

基于卡尔曼滤波和 TITAN 路径的雷电预警

胡 鹏¹, 伍瑞林², 伍光胜¹, 张志坚¹

(1. 广州市突发事件预警信息发布中心, 广州 511430; 2. 广州市荔湾区气象局, 广州 510140)

摘要: 雷电灾害是一种常见的自然灾害, 受其发生的随机性、瞬时性、地域性影响, 预警预报具有一定的难度; 为提高雷电短临预报的准确性和及时性, 文章提出了一种新型的基于 clique 聚类识别和卡尔曼滤波算法进行雷电识别及追踪外推的方法, 并在自主开发的广州市雷电监测预警系统中采用该算法和传统的雷暴识别、跟踪、分析路径算法 (TITAN) 分别实现了未来 1 小时逐 6 分钟 (即 6、12、…、60 min) 的雷电路径预报; 通过 2020 年 5 月至 10 月广州地区闪电定位数据对两种算法的检验分析表明: 两种算法基本性能接近, 均能有效识别、追踪和预测出大部分雷暴移动路径, 且经过优化的新算法在各时次的预测命中率上均已优于传统基于 TITAN 风暴路径的预测算法, 对于提高雷电临近预报的准确性有一定参考价值。

关键词: 雷电预警; 卡尔曼滤波; 聚类识别; 追踪外推; 雷暴

Lightning Proximity Early Warning Technology Based on Kalman Filter and Titan Path

HU Peng¹, WU Ruilin², WU Guangsheng¹, ZHANG Zhijian¹

(1. Guangzhou Emergency Warning Information Release Center, Guangzhou 511430, China;

2. Guangzhou Liwan District Meteorological Bureau, Guangzhou 510140, China)

Abstract: Lightning disaster is a common natural disaster, which is affected by the randomness, instantaneity and regionality of its occurrence, so it is difficult to warn early and forecast. In order to improve the accuracy and timeliness of lightning short-term and impending forecast, a new method based on clique clustering recognition and Kalman filter algorithm for lightning identification and tracking extrapolation is proposed. In the self-developed lightning monitoring and early warning system of Guangzhou City, the algorithm and the traditional thunderstorm identification, tracking, analysis, and now casting path algorithm (TITAN) are used to realize the lightning path prediction in the next hour by six minutes. By using the lightning location data in Guangzhou from May to October 2020, the two algorithms are tested and analyzed. The results show that the basic performance of the two algorithms is similar, and they can effectively identify, track and predict the thunderstorm moving path. Moreover, the optimized new algorithm is better than the traditional prediction algorithm based on Titan storm path in each time, which improves the accuracy of lightning proximity prediction has certain reference value.

Keywords: lightning warning; Kalman filter; clustering recognition; tracking and extrapolation; thunderstorm

0 引言

雷电是一种常见的天气现象, 常伴随着强对流等

天气过程出现, 容易造成破坏性极大的雷灾损失。广东省地势北高南低, 珠三角三面环山, 南朝南海, 呈一个半封闭低谷, 山地的向阳坡和迎风坡有利于海洋

收稿日期: 2021-06-08; 修回日期: 2021-08-03。

基金项目: 广州市科技计划项目(201803030014); 广东省气象局科学技术研究项目(GRMC2019M28)。

作者简介: 胡 鹏(1979-), 男, 湖南常德人, 硕士, 工程师, 主要从事气象信息技术方向的研究。

通讯作者: 伍光胜(1966-), 男, 广东普宁人, 大学本科, 正研级高工, 主要从事气象观测技术方向的研究。

引用格式: 胡 鹏, 伍瑞林, 伍光胜, 等. 基于卡尔曼滤波和 TITAN 路径的雷电预警[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(1): 196-201.

水汽抬升, 冷空气来临时容易出现锋面雷暴天气, 尤其广州市地处珠江三角洲, 城市范围大, 人口分布稠密, 是广东省雷击风险高值区之一^[1]。经统计, 2019 年广州市共发生云对地闪电约 23 万次, 平均地闪回击密度值为 30.64 次/(平方公里·年), 平均地闪强度为 10.44 kA, 发生雷灾事故 37 起, 占全省雷灾总数的 14.5%, 较 2018 年增加 48%, 因雷电灾害造成的经济损失 215.41 万元, 其中电力核电行业是雷灾的重灾区, 雷灾起数最多, 造成的经济损失最大。因此, 加强对雷电灾害产生的分析和研究, 尤其是对雷暴运动发展过程的研究, 从而实现高精度的雷电预警, 对进一步完善城市雷电灾害防御等方面有着重要意义。

