

基于 ANSYS 提取单相单向换能器耦合模参数

付 琛[†] 李红浪 何世堂

(中国科学院声学研究所 北京 100190)

摘要 基于有限元理论,给出了基于 ANSYS 提取单相单向换能器 (Single Phase Unidirectional Transducers, SPUDT) 耦合模参数的方法。首先,结合声表面波在压电介质中的传播原理,给出了压电有限元分析方程和对应的 ANSYS 分析步骤。然后针对 SPUDT 结构,给出了周期性近似分析的理论模型,利用耦合场分析对其进行模态分析和谐响应分析,最后结合两者的结果来计算 SPUDT 的耦合模参数。本文给出基底材料为压电晶体 $128^\circ\text{YX-LiNbO}_3$ 和 YZ-LiNbO_3 , 电极材料为铝的三种不同 SPUDT 的计算结果,理论结果与 Hashimoto^[8]和 Hartmann^[14]文献报道的结果相吻合,并且和实验测试的结果基本一致。从而给出了提取 SPUDT 耦合模参数的一种通用、有效的方法。

关键词 ANSYS, 声表面波, 单相单向换能器, 模态分析, 谐响应分析, 耦合模参数

COM parameters of a periodic array SPUDT extraction from numerical simulations by ANSYS

FU Chen LI Honglang HE Shitang

(Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

Abstract Based on Finite Element Method (FEM) theory, a universal numerical method was proposed to extract the Coupling-of-Modes parameter of a periodic array Single Phase Unidirectional Transducers (SPUDT) by ANSYS. Firstly, according to the theory about SAW propagation in piezoelectric media, the FE theory and corresponding ANSYS analysis procedure were presented. Then, Aiming at SPUDT structure, an approximate periodic finite element model was described. Both modal analysis and harmonic analysis were performed and we could make use of the results to calculate the COM parameter. Finally, $128^\circ\text{YX-LiNbO}_3$ and YZ-LiNbO_3 were adopted as substrate materials. Al was adopted as electrode. Three type SPUDT structures were calculated as an example. The results agreed well with those reported by Ken-ya Hashimoto^[8] and Hartmann^[14]. It's proved to be universal and convenient.

Key words ANSYS, SAW, SPUDT, Modal analysis, Harmonic analysis, COM parameter

1 引言

上个世纪90年代以来,随着移动通讯事业的迅猛发展,对声表面波 (Surface Acoustic

Wave, SAW) 器件的性能要求也不断提高,为了实现低损耗高性能滤波器,工程上经常采用单相单向换能器结构,这种结构必须利用以前被当作二阶效应而加以抑制的指条间

2011-03-01 收稿; 2011-05-27 定稿

作者简介: 付琛 (1982-), 男, 湖南岳阳人, 博士研究生, 研究方向: 声表面波传感器。

李红浪 (1976-), 男, 硕士生导师, 副研究员。 何世堂 (1958-), 男, 博士生导师, 研究员。

[†]通讯作者: 付琛, E-mail: fuchen@mail.ioa.ac.cn

的多次反射效应, 因此脉冲响应模型和电路等效模型不再适用, 针对这种结构通常是采用耦合模 (Coupling-of-Modes, COM) 理论进行分析^[1,2]。在用这种唯象模型的方法设计滤波器前提是需要得到准确的COM参数, COM参数的准确性直接影响到所设计器件的性能。

早期, Hartmann采用实验的办法来提取COM参数^[3], 这种方法周期长, 准确度低, 而且成本高。近些年来, 自从P. Ventura提出FEM/BEM方法以来^[4], 有限元法 (FEM) 以及有限元和边界元结合 (FEM/BEM) 的方法在声表面波器件设计中受到业界的广泛地关注, 取得了很大的发展。通过Hashimoto^[5], 林基明^[6]的方法虽然能够全面准确的提取COM参数, 但是这种方法针对结构简单的模型, 计算繁琐, 通用性较差。刘建生等采用分层介质波传播理论和变分原理能够快速的提取反射参数^[7], 但是不适用于周期内多指条的结构。

