

## 基于遗传算法的三维电场传感器解耦标定方法研究

李冰<sup>①②</sup> 彭春荣<sup>①</sup> 凌必赞<sup>①②</sup> 郑凤杰<sup>①</sup> 陈博<sup>①</sup> 夏善红\*<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

<sup>②</sup>(中国科学院大学 北京 100049)

**摘要:** 3 维电场分量对传感器输出信号的耦合干扰是影响 3 维电场探测准确性的关键问题。为了减小耦合干扰,实现 3 维电场的准确测量,该文提出一种基于遗传算法的 3 维电场传感器解耦标定方法。区别于求逆矩阵运算的传统标定方法,该方法利用遗传算法并行全局搜索的特点,通过设置适应度函数和遗传算子获得最优化解耦标定矩阵,避免了复杂的矩阵求逆计算,减小了计算误差。该文设计了一种可实现传感器与电场矢量成任意夹角的测试标定装置,建立了电场理论值计算模型。对基于矩阵求逆计算和基于遗传算法的两种解耦标定方法进行了对比实验,实验结果表明,基于遗传算法的 3 维电场传感器解耦标定方法与传统标定方法相比,有效地消除了电场分量对传感器的耦合干扰,提高了标定精度,实现了 3 维电场的准确测量。

**关键词:** 3 维电场传感器; 3 维标定; 耦合干扰; 遗传算法

**中图分类号:** TP212; TM937

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2017)09-2252-07

**DOI:** 10.11999/JEIT161277

## The Decoupling Calibration Method Based on Genetic Algorithm of Three Dimensional Electric Field Sensor

LI Bing<sup>①②</sup> PENG Chunrong<sup>①</sup> LING Biyun<sup>①②</sup> ZHENG Fengjie<sup>①</sup>  
CHEN Bo<sup>①</sup> XIA Shanhong<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

<sup>②</sup>(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The accuracy of three dimensional electric field measurement is greatly influenced by the coupling interference between components of Three Dimension (3D) electric field applied to the electric field sensor. In order to reduce the coupling interference and to realize accurate measurements, a decoupling calibration method based on Genetic Algorithm (GA) of 3D electric field sensor is proposed. Different from the traditional calibration method based on the matrix inversion technology, GA is utilized to obtain the optimal decoupling calibration matrix by setting the objective function and evolution operators, which avoids the calculation errors in the complex matrix inversion. A calibration apparatus, which can make an arbitrary angle between the sensor and the electric field, is designed, and a calculation model of theoretical electric field values is built. Experiments are conducted to verify the decoupling calibration methods based on the matrix inversion technology and GA. The experimental results show that the proposed method can effectively eliminate coupling interferences, improve the calibration precision and realize accurate measurements.

**Key words:** Three dimensional electric field sensor; Three dimension calibration; Coupling interference; Genetic Algorithm (GA)

### 1 引言

3 维电场探测技术在航空、航天、电网、气象、大气物理研究等领域具有重要的应用需求<sup>[1-3]</sup>。已

经报道的 3 维电场传感器主要有分布式机载场模型<sup>[4]</sup>、3 维场模型<sup>[5]</sup>、微机械系统(MEMS)共面组件型<sup>[6]</sup>、MEMS 单芯片型<sup>[7]</sup>等。然而在实际测量中,电场传感器的敏感单元受到电场 3 个分量耦合干扰作用,严重影响了 3 维电场测量的准确性。传感器的标定是实现传感器精确测量的前提,因此为了消除耦合干扰的影响,实现 3 维电场的准确测量,研究 3 维电场传感器的解耦标定方法具有重要意义。

基于求逆矩阵运算的标定方法是当前国内外常

收稿日期: 2016-11-24; 改回日期: 2017-02-26; 网络出版: 2017-05-02

\*通信作者: 夏善红 shxia@mail.ie.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61327810, 61302032), 国家 863 计划项目(2015AA042602)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61327810, 61302032), The National 863 Program of China (2015AA042602)

用的3维电场传感器解耦标定方法。Mach等人<sup>[8]</sup>针对分布式机载场模型3维电场测量方式，建立了传感器输出信号与实际电场分量的关系矩阵，并通过求该矩阵的逆矩阵或伪逆矩阵实现了3维电场传感器的解耦标定。但是此标定过程需要飞机在不同天气情况下进行翻滚、旋转和拉升等运动，导致整个标定过程操作复杂，成本很高。闻小龙等人<sup>[6]</sup>设计了共面解耦结构MEMS组件型3维电场传感器，并通过求逆矩阵运算的方法获得了传感器的耦合灵敏度矩阵完成了对该传感器的标定。但是该标定过程传感器标定位置特殊且测试数据较少，无法获得最优化灵敏度矩阵，导致标定误差较大。这种基于求逆矩阵运算的方法，当运算过程中矩阵奇异或接近奇异时，计算复杂耗时且存在计算误差。除此之外，受测试数据量和计算误差的限制该方法并不能得到最优化的解耦标定矩阵。

