

二维模拟场计算机建模与应用

隆 婷, 潘 峰, 张 锐, 任婷婷

(北京理工大学 自动化学院, 北京 100081)

摘要: 扩展模拟计算机(uEAC)是一个新兴的非传统计算技术的研究内容, 它由模拟电场和多值逻辑组成, 两者共同构成计算单元, 进行数据计算和信息处理. 本文分析了二维uEAC系统结构, 对其电场的有限元数学模型进行了推导. 在此基础上, 开发了基于ANSYS的uEAC仿真器, 进一步结合粒子群优化方法来进行其应用优化设计. 通过对经典二值异或和三值异或问题的求解, 验证了uEAC在解决线性不可分的模式分类问题上的有效性, 为uEAC更多的应用提供了开发工具和试验依据.

关键词: 扩展模拟计算机; 模拟场计算; 粒子群优化方法; 三值异或
中图分类号: TP38 **文献标识码:** A

Models and applications of 2-dimensional analog field computer

LONG Ting, PAN Feng, ZHANG Rui, REN Ting-ting

(School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The micro extended analog computer(uEAC) is a newly emergent unconventional computing facility under research and development. It consists of an analog electric field and a multi-value logic, constituting a computing unit for data computation and information processing. We analyze the structure of the 2-dimensional uEAC system, and derive the finite-element mathematical model for the electric field. On this basis, we develop a uEAC simulator with the ANSYS. This simulator is combined with the particle swarm optimization, which is applied to practical optimizing design. By solving the classical XOR and tri-XOR problems, the uEAC demonstrates its capability in solving the linear inseparable problems. This provides a basis for the further application of uEAC to practical problems.

Key words: micro extended analog computer; analog field computation; particle swarm optimization; tri-XOR

1 引言(Introduction)

相对于蓬勃发展的数字计算机技术, 模拟计算机的发展处于边缘化和非传统化的状态. 但这并不代表着对模拟计算的探索和研究的消失. 随着当今科学技术的发展, 模拟计算机不再仅仅局限于传统意义上的由运放、电容、电阻等组成, 尤其是非传统计算^[1]、场计算和计算科学等学科的发展, 已经把模拟计算机带入了一个全新的领域. 诸如MIT、哈佛机器人实验室、伊利诺伊大学、圣母大学、普渡大学、AD公司等都在从不同的角度进行模拟计算的研究, 麻省大学的Hava Siegelmann^[2]和Indiana University的Jonathan W. Mills^[3]也在进行模拟计算的研究, 并有了一些应用方面的成果.

Lee A. Rubel^[4,5]提出的模拟计算机(extended analog computer, EAC)原型, 其思想来源于Bush的差动分析器和Shannon的广义模拟计算机(general purpose analog computer, GPAC)^[6]. Rubel首次对EAC进行了描述, 他认为EAC比1941年Shannon GPAC有更

强的计算能力^[7]. Jonathan W. Mills^[3,8]基于该原型设计了二维的uEAC(micro extended analog computer, uEAC)如图1, 系统由3部分组成, 分别是模拟计算单元、数字接口电路和数字计算机辅助设计单元. 其核心是基于场计算原理和多值逻辑的模拟计算单元, 并结合计算智能的优化方法对模拟场进行优化设计. uEAC的原理有些类似场计算机^[9], 其场计算主要通过具有一定导电特性的导电介质(如: 导电纸、自来水、导电泡沫等)来实现^[10,11]. 二维uEAC的特点是无论在原型电路的物理实现上, 还是仿真器的模型设计上, 都将导电介质考虑为导电平面, 通过顶端的电流探针对导电介质注入/汲取电流, 从而形成不同电压分布的平面导电场. 多值逻辑单元由Lukasiewicz逻辑阵列^[12]来实现. 在问题求解过程中导电介质的场的优化设计由Russ Eberhart和Xiaohui HU通过粒子群优化方法(particle swarm optimization, PSO)来完成^[13,14]. Mills形象地将模拟计算与数字计算的关系比喻为“计算中的道”, 二者具有各自的特点, 共同发展, “阴阳”互补^[3].