因此, 为了准确、通用地提取耦合模参数, 减少实验量, 降低开发成本, 本文利用商业软件ANSYS对SPUDT进行数值模拟。其优点是可以方便对各种不同形状的模式建模, 考虑了质量加载效应, 对声波的传播模拟形象、直观。同时, ANSYS还具有强大的前后处理功能。正是基于以上优点, 在本文中, 利用ANSYS对给出基底材料分别为 $128^\circ\text{YX-LiNbO}_3$ 和 YZ-LiNbO_3 , 电极材料为铝的不同SPUDT的结构进行建模, 分析其模式和频率响应, 并且根据有限元分析结果与COM参数之间的关系基础上提取耦合模参数。

2 理论模型

2.1 SPUDT结构

图1是一个SPUDT的结构示意图。叉指

换能器 (Interdigital Transducer, IDT) 覆盖在压电介质上, 当在其上加加载交变电压, 将会在基底介质上激发起相应的弹性震动, 形成一个沿着基底介质表面单向传播的表面波。如图1所示, 每根指条的宽度以及同一周期内指条间的间隔均为 $1/8$ 波长, 相邻周期之间指条的间隔是 $3/8$ 个波长。指条1, 2分别加载正负电信号, 指条3是悬浮指, 没有加载激励电压, 根据结构的对称性, 反射中心位于指条2的中心, 发射中心位于指条1, 2的中心。换能中心与反射中心相隔 $1/8$ 波长, 经过调谐后, 在中心频率处的换能作用和反射作用的相位相差 90° 。声波在正方向上相位相同而能量增强, 在反方向上相位相反而相互抵消, 从而实现声波的单向传播^[8]。

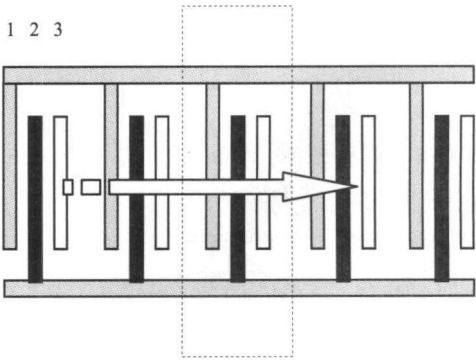


图1 水平平面示意图

2.2 SPUDT周期结构建模

由于实体模型在孔径方向长度与波长相比足够大, 因此可以假设在孔径方向, 场量的自由度沿该方向是没有变化的, 即近似满足平面应变条件。由于模型中的主要是表面波的效应, 随基底介质厚度的增加其幅度呈指数衰减, 因此本文模型在厚度方向只延伸3个波长。另外假设在传播方向认为其足够长, 传播没有衰减, 忽略电极末梢的表面波偏转, 并且考虑到换能器的结构周期性, 因此认为瑞利波的传播也是呈周期性的。模型近似为对图1中虚线框一个周期建模^[10,11], 如图2所示。

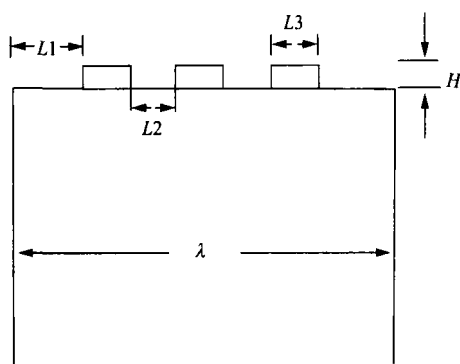


图2 实体模型图

模型的左右两个侧面相差一个周期,施加周期边界条件。为了抑止其他模式的影响,对压电介质的底面施加自由度为0的约束。

2.3 ANSYS耦合场分析

本文ANSYS的压电耦合分析主要有两个部分:

(1) 预处理:

对于基底介质,由于存在压电效应,因此采用压电单元,采用八节点的plane223单元,每个节点有4个自由度 $U(ux,uy,uz,v)$,单元按照ANSYS的规则定义材料密度,弹性常数,压电常数,介电常数矩阵。对于电极,选用八节点的非压电单元plane82,每个节点有3个自由度 $U(ux,uy,uz)$,并对其定义密度,泊松比,杨氏模量参数。

划分网格:为了离散化实体模型,根据求解的精度和实际问题的需要,将连续的实体模型划分成有限元单元模型,通常一个周期内单元数目大于32个时就能满足计算精度要求^[10]。

为了求得满足实际问题的解,将实际问题中施加力学和电学边界条件以及激励载荷施加到模型上。为了对电极施加电压激励,通过耦合同一电极位置上的结点的电压自由度,使其电压值相等,然后选择主结点施加电压载荷。

(2) 求解:

在静态分析中,通过对电极主节点加载

单位电压,提取时的电荷,可以计算激励产生的静态电荷。

设置求解频率区间,对其进行模态分析。使用通用后处理器POST1。求解出该频率区间内对应模式的特征频率。

进行谐响应分析,通过对电极主节点加载正弦单位电压,获得在不同频率载荷的作用下的响应,通过时间历时处理器POST26提取出节点输出电压响应和频率的变化关系。

3 分析结果与讨论

3.1 COM模型参数的提取

根据COM理论分析,对于单相单向换能器结构,存在两个谐振频率 f_{s+} , f_{s-} 分别表示阻带的边缘,在这个频率范围内,没有能量向介质内部传播,体波辐射截至。谐振频率点通过模态分析提取。反谐振频率 f_{o+} , f_{o-} 就是谐态分析的中导纳的零点,并且这四个频率特征点与5个COM参数存在如下对应的关系^[8,10]。

(1) SAW波速

$$v = (f_{s+} + f_{s-})\lambda / 2. \quad (1)$$

(2) 每个周期的反射系数

$$k_{12}\lambda = 2\pi \frac{f_{s+} - f_{s-}}{f_{s+} + f_{s-}}. \quad (2)$$

(3) 每个周期的归一化激发系数

$$\frac{4|\zeta|^2\lambda}{\omega C} = 2\pi \left(\frac{f_{oc}}{f_{sc}} - 1 \right). \quad (3)$$

(4) 换能系数与反射系数夹角

$$\cos\varphi = \frac{\delta f_s^2 - \delta f_o^2 + (f_{oc} - f_{sc})^2}{2\delta f_s(f_{oc} - f_{sc})}. \quad (4)$$

(5) 每个周期的电容 $C\lambda$

$$C\lambda = Q/V. \quad (5)$$

其中:

$$f_{sc} = (f_{s+} + f_{s-}) / 2, f_{oc} = (f_{o+} + f_{o-}) / 2,$$
$$\delta f_s = (f_{s+} - f_{s-}) / 2, \delta f_o = (f_{o+} - f_{o-}) / 2,$$
$$\varphi = \angle \zeta^2 / k_{12},$$
 V表示电压, Q表示静电荷。

3.2 Hashimoto SPUDT结构^[8]

本文给出实例分析条件如下, 参照图2, IDT周期为 $\lambda=20\mu\text{m}$, 电极材料是金属铝, 厚度 $H=0.8\mu\text{m}$ 。基底材料是 $128^\circ\text{YX-LiNbO}_3$, 厚度为 $60\mu\text{m}$ 。电极与两端间隔 $L1=0.375\lambda$, 电极之间间隔 $L2=0.125\lambda$, 每个电极宽为

