

基于多站大气电场的雷暴云等效电荷混合反演算法

行鸿彦 黄钰

(南京信息工程大学江苏省气象灾害预报预警与评估协同创新中心 南京 210044)

(南京信息工程大学中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室 南京 210044)

摘要 为了能够利用地面电场资料对雷暴云等效电荷进行反演,提出了一种雷暴云等效电荷混合反演算法。该算法通过镶嵌混合结构形式将粒子群法和牛顿法相结合,并构造混合概率函数来控制混合时机。给定雷暴云电荷结构参数,在正演结果基础上对雷暴云等效电荷进行反演,结果表明:该混合反演算法的全局搜索性强,能有效地解决对初值的选取问题,并能得到更精确的反演结果;单纯的串行混合结构计算时间短但是反演的效果不佳,镶嵌混合结构能较好地体现两算法的优势;构建混合概率密度函数能够较好地提高整体计算效率。

关键词 粒子群,牛顿法,雷暴云等效电荷反演,混合结构形式,混合概率密度

中图分类号 TP301.6 **文献标识码** A

Hybrid Inversion Algorithm of Thunder Cloud Equivalent Electric Charge Based on Multi-station Atmospheric Electric Field

XING Hong-yan HUANG Yu

(Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

(Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract In order to inverse thunder cloud equivalent electric charge using the ground electric field data, this paper presented a thunderstorm cloud equivalent charge hybrid inversion algorithm. The algorithm combines the particle swarm method and Newton method through the combined mosaic hybrid structure and controls the hybrid timing by constructing the mixed probability function. Giving the parameters thunder cloud charge structure, the thunder cloud equivalent charge is inversed based on the forward modeling results. The results show that the particle Newton's method can effectively avoid the selection of initial value problems by strong global search capability, get better inversion results, and calculation time of a simple serial hybrid structure is short but the inversion effect is not good. Setting mosaic hybrid structure can better reflect the advantage of two algorithms, and building mixed probability density function can improve the computation efficiency.

Keywords Particle swarm, Newton's method, Inversion of thunder cloud equivalent charge, Hybrid structure, Mixed probability density

1 引言

雷电是主要的自然灾害之一,随着电子信息技术的发展,雷电带来的灾害也日益增多。雷暴过程中的闪电及放电特征与雷暴电荷结构关系十分密切。电荷结构的研究很大一部分是依靠数值模拟实现^[1]的,万浩江^[2]将地面探测数据与数值模拟相结合,提高了模拟的分辨率。而研究雷暴云电荷结构最为直接的方法是入云观测雷暴云电场和带电水成物粒子^[3,4]。与直接观测相比,通过地面电场变化的多站同步观

测来与闪电中电荷源的位置和大小进行反演比较容易实现。郟秀书等^[5,6]通过闪电引起电场变化的地面多站同步观测对云闪、地闪中电荷源位置进行反演,推断出内陆高原雷暴云呈三极性电荷结构。张廷龙等^[7]考虑到雷暴地面电场是雷暴云内不同电荷区共同作用的结果,在理论分析的基础上,结合我国内陆高原雷暴的特征,利用甘肃中川地区一次雷暴过程地面电场值的多站观测对其电荷结构进行了分析。

大气电场仪实时性强,通过建立空间电场模型,可以利用地面电场仪组网得到的电场资料进行反演计算,得到雷暴云

到稿日期:2013-04-09 返修日期:2013-07-20 本文受国家自然科学基金(61072133),江苏省普通高校研究生科研创新计划(N0782002157),江苏省“传感网与现代气象装备”优势学科平台,江苏省产学研联合创新资金计划(SBY201120033),江苏省高校科研成果产业化推进项目(JHB2011-15)资助。

行鸿彦(1962—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为气象电子测量仪器、雷电科学与技术等, E-mail: xinghy@nuist.edu.cn; 黄钰(1989—),女,硕士,主要研究方向为雷电监测、雷电灾害。