本文提出了一种基于遗传算法的3维电场传感器解耦标定方法。遗传算法是模拟自然选择和遗传进化的一种并行全局最优化搜索方法。该方法通过设置适应度函数和进化算子，直接在可行解空间中搜索最优解而不需要考虑问题的内在关系，避免了复杂运算<sup>[9]</sup>。遗传算法因其简单、实用、高效和鲁棒性强的特点在机器学习和最优化问题中具有广泛的应用。3维电场传感器的解耦标定是一种多目标最优化问题，采用遗传算法可以避免复杂的矩阵求逆运算并获取全局最优化解耦标定矩阵，从而有效提升3维电场传感器的标定精度，实现3维电场的准确测量。

## 2 3维电场传感器解耦标定原理

电场以3维矢量形式存在，在任意笛卡尔坐标系下都能分解成3个互相垂直的电场分量。在进行3维电场测量时，电场传感器的输出反映了待测电场的场强值以及电场矢量与传感器的相对位置关系，即待测电场在以传感器为参考的局部坐标系(LCS)下的信息。3维电场传感器的任意一个敏感单元的输出信号同时受到待测电场在LCS下的3个分量的作用，其关系可以表示为

$$V_i - V_{i0} = k_{ix} \mathbf{E}_x + k_{iy} \mathbf{E}_y + k_{iz} \mathbf{E}_z \quad (1)$$

其中， $V_{i0}$ 为敏感单元*i*在零电场时响应输出； $V_i$ 为敏感单元*i*的实时输出； $\mathbf{E}_x, \mathbf{E}_y, \mathbf{E}_z$ 为电场 $\mathbf{E}$ 在LCS下的3个正交分量且随着电场 $\mathbf{E}$ 与传感器相对位置的变化而改变； $k_{ix}, k_{iy}, k_{iz}$ 为该敏感单元相对于3个正交电场分量的灵敏度系数，与传感器形状和结构有关。具有多个敏感单元的3维电场传感器的输出信号与LCS下电场分量的关系为

$$\begin{bmatrix} V_1 - V_{10} \\ V_2 - V_{20} \\ \vdots \\ V_m - V_{m0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{1x} & k_{1y} & k_{1z} \\ k_{2x} & k_{2y} & k_{2z} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ k_{mx} & k_{my} & k_{mz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{E}_x \\ \mathbf{E}_y \\ \mathbf{E}_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中， $m$ 为敏感单元个数， $m = 2, 3, 4, \dots$ ； $\mathbf{K} =$

$$\begin{bmatrix} k_{1x} & k_{1y} & k_{1z} \\ k_{2x} & k_{2y} & k_{2z} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ k_{mx} & k_{my} & k_{mz} \end{bmatrix} \text{为灵敏度系数矩阵，能够唯一确定}$$

待测电场和传感器输出的关系。

在实际应用时，需要通过传感器的输出信号解调在LCS下的3个电场分量( $\mathbf{E}_x, \mathbf{E}_y, \mathbf{E}_z$ )，从而获得待测电场情况。由式(2)可得待测电场分量的解耦计算公式为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}_x \\ \mathbf{E}_y \\ \mathbf{E}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{x1} & c_{x2} & \cdots & c_{xm} \\ c_{y1} & c_{y2} & \cdots & c_{ym} \\ c_{z1} & c_{z2} & \cdots & c_{zm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 - V_{10} \\ V_2 - V_{20} \\ \vdots \\ V_m - V_{m0} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中， $\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_{x1} & c_{x2} & \cdots & c_{xm} \\ c_{y1} & c_{y2} & \cdots & c_{ym} \\ c_{z1} & c_{z2} & \cdots & c_{zm} \end{bmatrix}$ 为传感器的解耦标定

矩阵。只有得到精确的矩阵 $\mathbf{C}$ ，才能利用传感器的输出信号准确地解调出待测电场在LCS下的3个分量，从而消除耦合干扰，实现3维电场的准确测量。

因此3维电场传感器解耦标定的目的是基于已知电场和传感器输出求取最优化解耦标定矩阵 $\mathbf{C}$ 。

## 3 基于遗传算法的解耦标定方法

本文提出了一种基于遗传算法的3维电场传感器解耦标定方法。该方法通过对遗传算法进行配置，确定优化目标和进化方式，以适应3维电场传感器的解耦标定背景；在此基础上设计解耦标定方法步骤，实现最优化解耦标定矩阵 $\mathbf{C}$ 的求解。