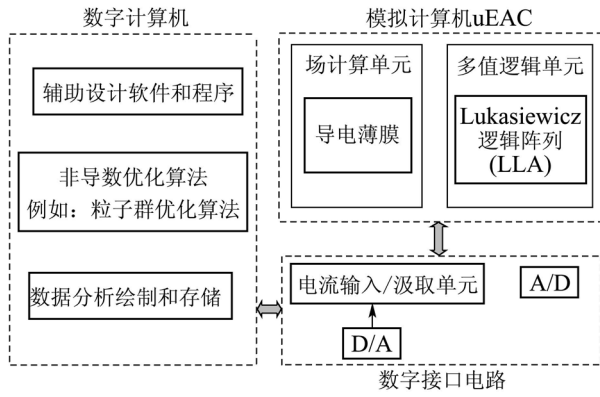


图1 uEAC系统逻辑结构图

Fig. 1 Logical structure of uEAC system

因此模拟计算作为一个新兴的非传统计算研究领域^[13], 其研究的目的并不是要取代数字计算机, 而是通过对模拟计算机的研究, 与数字计算机互为补充, 发挥各自的长处. 同时, 模拟场计算和uEAC正处于发展的初期, 其研究工作也在摸索中前进.

2 uEAC系统结构(uEAC system structure)

模拟计算机uEAC通过并行计算, 使信号在电路中传输来完成计算. 与数字计算机将自然现象的过程转换为二进制数和算法所不同, 模拟计算机的原理是基于不同物理量变化规律在数学描述上的相似性. uEAC的机器变量是连续变化的电压变量, 对于变量的运算是基于电路中电压、电流元件等电特性的相似运算关系.

目前二维场平面结构的uEAC系统典型设计逻辑结构如图1所示. 系统分别包括导电介质、Lukasiewicz逻辑阵列(LLA)、电流输入/汲取单元和数字接口单元. uEAC的应用设计, 目前还无法脱离数字计算机来独立完成, 因此需要通过数字计算机侧的数据交换和处理来完成数据的读取和显示.

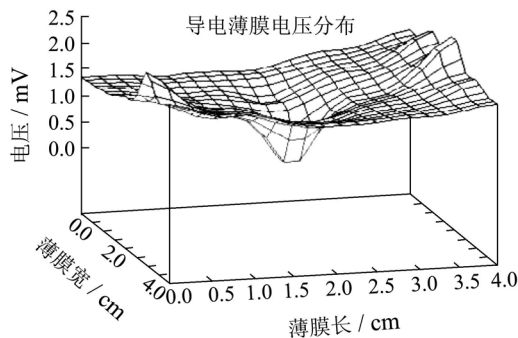


图2 场计算模型结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of field computation model

uEAC基于连续变化的电压或电流等机器变量构建模拟场, 从而进行特定功能的运算. 模拟场计算模型的构建是把具有若干固定节点的电流源或汲取电流作为输入, 加到导电介质上, 在图1所示的导电薄

膜内部产生一个电场(如图2), 以反映各点性质, 场的输出经过Lukasiewicz逻辑阵列单元, 以提高uEAC的灵活性.

3 uEAC电场有限元模型(uEAC finite element model of electric field)

uEAC模拟场的设计可以通过多种形式来实现, 可以通过在导电薄膜(如图1)、导电溶胶等材质上加载电流输入/汲取单元来构建; 也可以通过建立导电介质的数学模型, 通过数字计算设计仿真器来对其性质和应用进行研究. 本文即采用建立uEAC的电场的微元模型, 来设计其仿真器, 从而提供一个简单直观的研究平台, 以对uEAC的性质和应用进行研究, 为今后构建实物研究平台提供基础.

首先建立二维恒定电场的Laplace方程和Poisson方程. 假设导电薄膜的电阻率为 ρ , 导电介质均匀, 线性且各向同性. 在导电薄膜的固定节点上通入电流 i 以后(各点电流可以相同, 也可以不同), 在导电薄膜上产生电压梯度. 取电场的微元场域为规则的矩形, 电场的微元场域如图3, 表示在该微元场域上有微分电流源的情况.

