

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407450

基于改进麻雀搜索的雷暴云电荷反演方法*

行鸿彦^{1,2} 郑锦程² 徐伟² 王心怡²

(1.南通理工学院电气与能源工程学院 南通 226001;2.南京信息工程大学电子与信息工程学院 南京 210044)

摘要:为解决雷暴云电荷反演方法精度较差、现有电荷反演模型受多站组网观测造成的环境误差影响等问题。在假设雷暴云层等厚模型的基础上,推导雷暴云电荷反演所需非线性方程组,建立基于三维大气电场的雷暴云电荷反演模型,通过正弦混沌映射函数优化麻雀搜索算法(SSA)种群初始化方式,提高种群分布的非线性,使用莱维飞行(Levy)函数和反向学习策略优化算法发现者的位置更新方式,提出一种基于改进麻雀搜索算法(ISSA)的雷暴云电荷反演方法。利用三维大气电场仪对地面电场数据进行观测并分析电场特征,使用混合策略改进的SSA算法反演雷暴云充电模型参数。实验结果表明,使用三维大气电场仪观测所得数据进行反演,能够有效消除多站组网观测造成的误差,对比SSA,改进后的ISSA算法反演所得雷暴云两秒相邻电荷量的偏差率均在1%左右,适应度值最低达到5.38,能较为精确的反演雷暴云电荷参数,为研究其充放电过程提供一定参考。

关键词: 三维大气电场;雷暴云电荷;麻雀搜索算法;电荷反演模型;混合策略改进

中图分类号: TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4010

Thunderstorm cloud charge inversion method based on improved sparrow search algorithm

Xing Hongyan^{1,2} Zheng Jincheng² Xu Wei² Wang Xinyi²

(1. School of Electrical and Energy Engineering, Nantong Institute of Technology, Nantong 226001, China;

2. School of Electronics and Information Engineering, Nanjing University of Information

Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: In order to solve the problems of poor accuracy of the charge inversion method for thunderstorm clouds and the influence of the existing charge inversion model by the environmental error caused by multi-station network observation, a nonlinear equation system is derived to establish a charge inversion model based on the three-dimensional atmospheric electric field. On the basis of the assumption of equal thickness model of thunderstorm clouds, a set of nonlinear equations required for the charge inversion of thunderstorm clouds is derived, and a three-dimensional atmospheric electric field-based charge inversion model of thunderstorm clouds is established. The population initialisation of the sparrow search algorithm (SSA) is optimised by the sinusoidal chaotic mapping function to improve the nonlinearity of the distribution of the populations, and the Levy function and the inverse learning strategy are used to optimise the position updating of the algorithm's discoverer way, a thunderstorm cloud charge inversion method based on improved sparrow search algorithm (ISSA) is proposed. A 3D atmospheric electric field instrument is used to observe the ground electric field data and analyse the electric field characteristics, and the improved SSA algorithm using the hybrid strategy is used to invert the thunderstorm cloud charging model parameters. The experimental results show that the inversion of the data obtained from the three-dimensional atmospheric electric field instrument (3DAEF) can effectively eliminate the errors caused by the multi-station network observation. Compared with the SSA, the deviation rate of the two-second neighboring charges of the thunderstorm cloud obtained by the improved ISSA algorithm is around 1%, and the fitness value reaches as low as 5.38, which is able to accurately invert the charging parameters of the thunderstorm cloud, and provide a certain reference to the study of its charging and discharging process.

Keywords: three-dimensional atmospheric electric field; thunderstorm cloud charge; sparrow search algorithm; electric charge inversion model; mixed strategy improvements

收稿日期: 2024-04-19 Received Date: 2024-04-19

* 基金项目: 国家自然科学基金(62171228)项目资助

0 引言

雷暴云^[1]是一种积累一定强度产生雷暴的积雨云,伴随其的闪电静电感应往往造成不可估量的社会危害与经济损失,例如其产生的瞬间电压会导致电力损坏、通信系统故障、森林火灾、甚至人员伤亡。雷暴的产生与雷暴云中的电荷变化有关,雷暴云的电荷结构模型指通过一系列的物理学参数来反映云内的电荷分布特征,一般情况下,雷暴天气发生时的地面大气电场强度高达数万伏甚至数十万伏,因此利用地面电场的测量数据对雷暴云的电荷结构模型^[2]进行反演,有助于雷暴活动的预警^[3],降低灾害造成的损失,具有重要的理论价值。