等效电荷量大小以及电荷中心的空间位置。无论是利用地面电场变化值还是电场值进行反演,通常都是利用非线性最小二乘法拟合实现,而非线性最小二乘法初值的估算非常重要,到目前为止还没有很完善的解决方案。在其他一些领域,很多学者将一些算法混合使用,一定程度上提高了计算精度^[8,9],但很少看到关于混合结构的形式选择,一般都是直接利用串行结构将一种算法的搜索结果作为另一种算法的初值。不同形式的混合结构有各自的特点,适合不同的问题,混合结构形式的选择应是构建混合反演方法的一个重要步骤。大气电场资料广泛地应用于雷电监测工作中。为了能够利用地面电场数据对雷暴云电荷结构进行研究,鉴于利用单一的反演算法存在自身的缺陷,本文基于混合算法的镶嵌结构,构造混合概率函数提出一种基于粒子群算法与牛顿法的混合反演算法(简称粒子牛顿法),假定雷暴云结构参数在正演结果基础上对雷暴云等效电荷进行反演计算分析。

2 雷暴云等效电荷结构模型假定

孤立雷暴云内的电荷密度分布应是一个与空间位置有关的量,即电荷密度为 $\rho(x, y, z)$ ^[7]。我们假定:雷暴云内的电荷区在水平方向上均匀分布,即只与垂直高度有关,将雷暴云在垂直方向上分为若干个厚度相等的区域,每一层云内的电荷分部集中于一个点上,等效点水平方向上保持一致。地面电场值即为雷暴云内多个电荷区域共同作用的结果,用式(1)表示:

$$E_i = \sum_{k=1}^n E_k = \sum_{k=1}^n \frac{Q_k (h + (k-1)d + \frac{d}{2})}{4\pi\epsilon_0 [(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (h + (k-1)d + \frac{d}{2})^2]^{\frac{3}{2}}} \quad (1)$$

式中, E_k 为雷暴云从云底开始算起往上数第 k 层电荷区对地面电场的贡献,而 E_i 为第 i 个测站处的地面实测电场值;其中, x, y 分别为每一层等效点电荷中心的坐标, h 和 d 分别为雷暴云云底离地高度和每层电荷区的厚度, x_i, y_i 分别为地面各测站的位置。雷暴云电荷区分层越多,则计算结果越能真实反映雷暴电荷结构特征,但相应的未知量也随之增多。由式(1)可以看出,雷暴云分层数为 N 时,未知量有电荷中心位置 (x, y) 、云层底高 h 、云层厚度 d 以及每一层等效电荷量大小一共 $N+4$ 个,电场值与电荷量呈线性关系,与空间坐标和云层参数的非线性关系显著,解 $N+4$ 个未知数的方程组需至少 $N+4$ 个电场测量值。本文假定雷暴云分为等厚度4层,如图1所示。

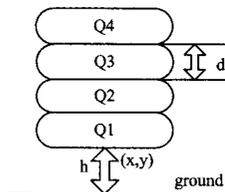


图1 雷暴云等效电荷结构模型

3 雷暴云等效电荷混合反演算法——粒子牛顿法

从混合的出发点看,将两种或以上的算法进行混合的目

的都是使各子算法能取长补短,充分发挥各自的长处,从而提高混合算法的优化性能。粒子群算法中已经隐含了选择、交叉和变异等进化机制,因此要想更好地提高算法的局部搜索能力,较好的思路是将局部搜索能力强的搜索机制引入算法当中。雷暴云电荷结构反演问题为较复杂的非线性问题,牛顿迭代法是计算非线性方程的常用方法,我们选择镶嵌混合结构形式,设置混合概率密度将粒子群良好的全局搜索性和牛顿法的局部搜索能力结合,形成粒子牛顿法。

3.1 粒子群法和牛顿法的搜索特性

粒子群初始化为一群随机粒子,然后通过迭代找到最优解。在每一次迭代中,粒子通过跟踪两个极值来更新自己:第一个就是粒子本身所找到的最优解,这个解称为个体极值;另一个极值是整个种群目前找到的最优解,这个极值是全局极值。