目前, 国内外均主要利用闪电定位资料、大气电场资料和雷达回波资料开展雷电预警相关技术研究。如美国、加拿大、巴西、法国、英国、日本等均建立了闪电监测定位网, 其中美国于 20 世纪七八十年代就已开始建设雷电预警系统^[2]。在我国, 中国气象科学研究院近几年也开发出了综合利用雷达、卫星、闪电定位、大气电场及探空等多种资料的雷电临近预警系统^[3], 并投入业务运行; 梁巧倩、林良勋根据雷电发生的天气学分型和完全预报方法研究出了一种广州地区雷电短期预报方案, 对雷电潜势预报具有较高参考价值^[4]; 王凯等通过利用黄山周边地区雷暴过程大气电场仪和闪电定位仪数据, 选取预报因子建立了雷电预警的预报方程, 获得较好的应用效果^[5]; 路郁等对闪电定位数据进行聚类分析, 利用“膨胀-腐蚀”算法还原雷暴云, 并外推未来雷电落区^[6]。以上雷电预警预报研究都取得了一定进展, 但雷电发生时具有一定的随机性、瞬间性、地域相关性等特征, 增加了其规律研究的难度。近年, 随着计算机技术和模式识别技术的快速发展, 又出现了利用闪电定位和雷达回波数据识别、追踪雷暴云, 从而采用外推法进行雷暴运动趋势临近预报的方法, 并取得了一定成果^[7]。如 R. E. Rinchert 提出利用模式识别方法识别和匹配相邻强回波单体; J. T. Johnson 提出改进的 SCIT 算法^[8], 使雷暴跟踪的准确率提高到 90%; 文献 [9] 提出了利用闪电定位数据基于 DBScan 聚类算法进行雷暴云识别从而进行其运动趋势预测的方法, 可实现预测未来 15 min 内雷暴位置和覆盖区域预测。

本文提出了一种新型的基于 clique 聚类识别^[10]和卡尔曼滤波^[11-12]进行雷电识别及外推的方法, 并

在雷电预警监测系统中分别利用本方法和传统的 TITAN 风暴模型^[13]路径预测方法实现了未来 1 小时逐 6 分钟的雷暴路径外推, 基于 2020 年广州闪电定位数据对两种方法进行了有效性检验评估。

1 雷电识别外推算法设计

1.1 基于卡尔曼滤波的追踪外推算法

卡尔曼滤波是一种最优化的自回归数据处理算法, 是一种针对线性系统的高效率状态滤波技术, 在对时间序列分析、轨迹最优化等方面都有较好的效果^[14-15]。它是一种递归的滤波过程, 即只要获知上一时刻状态的估计值以及当前状态的观测值就可计算出当前状态的估计值, 因此不需要记录观测或者估计的历史信息 (如图 1)。

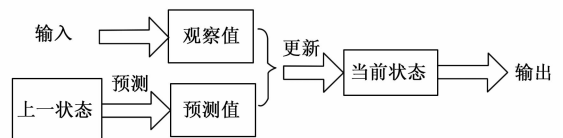


图 1 卡尔曼滤波过程

在雷暴预测应用中, 可以首先利用 Clique 空间网络聚类算法对雷暴单体进行识别, 然后利用卡尔曼滤波算法, 对识别出的雷暴单体运动进行线性外推。其中每 6 分钟设为一个时间段, 在时间段结束时, 采集融合该 6 分钟内的闪电数据, 按图 2 算法流程执行。

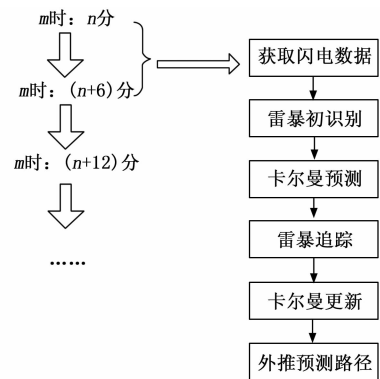


图 2 卡尔曼滤波路径外推流程图

1.1.1 基于 Clique 聚类算法的雷暴识别

由于闪电基本上由雷暴云团生成, 在空间上具有连续性, 雷暴云团的移动意味着闪电位置的移动, 因此在进行雷电外推时, 可通过聚类算法, 将在空间上具有一定连续性的离散闪电聚合成独立的雷电单体, 从而简化雷电外推过程。此处选择了运算速度较快, 抗干扰性较好, 可进行任意形状聚合的 Clique 网络