对雷暴云电荷结构的研究一直是大气物理学的重点,其研究方法有多种。最直接的方法是通过搭载气球探空仪器,对雷暴云参数进行测量;Simpson 等^[4]使用探空气球进行穿云实验,提出了雷暴云三极性电荷结构模型。Zhang 等^[5]和赵多青等^[6]的研究结果表明我国内陆高原地区雷暴云电荷结构呈典型三极型。第二种方法是通过云物理微观动力学因子结合数值模拟^[7-11],计算雷暴云充电过程中各时刻的云电荷结构特征参数;徐良韬等^[12]提出使用二维时变对称轴模型来推断南昌等地区雷暴云内部电荷分布及变化。谭涌波等^[13]应用改进的随机闪电参数优化方案来模拟云闪生命周期,揭示了周期内云内电荷分布重置和空间电荷中和过程的新现象,但此类方法注重物理概念,且计算量大,耗时长,通常无法得到一般性结论。除这两类方法外,一些学者提出反演算法与大气电场数据相结合的方法,研究雷暴云电荷模型;张延龙等^[14]利用最小二乘法结合内陆高原雷暴特征,对中川地区的雷暴云电荷结构进行了反演,结果表明该地区雷暴云电荷结构为四极型,但最小二乘法存在对初值估计依赖的缺陷。行鸿彦等^[15]提出一种粒子群法与牛顿法相结合的混合反演算法,利用大气电场组网数据,取得了较好的反演结果。但此类方法需对大气电场仪进行联合布站,组网测量大气电场值进行反演,但是各站点的安装环境存在差异性,从而导致数据的一致性较差,且目前的技术往往忽略了对雷暴云引起的水平电场分量的观测,造成这类数据进行反演效果不太理想。

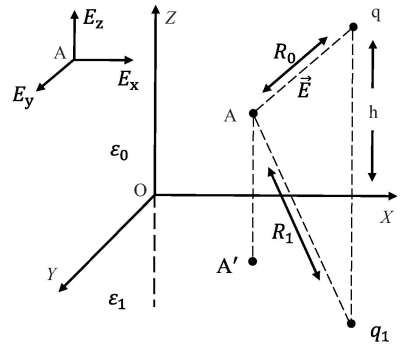
提出利用三维大气电场仪对地面电场的水平与垂直分量进行观测;推导三维大气电场测量原理,建立基于三维大气电场(3 D atmospheric electric field,3DAEF)的雷暴云电荷反演模型,依靠测量数据分析雷暴云形成—成熟—消散阶段的地面电场特征,以此观测数据对雷暴云的电荷参数反演,能够有效消除安装环境差异所带来的误差影响。对雷暴云电荷反演算法进行改进,在麻雀搜索算法基础上,使用正弦混沌映射函数优化种群的初始

化,同时引入莱维飞行(levi's flying,LEVY)和反向学习策略调整种群发现者的搜索策略,提出改进混合策略^[16]的麻雀搜索算法(improved sparrow search algorithm,ISSA)进行雷暴云充电模型参数反演。

1 雷暴云电荷反演模型建立

1.1 三维大气电场的观测

对雷暴云的电荷参数进行反演研究,首先要观测地面电场数据,因此建立如图 1(a)所示的模型,以求解观测点的大气电场与雷暴云电荷之间的关系。其中 XOY 视为地面,点 A(x,y,z) 为观测坐标,点 q(x₁,y₁,z₁) 为雷暴云等效电荷点,电荷量为 q;A' 为点 A 关于 X-Y 的映射,点 q 在空气和地壳中的镜像电荷分别为 q₁、q₂。



(a) 观测模型
(a) Observation model



(b) 三维大气电场仪测量实验
(b) Three-dimensional atmospheric electric field instrument measurement experiment

图 1 三维大气电场观测实验与模型

Fig. 1 Three-dimensional atmospheric electric field observation experiment and model

ϵ_0 和 ϵ_1 分别为空气介电常数与地表相对介电常数; E_x, E_y, E_z 分别为大气电场在 x, y, z 轴方向上的分量; R_0, R_1 分别为观测点 A 到 q 与镜像电荷 q' 之间的距离。此时,地表(z > 0) 上方与地表内部(z < 0) 的电势分别如式(1)、(2)所示。

$$\varphi_0 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{q}{R_0} + \frac{q_1}{R_1} \right) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{q}{\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2}} + \frac{q_1}{\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2}} \right) \quad (1)$$

$$\varphi_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_1} \left(\frac{q_0 + q}{R_0} \right) = \frac{1}{4\pi\epsilon_1} \left(\frac{q + q_0}{\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2}} \right) \quad (2)$$

若 $z=0$, 方程的边界条件为:

$$\varphi_0 = \varphi_1 \quad (3)$$

$$\epsilon_0 \frac{\partial \varphi_0}{\partial z} = \epsilon_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial z} \quad (4)$$

此时, 可以得到镜像电荷的大小:

$$q_0 = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_0}{\epsilon_1 + \epsilon_0} q \quad (5)$$

$$q_1 = -\frac{\epsilon_1 - \epsilon_0}{\epsilon_1 + \epsilon_0} q \quad (6)$$

将计算镜像电荷的式(6)代入式(1)以得到空气介质中的电位:

$$\varphi_0 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{q}{R_0} + \frac{q_1}{R_1} \right) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{q}{\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2}} - \frac{\epsilon_1 - \epsilon_0}{\epsilon_1 + \epsilon_0} \frac{q}{\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2}} \right) \quad (7)$$