假设在一个 D 维的目标搜索空间中,有 N 个粒子组成一个群落,其中第 i 个粒子表示为一个 D 维的向量:

$$X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD}), i=1, 2, \dots, N$$

第 i 个粒子的“飞行”速度也是一个 D 维的向量,记为:

$$V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD}), i=1, 2, \dots, N$$

第 i 个粒子迄今为止搜索到的最优位置称为个体极值,记为:

$$p_{best} = (p_{b1}, p_{b2}, \dots, p_{bD}), i=1, 2, \dots, N$$

整个粒子群迄今为止搜索到的最优位置为全局极值,记为:

$$g_{best} = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gD})$$

在找到这两个最优值时,粒子根据式(2)和式(3)来更新自己的速度和位置^[10]:

$$v_{id} = w * v_{id} + c_1 r_1 (p_{id} - x_{id}) + c_2 r_2 (p_{gd} - x_{id}) \quad (2)$$

$$x_{id} = x_{id} + v_{id} \quad (3)$$

其中, c_1 和 c_2 为学习因子,也称加速常数, r_1 和 r_2 为 $[0, 1]$ 范围内的均匀随机数。根据经验,通常 $c_1 = c_2 = 2, i=1, 2, \dots, D$ 。但有研究表明取 $c_1 = c_2 = 0.5$ 效果更好^[11]。我们选取0.5进行计算。 v_{id} 是粒子的速度, $v_{id} \in [-v_{max}, v_{max}]$, v_{max} 是常数,由我们设定,用来限制粒子的速度。 r_1 和 r_2 是介于 $[0, 1]$ 之间的随机数^[12]。

牛顿迭代法是计算非线性方程的常用方法,它利用导数的算法,每一步迭代方向都是沿着当前点函数值下降的方向^[13]。牛顿法需要设定合适的初值才能保证算法收敛及其收敛速度。假定 $F=(f_1, f_2, \dots, f_D)$ 是关于 $X=(x_1, x_2, \dots, x_D)$ 的函数,非线性方程组的牛顿迭代法表述为:

$$X^{(k+1)} = X^k - F'(X^{(k)})^{-1} F(X^{(k)}), k=0, 1, \dots \quad (4)$$

其中, $F'(X)^{-1}$ 是 F 的雅可比矩阵的逆矩阵,雅可比矩阵可表示为:

$$F'(X) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_D} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_D} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_D}{\partial x_1} & \frac{\partial f_D}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_D}{\partial x_D} \end{bmatrix} \quad (5)$$

3.2 粒子牛顿法的混合结构形式

混合算法结构形式常用的是串行和镶嵌结构。串行结构是在粒子群算法寻优结束后,以粒子群搜索的解为初始点进行牛顿搜索。该结构信息只是单一地从粒子群算法流入牛顿法,牛顿法的搜索结果不能反馈到粒子群算法中。而镶嵌结构弥补了串行结构的不足,它的信息可双向流动,每次全局搜索结束后,从全局搜索的结果出发进行确定性的局部搜索,再将局部搜索结果反馈到主算法中。镶嵌结构计算量较大,但其结构形式简单,能充分发挥子算法的性能,且能让子算法充分进行信息交流,做到真正意义上的取长补短。因此,我们选择镶嵌结构对粒子群算法和牛顿法进行混合,如图2所示。

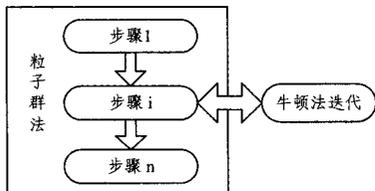


图2 粒子牛顿法的镶嵌混合结构形式

3.3 粒子牛顿法混合概率密度构建

对两种算法进行结合时,一般通过事先给定混合概率的值进行算法的混合,当混合概率大于随机数时,进行两种算法的混合。为了充分发挥牛顿法的局部搜索能力,同时又不至于过分加大计算量,我们构建了一种以时间及目标函数值标准为自变量的混合概率函数计算式。