$L3=0.125\lambda$ 。材料参数采用文献^[13]中所列参数。

通过模式分析得到SPUDT结构的两个本征模式。 $f1=193.664\text{ MHz}$ 和 $f2=196.383\text{ MHz}$ 分别对应的是对称模式与反对称模式, 如图3所示。这两个频率分别代表阻带的两个边缘, 从图中可以看出这两个模式分别关于电势对称和反对称。对称模式周期边缘的x方向位移为0, 反对称模式周期边缘y方向位移为0。

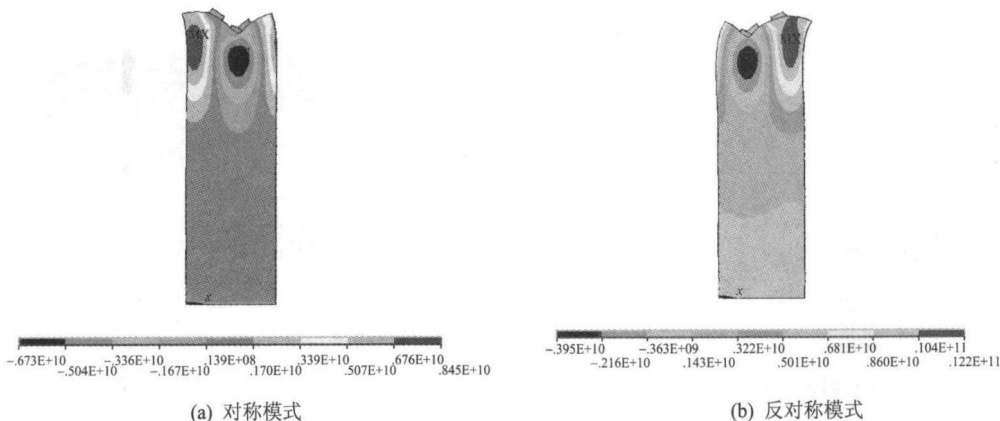


图3 SPUDT结构的本征模式

通过谐响应分析, 得到了电纳与频率的关系, 如图4所示, 可以提取两个反谐振点, 对应的频率分别是 195.650 MHz 和 197.250 MHz 。图中两个极点表示电纳无穷大, 电阻为0, 代表短路栅的特征频率。零点表示电纳为0, 电阻为无穷大, 代表开路栅的特征频率。

将谐振点代入式 (1) (2) 得速度为 3900.5 m/s , 反射系数为 4.38% , 将反谐振点代入 (3) (4) 求得换能系数参量为 0.02 , $\phi=27.66^\circ$ 。每个周期的相对电容 $C_n=C\lambda/w=45.36$, 其中w为指条孔径长度。

图4还给出了Hashimoto用MSYNC分析法计算的结果^[8], 其与本文的仿真结果非常吻合。

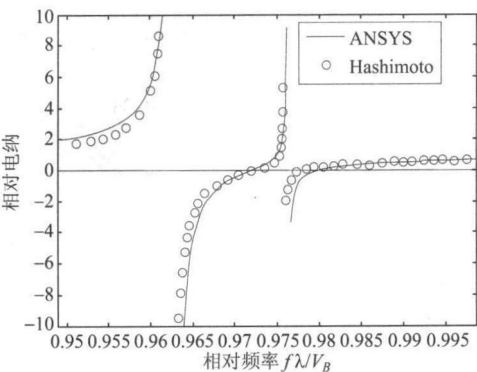


图4 $128^\circ\text{YX-LiNbO}_3$ 基片无限长三指 IDT 输入导纳

为了验证该方法的可靠性, 通过在实验中制作了一个在 $128^\circ\text{YX-LiNbO}_3$ 材料上制作200个周期排列如文中所示IDT单元结构的单

端SPUDT器件，通过HP5783D网络分析仪测量其导纳Y11。图5中实线是200个周期IDT组成的SPUDT结构的实验测试结果，虚线是加入了小的损耗无限周期延伸SPUDT结构的仿真结果，由于实验中IDT在传播方向和孔径方向是有限长，因此在幅度上存在差异，但是两者的谐振点的结果基本吻合，说明了本方法提取耦合模参数的可靠性。