1.2 基于 3DAEF 的雷暴云电荷反演模型建立

基于地面大气电场观测数据实现雷暴云电荷参数反演, 首先要建立合适的电荷结构模型^[17], 因此需了解雷暴云的荷电机理。而雷暴云的主要起电机理是粒子起电, 包括感应起电和非感应起电机理组成, 感应起电指大气中的粒子在不同相态的碰撞下发生电荷转移, 导致电荷在不同粒子上积累分层起电现象^[18]; 非感应起电指空气温度梯度和湿度变化引起的电荷分离时表面接触电位差导致了不同极性电荷的转移。其中雷暴云内的电荷密度 $\rho(x, y, z)$ 分布与其空间位置有关, 因此假定雷暴云分为若干等厚层, 如图 2 所示。视雷暴云内的电荷分布等效为一点, 假设电荷密度在这点的水平方向上保持一致, 那么将雷暴云在垂直方向上分为 n 个厚度相等的区域 d , 最下方的区域与地面的垂直距离为 z_0 。

在理想情况下, 地面电场由雷暴云各等效电荷区电荷共同作用, 基于此模型, 对观测点 A 相应方位的电势求偏导, 即可得一组地面三维大气电场值:

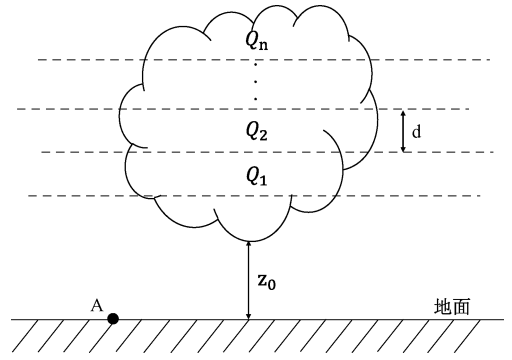


图 2 雷暴云电荷结构等效模型

Fig. 2 Thunderstorm cloud charge structure equivalent model

$$E_x = -\frac{\partial \varphi_0}{\partial x} = \sum_{k=1}^n \left[\frac{Q_k(x-x_0)}{2\pi(\epsilon_0 + \epsilon_1)} \times \left[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z_0 + (k-1)d)^2 \right]^{-\frac{3}{2}} \right] \quad (8)$$

$$E_y = -\frac{\partial \varphi_0}{\partial y} = \sum_{k=1}^n \left[\frac{Q_k(y-y_0)}{2\pi(\epsilon_0 + \epsilon_1)} \times \left[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z_0 + (k-1)d)^2 \right]^{-\frac{3}{2}} \right] \quad (9)$$

$$E_z = -\frac{\partial \varphi_0}{\partial z} = \sum_{k=1}^n \left[\frac{Q_k(z_0 + (k-1)d)}{2\pi(\epsilon_0 + \epsilon_1)} \times \left[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z_0 + (k-1)d)^2 \right]^{-\frac{3}{2}} \right] \quad (10)$$

式中: Q_k 是第 k 层雷暴云电荷区电荷量, 坐标 $(x, y, 0)$ 为等效电荷位置中心, (x_0, y_0, z_0) 为电荷地表相对坐标, E_x, E_y, E_z 为各层雷暴云内大气电场 3 个方向的叠加量。

反演的未知量个数由雷暴云分层数量 n 决定, 式中表达电荷结构的参数包含电荷量 Q_k , 雷暴云距观测点的水平相对距离 $|x-x_0|, |y-y_0|$, 垂直距离 z_0 , 未知量一共为 $n+4$ 个。三维大气电场仪的采样频率以秒为单位, 观测数据的距离量未发生改变, 在 1 s 的时间内, 雷暴云内的电荷结构参数很难发生较大变化, 因此比较前 1 s 的电荷量 Q_k 与后 1 s 的电荷量 Q'_k 是否近似, 即可验证反演效果好坏。

一般雷暴云电荷区呈现偶极性或三级型结构, 若相邻两层电荷量呈现相同极性, 如上正下负或上负下正则偶极性结构, 若相邻三层电荷极性为正、负、正则三级极性结构。假设为三级型结构, 相邻 2 s 的大气电场值分别为 $(E_{x1}, E_{y1}, E_{z1}), (E_{x2}, E_{y2}, E_{z2})$, 电荷量依次为 $Q_{11}, Q_{12}, Q_{13}, Q_{21}, Q_{22}, Q_{23}$, 则反演的所需的非线性方程组为:

$$E_{xi} = \frac{Q_{ij}(x-x_0)}{2\pi(\epsilon_0 + \epsilon_1)} \left[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + z_0^2 \right]^{-\frac{3}{2}} + \frac{Q_{ij}(x-x_0)}{2\pi(\epsilon_0 + \epsilon_1)} \left[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z_0 + 1000)^2 \right]^{-\frac{3}{2}} +$$

$$\frac{Q_{ij}(x-x_0)}{2\pi(\varepsilon_0+\varepsilon_1)}[(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+(z_0+2000)^2]^{-\frac{3}{2}} \quad (11)$$

$$E_{yi} = \frac{Q_{ij}(y-y_0)}{2\pi(\varepsilon_0+\varepsilon_1)}[(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+z_0^2]^{-\frac{3}{2}} +$$

$$\frac{Q_{ij}(y-y_0)}{2\pi(\varepsilon_0+\varepsilon_1)}[(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+(z_0+1000)^2]^{-\frac{3}{2}} +$$

$$\frac{Q_{ij}(y-y_0)}{2\pi(\varepsilon_0+\varepsilon_1)}[(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+(z_0+2000)^2]^{-\frac{3}{2}} \quad (12)$$

$$E_{zi} = \frac{-Q_{ij}\varepsilon_1 z_0}{2\pi(\varepsilon_0+\varepsilon_1)}[(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+z_0^2]^{-\frac{3}{2}} -$$

$$\frac{Q_{ij}\varepsilon_1(z_0+1000)}{2\pi(\varepsilon_0+\varepsilon_1)}[(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+(z_0+1000)^2]^{-\frac{3}{2}} -$$

$$\frac{Q_{ij}\varepsilon_1(z_0+2000)}{2\pi\varepsilon_0(\varepsilon_0+\varepsilon_1)}[(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+(z_0+2000)^2]^{-\frac{3}{2}} \quad (13)$$