空间聚类算法^[16-18]。其基本步骤如下。

步骤 1: 闪电坐标网格化, 将 6 分钟内的所有闪电根据经纬度坐标放入网格化的平面直角坐标系;

步骤 2: 根据设定好的阈值参数, 扫描符合闪电频数阈值和雷暴面积阈值的网格并合并;

步骤 3: 记录符合阈值要求的网格为闪电簇区域;

步骤 4: 合并相邻的闪电簇区域并编号;

步骤 5: 扫描所有闪电簇区域, 利用椭圆法包络闪电簇, 返回识别的雷暴区域。

1.1.2 卡尔曼预测

把雷暴的移动过程看作是系统的变化, 应用卡尔曼滤波中的时间更新方程对前一时间段的雷暴进行预测, 从而得到现时间段的预测值。通过前一时间的系统状态 \mathbf{X}_{n-1} 和协方差矩阵 \mathbf{P}_{n-1} 预测最新时间的系统状态和协方差, 并把预测结果作为预测值保存下来。该过程使用时间更新方程:

$$\mathbf{X}_n^- = \mathbf{F}\mathbf{X}_{n-1} \quad (1)$$

$$\mathbf{P}_n^- = \mathbf{F}\mathbf{P}_{n-1}\mathbf{F}^T + \mathbf{Q} \quad (2)$$

其中: \mathbf{F} 是状态转移矩阵, 代表系统变化的方向和幅度, \mathbf{Q} 是状态转移噪声矩阵, 代表该过程可能产生的误差变量。

1.1.3 雷暴追踪

步骤 1: 获取在前一时间段的 N_1 个雷暴, 在雷暴识别步骤中获取现时间段识别的 N_2 个雷暴, 把两个相邻时间段的雷暴作为二分图中的两个集合 A 和 B ;

步骤 2: 计算 A 中每个雷暴 i 对应 B 中每个雷暴 j 的代价函数 C_{ij} , 其中 $0 < i \leq N_1$, $0 < j \leq N_2$, 公式 (3) 如下:

$$C_{ij} = d_p + d_s \quad (3)$$

其中: d_p 是雷暴中心点的位置差; d_s 是雷暴面积的平方根的差。将 C_{ij} 作为雷暴二分图之间边上的权值;

步骤 3: 针对带权值的雷暴二分图, 利用二分图最小权值匹配寻找到能使代价函数的和 $\sum C_{ij}$ 的匹配方案;

步骤 4: 完成匹配后, 把雷暴分为四个集合, 分别为前一时间段的已匹配和未匹配雷暴集合 M_{n-1} 和 UM_{n-1} , 以及现时间段的已匹配和未匹配雷暴集合 M_n 和 UM_n ;

步骤 5: 结合卡尔曼预测所得的预测值, 再分别在重合的基础上匹配 M_{n-1} 和 UM_n 、 UM_{n-1} 和 M_n ,

以此判断是否产生了雷暴分裂和合并, 并对分裂和合并的雷暴进行方向和速度上的校准;

步骤 6: 分析处理剩余雷暴, 添加新生雷暴, 舍弃追踪失败的雷暴, 并把雷暴追踪的结果作为观察值。

1.1.4 卡尔曼更新

应用卡尔曼滤波中的状态更新方程对雷暴状态进行更新, 从而得到现时间段的雷暴状态值。首先利用预测过程得到的协方差预测值结合观察矩阵计算卡尔曼增益 \mathbf{K}_n , 再利用系统的预测值 \mathbf{X}_{n-1} 和最新时间的观察值 \mathbf{Y}_n 更新系统的最新状态。该过程使用状态更新方程:

$$\mathbf{K}_n = \mathbf{P}_n^- \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{P}_n^- \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \quad (4)$$

$$\mathbf{X}_n = \mathbf{X}_n^- + \mathbf{K}_n (\mathbf{Y}_n - \mathbf{H} \mathbf{X}_n^-) \quad (5)$$

$$\mathbf{P}_n = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_n \mathbf{H}) \mathbf{P}_n^- \quad (6)$$

其中: \mathbf{X}_n 是更新后的后验状态矩阵, \mathbf{P}_n 是更新后的后验协方差矩阵, \mathbf{H} 为观察模型, \mathbf{R} 是观察噪声矩阵。

