

基于有限长 FEM/BEM 提取 COM 参量

苏波¹, 王为标², 王昊¹, 水永安¹, 吴浩东¹

(1. 南京大学声学研究所 近代声学教育部重点实验室, 江苏 南京 210093;

2. 南京电子器件研究所 江苏省新型传感材料及器件工程技术研究中心, 江苏 南京 210016)

摘要:介绍了一种理论提取耦合模式模型(COM)参量的方法。利用有限长有限元/边界元法(FEM/BEM)计算声表面波同步单端对谐振器的导纳曲线,根据导纳曲线与表面波色散特性相关的特征量,通过解析计算、单变量拟合、再次单变量拟合及两变量拟合4个步骤依次提取出全部COM参量。与传统方法相比,该方法简单、稳定、可靠。根据得到的COM参量对一种混合结构的滤波器进行了模拟,与直接使用FEM/BEM得到的结果符合较好,验证了所提取的COM参量的准确性。

关键词:声表面波;有限元/边界元法(FEM/BEM);表面波色散关系;导纳曲线;耦合模式模型(COM)参量

中图分类号:TN65;O42

文献标识码:A

COM Parameters Extraction Based on Finite FEM/BEM

SU Bo¹, WANG Weibiao², WANG Hao¹, SHUI Yongan¹, WU Haodong¹

(1. Institute of Acoustics, Key Lab. of Modern Acoustics (MoE), Nanjing University, Nanjing 210093, China;

2. Nanjing Electronic Devices Institute, Jiangsu Engineering Research Center for Sensing Materials and Devices, Nanjing 210016, China)

Abstract: A theoretical method of getting COM parameters is presented. The admittance curve of a one-port synchronous SAW resonator is calculated using finite FEM/BEM, according to the characteristics of SAW dispersion, which is used to extract all the COM parameters through four steps: Algebraic analysis; Univariate function optimization; Univariate function optimization once again; Multivariate function optimization. Comparing with traditional methods, this approach is convenient, stable and reliable. The simulation of a hybrid SAW filter using the obtained COM parameters is consistent with the result directly calculated by FEM/BEM, which verifies the accuracy of COM parameters by our method.

Key words: SAW; finite FEM/BEM; characteristics of SAW dispersion; admittance curve; COM parameters

0 引言

声表面波(SAW)器件具有体积小,可靠性高,一致性好等优点,在电子通信方面有着不可替代的应用。对于SAW器件的优化设计,耦合模式模型(COM)是常用的一种方法。COM模型是唯象模型,参量需要从外界提供,故COM参量的精确度直接影响SAW器件的模拟结果。传统的COM参量通常被视为非色散常量。在实际工作中,用常数COM参量对瑞利波器件进行模拟时误差并不显著,但用来模拟漏波器件时,由于器件工作频率高且工作频段很宽,基片中体波辐射阈值往往处于漏波工作频段内,漏波在传播过程中向基片内部不断辐射的能量随频率变化,引入色散,所以把COM参量

作为常数提取会在器件设计中引入不可忽略的误差^[1]。

为了精确模拟漏波器件,近年来不少人致力于进行色散COM参量的提取。目前用来提取COM参量的方法可分为实验与理论两种,实验方法可将参量直接和自己的工艺、材料相联系,但受平面工艺、基片材料及外界因素的影响,这种方法不仅成本高,耗时长,提取出的结果也达不到很好的一致性,所以理论方法一直占重要的地位。90年代以来,Plessky等人在理论提取色散COM参量课题上做了大量的工作^[2-4]。此外,也有人从传统COM模型的前提假设出发,通过对COM模型本身进行改进来修正所要提取的COM参量的形式。Plessky提

收稿日期:2013-07-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11174143)

作者简介:苏波(1986-),男,江苏泰州人,硕士生,主要从事声表面波器件理论模拟的研究。通信作者:吴浩东,教授,主要从事声表面波器件、声学材料和超声换能器等领域的研究。