### 3.1 遗传算法配置

**3.1.1 标定参数集** 由3维电场传感器解耦标定原理可以确定代入遗传算法的标定参数集为 $\{\mathbf{C}, \mathbf{V}, \mathbf{V}_0, \mathbf{E}_t\}$ 。其中 $\mathbf{C}$ 为解耦标定矩阵，是遗传算法的优化目标； $\mathbf{V}$ 为3维电场传感器各敏感单元的实时输出矩阵； $\mathbf{V}_0$ 为3维电场传感器各敏感单元的零点场输出矩阵； $\mathbf{E}_t$ 为与传感器输出矩阵 $\mathbf{V}$ 和 $\mathbf{V}_0$ 相对应的电场理论值矩阵。 $\mathbf{V}, \mathbf{V}_0, \mathbf{E}_t$ 为参与遗传算法运算的数据依据。

**3.1.2 编码方式** 编码将问题的解空间映射到遗传

算法的染色体空间。对于 3 维电场传感器测试标定问题, 遗传算法中的每一个染色体个体  $\mathbf{x}$  代表一个解耦标定矩阵  $\mathbf{C}$ 。3 维电场传感器的解耦标定需要优化矩阵  $\mathbf{C}$  中的  $3m$  个元素, 是一种多目标参数优化问题。本文选择浮点数编码的方式<sup>[10]</sup>, 即染色体个体  $\mathbf{x}$  中包含  $3m$  个基因且与矩阵  $\mathbf{C}$  中的  $3m$  个元素直接对应, 与二进制编码方式相比, 该编码方式具有不需译码、平均效率高等优点。

**3.1.3 适应度函数** 适应度函数用来评价个体对于问题的适应程度, 决定了算法的寻优方向。标定过程的目的是求解最优化解耦标定矩阵  $\mathbf{C}$ , 使由式(3)计算得到电场值  $\mathbf{E}_c$  与电场理论值  $\mathbf{E}_t$  之间的误差最小。基于最小二乘法原则设置的适应度函数为

$$f(\mathbf{X}) = \frac{1}{\|\mathbf{E}_c - \mathbf{E}_t\|^2} = \frac{1}{\|\mathbf{X}(\mathbf{V} - \mathbf{V}_0) - \mathbf{E}_t\|^2} \quad (4)$$

其中,  $\mathbf{X}$  为个体  $\mathbf{x}$  的矩阵形式, 与矩阵  $\mathbf{C}$  的关系为

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 & x_4 & \cdots & x_{3m-2} \\ x_2 & x_5 & \cdots & x_{3m-1} \\ x_3 & x_6 & \cdots & x_{3m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{x1} & c_{x2} & \cdots & c_{xm} \\ c_{y1} & c_{y2} & \cdots & c_{ym} \\ c_{z1} & c_{z2} & \cdots & c_{zm} \end{bmatrix} = \mathbf{C}。$$

函数值  $f$  表示适应度, 由式(4)可知,  $f$  越大, 表示个体  $\mathbf{x}$  越符合问题需求, 即由个体  $\mathbf{x}$  计算得到的电场值  $\mathbf{E}_c$  与电场理论值  $\mathbf{E}_t$  的残差平方和越小。因此目标函数设置为

$$J = \max f(\mathbf{X}) \quad (5)$$

因此该遗传算法的目的是寻找个体  $\mathbf{x}$  使适应度  $f$  达到最大。

**3.1.4 遗传算子** 遗传算法从随机产生的由多个个体组成的初始种群开始搜索过程, 依据种群中每个个体的适应度, 利用遗传算子对种群中的个体进行运算, 产生下一代更符合问题需求的种群, 实现了种群的优化。遗传算子是遗传算法实现种群进化的核心, 主要包括选择算子、交叉算子和变异算子 3 部分。

选择算子使得适应性强的个体得以保留, 提高了种群的平均适应度, 本文采用基于非线性归一化几何分布的排序函数和随机遍历抽样方法进行个体选择<sup>[11]</sup>; 交叉算子是遗传算法中最主要的遗传操作, 是产生新个体的主要方式, 决定了遗传算法的全局搜索能力<sup>[12]</sup>, 本文采用自适应交叉算子<sup>[13]</sup>; 变异算子是产生新个体的辅助方法, 决定了遗传算法的局部搜索能力, 本文采用非均匀性变异算子<sup>[14]</sup>。

**3.1.5 终止条件** 若当前进化代数  $g$  达到初始设置的最大进化代数  $G$ , 则运算终止。

## 3.2 标定步骤

3 维电场传感器解耦标定方法流程如图 1 所示, 具体算法步骤如下:

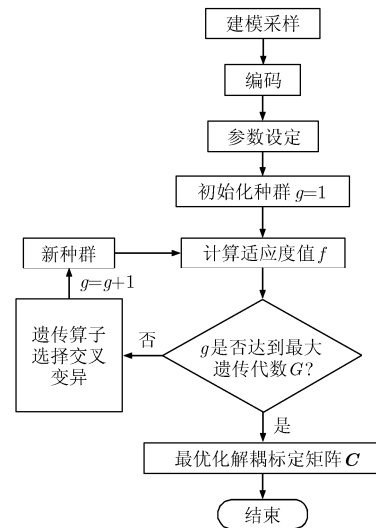


图 1 3 维电场传感器解耦标定方法流程图

**步骤 1** 建立电场理论值计算模型。记录传感器实时输出矩阵  $\mathbf{V}$ , 零电场输出矩阵  $\mathbf{V}_0$  和此时的电场理论值  $\mathbf{E}_t$ ;

**步骤 2** 确定编码方式和染色体基因个数。本文染色体个体为具有  $3m$  个基因的字符串, 表示为  $\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_{3m}\}$ ;

**步骤 3** 配置遗传算法相关参数, 包括目标函数  $J(\mathbf{X})$ , 适应度函数  $f(\mathbf{X})$ , 种群规模  $M$ , 最大遗传代数  $G$ , 选择概率  $p_s$ , 交叉概率  $p_c$ , 变异概率  $p_m$  等;

**步骤 4** 种群初始化, 随机产生  $M$  个个体组成初始种群, 当前代数  $g = 1$ ;

**步骤 5** 根据式(4), 计算当代种群中每个个体的适应度值  $f$ , 并将适应度由大到小进行排序;

**步骤 6** 终止条件判断: 若  $g \geq G$ , 运算终止, 当前种群中适应度最大的个体为最优解; 若  $g < G$ , 运算继续, 进行步骤 7;

**步骤 7** 遗传进化操作, 利用上文中配置的选择算子、交叉算子和变异算子对当代种群中个体进行操作, 产生新一代种群, 此时  $g = g + 1$ , 转向步骤 5。

## 4 标定装置研制及建模

为了保证应用于解耦标定算法的数据的充分性和准确性, 本文设计了一种能实现传感器与电场矢量成任意夹角的测试标定装置, 并建立了电场理论值计算模型。如图 2 所示, 该测试标定装置由平行

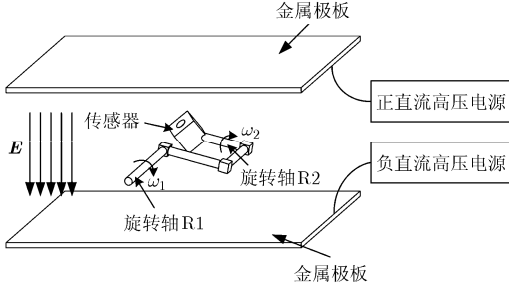


图2 测试标定装置示意图

金属极板、运动支架和直流高压电源组成。通过在两块相互平行的金属极板上加载不同直流电压，在极板之间形成静电场环境。位于两极板中间位置的运动支架由两个相互垂直的绝缘旋转轴R1和R2构成。将待标定传感器固定在R2末端，通过旋转R1和R2实现传感器在静电场中的运动。以测试标定装置为参考建立全局坐标系GCS，其中坐标轴YG与平行极板垂直，坐标轴XG、ZG与金属极板平行且处于两平行极板中间位置。施加电场方向平行于坐标轴YG，运动支架的旋转轴R1与坐标轴ZG重合。标定过程中，施加电场方向不变，通过运动支架旋转传感器实现传感器与电场矢量的任意夹角变化。

建立3维电场理论值计算模型，传感器的任一敏感单元所感应到的电场理论值计算方式为

$$\mathbf{E}_i = -\mathbf{E} \cos \theta_i \quad (6)$$

其中， $\mathbf{E}_i$ 为传感器的敏感单元*i*感应到的电场； $\mathbf{E}$ 为待测3维电场矢量； $\theta_i$ 为 $\mathbf{E}$ 与敏感单元*i*的朝向的夹角，随着 $\mathbf{E}$ 与传感器相对位置变化而改变，且 $\theta_i \in [0, \pi]$ 。

以传感器为参考建立局部坐标系LCS。传感器结构和敏感单元位置固定所以传感器上的所有敏感单元朝向与LCS3个坐标轴夹角关系确定。由式(6)可得到3维电场 $\mathbf{E}$ 在LCS下的3个电场理论值分量 $\mathbf{E}_x, \mathbf{E}_y, \mathbf{E}_z$ 计算方式为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}_x \\ \mathbf{E}_y \\ \mathbf{E}_z \end{bmatrix} = -\mathbf{E}_i \begin{bmatrix} \cos \theta_{ix} \\ \cos \theta_{iy} \\ \cos \theta_{iz} \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中， $\theta_{ix}, \theta_{iy}, \theta_{iz}$ 为敏感单元*i*的朝向分别与X轴、Y轴和Z轴正方向的夹角，与传感器结构和LCS建立方式有关。需要注意的是，在应用式(7)时，敏感单元*i*的朝向不能与LCS中坐标轴重合。如果重合，则需再补充其他的敏感单元所测电场信息才能确定出LCS下的电场分量理论值。例如当敏感单元*i*朝向与X轴重合时， $\mathbf{E}_i$ 只能代表该X轴上的电场分