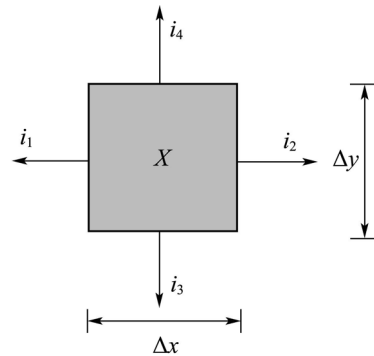


图3 二维电场微分单元(加载电流)

Fig. 3 Differential element of 2-D electrical field (load current source)

设加载在该微元场域上的微分电流源为 Δi , 恒定电场的电位函数 φ , 则在4条边上的电压梯度可表示为^[15]

$$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)_1 = \frac{i_1 \rho}{\Delta y}, \quad (1a)$$

$$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)_2 = -\frac{i_2 \rho}{\Delta y}, \quad (1b)$$

$$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial y}\right)_3 = \frac{i_3 \rho}{\Delta x}, \quad (1c)$$

$$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial y}\right)_4 = -\frac{i_4 \rho}{\Delta x}, \quad (1d)$$

其中脚标1, 2, 3, 4分别代表微元的左、右、下、上. 当相对边之间的距离 $\Delta x, \Delta y \rightarrow 0$ 时, 电压梯度的变化率为

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = \frac{(\frac{\partial \varphi}{\partial x})_2 - (\frac{\partial \varphi}{\partial x})_1}{\Delta x}, \Delta x \rightarrow 0, \quad (2a)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = \frac{(\frac{\partial \varphi}{\partial y})_4 - (\frac{\partial \varphi}{\partial y})_3}{\Delta y}, \Delta y \rightarrow 0. \quad (2b)$$

将式(1a)(1b)(1c)(1d)代入式(2a)(2b)中, 并将式(2a)(2b)相加, 即可得

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = \frac{-\rho}{\Delta x \Delta y} (i_1 + i_2 + i_3 + i_4), \Delta x \rightarrow 0, \Delta y \rightarrow 0, \quad (3)$$

根据电荷守恒定律, 在这个微元中没有电荷产生, 也没有电荷消失, 因而

$$i_1 + i_2 + i_3 + i_4 = \Delta i. \quad (4)$$

令 $\frac{1}{\rho} = \varepsilon$, $\frac{\Delta i}{\Delta x \Delta y} = \mu$, 且 $\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = \nabla^2 \varphi$. 由方程式(3)即可得到

$$\nabla^2 \varphi = -\frac{\mu}{\varepsilon}, \quad (5)$$

其中: ε 在均匀介质区域中是一常数, μ 是电流密度, 即外施激励源. 式(5)即为非齐次的 Laplace 方程, 也称之为 Poisson 方程. 当微元场域中有微分电流源时, μ 不等于零; 当微元场域中没有微分电流源时, μ 等于零. 对于电场的定解问题, 需加上边界条件

$$\varphi = \varphi_0(x, y), \forall \varphi \in l, \quad (6)$$

其中 l 为二维场域的周界线. 可以证明^[16], 上述定解问题和下列变分问题等价:

$$F(\varphi) = \frac{1}{2} \int_s \{ \varepsilon [(\frac{\partial \varphi}{\partial x})^2 + (\frac{\partial \varphi}{\partial y})^2] - 2\mu\varphi \} dx dy = \min, \quad (7)$$

其中: s 为二维场域, $\varphi|_l = \varphi_0(x, y)$. 这也就是泛函极值问题. 有限元法是以变分原理为基础的一种数值分析方法, 利用有限元法对变分问题进行求解. 将电场离散成 m 个四边形单元, 泛函的面积分用单元面积分的总和来表示, 即有

$$F(\varphi) = \frac{1}{2} \sum_{e=1}^m \int_{s_e} \{ \varepsilon [(\frac{\partial \varphi}{\partial x})^2 + (\frac{\partial \varphi}{\partial y})^2] - 2\mu\varphi \} dx dy = \min, \quad (8)$$

其中: $F_{e(1)}(\varphi)$ 表示储存在单元中的场能, $F_{e(2)}(\varphi)$ 表示由单元激励产生的位能, s_e 表示剖分单元的面积. 通过对 $F(\varphi)$ 求极值, 即令它对单元每个节点的一阶偏导数为零, 就可得到每个单元各节点的电位值. uEAC 仿真器就是在这个有限元模型的基础上, 通过在 MATLAB 中构建主体环境, 运用美国 ANSYS 公司研制的大型通用有限元分析 (FEA) 软件, 对电场进行

分析计算, 得到电场中各点的输出, 再经 Lukasiewicz 逻辑阵列, 得到仿真器的输出.