为保证反演模型的求解和算法的收敛性,设计 f 作为反演模型的目标函数。若相邻 2 s 大气电场真实观测值为 $(E_{xi}', E_{yi}', E_{zi}')$, 通过对大气电场反演值与真实观测值之间的比较,将参数反演的过程转为求解 $f \rightarrow 0$ 的过程 ($m = x, y, z; i, j = 1, 2$):

$$f = \sqrt{\sum_{i=1}^2 (E_{mi}' - E_{mi})^2} \quad (14)$$

2 雷暴云电荷反演算法

2.1 自适应麻雀搜索算法

麻雀搜索算法^[19] (sparrowsearchalgorithm, SSA) 是基于麻雀的觅食与反捕食行为的一种群智能优化算法。麻雀种群由发现者和跟随者组成,发现者的职责是为种群提供觅食位置,但其位置更新往往在种群迭代的过程中依赖于当前最优解,从而使算法陷入局部最优。因此引入非线性参数 ω 对种群迭代过程中搜索个体对当前自身位置信息的依赖进行调整,在迭代前期,降低权重增加算法全局搜索能力,迭代后期,提高权重帮助算法快速收敛。非线性调整参数 ω 的计算规则和发现者的位置更新方法如式(15)和(16)所示。

$$\omega = (t/item_{\max})^2 \quad (15)$$

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} \omega \cdot X_{i,j}^t \cdot \exp\left(\frac{-i}{\alpha \cdot item_{\max}}\right), R_2 < ST \\ \omega \cdot X_{i,j}^t + Q \cdot L, R_2 \geq ST \end{cases} \quad (16)$$

式中: t 为当前迭代次数, $item_{\max}$ 为最大迭代次数, α 为 $(0, 1]$ 内的均匀随机数, Q 为标准正态分布随机数;第 i 个麻雀在第 j 维中的位置信息表示为 $X_{i,j}$, 判断 R_2 与 ST

的大小,从而更新发现者位置信息。

跟随者位置更新如式(17)所示。

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} Q \cdot \exp\left(\frac{X_{worst}^t - X_{i,j}^t}{l^2}\right), i > \frac{n}{2} \\ X_p^{t+1} + |X_{i,j}^t - X_p^{t+1}| \cdot A^+ \cdot L, \text{其他} \end{cases} \quad (17)$$

式中: A 为 $1 \times d$ 矩阵,每个元素赋值为 -1 或 1 , $A^+ = A^T(AA^T)^{-1}$;发现者占据的全局最优位置 X_p 和全局最差位置 X_{worst} 决定了跟随者位置信息变化。

另外,在种群中存在 10%~20% 的麻雀具有危险识别能力,它们的初始位置随机生成,更新策略如式(18)所示。

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} X_{best}^t + \beta \cdot |X_{i,j}^t - X_{best}^t|, f_i > f_g \\ X_{i,j}^t + K \cdot \frac{|X_{i,j}^t - X_{worst}^t|}{(f_i - f_w) + \varepsilon}, f_i = f_g \end{cases} \quad (18)$$

式中: f_i 为当前麻雀适应度值, f_g 和 f_w 为当前全局最优与最差值, β 为正态分布的随机数, K 为 $[-1, 1]$ 内随机数, ε 趋于 0 以防止分母为 0。

2.2 正弦混沌映射函数种群初始优化

混沌映射属于一类动力系统,表现出极其敏感的依赖于初始条件的行为,即微小的初始差异可能会导致系统轨迹的巨大分歧。由于正弦混沌映射具有不可预测性,作为伪随机数生成器应用于优化算法,丰富种群的多样性,有利于算法跳出局部最优。利用正弦混沌映射函数^[20]对麻雀的种群进行初始化,其表达形式为:

$$X = \begin{cases} X_{n+1} = \sin\left(\frac{2}{x_n}\right), n = 0, 1, \dots, N \\ -1 \leq X_n \leq 1, \dots, X_n \neq 0 \end{cases} \quad (19)$$

设定种群数量为 100,范围 $[0, 1]$,分别使用随机分布与混沌映射函数对麻雀种群进行初始化,如图 3 所示,相较于图 3(b),图 3(a)使用混沌函数修正后种群初始化分布具有更好的非线性与随机性,可以防止过多的个体聚集从而导致算法无法跳出局部最优范围。