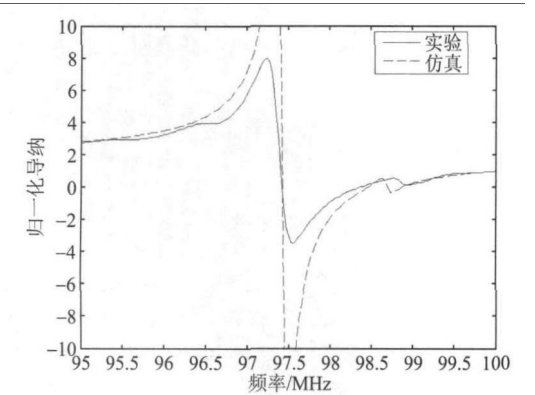


图 5 实验与仿真输入电纳图

3.3 DART/SPUDT与EWC/SPUDT结构

根据文献^[13]的分析，SPUDT的单向性主要取决于反射系数的绝对值和夹角 φ ，如图6所示，其中文献^[13]中的夹角定义为本文中夹角的二分之一。

由图6可知，为了获得良好的单向性，需要尽可能大的反射系数以及接近90度的相位

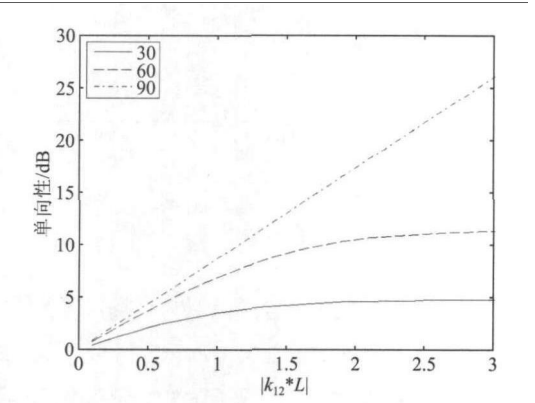


图 6 SPUDT 单向性随 φ 以及反射系数绝对值变化

角，因此我们可以判断出Hashimoto的SPUDT的单向性能较差。目前广泛采用的SPUDT结构是DART，如图7所示。如果将DART结构的宽 $3\lambda_0/8$ 指条改为 $\lambda_0/4$ 指宽，会有更强的反射，这种结构现在通常称为EWC/SPUDT。

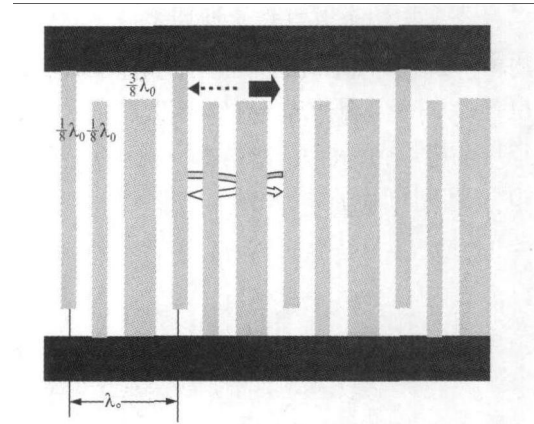


图 7 DART/SPUDT 结构示意图

针对DART和EWC结构，在铝基片采取128°YX-LiNbO₃和YZ-LiNbO₃，在1%波长的铝电极情况下，得到的反射系数的绝对值和夹角 φ 如表1、表2所示。根据计算的结果，我们可以看出，DART结构比EWC结构具有更接近90的夹角 φ ，但是反射系数却比EWC结构小，这与Hartmann^[14]分析相吻合。

表 1 128°YX-LiNbO ₃ SPUDT 的 COM 参数		
	DART	EWC
$k_{12}\lambda$	0.22%	1.25%
φ	43.6	49.0

