

DOI: 10.7652/xjtuxb201609020

铁电材料力-电非线性电滞与蝴蝶曲线 综合模型研究

薛晓敏¹, 孙清¹, 伍晓红², 张陵²

(1. 西安交通大学土木工程系, 710049, 西安; 2. 西安交通大学航空航天学院, 710075, 西安)

摘要: 铁电材料固有的电畴结构和极化反转特性引发宏观非线性行为, 即极化电滞曲线和应力蝴蝶曲线, 且由于材料、制备技术、电路系统等限制因素使得行为曲线出现不对称、中心偏移等现象, 使得目前常规模型很难精确、有效地描述铁电系统的真实特性。针对此问题, 提出一种适用于铁电材料的综合含参数模型用以有效模拟力、电及耦合非线性行为。该模型基于现有铁电模型理论并引入异化参数而形成, 可广泛适用各类铁电曲线中存在的不对称和偏移等异化现象; 此外, 为了有效预测综合模型中多个未知特性参数, 通过设计遗传算法程序实现其精确优化识别, 为进一步提高模型预测精确性和实用性提供必要条件; 最后, 分别开展了虚拟试验和真实试验仿真模拟验证, 结果表明: 采用优化参数综合模型的模拟误差均可控制在 10% 以内, 相较于传统模型方法可提高约 50%。因此, 该模型方法可广泛用于实际铁电材料特性行为的描述, 且具有较好的应用前景。

关键词: 铁电材料; 电滞曲线; 蝴蝶曲线; 综合模型; 参数识别

中图分类号: TN384; TN402 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)09-0125-07

Comprehensive Modeling for Electro-Mechanical Nonlinear Hysteretic and Butterfly Curves in Ferroelectrics

XUE Xiaomin¹, SUN Qing¹, WU Xiaohong², ZHANG Ling²

(1. Department of Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. School of Aerospace, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Ferroelectric materials have domain structure and present switching behavior of the polarization, resulting in nonlinear characteristics of electric field-induced hysteretic polarization and butterfly-shaped strain. In addition, they also show abnormal performance of asymmetry and bias due to inevitable sophisticated factors in material processing, electric circuit, etc. In this sense, this paper presents a comprehensive parameterized model to simulate the electro-mechanical coupling properties in ferroelectrics. The model was formed from adding a set of extra parameters on the basis of ferroelectric model theory, and it can be used to describe the behaviors of all kinds of ferroelectrics. Genetic algorithm (GA) program was designed to optimize the values of the underdetermined parameters in the model. By this program, the model can be greatly improved in accuracy and practicality. Finally, the simulation verification was carried out by using synthetic and actual experimental data, and the simulation errors are below 10%, improved by about 50% compared with the traditional methods. The proposed approach can be extensively used to describe the behaviors of various ferroelectric materials, and has very good

收稿日期: 2015-11-25。 作者简介: 薛晓敏(1977—), 女, 讲师; 孙清(通信作者), 男, 教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11172226, 11502188)。

网络出版时间: 2016-07-14

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20160714.1117.008.html>

application prospect.

Keywords: ferroelectric material; hysteresis curve; butterfly curve; comprehensive model; parameter identification

作为重要的电子元器件材料,铁电晶体具有良好的铁电性、压电性、热释电性、声电光及非线性光学等特性,因而可广泛应用于传感器、智能材料与智能结构及存储器诸多领域中^[1-2]。根据铁电畴结构和极化反转特性,铁电材料常呈现复杂的机电耦合行为,继而引发非线性铁电和压电行为,即电场-电位移或极化曲线和电场-应变曲线。理想的铁电系统在等幅周期外电场作用下,应呈现对称规则的电滞曲线和蝴蝶曲线。然而,由于材料制备技术、电路系统及加载条件等原因致使电滞曲线和蝴蝶曲线发生不对称、中心偏移等异化现象^[3]。该异化现象无疑给模型建立增加困难,很大程度限制铁电材料在实际工程中的应用前景。因此,如何提出适用于各种非线性铁电、压电行为描述的力-电模型,对铁电材料的潜在实用性起到至关重要的作用。

目前,描述铁电材料非线性行为的理论模型主要有唯象模型^[4]、细观力学模型^[5]等。以上模型在构造过程中不可避免地涉及各种待定参数,例如饱和极化强度、剩余极化强度、矫顽磁场、介电常数、压电常数等,其数值一般通过试验测试结果进行预估,然后代入模型用以模拟智能材料的铁电、压电行为。由于铁电特性试验不可避免地受周围铁电畴极化状态、缺陷密度、应力等^[6]不确定因素干扰,因此依据试验结果预估参数数值的方法并不可靠,继而进一步影响铁电非线性模型的精确性和有效性,最终限制了模型的实际应用。

