据.

将 PSPICE 等效电路应用于超声无线输能通道,可对超声无线输能系统中能量的有损传输过程进行有效的建模和仿真. 通过有损传输线模拟不同传输介质,并利用本模型构建超声无线输能的声电转换通道,简单有效,对整体电路和机械结构的仿真都具有极大的可扩展性,对超声无线输能系统的研制具有很好的指导意义.

参考文献

- [1] Roes M, Duarte J, Hendrix M, et al. Acoustic energy transfer: A review [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(1): 242 – 248.
- [2] Zaid T, Saat S, Yusop Y, et al. Contactless energy transfer using acoustic approach-A review [A]. International Conference on Computer, Communications, and Control Technology [C]. Langkawi; 2014. 376 – 381.
- [3] Hu Y, Zhang X, Yang J, et al. Transmitting electric energy through a metal wall by acoustic waves using piezoelectric transducers [J]. Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control IEEE Transactions on, 2003, 50(7): 773 – 781.
- [4] Sherrit S, Badescu M, Bao X, et al. Efficient electromechanical network model for wireless acoustic-electric feed-throughs [J]. Proceedings of SPIE-the International Society for Optical Engineering, 2005, 5758: 362 – 372.
- [5] Krimholtz R, Leedom D, Matthaei G. New equivalent circuits for elementary piezoelectric transducers [J]. Electronics Letters, 1970, 6(13): 398 – 399.
- [6] 徐洁, 林书玉. 径向振动环状压电陶瓷复合变压器的研究 [J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2017, 47(1): 50 – 55.
Xu J, Lin S. Research on the annular piezoelectric ceramic composite transformer in radial vibration [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2017, 47(1): 50 – 55. (in Chinese)
- [7] 顾晓丹, 刘传绍, 张昌娟. 夹心式压电超声换能器的等效电路设计法 [J]. 声学与电子工程, 2007(3): 28 – 30.
Gu X, Liu C, Zhang C. The method of equivalent circuit design for sandwich piezoelectric ultrasonic transducer [J]. Acoustics and Electronics Engineering, 2007(3): 28 – 30. (in Chinese)
- [8] 黄以华, 周康源, 施俊, 等. 径向振动压电变压器的等效电路模型及特性研究 [J]. 电子学报, 2002, 30(11): 1585 – 1588.
Huang Y, Zhou K, Shi J, et al. The equivalent circuit model and characteristic of radial vibration mode piezoelectric transformer [J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(11): 1585 – 1588. (in Chinese)
- [9] 黄以华, 施俊, 周康源. 圆盘形弯曲振动压电变压器等效电路及特性研究 [J]. 电子学报, 2003, 31(11): 1664 – 1666.
Huang Y, Shi J, Zhou K. The research on the equivalent circuit model and characteristic of disk flexural vibration

- mode piezoelectric transformer [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2003, 31(11): 1664 – 1666. (in Chinese)
- [10] 黄以华, 符健, 邱志明, 等. 基于 TSM 的压电免疫传感器等效电路模型的研究进展 [J]. *电子学报*, 2008, 36(4): 744 – 749.
Huang Y, Fu J, Qiu Z, et al. The research on the equivalent circuit of TSM-based piezoelectric immune sensors: recent advances [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2008, 36(4): 744 – 749. (in Chinese)
- [11] Puttmer A, Hauptmann P, Lucklum R, et al. SPICE model for lossy piezoceramic transducers [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control*, 1997, 44(1): 60 – 66.
- [12] Leach W M. Controlled-source analogous circuits and SPICE models for piezoelectric transducers [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control*, 1994, 41(1): 60 – 66.
- [13] Khan S, Taube W, Yogeswaran N, et al. Spice model of a piezo-electric transducer for pulse-echo system [A]. Ph. d. *Research in Microelectronics and Electronics* [C]. Glasgow: IEEE, 2015. 334 – 337.
- [14] Hayward G, Jackson M N. Discrete-time modeling of the thickness mode piezoelectric transducer [J]. *IEEE Transactions on Sonics & Ultrasonics*, 1984, 31(3): 137 – 150.
- [15] Morris S A, Hutchens C G. Implementation of mason's model on circuit analysis programs [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control*, 1986, 33(3): 295 – 298.
- [16] Redwood M. Transient performance of a piezoelectric transducer [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1961, 33(4): 527 – 536.
- [17] 拉德马内斯. 射频与微波电子学 [M]. 电子工业出版社, 2012. 154 – 160.
- [18] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. 声学基础 [M]. 南京大学出版社, 2012. 78 – 124.

作者简介



王 俊 男, 1990 年出生于浙江省江山市, 中国科学院声学研究所博士生, 主要从事超声相控阵井壁成像系统与超声无线输能系统研究.
E-mail: wangjun213@mails.ucas.ac.cn



黄 娟 (通信作者) 女, 1983 年出生于湖北省襄阳市, 中国科学院声学研究所助理研究员, 博士学位, 主要从事超声检测与成像、集成电路与系统的研究.
E-mail: huangjuan@mail.ioa.ac.cn

阎守国 男, 1981 年出生于辽宁省大连市, 中国科学院声学研究所助理研究员, 博士学位, 主要从事超声传播与成像, 无损检测研究.
E-mail: yanshouguo@mail.ioa.ac.cn



张碧星 男, 1963 年出生于湖南省岳阳县, 中国科学院声学研究所研究员、博士生导师, 主要从事声学 and 地球物理领域的研究, 先后在井孔声学、层状介质声学、超声检测与成像等方面开展了系统的理论和实验工作.
E-mail: zhbix@mail.ioa.ac.cn