4 基于 PSO 的 uEAC 应用优化设计 (Application of PSO-based optimal design of uEAC)

4.1 “uEAC+PSO” 的优化设计系统结构 (“uEAC+PSO” optimal design of system structure)

同数字计算机指令集的形式完全不同的是, 模拟计算的程序设计和应用设计, 需要综合其他的优化方法进行辅助设计, 尤其是针对不同的问题进行求解, 设计的过程和结果也不一样. 这就对优化方法的适用性、灵活性、寻优能力等各方面都提出了较高的要求.

uEAC 对问题进行求解, 是通过选取若干个加载电流, 构建电场. 为建立一个能对特定问题进行求解的电场, 寻优目标就是寻找若干个建立电场电流值, 一旦这几个电流值被确定, 电场模型即被确定, 从而输入输出关系可以实现特定的功能. 通过对输入样本进行训练, 利用群智能优化方法对构建的电场进行优化, 寻找一组较优的电场输入电流值来实现对问题的求解.

群智能计算技术粒子群优化算法寻优能力强、收敛性好, 且计算复杂度低^[14,17], 既适合科学研究, 又特别适合工程应用. 与进化算法类似, 粒子群优化算法存储了一个问题的可能的解. 通过随机初始化粒子, 在每一次迭代中, 粒子根据自身的经验和其他粒子的最好位置来更新自己的位置^[18]. 基于 PSO 的 uEAC 应用设计系统结构如图 4 所示.

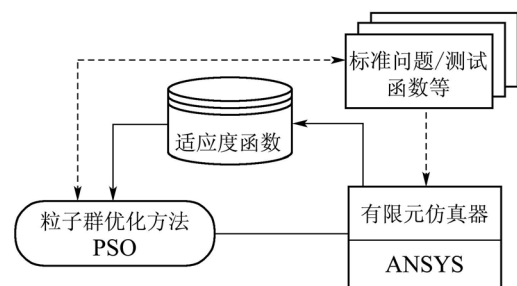


图 4 “uEAC+PSO” 优化设计

Fig. 4 “uEAC+PSO” optimal design

4.2 实验设计 (Experimental design)

4.2.1 XOR 问题描述及电场模型构建 (XOR problem formulation and electric field model construction)

异或问题 XOR 是典型的线性不可分问题, 也是模式识别和人工智能领域的典型问题. 正是 Minsky 对感知器在 XOR 问题求解的质疑, 对神经网络的研究和发展带来了深刻的影响. 因此, 对 uEAC 在模式

分类问题的研究中,首先对其在经典XOR问题进行研究;进而对具有更加复杂分类曲面的三值异或问题进行求解.

三值逻辑与经典的二值逻辑不同,它除了真、假之外,还有一个不确定的值,其真值表定义如图5所示.图5中:0代表“假”,1代表“不确定”,2代表“真”.三值异或是比经典二值异或分类问题更复杂的线性不可分问题.

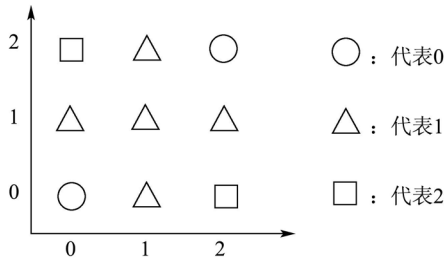


图5 三值XOR异或功能图

Fig. 5 Tri-XOR function chart

在导电薄膜上任取4个点来构建电场,再选取2个输入点,1个输出点,输入量和输出量均为电流,构建的电场模型如图6所示.通过优化算法对构建的电场进行优化,得到一组较优的构建电场的电流值 $I_{\omega 1}$, $I_{\omega 2}$, $I_{\omega 3}$, $I_{\omega 4}$ 来实现异或关系.

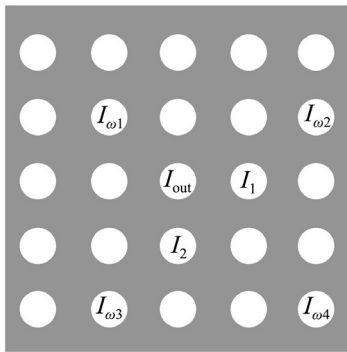


图6 电场模型

Fig. 6 Electric field model

4.2.2 PSO 算法应用设计(PSO application design)

构建电场的电流值作为PSO算法中的粒子值,也就是粒子的位置.优化变量的维数对应着构建电场的输入值的个数.这里需要优化的参数有4个,即4个构建电场的电流值,因此算法中粒子的维数为4.