首先考虑时间的影响。在全局搜索能力较强的计算初期,为保证计算效率,混合概率应较小;而在后期,牛顿法以较大的概率被选择执行,以加强混合算法的局部搜索能力。将混合概率看成时间的单调增函数,构建时间对混合概率的影响项 p_t 的计算式:

$$p_t(t) = \left(\frac{t}{t_{\max}}\right)^2 \quad (6)$$

式中, t_{\max} 是最大迭代次数, t 是当前迭代次数。

其次,考虑粒子群个体多样性程度影响。当粒子群个体多样性比较差时,混合概率能自动地增大,增强混合算法在最优解附近的局部搜索能力。构建个体多样性对混合概率的影响项 p_σ 的计算式:

$$p_\sigma(\sigma) = 1 - \tanh(\sigma) \quad (7)$$

其中, σ 是一次迭代中目标函数值的标准差。

综合时间和个体多样性对混合概率的影响,并设混合概率的最大值为 p_{\max} , 则 p 可表示为:

$$p(t, \sigma) = p_{\max} \left[1 - \tanh(\sigma) \right] \left(\frac{t}{t_{\max}}\right)^2 \quad (8)$$

4 基于粒子群牛顿法的雷暴云等效电荷反演结果分析

根据雷暴云等效电荷结构模型(如图1所示)对参数进行设定,假设所要反演的雷暴云结构参数为 $Q_1 = 5C, Q_2 = -25C, Q_3 = 12C, Q_4 = -3C, x=0, y=0, h=2500m, d=1000m$ 。我们先通过正演计算得到地面电场值,如图3所示,我们选取3组电场值(每组8个)将其作为反演过程中的探测值进行计算,验证粒子牛顿法的效果。建立目标函数:

$$f(x, y, h, d, Q_1 \cdots Q_N) = \sum_{i=1}^N (E_m - E_i)^2 \quad (9)$$

式中, E_i 是第 i 站测量得到的电场(这里由正值代替), E_m 是反演计算得到第 i 站的电场。

在算法执行时,首先为粒子群规模 m 、加速度因子 c_1, c_2 、惯性权重 w 、搜索空间维数 D 、最大迭代次数 NC 、混合概率 p 、反射系数 α 、扩展系数 γ 、压缩系数 β 及允许误差 ϵ 等参数赋值,并初始化粒子群。计算各粒子的适应值,重复更新当前粒子的个体极值和粒子群的全局极值,直到完成对粒子群中每个粒子的操作,之后对每个粒子以混合概率 p 进行牛顿法搜索。如果粒子被选择进行牛顿法搜索,则以 X_i^j 及 D 维空间的一组基作为初始顶点执行牛顿法,并把所得的最优值赋给 X_i^j 。判断终止条件是否满足,满足就输出结果,不满足则再计算各粒子适应值,重新进行搜索。