量 $\mathbf{E}_x$ 。

由式(6)和式(7)，整理可得电场分量理论计算公式，以 $\mathbf{E}_x$ 为例

$$\mathbf{E}_x = -\mathbf{E} \cos \theta_{ix} \cos \theta_i \quad (8)$$

其中，由于 $\theta_{ix}$ 和 $\mathbf{E}$ 为已知量，因此 $\mathbf{E}_x$ 只与 $\theta_i$ 有关。

在本文测试标定装置中 $\theta_i$ 与传感器在运动支架上的布置方式和运动支架旋转轴R1与R2的旋转角度有关。图3为 $\theta_i$ 变化示意图，经过运动支架旋转轴R1和R2的转动，旋转轴R2从位置A转到了位置A'，敏感单元*i*的朝向从 $O_i$ 变成了 $O'_i$ ，从而导致了敏感单元*i*的朝向与电场矢量的夹角从 $\theta_i$ 变化为 $\theta'_i$ 。设当旋转轴R2与XG轴重合且敏感单元*i*的朝向与XG轴和YG轴共面时为初始位置。则 $\theta_i$ 的计算方式为

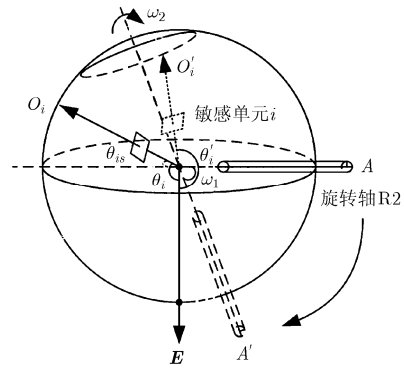


图3 敏感单元*i*的朝向与3维电场矢量夹角变化示意图(旋转轴R2从位置A变化到位置A'，敏感单元*i*朝向从 $O_i$ 变成了 $O'_i$ )

$$\theta_i = \frac{\pi}{2} + \arcsin(\sin \omega_1 |\cos \theta_{is}| + \cos \omega_1 \sin \theta_{is} \cos \omega_2) \quad (9)$$

其中， $\theta_{is}$ 为敏感单元*i*与旋转轴R2末端方向的夹角，由传感器的布置方式决定，且 $\theta_{is} \in [0, \pi]$ ； $\omega_1, \omega_2$ 分别为旋转轴R1和R2转动的角度，顺时针方向为正方向。

由式(7)、式(8)和式(9)可得电场分量理论计算公式，以 $\mathbf{E}_x$ 为例

$$\mathbf{E}_x = -\mathbf{E} \cos \theta_i \cos \theta_{ix} = -\mathbf{E} (\sin \omega_1 |\cos \theta_{is}| + \cos \omega_1 \sin \theta_{is} \cos \omega_2) \cos \theta_{ix} \quad (10)$$

其中， $\mathbf{E}$ 为测试标定装置施加的电场。根据式(10)可以计算在本文设计的测试标定装置中处于任意姿态的传感器的电场理论值。

## 5 实验验证

### 5.1 实验对象及建模

在本文设计的测试标定装置中利用MEMS组件式3维电场传感器分别对基于遗传算法解耦标定

方法和基于求逆矩阵运算的解耦标定方法进行实验验证。如图 4 所示, 本文选用的 MEMS 组件式 3 维电场传感器, 采用了 3 个 1 维 MEMS 电场敏感芯片<sup>[15,16]</sup>, 通过芯片的相互正交布置实现了 3 维电场的测量。基于该传感器建立了局部坐标系 LCS, 且 X 轴, Y 轴, Z 轴分别与敏感芯片 S1, S2, S3 的朝向重合。

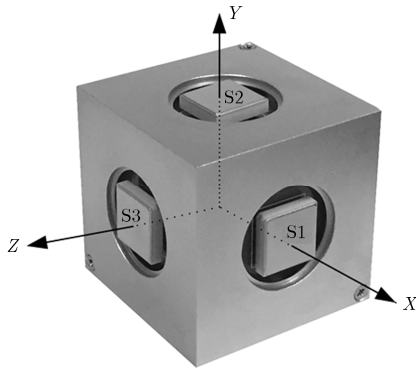


图 4 3 维电场传感器及局部坐标系 LCS

将传感器安装在测试标定装置中, 并保证传感器的体对角线与旋转轴 R2 重合, 则各敏感芯片朝向与旋转轴 R2 夹角均为  $0.3039\pi$ 。建立全局坐标系 GCS, 以敏感芯片 S1 的朝向与 XG 轴和 YG 轴共面时为初始位置, 由式(11)可得该传感器的电场理论值计算公式为