2.3 Levy 飞行与反向学习策略

Levy 飞行函数通常用于描述随机过程中的长尾分布,可以解决寻常优化算法容易陷入局部最优的窘境,使算法具有更高概率大步跳出局部最优的能力。基于 Levy 飞行的麻雀位置更新公式如式(20)所示。

$$x_{new}^{t+1} = x_i^t + \gamma \oplus Levy(d) \quad (20)$$

式中: γ 代表步长, $Levy(d)$ 为随机路径搜索策略如式(21)所示。

$$Levy(d) \sim u = t^{-d}, 1 \leq d \leq 3 \quad (21)$$

随机步长的生成满足公式:

$$Levy(d) = 0.01 \cdot \frac{u \cdot \sigma}{|v|^{\frac{1}{\beta}}} \quad (22)$$

参数 σ 的计算方式如式(23)所示。

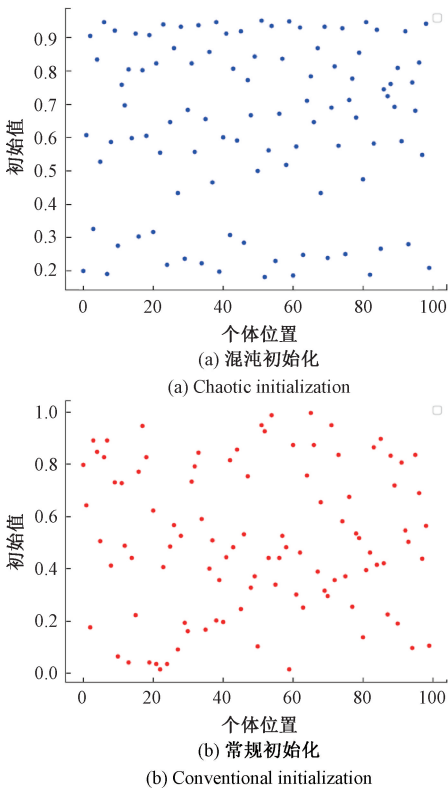


图 3 不同初始化方法种群分布对比

Fig. 3 Distribution comparison of different initialization methods

$$\sigma = \left[\frac{\Gamma(1 + \beta) \cdot \sin(\pi\beta/2)}{\Gamma[(1 + \beta)/2] \beta \cdot 2^{(\beta-1)/2}} \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (23)$$

式中： d 为向量维度， β 为常数值 1.5， Γ 为伽马函数， u 和 v 为 0~1 的随机数。

当发现者迭代一定次数后，适应度值恒定，此时跟随者成为发现者，为帮助其跳出局部最优，使用 Levy 飞行策略对跟随者位置更新策略进行改进：

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} Q \cdot \exp\left(\frac{X_{worst}^t - X_{i,j}^t}{t^2}\right), & i > n/2 \\ X_p^{t+1} + |X_{i,j}^t - X_p^{t+1}| \cdot Levy(d), & \text{其他} \end{cases} \quad (24)$$

反向学习策略是一种通过当前解寻找相应反向解，评估后保留较好的解方案的方法，用于群优化算法能很好的帮助其跳出局部最优解，基于反向学习的麻雀位置更新策略如式(25)所示。

$$\begin{cases} x'_{best}(t) = ub + r \oplus (lb - x_{best}(t)) \\ x_{new}^{t+1} = x_i^t + b \oplus (x_{best}(t) - x'_{best}(t)) \end{cases} \quad (25)$$

式中： $x'_{best}(t)$ 为 t 次迭代时第 i 只麻雀的最优逆解， ub 和 lb 为搜索空间的上下界， r 和 b 步长控制参数， r 服从标准正态分布，当算法陷入局部最优时，较大的步长控制能够有效提高全局搜索能力， b 的计算设计如式(26)所示。

$$b = \left((f_g - f_w) \cdot \left(1 - \frac{t}{item_{max}}\right) \right)^t \quad (26)$$

2.4 混合策略改进的雷暴云电荷反演算法

为了提升算法反演的性能，设计麻雀位置更新方法动态选择策略， R_2 为 $rand(1)$ 的随机数，当 $R_2 \in (0, 0.5)$ 时，选择式(24)进行麻雀位置更新，否则，选择式(25)；针对基础麻雀优化算法所存在的缺陷，基于以上的改进思想，所提出的 ISSA 算法对雷暴云电荷参数反演流程如图 4 所示，具体包含以下步骤：

步骤 1) 初始化种群；根据式(19)对麻雀的种群进行初始化，对目标函数、种群数量 n 、问题维度 d 、最大迭代次数 $maxitem$ 、迭代范围的上下界 (ub, lb) 等进行设置；

步骤 2) 计算全部个体的适应度值并进行排序，找出最优个体与最差个体所在位置；

步骤 3) 发现者位置更新；根据式(16)对发现者的位置进行更新；

步骤 4) 加入者位置更新；根据式(17)对跟随者 s 的位置进行更新；

步骤 5) 警觉者位置更新；部分麻雀具有警觉能力，通过式(18)进行位置更新；

步骤 6) 动态选择更新策略；麻雀的位置更新由动态更新策略进行，当 $R_2 \in (0, 0.5)$ 时，选择基于 Levy 飞行的改进策略，搜索步长由式(22)、(23)计算得出，根据式(24)对跟随者进行位置更新；否则，利用式(25)对发现者位置更新；