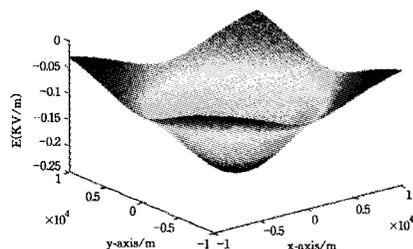


图3 地面电场分布图

为了与非线性最小二乘法进行比较,我们选取的3组正演数据用两种方法分别进行计算,反演结果见表1。从表1中我们可以看到3组结果中粒子牛顿法的目标函数值都较小,而第二组非线性最小二乘法是发散的,结果很不理想,第一组和第三组的非线性最小二乘法的最优目标函数值虽然也不大,但是从单个的反演参数看,误差还是比较大的,尤其表现在空间参数上,这可能还是因为非线性最小二乘法太过依赖于初值的选取,在计算过程中选择8个数据的平均值作为初值,可能陷入了局部最优的情况,相比之下,粒子牛顿法显示了更优的全局搜索性。为了更清楚地比较两种算法的收敛史,图4给出了利用第一组数据反演时两种算法最优目标函数值随迭代次数的变化过程。从图4中我们可以看到在迭代初期两种方法的收敛都比较快,但是到计算后期粒子牛顿法的迭代收敛性明显更好,从曲线的变化可以清楚地看到它在全局和局部收敛的特征。我们同样选取了第一组数据计算比较了不同混合结构形式下混合概率对反演结果的影响。从表2可以看到,单纯的串行结构计算时间短但是反演的效果不佳,没有将牛顿法的局部搜索特性反映到主算法中,镶嵌混合形式能较好地体现两算法结合使用的优势,虽然计算量加大了,但是也没有过大地增加计算时间。从表3我们可以看到不建立概率密度函数对反演的结果精度影响不大,但是明显地增加了计算的时间,这是由于不建立混合概率密度从一开始便要嵌套,浪费了大量的时间。

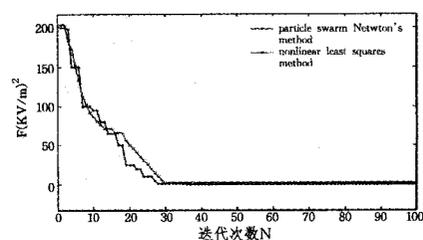


图4 最优目标函数值随迭代次数的变化

表 1 反演结果(粒子牛顿法/非线性最小二乘法)

| 编号 | x/km | y/km | h/km | d/km | Q ₁ /C | Q ₂ /C | Q ₃ /C | Q ₄ /C | f/(KV/m) ² |
|----|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|
| 1 | 0.011/0.102 | 0.023/0.351 | 2.456/2.789 | 1.020/1.231 | 5.121/6.215 | -25.402/-29.945 | 12.102/13.516 | -2.925/-5.012 | 0.0060/2.2152 |
| 2 | 0.015/- | 0.020/- | 2.512/- | 1.031/- | 4.820/- | -24.894/- | 12.312/- | -3.324/- | 0.0093/- |
| 3 | 0.021/0.996 | 0.100/1.062 | 2.431/2.012 | 1.023/0.825 | 4.526/6.998 | -24.714/-30.135 | 12.325/10.594 | -3.215/-5.936 | 0.0141/3.9473 |

表 2 串行和镶嵌混合结构的结果对比

| 混合结构形式 | x/km | y/km | h/km | d/km | Q ₁ /C | Q ₂ /C | Q ₃ /C | Q ₄ /C | f/(kV/m) ² | 计算时间/min |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|----------|
| 串行 | 0.151 | 0.137 | 2.678 | 1.089 | 5.793 | -28.298 | 14.236 | -4.157 | 0.1736 | 6 |
| 镶嵌 | 0.011 | 0.023 | 2.456 | 1.020 | 5.121 | -25.402 | 12.102 | -2.925 | 0.006 | 15 |

表 3 混合概率对反演结果的影响

| 混合概率 | x/km | y/km | h/km | d/km | Q ₁ /C | Q ₂ /C | Q ₃ /C | Q ₄ /C | f/(kV/m) ² | 计算时间/min |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|----------|
| 不建立概率函数 | 0.012 | 0.019 | 2.578 | 0.998 | 5.099 | -25.288 | 12.098 | -3.151 | 0.0097 | 32 |
| 本文所提出的 | 0.011 | 0.023 | 2.456 | 1.020 | 5.121 | -25.402 | 12.102 | -2.925 | 0.006 | 15 |

结束语 本文提出的粒子牛顿法能有效地解决非线性迭代对初值的选取问题,选择的镶嵌混合结构能较好地体现两算法结合的优势,建立的以时间及目标函数值标准差为自变量的混合概率函数能够较好地提高计算效率,得到更优的反演结果。