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} -\sqrt{3}E \\ 3 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \sqrt{2} \cos \omega_2 \cos \omega_1 + \sin \omega_1 \\ \sqrt{2} \cos \left( \omega_2 + \frac{2\pi}{3} \right) \cos \omega_1 + \sin \omega_1 \\ \sqrt{2} \cos \left( \omega_2 + \frac{4\pi}{3} \right) \cos \omega_1 + \sin \omega_1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

由于该传感器只有 3 个敏感单元, 因此其解耦标定矩阵  $C$  为  $3 \times 3$  的矩阵。在标定装置中分别施加沿 YG 轴负方向的电场, 其场强值为 0 kV/m, 10 kV/m, 15 kV/m, 20 kV/m, 25 kV/m。在每个的电场环境下, 控制旋转 R1 和 R2 进行运动, 其中  $\omega_1$  分别选取 0 和  $\pi/3$ ,  $\omega_2$  则以步长  $\pi/6$  从 0 变化到  $2\pi$ 。同时记录传感器的 3 路输出并计算对应姿态的电场理论值, 将这些数据分别应用与两种解耦标定算法中, 计算解耦标定矩阵  $C$ 。

## 5.2 实验结果

对于本文提出的基于遗传算法的解耦标定算法, 首先进行如表 1 所示的参数设置, 然后将采样得到的数据代入算法进行运算。

由该方法求解得到解耦标定矩阵  $C_{GA}$  为

表 1 遗传算法参数设置

| 参数  | 含义       | 设定值  |
|-----|----------|------|
| $n$ | 染色体中基因个数 | 9    |
| $M$ | 种群规模     | 1000 |
| $G$ | 最大遗传代数   | 2000 |

$$C_{GA} = \begin{bmatrix} 3.5355 & -0.1610 & 0.2400 \\ -0.1960 & 3.1800 & -0.3428 \\ -0.4003 & -0.0100 & 3.4000 \end{bmatrix} \quad (12)$$

由基于矩阵求逆运算获得的解耦标定矩阵  $C_{MI}$  为

$$C_{MI} = \begin{bmatrix} 3.6211 & -0.1585 & 0.2389 \\ -0.1885 & 3.1714 & -0.3506 \\ -0.4021 & -0.0007 & 3.2120 \end{bmatrix} \quad (13)$$

对两个解耦标定矩阵进行测量结果比较, 在测试标定装置中施加沿 YG 轴负方向, 场强值为 25 kV/m 的电场。控制传感器运动并记录输出数据, 其中运动参数设定为  $\omega_1$  选取  $\pi/6$ ,  $\omega_2$  以步长  $\pi/6$  从 0 变化至  $2\pi$ 。即在该电场环境下传感器进行 13 次测量, 分别利用两个解耦标定矩阵进行电场计算。电场分量计算值和理论值关系如图 5 所示, 其中图 5(a) 为由矩阵  $C_{GA}$  得到的电场分量计算值与理论值的关系, 图 5(b) 为由矩阵  $C_{MI}$  得到的电场分量计算值与理论值的关系。两个解耦标定矩阵得到的合成电场计算值和理论值的关系如图 6 所示。

由图 5 和图 6 可知, 两种解耦标定方法得到的电场计算值和理论值都具有非常好的一致性, 说明两种方法都能有效地消除耦合干扰。表 2 为两种解耦标定方法得到的电场计算值与理论值的相对误差关系。由表 2 可知, 由基于遗传算法的解耦标定方法获得的电场矢量计算值和理论值的最大相对误差和平均相对误差均小于基于求逆矩阵运算的解耦标定方法。采用基于遗传算法的解耦标定方法相比于基于求逆矩阵运算的方法将合成电场最大相对误差从 4.39% 减小到了 1.90%, 平均相对误差从 1.51% 减小到了 0.59%。实验表明基于遗传算法的 3 维电场传感器解耦标定方法能够有效消除电场分量的耦合干扰, 提高电场传感器的标定精度, 实现了 3 维电场的准确测量。