基于以上研究背景,本文提出一种铁电材料力、电非线性综合模型及其待定参数优化识别方法,该方法可灵活适用于不对称、偏移等异化现象的各类铁电电滞曲线和蝴蝶曲线的模拟,为铁电材料在工程上的潜在应用提供了必要的理论基础。

1 基本方程

铁电材料的应变和电位移除了来源于外加电场、应力场之外,还源于自发极化和应变的影响。铁电材料在小变形、小电场条件下的本构关系为^[7]

$$\mathbf{D} = \mathbf{P} + \mathbf{d}\boldsymbol{\sigma} + \mathbf{k}\mathbf{E} \quad (1)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}^r + \boldsymbol{\sigma}\mathbf{s} + \mathbf{d}\mathbf{E} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{D}$ 为外加电场、应力场条件下引发的电位移; $\mathbf{P}$ 为自发极化矢量; $\mathbf{d}$ 为三阶压电应变系数张量; $\boldsymbol{\sigma}$

为外加应力场; $\mathbf{k}$ 为二阶应力-介电常数张量; $\mathbf{E}$ 为外加电场强度; $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为外加电场、应力场条件下引发的全应变; $\boldsymbol{\varepsilon}^r$ 为自发应变张量; $\mathbf{s}$ 为四阶弹性柔度张量。

为了全面研究铁电材料在电场作用下的铁电和压电效应,现有的试验和理论研究大都考虑材料在均匀热力场、无外应力和单轴外电场加载等条件。根据该限制条件,电场-电位移关系为

$$\mathbf{D} = \xi_0 \xi_r \mathbf{E} + \mathbf{P} \quad (3)$$

式中: $\xi_0 = 8.854 \text{ F/m}$ 为真空绝对介电常数; ξ_r 为大电场相对介电常数,是唯一涉及的待定参数。由于极化强度与电位移在大电场作用下呈现线性关系,其斜率为 $\xi_0 \xi_r$ ^[7],因此 ξ_r 的常规取值方法是通过电场-电位移试验曲线结合其斜率关系进行预测的。

文献[8-9]提出本构与应变-电场具有相似性,为便于推导电场-应力关系,McMeeking假设残余应变与材料极化强度直接相关^[4],轴向应变可简化为

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{Pd_{33}}{P_0} \mathbf{E} + \boldsymbol{\varepsilon}_0 \left(\frac{\mathbf{P}}{P_0} \right)^2 \quad (4)$$

式中: d_{33} 为长度方向压电常数; $\boldsymbol{\varepsilon}_0$ 为残余应变; P_0 为饱和自发极化最大值。

本文采用双曲正切函数表达饱和电场-极化关系,即

$$P^{\text{sat}}(t) = \xi P_s \tanh\left(\frac{\xi E(t) - E_c}{2\theta}\right) \quad (5)$$

式中: $\theta = E_c \left[\ln\left(\frac{1+P_r/P_s}{1-P_r/P_s}\right) \right]$; P^{sat} 为饱和极化强度; P_s 、 P_r 和 E_c 分别为饱和极化、剩余极化强度和矫顽电场; ξ 为符号函数,当电场增大时 $\xi = 1$,当电场减小时 $\xi = -1$ 。为了获得 P_s 、 P_r 和 E_c 3个参数值,常规做法是根据近似于饱和极化试验数据进行预测,结果如图1所示。

铁电体的饱和电场-极化曲线是在一种理想饱和状态获得的,然而试验中所得曲线并非理想饱和状态,其施加的电场和获得的极化强度小于理想状态的幅值,根据米勒理论^[10],饱和极化曲线为实际电滞回线外包络线,数学关系为

$$\frac{\partial P(t)}{\partial E(t)} = \Omega \frac{\partial P^{\text{sat}}(t)}{\partial E(t)} \quad (6)$$

式中: $\Omega = 1 - \tanh\left[\left(\frac{P(t) - P^{\text{sat}}(t)}{\xi P_s - P(t)}\right)^{1/2}\right]$ 为小于1的比例函数。