出二参量模型^[5],引进与 SAW 反射和渗透深度相关的参量 η, ϵ 来表征布喇格禁带内周期栅格中传播的纯表面剪切波的频散关系,从而近似模拟出漏波的色散。Abbott 和 Hashimoto 在此基础上更进一步,把 Plessky 色散关系与 COM 理论相结合,建立了 STW-COM 模型^[6],并给出了用他们组所开发的 FEMSDA 软件提取 COM 参量的方法^[7]。值得一提的是,由于 Abbott 频散关系是由 COM 理论推导出来的,所以 STW-COM 模型并不仅适用于表面横波(STW),而适用于绝大部分类型的 SAW^[8]。

以上提取 COM 参量的方法虽然在实际设计中得到了广泛应用,但这些方法都是基于无限周期结构,在模拟有限长 SAW 器件时不可避免会引入误差。目前对有限长 SAW 器件模拟最精确的方法为有限元/边界元法(FEM/BEM)^[9],该方法为 COM 参量的提取提供了精确的基础数据。史向龙给出了基于有限长 FEM/BEM 计算出的有限周期栅格内部 SAW 场分布来提取色散 COM 参量的方法^[10]。本文用有限长 FEM/BEM 计算出 SAW 同步单端对谐振器的导纳曲线,找出与栅格中传播的 SAW 色散关系相关的特征量,用解析与拟合的方法,通过 4 个步骤依次提取出 STW-COM 形式下的 COM 参量,并且用所得到的 COM 参量模拟了一种混合结构滤波器的电学响应,与直接使用 FEM/BEM 模拟的结果符合得很好,验证了所提取 COM 参量的精确度。这种方法提取参量速度快,弥补了 FEM/BEM 法计算速度慢、不能对器件进行优化设计的缺点。由于导纳数据来源于有限长 FEM/BEM,结果也稳定可靠,提高了 SAW 器件的仿真精度。

1 STW-COM 模型与 COM 参量提取

1.1 Plessky 频散关系

Plessky 推导出了无限周期反射栅下的近似色散公式^[5]。此模型假设周期栅格中表面剪切波的位移是与表面平行的纯横向,且在无反射栅时只有速度为 v_b 的体波。令周期栅格中纯表面剪切波的归一化频率为

$$\Delta = \omega/\omega_b - 1 \quad (1)$$

式中 $\omega_b = v_b \pi/p$ 为体波的布喇格截止频率, p 为指条的结构周期。Plessky 引入归一化的波数差 q ,将色散关系表示为

$$q = \pm \sqrt{\Delta^2 - \frac{1}{4}(|\epsilon|^2 \pm \eta \sqrt{2|\epsilon|^2 - \eta^2 - 4\Delta})^2} \quad (2)$$

式中 ϵ, η 为与 SAW 反射和渗透深度相关的参量。

1.2 STW-COM 方程^[11]

Abbott 和 Hashimoto 提出了基于 STW 频散关系的 STW-COM 方程。令 $R(x)$ 与 $S(x)$ 分别为周期栅格中右向波与左向波的慢渐变振幅, STW-COM 方程可写成

$$\begin{cases} \frac{dR(x)}{dx} = -i\delta_{STW}R(x) + i\kappa_R S(x) + i\alpha V \\ \frac{dS(x)}{dx} = -i\kappa_S R(x) + i\delta_{STW} S(x) + i\alpha^* V \\ \frac{dI(x)}{dx} = 2i\alpha^* R(x) + 2i\alpha S(x) - i\omega CV \end{cases} \quad (3)$$

式中: δ_{STW} 为修正失谐系数; κ_R, κ_S 分别为右向波、左向波在栅格中传播时与反方向波的耦合系数; C 为单位长度的静态电容; α 为换能系数; V 为外加电压; $I(x)$ 为从原点到 x 处随位置变化流入电极的电流。其中

$$\delta_{STW} = \Delta - \Delta_v + |\kappa_B|v(\Delta) - i\gamma \quad (4)$$

式中: γ 为衰减系数; Δ_v 为相向传播的波(包括 SAW 之间和 SAW 与体波之间)的耦合作用趋近于 $0(\epsilon \rightarrow 0)$ 时的中心频率(禁带中心的位置); $v(\Delta)$ 为 SAW 对反向传播剪切体波的背向散射导致的衰减与强色散作用,且

$$v(\Delta) = \eta_B / (\sqrt{\Delta_B - \Delta} + \eta_B) \quad (5)$$

式中: η_B 为色散相关参量; Δ_B 为体波辐射阈值。 $\kappa_R v(\Delta)$ 为相向传播的掠面体波间的耦合系数。

令 κ 为相向传播的 SAW 之间的耦合系数,则 κ_R 与 κ_S 的表达式为

$$\begin{cases} \kappa_R = \kappa + \kappa_B v(\Delta) \\ \kappa_S = \kappa^* + \kappa_B^* v(\Delta) \end{cases} \quad (6)$$