## 6 结论

电场分量对传感器输出信号的耦合干扰是影响 3 维电场准确测量的关键问题。传统的基于求逆矩阵运算的解耦标定方法虽然能够减小耦合干扰, 但

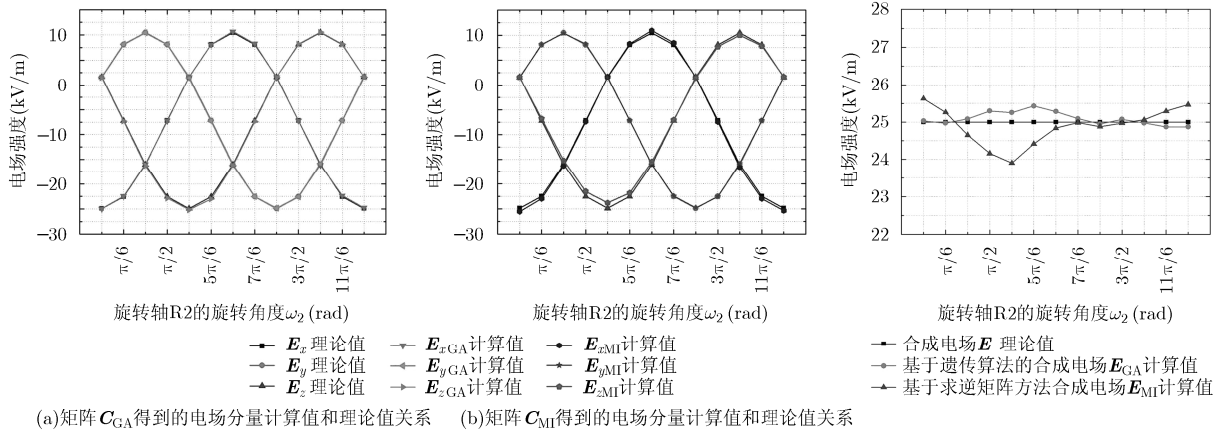


图 5 由两个解耦标定矩阵得到的电场分量计算值和理论值关系

图 6 两种方法得到的合成电场计算值和理论值的关系

表 2 两种解耦标定方法得到的电场计算值与理论值的相对误差(%)

| 电场(kV/m)   | 基于遗传算法的解耦标定方法 |        | 基于矩阵求逆运算的解耦标定方法 |        |
|------------|---------------|--------|-----------------|--------|
|            | 最大相对误差        | 平均相对误差 | 最大相对误差          | 平均相对误差 |
| 电场分量 $E_x$ | 3.21          | 0.92   | 4.38            | 2.90   |
| 电场分量 $E_y$ | 5.77          | 1.22   | 9.85            | 1.84   |
| 电场分量 $E_z$ | 8.00          | 1.77   | 10.46           | 4.41   |
| 合成场 $E$    | 1.90          | 0.59   | 4.39            | 1.51   |

是由于计算复杂，存在计算误差和易丢失最优解等缺点，导致测试标定结果误差较大，不能满足 3 维电场的准确测量需求。为了减小耦合干扰，实现 3 维电场准确测量，本文提出了基于遗传算法的 3 维电场传感器解耦标定方法。该方法直接在解空间进行并行全局的最优化搜索，避免了复杂的矩阵求逆运算，简化了计算过程，减小了计算误差，同时获得了全局最优解。本文对 3 维电场解耦标定原理进行了分析，确定求解最优化的标定矩阵  $C$ ；通过对遗传算法进行配置，设计了 3 维电场传感器解耦标定流程；搭建了能够实现传感器与电场矢量成任意夹角的测试标定装置并建立了电场理论值计算模型。对两种解耦标定方法进行对比实验。实验结果表明，相比于传统方法，基于遗传算法的解耦标定方法获得的电场分量计算值与理论值具有很好的一致性；合成电场的最大相对误差从 4.39%减小到了 1.90%，平均相对误差从 1.51%减小到了 0.59%；该方法有效地减小了电场分量对传感器的耦合干扰，提升了 3 维电场传感器的测试标定精度，实现了 3 维电场的准确测量。

参 考 文 献

[1] STOLZENBURG M and MARSHALL T C. Charge structure and dynamics in thunderstorms[J]. *Space Science Reviews*, 2008, 137(1): 355-372. doi: 10.1007/s11214-008-9338-z.

[2] LU Tiebing, FENG Han, ZHAO Zhibin, et al. Analysis of the electric field and ion current density under ultrahigh-voltage direct-current transmission lines based on finite element method[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2007, 43(4): 1221-1224. doi: 10.1109/TMAG.2006.890960.

[3] HARRIDON and GILES R. A balloon-carried electrometer for high-resolution atmospheric electric field measurements in clouds[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2001, 72(6): 2738-2741. doi: 10.1063/1.1369639.

[4] BATEMAN M G, STEWART M F, BLAKESLEE R J, et al. A low-noise, microprocessor-controlled, internally digitizing rotating-vane electric field mill for airborne platforms[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2007, 24(7): 1245-1255. doi: 10.1175/JTECH2039.1.