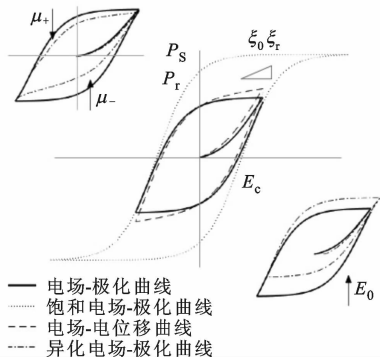


图 1 模型参数对电场-极化曲线的影响示意图

联合求解式(3)~(7),可对铁电材料对称规则的电滞、蝴蝶回线进行模拟。为拓展模型的适用性,本文通过增加 2 个待定参数用以描述各种不对称、偏移和异化特性曲线,即

$$\dot{P} \leftarrow (\dot{P} - \mu \text{sign}(P)); \quad E \leftarrow (E - E_0) \quad (7)$$

式中: μ 为正(负)电场方向的变形系数,其数值大小代表滞回环的变化程度,正、负电场各自取值,数值的差别则体现滞回曲线的不对称性; E_0 为偏移系数,其数值大小代表电滞环整体偏移的程度。

2 模型参数识别

为了提高模型精确性和实用性,本文利用遗传算法设计参数识别优化程序,该程序根据随机试验结果预测反映铁电系统物理真实特性的参数值。

遗传算法运行主要分为染色体编码与解码、个体适用度评价、选择运算、交叉和变异运算等步骤。遗传算法把问题的解表示为染色体,其结构由求解优化问题的本身特性决定。由于综合参数模型涉及到 9 个待定参数需要求解,因而染色体结构设为

$$\Pi = \{F_{s,i}, F_{r,i}, E_{c,i}, \zeta_{r,i}, \mu_{+,i}, \mu_{-,i}, E_0; d_{33,i}, \epsilon_{0,i}\} \\ i = 1, \dots, N \quad (8)$$

式中: N 为染色体群体总量; i 为个体数。

适应度是用来评价染色体个人的优劣程度,用以决定每个个体遗传下一代的概率。为了便于误差分析,本文将适应度函数设为相对均方根误差,第 k 代电位移和应变适用度函数为

$$e_{D,k} = (1/n \sum_{j=1}^n (D_{\text{sim},j} - D_{\text{exp},j})^2)^{1/2} / \\ (1/n \sum_{j=1}^n (D_{\text{exp},j})^2)^{1/2} \times 100\% \quad (9)$$

$$e_{\epsilon,k} = (1/n \sum_{j=1}^n (\epsilon_{\text{sim},j} - \epsilon_{\text{exp},j})^2)^{1/2} / \\ (1/n \sum_{j=1}^n (\epsilon_{\text{exp},j})^2)^{1/2} \times 100\% \quad (10)$$

式中: n, j 为数据点总数; $\epsilon_{\text{sim},j}, \epsilon_{\text{exp},j}$ 分别为仿真、试验结果。

标准遗传算法一般预设固定的遗传终止迭代数,由于没有实时监控优化进程,过早收敛容易导致计算精度不高,而过度迭代使得计算效率低下。基于此,本文提出一套自适应收敛规则,即

$$(e_{k,\min} \leq e_{\text{low}}) \vee [(e_{k,\max} \leq e_{\text{up}}) \wedge (\bar{e}_k \leq e_{\text{ave}})] \quad (11)$$

式中: $\vee$ 和 $\wedge$ 分别为逻辑符号“或”和“并”; $e_{k,\min}, e_{k,\max}$ 和 $\bar{e}_k$ 分别为第 k 代适用度函数的最小值、最大值和平均值; $e_{\text{low}}, e_{\text{up}}$ 和 e_{ave} 分别为适用度函数最低、最高和平均阈值,阈值的选取与适用度函数的选取、精度要求有关。遗传算法的主要参数设置如表 1 所示,实现模型参数识别流程如图 2 所示。