STW-COM 模型下 SAW 色散关系为

$$q(\Delta) = \pm c \sqrt{(\delta_{STW}(\Delta))^2 - \kappa_R(\Delta)\kappa_S(\Delta)} \quad (7)$$

式中 c 为 SAW 速度色散的修正系数。至此,可得 5 个反映表面波色散关系的参量 $\Delta_v, \Delta_B, \kappa, \kappa_B$ 和 η_B 。由于 STW-COM 模型与 Plessky 模型的色散关系是等价的,因此可推导出上述 5 个参量与 Plessky 二参量间的关系为

$$\begin{cases} \Delta_v = -\eta^2/2 \\ \Delta_B = -(\eta^2 - 2|\epsilon|^2)/4 \\ \kappa = \pm |\epsilon|(2\eta + |\epsilon|)e^{i\theta}/2 \\ \kappa_B = \mp |\epsilon|^2 \eta e^{i\theta}/(\eta + 2|\epsilon|) \\ \eta_B = (\eta + 2|\epsilon|)/2 \end{cases} \quad (8)$$

式中 θ_c 为 κ 的相位。只要我们提取 η, ϵ 及 C, α, c, γ 这 6 个 COM 参量, 就可用 P 矩阵级联法计算出 SAW 器件的响应。

1.3 数值方法提取 COM 参量

用有限长 FEM/BEM 对以下结构的 $42^\circ\text{Y-XLiTaO}_3$ 基片上同步单端对谐振器进行仿真: 金属化比为 0.5, 指条相对厚度为 8%, 孔径为 $108\ \mu\text{m}$, 叉指换能器及其两侧反射栅的指条数均为 50, 结构周期 p 为 $1.08\ \mu\text{m}$ 。仿真得到的电导曲线如图 1 所示。由图可知, 谐振器电导曲线在工作频段有 3 个明显的极大值点。频率点 f_3, f_2 分别为禁带上、下边界处^[12], 二者的归一化频率 $\Delta_{\pm}$ 与 ϵ, η 的关系为

$$\Delta_{\pm} = -(\eta \mp |\epsilon|^2)/2 \quad (\eta > 2|\epsilon|) \quad (9)$$

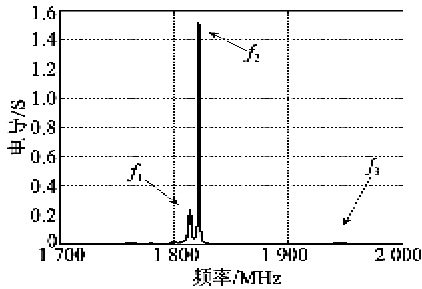


图 1 $42^\circ\text{Y-X LiTaO}_3$ 谐振器电导曲线

由式(9)可求得

$$\eta = (\sqrt{-2\Delta_-} + \sqrt{-2\Delta_+})/2 \quad (10)$$

$$\epsilon = (\sqrt{-2\Delta_-} - \sqrt{-2\Delta_+})/2 \quad (11)$$

在强周期微扰下, 禁带频段与体波散射频段可能发生部分重叠^[13], 此时禁带上边界频率变为

$$\Delta_+ = \Delta_B \quad (\eta \leq 2|\epsilon|) \quad (12)$$

为尽可能精确地提取出参量 ϵ, η 和 c , 需求出极大值所在频率点 f_1, f_2 与 f_3 的精确值。由于 FEM/BEM 计算出的谐振器电导数值分布均匀, 拟合曲线非常平滑, 故可在 f_1, f_2 与 f_3 附近分别使用分段样条插值法拟合电导数据来求出 f_1, f_2 与 f_3 的精确值, 再利用式(10)、(11)求出 ϵ, η 的值。