步骤 7) 记录适应度值并排序，保留与最优适应度匹配的麻雀位置；

步骤 8) 终止条件；比较适应度值是否达到设定值或者达到最大迭代次数，否则，返回步骤 2) 重复流程。

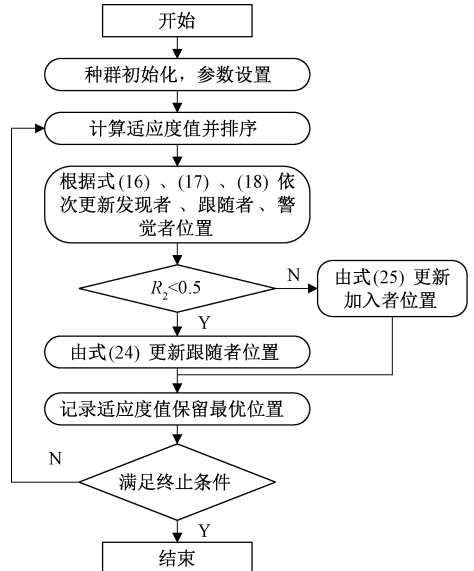


图 4 ISSA 算法流程

Fig. 4 The ISSA algorithm process

3 实验结果与分析

为获取反演所需的地面电场观测数据,在南京信息工程大学学科 2 号楼楼顶安装本团队自主研发的三维大气电场仪进行实地观测,如图 1(b)所示,安装位置选在

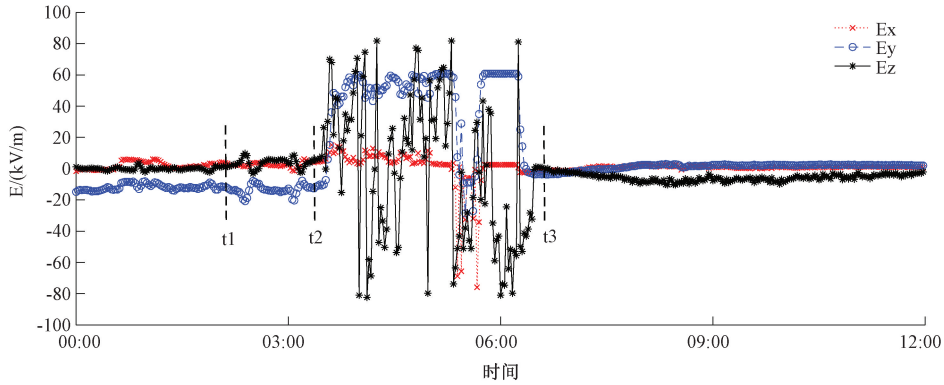


图 5 地面电场强度变化曲线

Fig. 5 Variation curve of ground electric field intensity

由图 5 可知,t1~t2 时刻为雷暴临近阶段,此时垂直方位电场极性开始发生跳变,水平方位电场相对稳定;t2~t3 时刻为雷暴发生阶段,地面电场剧烈振荡,极性多次反转,雷暴云充放电过程明显,地面电场发生了显著的变化;t3 时刻后为雷暴消散阶段,此时地面电场逐渐趋于平稳且数值微弱。依据前两节所介绍的方法,对雷暴发生阶段时刻的充电模型参数进行反演,在此阶段内任选两组相邻采样时刻的三维大气电场测量值,分别为:1) (-0.94, 1.21, 23.84) kV/m, (-1.00, 1.28, 23.84) kV/m, 2) (2.27, 2.82, -11.10) kV/m, (2.29, 2.83, -11.16) kV/m。由于时间间隔极短,且观测点的位置未发生改变,所以其与雷暴云的相对距离 $|x - x_0|$ 、 $|y - y_0|$ 、 z_0 近似恒定。

为提高计算效率和避免搜索无效区域,保证参数反

楼顶以避免高大建筑物对电场分布产生影响,采样频率为 1 s。图 5 为 2019 年 12 月 1 日所测量的地面电场强度变化曲线图,其中红色点线和蓝色虚线分别为水平方向 x, y 轴的电场强度 E_x, E_y , 黑色实线为垂直方向电场强度 E_z 。

演结果在合理的范围内,结合所反演参数实际合理值,对参数反演边界进行约束,如表 1 所示。

表 1 参数约束边界

Table 1 Parameter constraint boundary

参数	(ub, lb)
Q_{ij}	(-50 C, 50 C)
$ x - x_0 , y - y_0 $	(0, 10 km)
z_0	(0.5 km, 5 km)

对带电模型的参数 $Q_{11}, Q_{12}, Q_{13}, Q_{21}, Q_{22}, Q_{23}, |x - x_0|, |y - y_0|, z_0$ 进行反演,设置种群数量 m 为 50、迭代次数 maxitem 为 100、麻雀警觉者数量为 20%,结果如表 2 所示。

表 2 三层雷暴云电荷模型参数反演结果

Table 2 Parameter inversion results of three-layer thunderstorm cloud charge model