表 1 遗传算法参数设置

基因类型	二进制代码
染色体	20×3
群体个体数	60
基因	20
选择	轮盘赌选择
交叉率	0.85
变异率	0.01

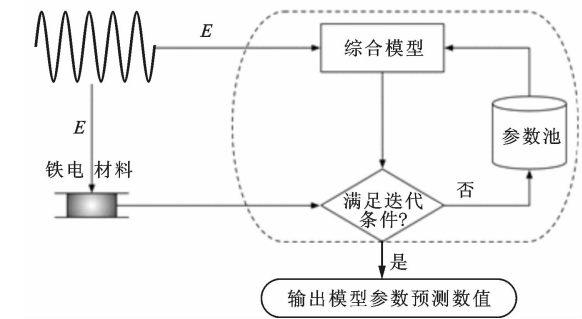


图 2 综合模型参数识别流程

3 仿真实验

为了验证本文方法的有效性,分别对虚拟和真实试验曲线进行了模型预测。

3.1 虚拟试验

本文预设一组参数 $\Pi = \{P_s, P_r, E_c, \zeta_r, \mu_+, \mu_-, E_0; d_{33}, \epsilon_0\}$ 代表铁电材料内在属性,基于该设定参数,采用遗传算法对预设参数进行优化识别,最终得到另一组估计参数 $\Pi^* = \{P_s^*, P_r^*, E_c^*, \zeta_r^*, \mu_+^*, \mu_-^*, E_0^*; d_{33}^*, \epsilon_0^*\}$,当优化结果 Π^* 趋近于设计参数 Π 时,该组参数识别结果可代表铁电系统本质属性。

当电流在电路测试系统流动时,铁电系统产生相对应的电场,这是由于其自身的铁电效应特性,同

时还和临近电路设备的干扰有关。因此,本文将在原始虚拟试验数据基础上人为增加不同程度的噪声,用来验证所提方法具有稳定精确的参数识别能力,为其实用性提供重要保障。

噪声百分比率定义为

$$R = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left(\frac{P_j - P'_j}{\max |P|} \right) \times 100\% \quad (12)$$

式中: P_j 为 j 时刻无噪声原虚拟试验数据; P'_j 为增加了人为噪声后的试验数据。

设计外加电场强度信号为简谐波,频率为 0.1 Hz,幅值为 0.6 MV/m,时间历程 40 s,虚拟铁电系统特性参数取值为: $P_s = 0.3 \text{ C/m}^2$, $P_r = 0.25 \text{ C/m}^2$, $E_c = 0.4 \text{ MV/m}$, $\zeta_r = 5\,000$, $\mu = 0$, $E_0 = 0 \text{ MV/m}$, $d_{33} = 8 \text{ }\mu\text{C/N}$, $\epsilon_0 = 0.15\%$, R 分别为 0%和 20%。

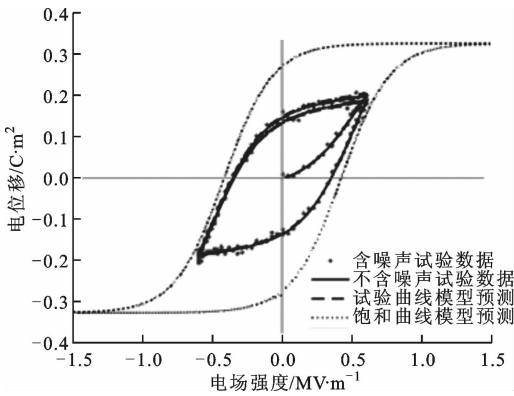
采用本文方法对虚拟试验数据进行拟合的结果如表 2 所示,总体误差基本控制在 6%以内,满足精度要求,噪声的引入使得模拟精度有所降低,其中 e_D 、 e_ϵ 在引入噪声下误差分别增加了 15%和 13%,噪声对模型模拟效果具有一定的干扰,但误差仍保持在比较精确的范围。

表 2 虚拟试验仿真算例模拟结果

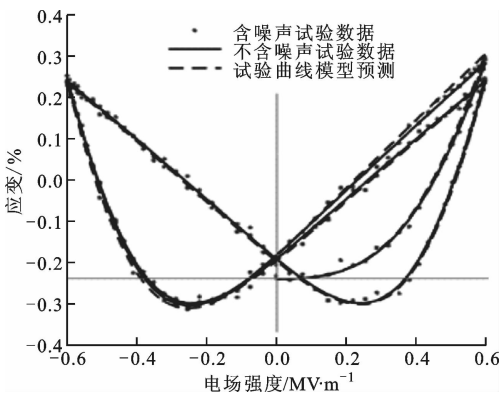
参数	预设值/估计值	
	$R=0\%$	$R=20\%$
$P_s/\text{C}\cdot\text{m}^{-2}$	0.3/0.33	0.32/0.31
$P_r/\text{C}\cdot\text{m}^{-2}$	0.25/0.27	0.3/0.29
$E_c/\text{MV}\cdot\text{m}^{-1}$	0.4/0.42	0.5/0.49
ζ_r	5 000/5 312	5 000/5 401
μ		
$E_0/\text{MV}\cdot\text{m}^{-1}$		
$d_{33}/\mu\text{C}\cdot\text{N}^{-1}$	8.0/8.95	8.0/9.60
$\epsilon_0/\%$	0.15/0.15	0.15/0.16
$e_D/\%$	4.01	4.74
$e_\epsilon/\%$	4.93	5.64