ϵ, η 确定后, 由于 C, α 与 γ 并不影响 f_1 的位置, 所以这 3 个 COM 参量可暂时用常数代入计算谐振器响应, 所求得电导曲线与 FEM/BEM 仿真结果对比, 不断改变 c 的取值进行迭代计算, 直到这 3 个极大值频率点 f_1, f_2 与 f_3 完全吻合, 即可确定 c 的值。

由于 C 与归一化 α 存在依赖关系, 所以我们先提取 γ , 再同时提取 C 与 α 。这 3 个参量决定了导纳

曲线的峰值及整体大小, 这样问题就转化为约束条件下非线性最小化函数求解。

对 γ 赋予初值, 在谐振器工作频段上取 N 个频率点, 用 P 矩阵级联法计算出每一个频率点 x_n 处的电导值 $y(x_n)$, 与 FEM/BEM 计算得到的电导值 $y'(x_n)$ 相比较。利用最小二乘法, 令

$$F = \sum_{n=1}^N [y(x_n) - y'(x_n)]^2 \quad (13)$$

用 MATLAB 优化工具箱进行优化计算, 使 F 取最小值时的 γ 值, 即为所要提取的衰减系数值。得到 γ 后, 用同样的优化方法可求出 C, α , 为保证所提取的 C, α 与 γ 有足够的精确度, 我们可利用得到的 COM 参量再次计算谐振器的电导值 $y(x)$, 根据式(13)重复迭代计算。当 $F(x)$ 的值不再变化, 表明此时 C, α 与 γ 的值最精确。

令 $42^\circ\text{Y-X LiTaO}_3$ 上同步单端对谐振器的指条相对厚度在 5%~10% 间变化, 其余结构参数同前。用有限长 FEM/BEM 分别计算出 11 组导纳数据, 用上述方法提取 COM 参量的结果如图 2、3 所示。

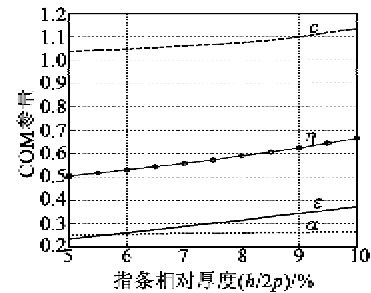


图 2 $42^\circ\text{Y-XLiTaO}_3$ 漏波 COM 参量 $\eta, \epsilon, c, \alpha$

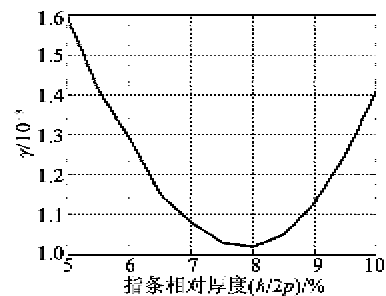


图 3 $42^\circ\text{Y-XLiTaO}_3$ 漏波 COM 参量 γ

由图 2、3 可知, 随着指条相对厚度 $(h/2p)$ 增大, COM 参量 $\eta, \epsilon, c, \alpha$ 随之近似线性增大, 而衰减系数 γ 先减小后增大, 且当指条相对厚度为 8% 时 γ 最小, 与实际情况相符合^[9]。 C 不随频率变化。