二值XOR问题中 A , B 分别代表4组样本值输入,其中40和120分别代表逻辑0和逻辑1;而第一列是理想输出值,设输出电流小于或等于80时,代表逻辑0,大于或等于120时,代表逻辑1.

样本输入如表1所示.

表1 二值XOR输入样本
Table 1 Input samples of XOR

二值XOR	A/ mA	B/ mA
80	40	40
120	40	120
120	120	40
80	120	120

三值XOR问题中 A , B 分别代表9组样本值输入,其中20, 100和160分别代表逻辑0, 逻辑1和逻辑2;第一列是理想输出值,设输出电流小于或等于50时,代表逻辑0;大于或等于160时,代表逻辑2;在50和160之间时,代表逻辑1.输入样本如表2所示.

表2 三值XOR样本输入
Table 2 Input samples of tri-XOR

三值XOR	A/ mA	B/ mA
50	20	20
100	100	20
160	160	20
100	100	100
100	20	100
100	160	100
160	20	160
100	100	160
50	160	160

采用PSO作为问题求解和电场构建的优化工具.采用系统的实际输出与表1和表2中期望输出的误差平方和作为适应度函数.算法参数选择如表3所示.

表3 PSO算法参数选择
Table 3 Parameters selection of PSO

参数	设置
拓扑结构	环形
编码	实数
粒子数量	15
搜索空间	[-200, 200]
惯性参数 ω	0.79
加速度因子 c_1, c_2	2.05

5 实验结果及数据分析(Experimental results and data analysis)

5.1 二值XOR问题实验结果及数据分析(Experimental results and data analysis of XOR problem)

经过PSO优化后,系统的输入输出结果如表4所示.二值异或问题的构建的电场分布如图7所示.对除样本外的其他电流分布组合进行测试,以验证系统的泛化能力,结果如图8所示.

表 4 二值XOR问题的uEAC分类器输出结果
Table 4 Classification results of XOR with uEAC

	输入样本/mA	输入逻辑	输出电压/mV	LLA输出电流/mA	输出逻辑
1	(40, 40)	(0, 0)	125.2	25.0441	0
2	(40, 120)	(0, 1)	931.27	186.2535	1
3	(120, 40)	(1, 0)	931.189	186.2379	1
4	(120, 120)	(1, 1)	1737.236	52.5528	0

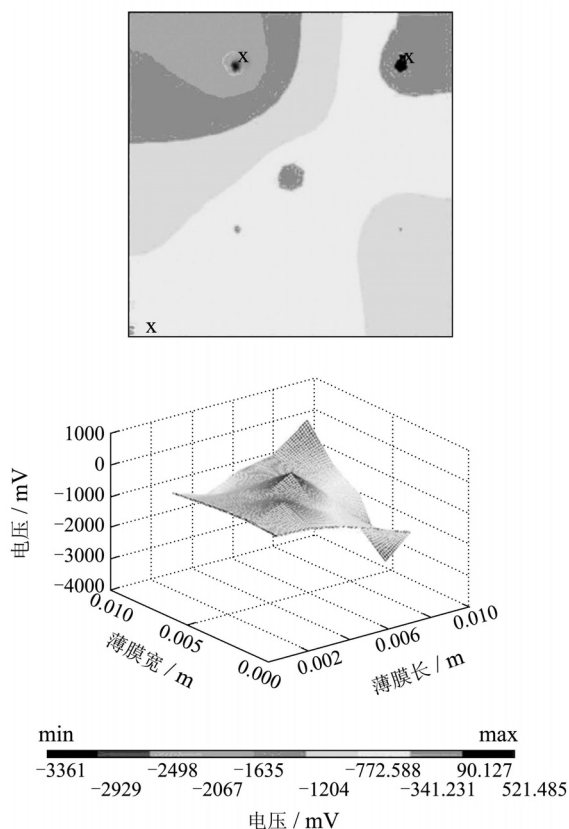


图 7 uEAC实现二值XOR的电场电压分布图
Fig. 7 Electric field voltage distribution of XOR with uEAC

从测试数据来看, (20, 50)代表0, (120, 150)代表1, 对应的输出(0, 80)代表0, (120, 200)代表1时, 能准确的实现异或功能. 图8也说明了uEAC作为

分类器具有一定的泛化能力, 而在远离样本值的地方, 结果可能会出现错误.