		Q_{11}/C	Q_{12}/C	Q_{13}/C	Q_{21}/C	Q_{22}/C	Q_{23}/C	$ x - x_0 /km$	$ y - y_0 /km$	z_0/km	f
ISSA	1)	23.88	-16.59	-41.94	22.77	-15.53	-42.60	8.39	6.64	0.68	5.38
	2)	-35.28	44.94	30.40	-36.23	46.05	31.23	0.839	0.919	3.89	6.10
SSA	1)	-17.83	13.87	-38.11	-15.44	-42.66	37.95	0.68	1.64	3.75	2 344
	2)	38.76	-5.92	-34.08	-32.00	29.81	-39.19	0.022	4.02	0.51	5 134

演结果的好坏可通过 2 s 内相邻采样点电荷量是否发生较大变化判断。由表 2 可知,相比 SSA,由 ISSA 反演得到的结果更优,这是因为和基础的 SSA 算法相比,ISSA 不但优化了种群的初始化方式,使其更加离散地分布于搜索空间,并且在麻雀发现者的搜索策略上提出了

Levy 飞行与反向学习策略相结合的混合搜索策略,帮助其跳出局部最优直至达到迭代终止条件。分析表 2 结果,可知由 ISSA 算法反演所得的 2 s 相邻电荷量的偏差率均在 1% 左右,表明反演结果较好,数据 1) 反演结果显示雷暴云层上部均带负电荷且底部带正电荷,数据 2) 反

演结果显示雷暴云上部带正电荷且底部带负电荷,以此推断南京市浦口地区雷暴云呈经典偶极性结构。

数据 1) 的适应度变化曲线如图 6 所示,ISSA 的适应度值 f 最低为 5.38,在迭代初期算法适应度值持续下降,这是因为自适应函数 ω 调整搜索空间,帮助每个个体跳出局部最优解;而在迭代后期,混合搜索策略不断收缩搜索空间,帮助群体快速收敛,最终稳定,防止发现者多余的搜索行为造成计算资源浪费。

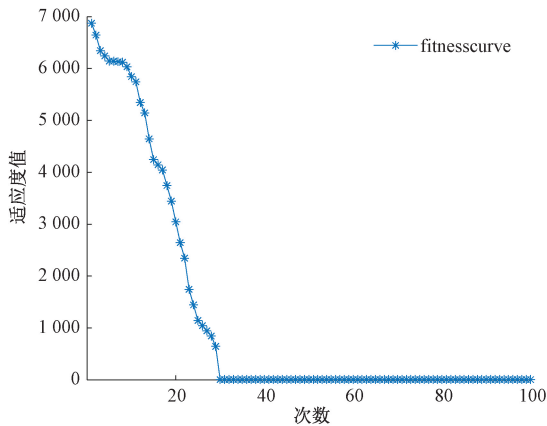


图 6 ISSA 适应度函数变化曲线

Fig. 6 Change curve of ISSA fitness function

4 结 论

假设雷暴云层等厚模型,将各层电荷视为等效点电荷,分析三维大气电场测量原理并对地面电场进行观测,建立基于三维大气电场的雷暴云电荷结构等效模型,推导反演所需非线性方程组,对雷暴云电荷反演算法改进。实验结果表明,通过三维大气电场仪观测的数据更加归一化,所建立的基于 3DAEF 的雷暴云电荷参数反演模型能够有效消除以往电荷反演所使用多站组网观测,安装位置不同所造成的环境变量误差,ISSA 算法反演所得的 2 s 相邻电荷量的偏差率均在 1% 左右,能较为精确的反演出雷暴云电荷参数,为研究其充放电过程提供一定参考。但以三维电场数据两秒内相邻电荷结构不变为基础,在大多数情况下可以采用,不排除有些情况下,超强雷暴的放电过程使得电场在采样单位内发生巨大变化,导致假设无效。同时,本文假设雷暴云等层等厚模型,使用其它如球对称模型进行建模可能也较为理想,如何把雷暴云电荷密度的分布情况考虑进建模中也待进一步研究。

参考文献

[1] JIANG F, HUANG C, WANG Y, et al. Emission spectrum of sprites caused by the quasi-electrostatic field above

thunderstorm cloud [J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2018, 131 (3): 1-10.

[2] 李胤演,行鸿彦. 地表相对介电常数对雷暴云定位影响分析与研究 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2022, 36(6):187-195.

LI Y Y, XING H Y. Analysis and research on the influence of the relative permittivity of the earth surface on thunderstorm cloud positioning [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2022, 36(6):187-195.

[3] 陈家宏,赵淳,谷山强,等. 我国电网雷电监测与防护技术现状及发展趋势 [J]. *高电压技术*, 2016, 42(11):3361-3375.

CHEN J H, ZHAO CH, GU SH Q, et al. Present status and development trend of lightning detection and protection technology of power grid in China [J]. *High Voltage Engineering*, 2016, 42(11):3361-3375.

[4] SIMPSON G, ROBINSON G D. The distribution of electricity in thunderclouds [J]. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1941, 177:281-329.

[5] ZHANG T L, QIE X S, YUAN T, et al. The characteristics of cloud-to-ground lightning flashes and charge structure of a typical thunderstorm in Chinese inland plateau [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, 32(5):1221-1227.

[6] 赵多青,谷山强,王宇,等. 西藏高海拔地区输电线路沿线雷电地闪时空分布特征 [J]. *高电压技术*, 2023, 49(7):3090-3101.