用提取出的 COM 参量对同步单端对谐振器进行模拟, 结果如图 4、5 所示。由图可见, 导纳曲线与

直接使用 FEM/BEM 模拟的结果符合良好,说明用上述方法得到的 COM 参量是准确、可靠的。

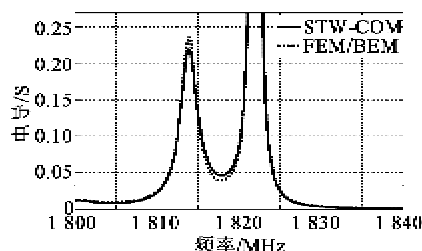


图4 电导曲线对比

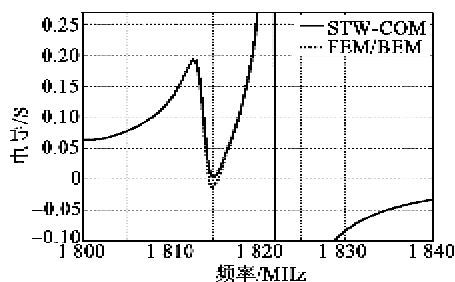


图5 电纳曲线对比

2 结果分析

为验证所提取 COM 参量的准确性,我们以一种单端输入、平衡输出的结构较复杂的滤波器为例,该滤波器由一级梯形结构和一级 5 换能器的多模纵向耦合 (MMS) 滤波器组成^[14]。利用提取出的 COM 参量计算出其响应,并与 FEM/BEM 仿真的结果进行对比,如图 6 所示。

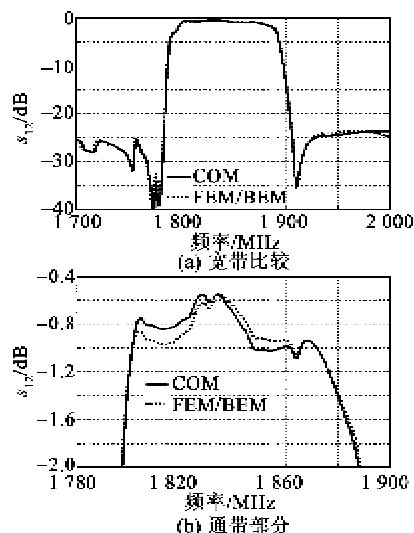


图6 滤波器响应对比

由图 6 可看出,用提取出的 COM 参量计算出的器件幅频响应与 FEM/BEM 结果吻合很好。低端阻带二者在细节上符合较好,通带内二者的最大

差值不超过 0.2 dB,高端阻带细节上稍有差异,但基本能满足实际的需要。高端阻带差异较大的原因是频率超过体波辐射的阈值,SAW 的色散关系变得较复杂,COM 模型本身已不再适用。尽管如此,这一结果足以验证我们所提取的 COM 参量的精确性,说明本文提取 COM 参量的方法可很好地应用到 SAW 器件的设计工作中。

3 结束语

提取精确的 COM 参量对于 SAW 器件的优化设计的实用价值大。本文利用由有限长 FEM/BEM 计算的同步单端对谐振器导纳曲线与表面波色散关系特征量间的联系,分别用一次解析方法、两次单变量拟合和一次两变量拟合的数值方法提取出了全部 COM 参量;用所提取出的 COM 参量按照 P 矩阵级联的方法计算了一种复杂结构的单端输入平衡输出滤波器的响应,与直接使用 FEM/BEM 仿真的结果符合较好,验证了所提取 COM 参量的精确性。与实验方法相比,本文的方法用计算机软件实现起来简单、稳定;与传统的利用无限周期栅格阵的色散曲线提取 COM 参量的方法相比,本方法考虑了器件结构的有限性对色散关系的影响,因而得到的 COM 参量更能反映实际器件的性质。因此,本文提出的方法可有效提高漏波器件或 STW 器件的设计水平。

参考文献:

- [1] TONAMI S, NISHIKATA A, SHIMIZU Y. Characteristics of leaky surface acoustic waves propagating on LiNbO₃ and LiTaO₃ substrates [J]. Jpn J Appl Phys, 1995, 34(3B): 2664-2667.
- [2] KOSKELA J, PLESSKY V P, SALOMAA M M. SAW/LSAW COM parameter extraction from computer experiments with harmonic admittance of a periodic array of electrodes[J]. IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control, 1999, 46(4): 806-816.
- [3] PASTUREAUD T. Evaluation of the P-matrix parameters frequency variation using periodic FEM/BEM analysis[A]. In: Proceedings of IEEE Ultrasonics Symposium[C]// Montreal, IEEE, 2004: 80-84.
- [4] SVESHNIKOV B V, SHITVOV A P, BHATTACHARJEE K K. Evaluation of dispersion in COM-parameters[A]. In: Proceedings of IEEE Ultrasonics Symposium[C]// Honolulu, IEEE, 2003: 715-719.

(下转第 175 页)