1.1.5 外推预测路径

根据更新后得到的雷暴状态, 通过线性外推得到雷暴预测路径, 以此外推未来 1 小时逐 6 分钟 (即 6、12、……、60 min) 的雷暴状态, 得到一条雷暴外推路径; 在每次时间段结束都可以进行迭代外推, 从而不断更新且精确化外推路径。

1.2 基于 TITAN 风暴路径的追踪外推算法

基于 TITAN 风暴路径进行雷电追踪和外推则是目前应用较多的另一种雷电临近预报方法。其主要过程也包括: 闪电融合、聚类识别、追踪外推^[19-20]。

1.2.1 闪电融合

由于 TITAN 风暴移动路径时间间隔和雷达回波探测间隔均为 6 min, 首先需要将每次采集到的零散闪电定位数据融合成逐 6 min 过程, 与雷达的探测间隔相对应, 融合过程如图 3 所示。

当前时间采集到闪电, 计算出起始和截止时间, 将其对应 06/12/18/24/30/36/42/48/54/00 分钟时段内, 按照时段的起止时间, 从数据表中检索出已存在的闪电进行融合, 从而形成一个逐 6 min 的闪电集合, 作为后续进行聚类识别和外推的雷电数据。

1.2.2 聚类识别

此处采用 DBSCAN (density-based spatial clustering of applications with noise) 密度聚类算法, 用距离作为闪电密度的聚合因素, 将多个离散的闪电聚

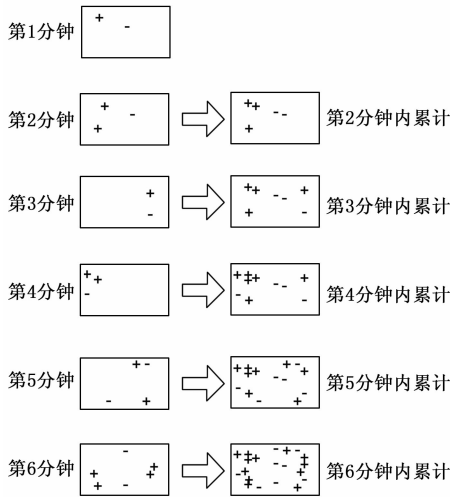


图 3 闪电融合过程图

合成若干个雷电单体, 离散的闪电聚合成雷电单体后, 利用雷电单体内的闪电位置, 加权计算出雷电单体的质心位置, 再以质心位置与风暴移动路径进行空间关联和外推。

1.2.3 外推预测

利用成熟的 TITAN 雷暴识别、追踪、分析和临近预报算法, 从前后两个时次的雷达回波图中识别出雷暴单体, 利用两个单体之间的位置偏移, 计算出雷暴的移动方向和移动速度, 从而得到风暴的移动路径, 将其作为雷电的移动路径。由于 TITAN 数据接口提供的是未来 1 小时逐 10 min 的风暴移动路径, 还需要进行差值运算生成未来逐 6 min 的风暴移动路径以匹配雷电预报路径。

通常雷电单体会随着风暴移动, 但雷电单体和风暴位置往往并不重叠, 同时由于闪电定位仪和雷达探测设备之间数据处理存在时间差, 因此需利用时间和空间关联方法, 根据聚类出来的雷电单体的时间和质心位置, 匹配到最近时间和空间距离最近的风暴移动路径, 将风暴预报路径平移后, 作为雷电单体的预报路径, 对雷电单体进行逐 6 min 的位置外推 (图 4 中虚线部分), 生成未来 1 小时逐 6 min 的雷电预报产品。

2 雷电预警模型和平台设计

基于上述两种雷电识别外推方法和广州范围内闪电定位仪、大气电场仪、雷达等雷电实况监测数据, 广州市气象局开发了雷电监测预警系统, 可在 GIS 平台上有效提供当前雷电实况数据和未来 1 小时雷电预报产品, 并对两种识别外推方法进行有效性检验评