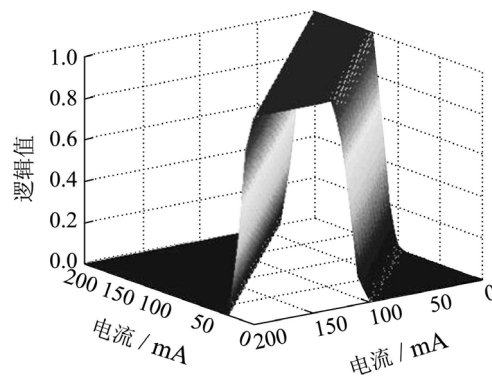


图 8 二值XOR的uEAC分类曲面测试结果
Fig. 8 Test results of classification of surface of XOR

5.2 三值XOR问题实验结果及数据分析(Experimental results and analysis of tri-XOR problem)

电场模型的构建和实验过程与解决二值逻辑时相同. 通过对样本值进行训练, 采用粒子群算法优化电场, 最终经过几次迭代得到一组电场值, 由它构建的电场能准确的实现三值异或功能. 系统的输入输出结果如表5, 对应的电场分布如图9, 对除样本外的其他电流分布组合进行测试, 以验证系统的泛化能力, 结果如图10所示.

表 5 三值XOR问题的uEAC分类器输出结果
Table 5 Classification results of tri-XOR with uEAC

	输入样本/mA	输入逻辑	输出电压/mV	LLA输出电流/mA	输出逻辑
1	(20, 20)	(0, 0)	177.64	35.527	0
2	(20, 100)	(0, 1)	715	143	1
3	(20, 160)	(0, 2)	1118	176.39	2
4	(100, 100)	(1, 1)	1252.3	149.54	1
5	(100, 20)	(1, 0)	714.95	142.99	1
6	(100, 160)	(1, 2)	1655.3	68.933	1
7	(160, 20)	(2, 0)	1117.9	176.41	2
8	(160, 100)	(2, 1)	1655.3	68.94	1
9	(160, 160)	(2, 2)	2058.3	0	0

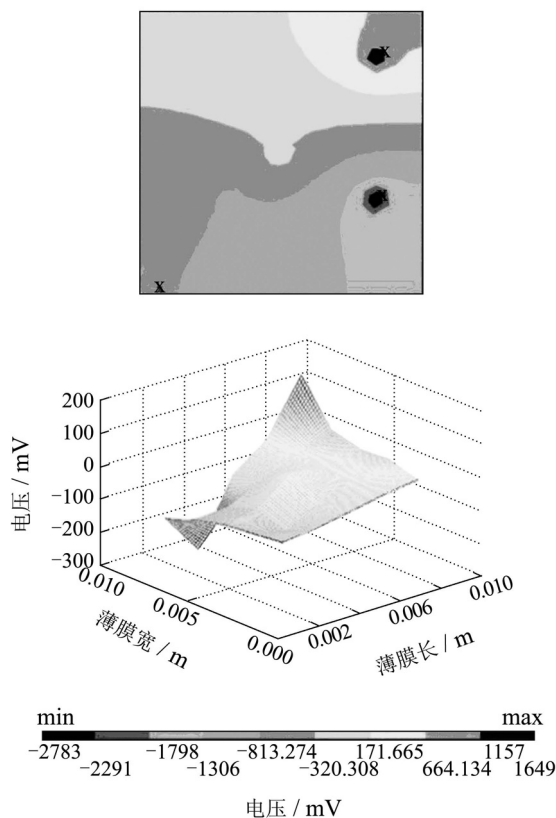


图9 uEAC实现三值XOR的电场电压分布图
Fig. 9 Electric field voltage distribution of tri-XOR with uEAC