表 2 YZ-LiNbO ₃ SPUDT 的 COM 参数		
	DART	EWC
$k_{12}\lambda$	0.48%	1.54%
φ	44.1	49.3

4 结论

本文采用有限元方法，通过ANSYS软件，针对沿传播方向无限周期延伸的SPUDT

结构的频率响应进行了分析, 结合ANSYS模态与谐响应分析的结果与COM模型参数之间存在的对应关系, 提取了COM参数, 通过与Hashimoto^[8]计算的结果的比较, 并且经过实验验证, 说明了本文采取的方法的可行性, 并且, 该方法可以直观、通用分析任意形状的模型, 能考虑二次效应。可以预见对于多层结构, 不同的边界条件都可以实现耦合模参数的提取, ANSYS相对其它方法, 具有直观, 计算准确的优势, 采用这种方法提取COM参数, 并结合耦合模理论, 能够节约声表面波器件的设计成本和周期, 起到很好的指导作用。但是考虑到COM模型中的电纳表达式是建立在散射效应不是很显著的基础上的^[8], 因此当波速的散射很大的时候, 这种提取电纳的方法仍然适用, 但是特征点与COM参数不再是以上对应关系。

参 考 文 献

- [1] HAUS H A, HUANG W, Coupled-mode theory[J]. Proceedings of the IEEE, 1991, 79(10): 1505-1518.
- [2] HARTMANN C S, WRIGHT P V, et al. An Analysis of SAW interdigital transducers with internal reflections and the application to the design of single-phase unidirectional transducers[J]. In: Proc. IEEE Ultrason. Symp 1982: 40-45.
- [3] HARTMANN C S, ABBOTT B P. Experimentally determining the transduction magnitude and phase and the reflection magnitude and phase of SAW SPUDT structures[J]. In: Proc IEEE Ultrason Symp, 1990: 37-42.
- [4] VENTURA P, HODE J M, LOPES B. Rigorous analysis of finite SAW Devices with arbitrary electrode geometries[J]. In: Proc IEEE Ultrason Symp, 1995: 257-262.
- [5] HASHIMOTO K Y, KOSKELA J, SALOMAA M M. Fast determination of coupling-of-modes parameters based on strip admittance approach[J]. In: Proc IEEE Ultrason Symp, Caesars Tahoe. 1999: 93-96.
- [6] 林基明, 吴浩东, 王宁, 等. 用周期Green 函数方法全面提取耦合模式模型参量[J], 中国科学(E辑), 33(4), 2003, 357-364.
- [7] 刘建生, 何世堂. 声表面波耦合模模型参量的快速计算[J], 声学学报, 2007, 32(4), 323-327.
- [8] HASHIMOTO K Y著, 王景山, 刘天飞, 孙玮译, 声表面波器件模拟与仿真[M], 北京: 国防工业出版社, 2002: 244-248.
- [9] Release 11.0 Documentation for ANSYS © 2007 SAS IP, Inc.
- [10] KANNAN T, Finite Element Analysis of Surface Acoustic Wave Resonators[D], Master Thesis, University of Saskatchewan, 2006.
- [11] LERCH R, Simulation of piezoelectric devices by two and three-dimensional finite elements[J]. In: Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions, 1990, 37(3): 233-247.
- [12] AULD B A, Acoustic Fields and Waves in Solids[M]. (1-2), New York: John Wiley and Sons, 1973.
- [13] CHEN Z H, TAKEUCHI M, YAMANOUCHI K, Analysis of the film thickness dependence of a single-phase unidirectional transducer using the coupling-of-modes theory and the finite-element method[J]. Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on, 1992, 39(1): 82-94.
- [14] HARTMANN C S, ABBOTT B P. Overview of Design Challenges For Single Phase Unidirectional SAW Filters[J], Proc. IEEE Ultrasonics Symp, 1989: 79-89.