[5] 张星, 白强, 夏善红, 等. 小型三维电场传感器设计与测试[J]. *电子与信息学报*, 2007, 29(4): 1002-1004. doi: 10.3724/SP.J.1146.2005.01145.

ZHANG Xing, BAI Qiang, XIA Shanhong, et al. Design and measurement of a miniaturized three dimensional electric field sensor[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(4): 1002-1004. doi: 10.3724/SP.J.1146.2005.01145.

[6] 闻小龙, 彭春荣, 方东明, 等. 基于共面去耦结构的空 3 维电场测量方法[J]. *电子与信息学报*, 2014, 36(10): 2504-2508. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.01921.

WEN Xiaolong, PENG Chunrong, XIA Shanhong, et al. Measuring method of three dimensional atmospheric electric field based on coplanar decoupling structure[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(10): 2504-2508. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.01921.

[7] WANG Yu, FANG Dongming, FENG Ke, et al. A novel micro electric field sensor with X-Y dual axis sensitive

- differential structure[J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2015, 229: 1-7. doi: 10.1016/j.sna.2015.03.013.
- [8] MACH D M and KOSHAK W J. General matrix inversion technique for the calibration of electric field sensor arrays on aircraft platforms[J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2007, 24(9): 1576-1587. doi: 10.1175/JTECH2080.1.
- [9] WEISE T. Global optimization algorithm: Theory and application[J]. *Proceedings of the XII Global Optimization Workshop Mago*, 2009, 7445(2): 242-243. doi: 10.1137/1.9781611972672.
- [10] 崔明义. 特殊变换多小波构造的浮点数编码遗传算法[J]. *计算机工程与应用*, 2013, 49(15): 119-122.  
CUI Mingyi. Floating point representation genetic algorithm based on construction of multiwavelets in terms of novel transformation[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2013, 49(15): 119-122.
- [11] JOINES J A and HOUCK C R. On the use of non-stationary penalty functions to solve nonlinear constrained optimization problems with GA's[C]. *Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation, IEEE World Congress on Computational Intelligence, Washington, 1994*, 2: 579-584. doi: 10.1109/ICEC.1994.349995.
- [12] 熊邦书, 黄武涛, 李新民. 基于改进遗传算法的摄像机标定参数优化方法[J]. *光电技术应用*, 2016, 37(1): 110-114.  
XIONG Bangshu, HUANG Wutao, and LI Xinmin. Optimization method for camera calibration parameters based on improved genetic algorithm[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2016, 37(1): 110-114.
- [13] SRINIVAS M and PATNAIK L M. Adaptive probabilities of crossover and mutation in genetic algorithms[J]. *IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics*, 1994, 24(4): 656-667. doi: 10.1109/21.286385.
- [14] 张彩宏, 潘广贞. 基于非均匀变异和自适应逃逸的果蝇优化算法[J]. *计算机工程与设计*, 2016, 37(8): 2093-2097.  
ZHANG Caihong and PAN Guangzhen. Fruit fly optimization algorithm based on non-uniform mutation and adaptive escape[J]. *Computer Engineering and Design*, 2016, 37(8): 2093-2097.
- [15] YANG Pengfei, PENG Chunrong, ZHANG Haiyan, *et al.* A high sensitivity SOI electric-field sensor with novel comb-shaped microelectrodes[C]. *16th International Conference on Solid-State Sensors, Beijing, 2011: 1034-1037*. doi: 10.1109/TRANSDUCERS.2011.5969165.
- [16] 杨鹏飞, 陈博, 闻小龙, 等. 一种基于 MEMS 芯片的新型地面大气电场传感器[J]. *电子与信息学报*, 2016, 38(6): 1536-1540. doi: 10.11999/JEIT150994.  
YANG Pengfei, CHEN Bo, WEN Xiaolong, *et al.* A novel MEMS chip-based ground atmospheric electric field sensor[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(6): 1536-1540. doi: 10.11999/JEIT150994.
- 李冰: 男, 1989年生, 博士, 研究方向为电场传感器3维测试方法及测试系统研究.
- 彭春荣: 男, 1979年生, 博士, 副研究员, 研究方向为MEMS电场传感器芯片及系统研究.
- 凌必赞: 男, 1989年生, 博士, 研究方向为MEMS电场传感器及系统研究.
- 郑凤杰: 女, 1979年生, 博士, 副研究员, 研究方向为探空电场传感器及系统研究.
- 陈博: 男, 1987年生, 硕士, 助理研究员, 研究方向为电场传感器系统及应用研究.
- 夏善红: 女, 1958年生, 博士, 研究员, 研究方向为微纳技术制造及应用、传感器技术研究.