在实际利用多站大气电场进行反演时,数据没有那么归一化,导致了拟合结果偏大,所以对于场地误差的处理是今后实际操作中必需要考虑的。在算法执行时对于反演计算空间要进行一定的假设,没有根据的直接假设可能对计算效率影响较大,我们可以借鉴文献[7],结合雷达资料得到云底高度和云厚,通过对雷暴云的分层多少和云厚就可以给出每层电荷区的厚度。本文主要讨论从计算方法上提高反演拟合的效果,其在一定程度上提高了计算的精度,有一定的参考价值,利用该法能够通过多站大气电场反演得到雷暴云等效电荷,为研究其放电过程提供参考。但是雷暴云电荷结构反演涉及的问题很多,我们假设的模型也比较理想,如何根据实测资料更为全面地反映雷暴云水平尺度、电荷密度分布等都有待于在下一步工作中做更深入的研究。

参 考 文 献

- [1] 谭涌波,陶善昌,祝宝友,等. 云内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(4):1053-1065
- [2] 万浩江,魏光辉,陈强. 地面电场数据在雷电三维数值模拟中的应用[J]. 计算机测量与控制,2010,18(8):1916-1927
- [3] Marshall T C, Rust W D. Electric field soundings through thunderstorms[J]. J Geophys Res, 1991,96:22297-22306
- [4] Stolzenburg M, Marshall T C. Charged precipitation and electric field in two thunderstorms[J]. J Geophys Res, 1998,103(D16):19777-19790
- [5] Zhang Ting-long, Qie Xiu-shu, Yuan Tie, 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 (in Chinese), 2008, 32(5):1221-1227
- [6] 崔海华, 鄯秀书, 张其林, 等. 甘肃中川地区云闪的多站同步观测及雷暴的等效电荷结构[J]. 高原气象, 2009, 28(4):808-815
- [7] 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
- [8] 李炳宇, 萧蕴诗, 汪镭. PSO算法在工程优化问题中的应用[J]. 计算机工程与应用, 2004(18):74-76
- [9] 康玉梅, 刘建坡, 李海滨, 等. 一类基于最小二乘法的声发射源组合定位算法[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2010, 31(11):1648-1656
- [10] Langdon W B, Poli R. Evolving problems to learn about particle swarm and other optimizers[C]//Proc. CEC-2005. vol. 1, 2005:81-88
- [11] Parsopoulos K E, Vrahatis M N. Recent approaches to global optimization problems through particle Swarm optimization[J]. Natural Computing, 2002, 1(2/3):235-306
- [12] Garnier S, Gautrais J, Theraulaz G. The biological principles of swarm intelligence [J]. Swarm Intelligence, 2007, 30(1):3-31
- [13] 李庆扬, 王超能, 易大义. 数值分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2008:271-276
- [14] 陈渭民. 雷电学原理[M]. 北京:气象出版社, 2006:268-270
- [15] 姚莉, 佟濛, 苏建欣, 等. 用于辩证分析的多 Agent 辩论对话系统 MAS-Arguing 的设计与实现[J]. 小型微型计算机系统, 2011, 32(10):2109-2133

(上接第 231 页)

- [8] Muñoz A, Botía J A. ASBO: Argumentation system based on ontologies[M]//Cooperative Information Agents XII. Berlin Heidelberg, Springer, 2008:191-205
- [9] Prakken H. An abstract framework for argumentation with structured arguments[J]. Argument and Computation, 2010, 1(2):93-124
- [10] Vreeswijk G A W. Abstract argumentation systems[J]. Artificial intelligence, 1997, 90(1):225-279

- [11] Martnez D C, Garcla A J, Simari G R. Modelling well-structured argumentation lines[C]//Proceedings of the 20th International Joint Conference on Artificial Intelligence. 2007:465-470
- [12] 姚莉, 佟濛, 苏建欣, 等. 用于辩证分析的多 Agent 辩论对话系统 MAS-Arguing 的设计与实现[J]. 小型微型计算机系统, 2011, 32(10):2109-2133