采用遗传算法参数识别模型方法获得的电滞回线和蝴蝶回线的模拟效果如图 3 所示,人为输入 20%噪声干扰,电场-电位移和电场-应变的虚拟试验数据预测与原始曲线基本一致,验证了本文方法的精确性和鲁棒性。外加电场强度信号是幅值为 0.6 MV/m、偏置为 0.1 MV/m 的简谐波,频率为 0.1 Hz,时间里程为 40 s,虚拟铁电系统特性参数取值为: $P_s = 0.3 \text{ C/m}^2$, $P_r = 0.25 \text{ C/m}^2$, $E_c = 0.4 \text{ MV/m}$, $\zeta_r = 5\,000$, $\mu_+ = 0.02$, $\mu_- = 0.01$, $E_0 = 0.1$, $d_{33} = 8 \text{ }\mu\text{C/N}$ 和 $\epsilon_0 = 0.15\%$, R 分别为 0%和 20%。

采用本文方法对偏移、不对称虚拟试验数据进



(a)电滞曲线模拟



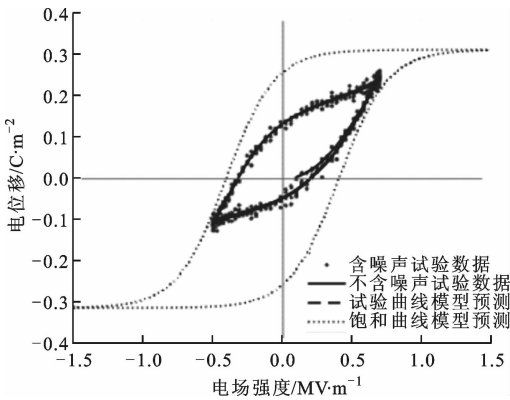
(b)蝴蝶曲线模拟

图 3 不考虑异形参数仿真算例拟合效果

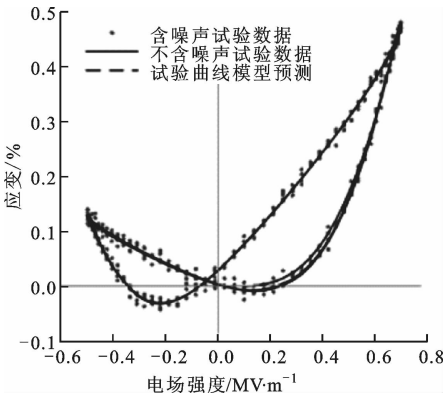
行模拟的结果如表 3 所示,其总体误差可控制在 6%以内,噪声的引入对模拟精度有微弱影响。此算例中添加了变形参数值且施加了偏置的外电场,虚拟试验曲线为不对称、偏置电滞回线和蝴蝶回线,如图 4 所示。通过采用本文模型方法获得的特性曲线与试验曲线基本一致,说明了该模型对电滞、蝴蝶回

表 3 考虑异形参数仿真算例模拟结果

参数	预设值/估计值	
	$R=0\%$	$R=20\%$
$P_s/\text{C}\cdot\text{m}^{-2}$	0.3/0.32	0.32/0.31
$P_r/\text{C}\cdot\text{m}^{-2}$	0.25/0.27	0.3/0.28
$E_c/\text{MV}\cdot\text{m}^{-1}$	0.4/0.41	0.5/0.48
ζ_r	5 000/5 312	5 000/5 401
μ_+	0.02/0.022	0.03/0.028
μ_-	0.01/0.011	-0.01/-0.012
$E_0/\text{MV}\cdot\text{m}^{-1}$	0.109/0.105	0.112/0.107
$d_{33}/\mu\text{C}\cdot\text{N}^{-1}$	8.0/9.01	8.0/8.79
$\epsilon_0/\%$	0.15/0.16	0.15/0.15
$e_D/\%$	3.88	4.56
$e_\epsilon/\%$	4.09	5.78