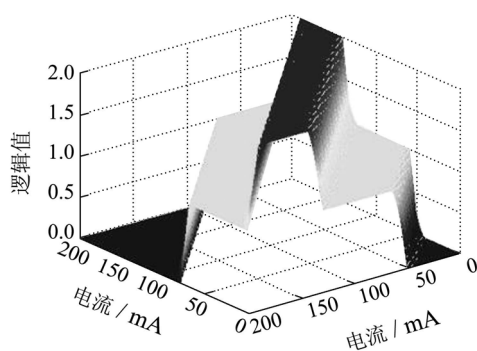


图10 三值XOR的uEAC分类曲面测试结果
Fig. 10 Test results of classification of surface of tri-XOR

实验结果验证了uEAC能准确实现三值逻辑异或功能. 并且通过在(0, 200)范围内任取两个数作为异或的输入, 对uEAC在样本值之外的数据进行测试, 进一步验证了其具有一定的泛化能力. 但模拟计算的精确度不如数字计算, 所以模拟计算适合于精确度要求不高, 但需快速处理大量信息, 识别实时数据, 产生大量计算模型等具有容错性的场合.

5.3 uEAC与遗传算法结合(uEAC and genetic algorithm)

从理论上而言, 基本所有的群智能方法、进化

算法都可以用来对构建的电场进行优化. 遗传算法(genetic algorithm, GA)是一种进化算法, 它从一组随机产生的初始解, 称为群体, 开始搜索过程. 群体中的每个个体是问题的一个解, 称为染色体. 这些染色体在后续迭代中不断进化, 称为遗传. 遗传算法主要通过选择、交叉、变异运算实现^[19], 使问题不断地接近最优解. 实验设计中, 遗传算法的参数选择: 种群大小为60; 每个个体含4个基因, 每个基因代表了一个构建电场的电流值; 交叉概率为0.9, 变异概率为0.1. uEAC与遗传算法结合实现二值异或、三值异或的测试结果分别如图11所示.

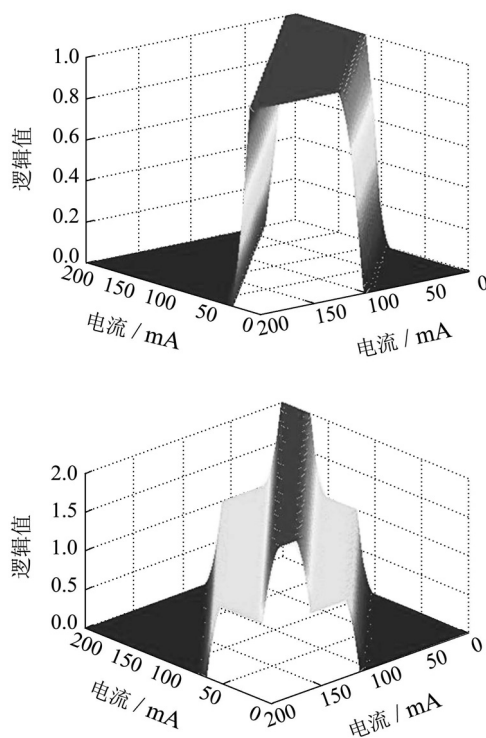


图11 “uEAC+GA”二值XOR和三值XOR的测试结果
Fig. 11 Test results of XOR and tri-XOR with “uEAC+GA”

从上面的测试结果来看, 用遗传算法与uEAC结合, 对构建的电场进行优化, 也能正确的实现二值异或和三值异或, 效果跟粒子群优化算法相近. 但是遗传算法在进行优化时, 只有在种群的规模较大(大约60)的情况下才能取得较好的优化效果; 而粒子群优化算法中粒子的个数大约为15就能满足要求. 在优化过程中, 种群规模越大, 消耗计算时间和计算资源将会更多.

6 结论(Conclusion)

本文通过对uEAC有限元数学模型的建立, 设计了基于ANSYS的uEAC仿真器. 在此基础上, 采用粒子群优化方法对uEAC电场进行优化设计. 具

有线性不可分特性的异或问题是模式分类研究中的经典问题, uEAC求解二值异或和三值异或分类问题的实验结果表明, uEAC可以设计成非线性分类器。目前对uEAC的应用研究还处于起步阶段, 仿真试验只从一个角度反映了uEAC对简单的非线性问题的求解能力, 因此, 在下一步的研究工作中将通过对电场模型的修正来解决更为复杂的问题, 例如可以考虑对Lukasiewicz逻辑各单元进行组合, 来逼近任意代数微分方程; 将多层导电薄膜进行级联, 以解决更为复杂的非线性分类问题等。