ZHAO D Q, GU SH Q, WANG Y, et al. Spatio-temporal characteristics of the cloud-to-ground lightning activity along the transmission lines in the tibet high-altitude area [J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(7):3090-3101.

[7] ZHAO P, YIN Y, XIAO H, et al. Role of water vapor content in the effects of aerosol on the electrification of thunderstorms: A numerical study [J]. *Atmosphere*, 2016, 7(10):137.

[8] TSENOVABD, BARAKOVAD, MITZEVAR. Numerical study on the effect of charge separation at low cloud temperature and effective water content on thunderstorm electrification [J]. *Atmosphere*, 2017, 184:1-14.

[9] FAN X, ZHAN G Y, ZHANG G, et al. Lightning characteristics and electric charge structure of a hail-producing thunderstorm on the eastern Qinghai-tibetan plateau [J]. *Atmosphere*, 2018, 9(8):295.

[10] GAO W, KOU Z, DING P. A numerical study of hail process effects on charge structure and lightning flash rate of thunderstorms [C]. *Asia-Pacific International*

- Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2016.
- [11] GALANAKIE, LAGOUVARDOSK, KOTRONIV, et al. Thunderstorm climatology in the mediterranean using cloud-to-ground lightning observations [J]. Atmosphere, 2018, 207: 136-144.
- [12] 徐良韬, 张义军, 王飞, 等. 雷暴起电和放电物理过程在 WRF 模式中的耦合及初步检验 [J]. 大气科学, 2012, 36(5): 1041-1052.
- XU L T, ZHANG Y J, WANG F, et al. Coupling of electrification and discharge processes with WRF model and its preliminary verification [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2012, 36(5): 1041-1052.
- [13] 谭涌波, 陶善昌, 祝宝友, 等. 云闪放电对云内电荷和电位分布影响的数值模拟 [J]. 地球物理学报, 2007, 50: 1053-1065.
- TAN Y B, TAO SH CH, ZHU B Y, et al. A simulation of the effects of intra-cloud lightning discharges on the charges and electrostatic potential distributions in a thundercloud [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2007, 50: 1053-1065.
- [14] 张廷龙, 言穆弘, 张彤, 等. 利用地面电场对中川地区一次雷暴过程电荷结构的研究 [J]. 高原气象, 2010, 29(6): 1524-1532.
- ZHANG YL, YAN MH, ZHANG T, et al. Study of charge structure in a thunderstorm case of Zhongchuan area by the observation of surface electrical field [J]. Plateau Meteorology, 2010, 29(6): 1524-1532.
- [15] 行鸿彦, 黄钰. 基于多站大气电场的雷暴云等效电荷混合反演算法 [J]. 计算机科学, 2014, 41(2): 257-260.
- XING H Y, HUANG Y. Hybrid inversion algorithm of thunder cloud equivalent electric charge based on multi-station atmospheric electric field [J]. Computer Science, 2014, 41(2): 257-260.
- [16] 赵建萍, 张达敏. 混合策略改进的草原土拨鼠算法及其应用 [J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(11): 129-142.
- ZHAO J P, ZHANG D M. Hybrid strategy improved prairie dog algorithm and its application [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(11): 129-142.
- [17] GUO Y L, WANG H Y, HU Q Y, et al. Deep learning for 3D point clouds: A survey [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2020, 43(12): 4338-4364.
- [18] 章卓雨. 基于多源数据的雷云监测与雷电临近预警方法研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.
- ZHANG ZH Y. Research on thunder cloud monitoring and lightning nowcasting method based on multi-source data [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022.
- [19] XUE J, SHEN B. A novel swarm intelligence optimization approach: Sparrow search algorithm [J]. Systems Science & Control Engineering, 2020, 8(1): 22-34.
- [20] 何柳, 张梅. 基于 ISSA-SVM 的充电桩故障诊断 [J]. 电子测量技术, 2023, 46(20): 104-109.
- HE L, ZHANG M. Fault diagnosis of charging pile based on ISSA-SVM [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(20): 104-109.

作者简介



行鸿彦 (通信作者), 1983 年于太原理工大学获得学士学位, 1990 年于吉林大学获得硕士学位, 2003 年于西安交通大学获得博士学位, 现为南京信息工程大学教授、博士生导师, 主要研究方向为气象仪器设计与计量、信号检测与处理等。

E-mail: xinghy@nuist.edu.cn

Xing Hongyan (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Taiyuan University of Technology in 1983, M. Sc. degree from Jilin University in 1990 and Ph. D. degree from Xi'an Jiaotong University in 2003. Now he is a professor and Ph. D. supervisor in Nanjing University of Information Science and Technology. His main research interests include design and metering of meteorological instruments and signal detection and processing etc.



郑锦程, 2022 年于南京信息工程大学获得学士学位, 现为南京信息工程大学硕士研究生, 主要研究方向为微弱信号的检测与处理、雷电探测与预警技术。

E-mail: 202212490693@nuist.edu.cn

Zheng Jincheng received his B. Sc. degree from Nanjing University of Information Science & Technology in 2022. Now he is a M. Sc. candidate at Nanjing University of Information Science & Technology. His main research interest includes weak signal detection and lightning detection and early warning technology.