(a)电滞曲线模拟



(b)蝴蝶曲线模拟

图 4 考虑异形参数仿真算例模拟效果

线不对称、偏置等仍然适用。

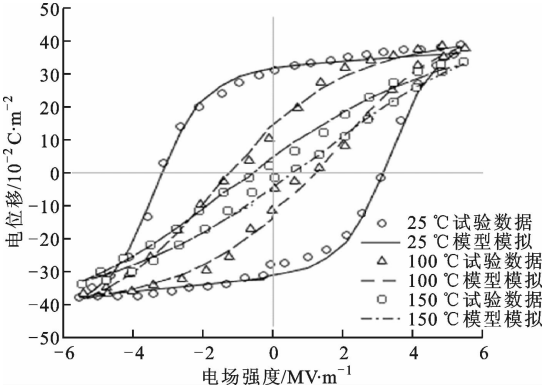
3.2 真实试验

压电铁电陶瓷大多含铅,在制备、使用及废弃处理过程中会给环境和人类健康带来很大损害,于是众多学者研究并开发了一系列无铅基压电陶瓷材料。Jaitea 对新型无铅压电材料 BNKT-BTS 开展了力、电特性试验研究,集合了大量不同 $\text{Ba}(\text{Ti}_{0.90}\text{Sn}_{0.10})\text{O}_3$ (BTS) 含量和环境温度下电滞和蝴蝶回线的试验数据^[11],电滞回线由示波器图示法测量获得,蝴蝶回线由光学位移传感器和辐射铁电系统测试获得。其中铁电参数 P_s 、 P_r 和 E_c 由电滞回线试验结果进行预估,压电特性参数 d_{33} 则由精密压电系数测试仪测试获得。

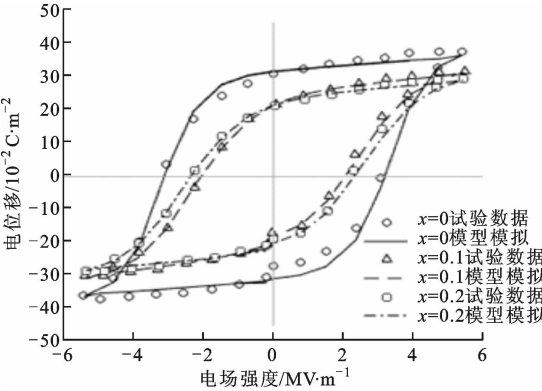
铁电模型的参数识别常规做法是通过大量试验数据对参数进行预估,然后将其代入模型中,继而用来模拟铁电系统的复杂力、电行为。与传统做法不同,本文采用参数优化识别方法,为了验证综合模型和参数识别方法的有效性和实用性,本文分别通过试验参数预测和优化参数识别对综合模型参数赋值,继而代入模型中对试验数据进行模拟。

BTS 含量 x 为 0、电场强度幅值为 55 kV/cm、

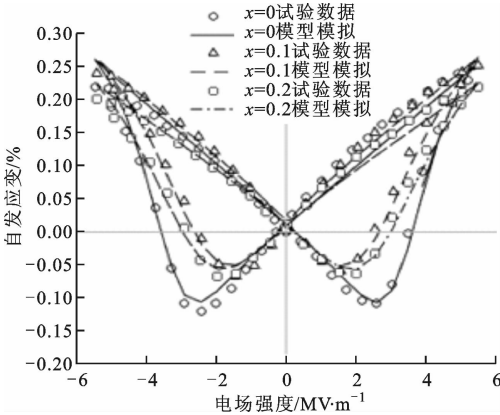
频率为 1 Hz 的输入条件下,观测环境温度变化对 BNKT-BTS 电滞回线的影响如图 5a 所示。由图 5a 可知,采用本文方法能够准确模拟该材料在各温度条件下的电滞回线。室温控制在 25℃、电场幅值 55 kV/cm、频率 1 Hz 下,在 BNKT 材料增加 BTS 含量并观测 BTS 不同含量对材料电滞回线和蝴蝶曲线的影响如图 5b、图 5c。由图 5 可知,BTS 的添加降低了剩余极化强度和矫顽电场强度,整体弱化了压电材料铁电滞回曲线的饱和度,采用本文方法能够