参考文献(References):

- [1] 李国杰. 非传统的高性能计算技术[R]. 北京: 香山科学讨论会, 1998.
- [2] SIEGELMANN H T. Neural and super-turing computing[J]. *Minds and Machines*, 2003, 13(1): 103 – 114.
- [3] JONATHAN W M. The nature of the extended analog computer[J]. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 2008, 237(9): 1235 – 1256.
- [4] RUBEL L A. The brain as an analog computer[J]. *Journal of Theoretical Neurobiology*, 1985, 4(2): 73 – 81.
- [5] RUBEL L A. The extended analog computer[J]. *Advances in Applied Mathematics*, 1993, 14(1): 39 – 50.
- [6] GRACA D. Some recent developments on Shannon's general purpose analog computer[J]. *Mathematical Logic Quarterly*, 2004, 50(4/5): 473 – 485.
- [7] ROINESTAD H, VIECCO C H, BOBBITT I, et al. *Study of a model of an extended analog computer*[R]. Indiana University: Computer Science Department, 2003.
- [8] JONATHAN W M. *Extended analog grid supercomputer*[R]. Ischia: ACM Computing Frontiers, 2006.
- [9] MACLENNAN B. *Field computation: a theoretical framework for massively parallel analog computation*[R]. Knoxville: Department of Computer Science, 1990.
- [10] FEYNMAN R. *The Character of Physical Law*[M]. Cambridge: MIT Press, 1967.
- [11] HARDING S, MILLER J, REITMAN E. Evolution in materio: exploiting the physics of materials for computation[J]. *International Journal of Unconventional Computing*, 2008, 4(2): 155 – 194.
- [12] JONATHAN W M, GORDON M B, CHARLES A D. Lukasiewicz logic arrays[C] // *Proceedings of the 20th International Symposium on Multiple-valued Logic*. Los Alamitos, California: IEEE, 1990: 4 – 10.
- [13] JONATHAN W M, MATT P, BRYCE H, et al. "Empty space" computes: the evolution of an unconventional supercomputer[C] // *Proceedings of the 3rd Conference on Computing Frontiers*. Ischia, Italy: ACM, 2006: 115 – 126.
- [14] HU X H, EBERHART R C, et al. Engineering optimization with particle swarm[C] // *Proceedings of the 2003 IEEE Swarm Intelligence Symposium*. Piscataway, NJ: IEEE, 2003, 4: 53 – 57.
- [15] KARPLUS W. *Analog Simulation-Solution of Field Problems*[M]. New York: McGraw-HILL Book Company Inc, 1958.
- [16] 盛剑霓. 工程电磁场数值分析[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1991.
(SHENG Jianni. *Numerical Analysis of Electromagnetic Field*[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1991.)
- [17] 潘峰, 陈杰, 辛斌, 等. 粒子群优化方法若干特性分析. 自动化学报[J], 2009, 35(7): 1010 – 1016.
(PAN Feng, CHEN Jie, XIN Bin, et al. Several characteristics analysis of particle swarm optimizer[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2009, 35(7): 1010 – 1016.)
- [18] NOROUZZADEH M S, AHMADZADEH M R, PALHANG M. Plowing PSO: a novel approach to effectively initializing particle swarm optimization[C] // *Proceedings of the 3rd IEEE International Conference On Computer Science and Information Technology*. Piscataway, NJ: IEEE, 2010, 7: 705 – 709.
- [19] 吉根林. 遗传算法综述[J]. 计算机应用与软件, 2004, 21(2): 69 – 73.
(JI Genlin. Survey on genetic algorithm[J]. *Computer Applications and Software*, 2004, 21(2): 69 – 73.)

作者简介:

隆 婷 (1987—), 女, 主要研究方向为非传统模拟场计算, E-mail: longting_6@163.com;

潘 峰 (1978—), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为智能优化计算与非传统计算、高精伺服控制与目标识别跟踪、复杂动态系统建模与优化设计, E-mail: panfeng@bit.edu.cn;

张 锐 (1986—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为模拟计算, E-mail: jsczr@163.com;

任婷婷 (1989—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为模拟计算, E-mail: rent.t@126.com.