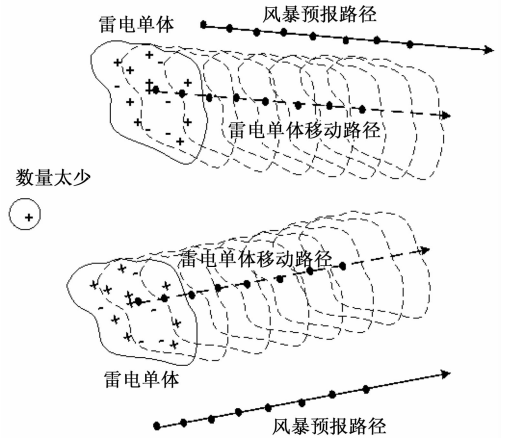


图 4 移动路径外推图

估, 可广泛应用于防雷减灾、雷灾调查、预警预报服务等领域。其整体方案如图 5 所示。

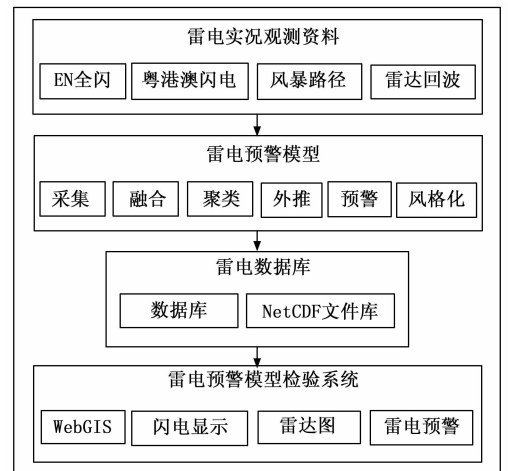


图 5 系统结构图

1) 雷电实况监测资料: 包括 EN 全闪、粤港澳闪电、风暴路径和雷达回波及广州新建大气电场仪等。

2) 雷电预警模型: 包括采集、融合、聚类分析、外推、预警和网格化等过程。①采集: 从广东省气象探测数据中心的通用气象数据访问接口采集雷达回波、EN 全闪、粤港澳闪电、风暴路径等雷电实况资料, 入库存储; ②融合: 将逐分钟的闪电定位融合成逐 6 min 的数据, 与雷达观测时间进行匹配; ③聚类分析: 将离散的闪电定位聚合成雷电单体; ④外推: 利用风暴移动路径, 对雷电单体进行未来 1 小时的外推; ⑤预警和网格化: 将地图划分成 1 × 1 km 分辨率的网格, 设置每个格点的雷电红色和黄色预警标准, 利用未来 1 小时逐 6 min 的雷电单体位置, 按照距离权重法, 插值成未来 1 小时逐 6 分钟的雷电精细

化格点预警产品。

3) 雷电数据库: 采用关系型数据库和 NetCDF 文件库相结合的方式存储雷电实况监测和预警数据。其中关系型数据库用于保存闪电和风暴路径等结构化雷电数据; NetCDF 文件库用于存储雷达回波和雷电精细化格点预警产品等网格数据。

4) 雷电预警模型检验系统: 在 WebGIS 地理信息系统中, 实现雷达回波、闪电、风暴移动路径和雷电精细化格点预警产品的综合显示, 通过对雷电数据的可视化分析, 检验雷电预警模型的输出结果。

系统界面如图 6, 其中黑色路径为基于 TITAN 风暴路径生成的未来 1 小时雷电路径预报, 灰色路径为基于卡尔曼滤波算法生成的未来 1 小时雷电路径预报。

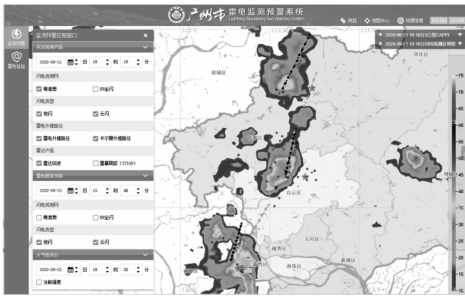


图 6 系统界面

3 实验结果与分析

3.1 数据来源

为了对两种外推算法结果的有效性进行检验评估, 本文使用了 2020 年 5 月 1 日至 2020 年 10 月 27 日广东省气象局数据接口所提供的广东 EN 全闪观测网的全省闪电定位数据作为检验结果的数据来源。