(a) $x=0$ 时不同环境温度电滞回线模拟



(b)室温 25℃ 时不同 BTS 含量的电滞回线模拟



(c)室温 25℃ 时不同 BTS 含量的蝴蝶曲线模拟

图 5 BNKT-BTS 特性试验仿真模拟效果

准确模拟该材料在不同 BTS 含量时的电滞回线和蝴蝶回线,模拟误差可控制在 10% 以内。

部分仿真计算结果如表 4 所示,当 BTS 含量 x 为 0、环境温度为 25℃ 时,采用传统方法预估各项特性参数值分别为: $P_r=0.304\ 8\ \text{C/m}^2$, $E_c=3.149\ \text{MV/m}$, $\xi_r=1\ 419$, $d_{33}=178\ \text{pC/N}$ 和 $\epsilon_0=0.23\%$, 将以上参数值代入模型中,误差 e_D 、 e_e 分别为 14.38%、18.15%。采用本文优化参数识别方法获得的参数值为: $P_s=0.371\ 5\ \text{C/m}^2$, $P_r=0.368\ 6\ \text{C/m}^2$, $E_c=3.178\ \text{MV/m}$, $\xi_r=1\ 844$, $d_{33}=184\ \text{pC/N}$ 和 $\epsilon_0=0.24\%$,如将以上数值代入模型中所产生的误差 e_D 、 e_e 分别为 7.36%、8.82%,模型精度相较于传统预测精度分别提高了 48.82%、51.4%。本文将室温 25℃,BTS 含量为 0、0.05、0.1、0.15 和 0.2 的电滞回线和蝴蝶曲线进行了仿真模拟,总体平均误差 e_D 、 e_e 分别为 6.88%、8.09%,均低于 10%,而采用传统方法得到的平均误差 e_D 、 e_e 分别为 14.62%、15.83%,由此可见优化特性参数对模型预测铁电行为的准确描述至关重要。此外,由于本文参数识别方法是根据随机试验结果进行训练优化得出的,这说明本文方法具有较为理想的普适性。

参数	传统方法/本文方法	
	$x=0$	$x=0.20$
$P_s/10^{-2}\text{C}\cdot\text{m}^{-2}$	/37.15	
$P_r/10^{-2}\text{C}\cdot\text{m}^{-2}$	30.48/36.86	20.54/29.68
$E_c/10^5\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$	31.49/31.78	23.08/26.12
ξ_r	1419/1844	1465/2271
μ_+	/9.958	/10
μ_-	/9.996	/10
$E_0/10^{-2}\text{C}\cdot\text{m}^{-2}$	/-0.38	/-0.205 6
$d_{33}/\mu\text{C}\cdot\text{N}^{-1}$	178/184	137/163
$\epsilon_0/\%$	0.23/0.24	0.21/0.25

4 结 论

为精确模拟电滞回线和宏观应力蝴蝶曲线,本文综合提出便于工程应用的适用于铁电材料非线性力、电耦合综合的含参数模型,为解决模型待定参数选取困难的问题,本文利用遗传算法对参数进行优化识别,进一步改善模型在工程实用性上受限的现状。该方法仅需要一组电场-极化、电场-电位移和电场-应变试验数据,即可精确识别铁电材料特性参数,继而代入综合模型对其他任意电场输入所获得

的极化和应变进行准确预测,并可获得该铁电系统在实际试验中很难获得的饱和极化电滞回线。

试验数据由于受各种不确定因素的干扰,实际电滞回线和蝴蝶回线常发生偏移、变形,且多数为不饱和和极化试验结果,该方法可灵活模拟各种不规则电滞曲线和蝴蝶曲线,具有较好的普适性。本文方法在不同噪声比率情况下的参数优化和综合模型模拟效果依然有效,误差保持在较精确的范围内,具有较好的鲁棒性,表明了铁电力、电综合模型及参数识别方法是切实可行的,有一定实用价值和工程应用前景。

参考文献:

[1] 江冰,方岱宁. 铁电材料的本构关系及相关问题研究进展[J]. 力学进展,1998,28(4): 469-478.
JIANG Bing, FANG Daining. Research progress of constitutive relation and its relevant issues of ferroelectric materials[J]. Advances in Mechanics, 1998, 28(4): 469-478.

[2] 邹小平,王丽坤. 热释电复合材料 PZT-PVDF 的介电性与热释电性[J]. 西安交通大学学报,1996,30(2): 14-19.
ZOU Xiaoping, WANG Likun. Dielectric and pyroelectric properties of pyroelectric composite material PZT-PVDF[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1996, 30(2): 14-19.

[3] WONG C K, SHIN F G. A possible mechanism of anomalous shift and asymmetric hysteresis behavior of ferroelectric thin films[J]. Applied Physics Letters, 2005, 86(4): 042901.

[4] MCMEEKING R M, LANDIS C M. A phenomenological multi-axial constitutive law for switching in polycrystalline ferroelectric ceramics[J]. International Journal of Engineering Science, 2002, 40(14): 1553-1577.

[5] DUNN M L, TAYA M. Micromechanics predictions of the effective electroelastic moduli of piezoelectric composites[J]. International Journal of Solids and Structures, 1993, 30(2): 161-175.

[6] DELIMOVA L A, YUFEREV V S, GREKHOV I V, et al. Origin of photoresponse in heterophase ferroelectric Pt/Pb (ZrTi) O3/Ir capacitors[J]. Applied Physics Letters, 2007, 91(11): 112907.