3.2 检验方法

定义命中率和提前量为两个检验指标。

其中命中率是针对每个预报路径点, 读取对应时刻发生的闪电, 如闪电定位数据显示半径 5 km 范围内有地闪, 则认为命中, 否则认为空报, 即:

$$\text{命中率} = \frac{N_{\text{命中}}}{N_{\text{命中}} + N_{\text{空报}}} \quad (7)$$

其中: $N_{\text{命中}}$ 为命中次数, $N_{\text{空报}}$ 为空报次数。

提前量则是针对每个预报路径点, 其对应时刻的未来 1 小时内发生闪电, 则认为命中, 计算第一次闪电和当前预报之间的时间差, 作为预报的提前量。

统计时, 以间隔 6 分钟为一个时间片, 从起始时间至结束时间整个时间段内逐时间片计算每个预测路

径的命中率和提前量。

3.3 结果分析

统计后的检验结果如图 7 可见, 两种外推算法的命中率均随预测时间的增加而衰减, 越是临近当前时刻, 预测命中率越高, 未来 6 分钟预测命中率最高可达到 87.5%, 未来 60 分钟预测命中率最高 27.2%。且由于 2020 年 8 月份对基于卡尔曼滤波的外推算法进行了参数优化, 将聚类识别过程中的网格密度增大后, 其预测命中率在 2020 年 9 月至 10 月的检验中已明显优于基于 TITAN 路径的外推算法。而两种外推算法在各时次的预测提前量上差别不大, 平均相差 1 分钟左右, 整体表现比较接近。但在命中次数上, 基于 TITAN 路径的外推算法要明显高于基于卡尔曼滤波的外推算法, 其主要原因还是因为后者所采用的 Clique 聚类算法对分散的较小型雷暴单体识别率低于前者采用的 DBSCAN 密度聚类算法, 需进一步进行优化改进。

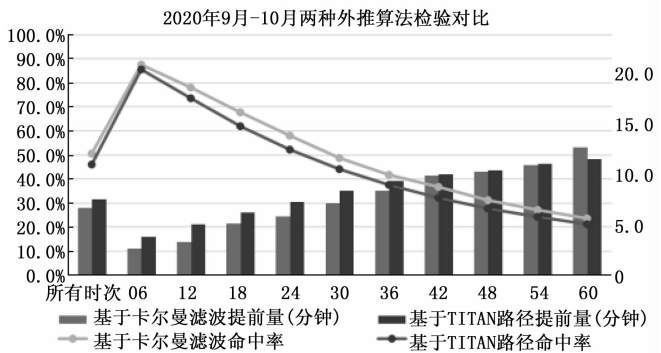
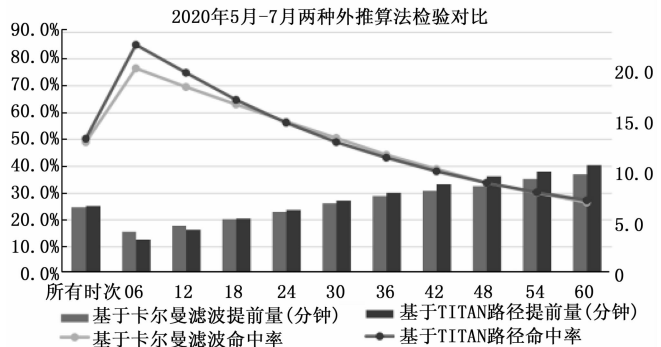


图 7 检验结果对比

4 结束语

本文提出了一种基于 clique 聚类识别和卡尔曼滤波算法进行雷电识别及外推的方法, 并利用该方法和传统的基于 TITAN 风暴路径外推的两种算法, 研究开发了广州雷电监测预警系统, 该系统接入实时雷电

气象数据, 可生成未来 1 小时逐 6 分钟 $1 \times 1 \text{ km}$ 分辨率的雷电精细化格点预警产品, 并对预报产品进行检验, 可为雷电预警业务化提供有效平台。实际数据检验表明, 两种算法均能有效识别追踪雷暴并进行未来 1 小时路径预测, 经过参数优化后, 基于卡尔曼滤波的算法在预测命中率上已优于传统的基于 TITAN 风暴路径的外推算法, 下一步还需要在聚类识别算法上进行研究优化, 进一步提高雷电预警的准确性、及时性。

参考文献:

- [1] 刘三梅, 吕海勇, 陈绍东, 等. 广东省雷电风险区域研究 [J]. 资源科学, 2014, 36 (11): 2337-2344.
- [2] 郝秀书, 刘冬霞, 孙竹玲. 闪电气象学研究进展 [J]. 气象学报, 2014, 72 (5): 1054-1068.
- [3] 吕伟涛, 张义军, 孟 青, 等. 雷电临近预警方法和系统研发 [J]. 气象, 2009, 35 (5): 10-18.
- [4] 梁巧倩, 林良勋. 一种可业务化的雷电潜势预报方案 [J]. 气象科技, 2008, 36 (2): 150-154.
- [5] 王 凯, 朱 浩, 刘安平, 等. 黄山风景区雷暴电场特征及预警方法研究 [J]. 气象与环境学报, 2015, 31 (5): 184-189.
- [6] 侯荣涛, 朱 斌, 冯民学, 等. 基于 DBSCAN 聚类算法的闪电临近预报模型 [J]. 计算机应用, 2012, 32 (3): 847-851.
- [7] 周康辉, 郑永光, 蓝 渝. 基于闪电数据的雷暴识别、追踪与外推方法 [J]. 应用气象学报, 2016, 27 (2): 173-181.
- [8] 段艺萍, 徐亚娟, 支树林. 改进的 SCIT 算法在人工防雹作业中 [J]. 气象与防灾研究, 2014, 37 (4): 42-49.
- [9] 高文胜, 张博文, 周瑞旭, 等. 基于雷电定位系统监测数据的雷暴云趋势预测 [J]. 电网技术, 2015, 39 (2): 523-529.

- [10] 魏 韬, 沈 平, 王 伟, 等. 基于大气电场值的雷电发生识别方法 [J]. 计算机应用与软件, 2018, 35 (2): 86-90.
- [11] 李霁杭, 肖 辉, 万齐林, 等. 基于 2017 年 5 月 7 日广州特大暴雨分析影响半径对集合卡尔曼滤波方法同化效果的影响 [J]. 热带气象学报, 2019, 35 (1): 73-88.
- [12] 徐 壮, 彭 力. 带非线性约束的自适应高斯和卡尔曼滤波目标跟踪算法 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (6): 241-246.
- [13] 周毓荃, 潘留杰, 张亚萍. TITAN 系统的移植开发及个例应用 [J]. 大气科学学报, 2009, 32 (6): 752-764.
- [14] 周艳青, 薛河儒, 姜新华, 等. 基于改进的卡尔曼滤波算法的气象数据融合 [J]. 计算机系统应用, 2018, 27 (4): 184-189.
- [15] 贾 勇, 陈晓飞. 基于卡尔曼滤波的两轮平衡姿态检测系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (12): 53-56.
- [16] 曾绍琴, 李光强, 廖志强. 空间聚类方法的分类 [J]. 测绘科学, 2012, 37 (5): 103-106.
- [17] 袁湘玲, 马虹旭, 陈石定, 等. 黑龙江省闪电活动特征及其与地面相对湿度的响应关系 [J]. 气象与环境学报, 2020, 36 (5): 91-96.
- [18] 贾 骏, 朱 旭, 闫茂德, 等. 高速公路气象数据融合滤波与短时雨雾预测 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (3): 214-219.
- [19] 赵 琴, 司景璐, 杨慧燕, 等. 一种雷暴运动路径的预测方法 [J]. 广东气象, 2021, 43 (3): 19-21.
- [20] 杨 璐, 韩 丰, 陈明轩, 等. 基于支持向量机的雷暴大风识别方法 [J]. 应用气象学报, 2018, 29 (6): 680-689.

(上接第 195 页)

- [17] 袁学松. 路侧装置修正位置预测模型在 Vanet 混合路由算法中的应用 [J]. 重庆大学学报, 2018, 41 (8): 100-110.
- [18] HOUMER M, HASNAOUI M L. An Enhancement of Greedy Perimeter Stateless Routing Protocol in VANET [J]. Procedia Computer Science, 2019, 160: 101-108.
- [19] HAIDER S, ABBAS G, ABBAS Z H, et al. DABFS: a robust routing protocol for warning messages dissemination in VANETs [J]. Computer Communications,

- 2019, 147: 21-34.
- [20] 张 婷, 张德干, 高瑾馨. 面向智能车联网的缺失数据估计新方法 [J]. 计算机应用研, 2019, 36 (11): 3460-3463, 3492.
- [21] DIN S, PAUL A, REHMAN A. 5G-enabled Hierarchical architecture for software-defined intelligent transportation system [J]. Computer Networks, 2019, 150: 81-89.
- [22] 范茜莹, 黄河河, 朱钧宇, 等. 无人机辅助车联网环境下干扰感知的节点接入机制 [J]. 通信学报, 2019, 40 (6): 90-101.