[7] MCKINLEY I M, GOLJAH I S, LYNCH C S, et al. A novel thermally biased mechanical energy conversion cycle[J]. Journal of Applied Physics, 2013, 114(22): 224111.

- [8] COCKS A C, MCMEEKING R M. A phenomenological constitutive law for the behaviour of ferroelectric ceramics [J]. *Ferroelectrics*, 1999, 228(1): 219-228.
- [9] LANDIS C M. Symmetric constitutive laws for polycrystalline ferroelectric ceramics [C]// The 8th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials. Belingham, WA, USA: SPIE, 2001: 271-278.
- [10] MILLER S L, SCHWANK J R, NASBY R D, et al. Modeling ferroelectric capacitor switching with asymmetric nonperiodic input signals and arbitrary initial conditions [J]. *Journal of Applied Physics*, 1991, 70(5): 2849-2860.
- [11] JAITA P, WATCHARAPASORN A, CANN D P, et al. Dielectric, ferroelectric and electric field-induced strain behavior of $\text{Ba}(\text{Ti}_{0.90}\text{Sn}_{0.10})\text{O}_3$ -modified $\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.80}\text{K}_{0.20})0.5\text{TiO}_3$ lead-free piezoelectrics [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, 596: 98-106.

(编辑 赵炜)

(上接第 19 页)

- [2] CHEN Bingkui, ZHONG Hui, LIU Jingya, et al. Generation and investigation of a new cycloid drive with double contact [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2012, 49(4): 270-283.
- [3] LI S. Design and strength analysis methods of the trochoidal gear reducers [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2014, 81(11): 140-154.
- [4] HSIEH C F. Traditional versus improved designs for cycloidal speed reducers with a small tooth difference: the effect on dynamics [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2015, 87(4): 15-35.
- [5] HSIEH C F. A new curve for application to the rotor profile of rotary lobe pumps [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2015, 87(5): 70-81.
- [6] LITVIN F L, FUENTES A. Gear geometry and applied theory [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004: 358-360.
- [7] IVANOVIĆ L, JOSIFOVIĆ D. Specific sliding of trochoidal gearing profile in the gerotor pumps [J]. *FME Transactions*, 2006, 34(3): 121-127.
- [8] GAMEZ-MONTERO P J, CASTILLA R, KHAMASHTA M, et al. Contact problems of a trochoidal-gear pump [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2006, 48(12): 1471-1480.
- [9] 李远庆. 准纯滚动啮合的摆线齿轮传动 [J]. *机械传动*, 2010, 34(11): 6-15
LI Yuanqing. Universal cycloid gear of prospective pure rolling meshing transmission [J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2010, 34(11): 6-15.
- [10] 陈焕. 新型摆线齿轮 3K 型减速器的设计研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012: 10-42.
- [11] 薛云娜, 王勇, 王宪伦. 新型摆线传动的共轭啮合机理 [J]. *山东大学学报(工学版)*, 2005, 35(4): 26-29.
- XUE Yunna, WANG Yong, WANG Xianlun. Conjugate meshing mechanism of cycloid drive [J]. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 2005, 35(4): 26-29.
- [12] 郑州工学院机械原理及机械零件教研室. 摆线针轮行星传动 [M]. 北京: 科学出版社, 1978: 12-18.
- [13] 刘令涛, 焦永和, 张春林, 等. 内平动全摆线齿轮压力角的分析 [J]. *北京理工大学学报*, 2010, 30(2): 158-160.
LIU Lingtao, JIAO Yonghe, ZHANG Chunlin, et al. Pressure angle of internal parallel moving gears with whole cycloidal profiles [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2010, 30(2): 158-157.
- [14] 吴序堂. 齿轮啮合原理 [M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2009: 42-49.
- [15] 陈兵奎, 梁栋, 彭帅, 等. 共轭曲线齿轮啮合管齿面的几何及接触特性分析 [J]. *西安交通大学学报*, 2015, 49(3): 85-94.
CHEN Bingkui, LIANG Dong, PENG Shuai, et al. Analysis on geometric and contact characteristics of tubular meshing tooth surfaces for conjugate-curve gears [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2015, 49(3): 85-94.
- [16] 肖望强, 李威, 韩建友, 等. 双压力角非对称齿轮传动接触分析 [J]. *北京科技大学学报*, 2006, 28(12): 1167-1173.
XIAO Wangqiang, LI Wei, HAN Jianyou, et al. Transmission contact analysis of the unsymmetric gear with double pressure angles [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2006, 28(12): 1167-1173.

(编辑 葛赵青)