

汪开斌. 基于一次雷电灾害的安徽 ADTD 定位精度分析[J]. 陕西气象, 2024(5): 77-82.

文章编号: 1006-4354(2024)05-0077-06

基于一次雷电灾害的安徽 ADTD 定位精度分析

汪开斌

(芜湖市气象局, 安徽芜湖 241000)

摘要: 2022 年 8 月 26 日安徽南陵发生了一次重大雷电灾害事件, 利用距离雷电灾害点 62.0 m 处监控摄像机拍摄的视频数据, 通过分析闪电的光学特征, 确定了雷电灾害点闪电过程各次回击的精确时间, 采用公式计算法和测绘图测量法, 校验了安徽 ADTD 探测的 4 个闪电定位点的定位精度。结果表明: (1) 4 个定位点在地面 0.0~31.5 m 高度范围内为同一个地理位置(即雷电灾害点), 4 个定位点之间的距离为 174~581 m, 算术平均值为 371 m, 几何平均值为 348 m, 中值为 386 m; (2) 4 个定位点与雷电灾害点之间的距离为 1 106~1 670 m, 算术平均值为 1 433 m, 几何平均值为 1 417 m, 中值为 1 478 m; (3) 4 个定位点位于雷电灾害点方位角 232.57°~245.27°, 算术平均值为 237.48°, 几何平均值为 237.42°, 中值为 236.04°。

关键词: ADTD; 定位精度; 雷击案例验证法; 回击

中图分类号: P413

文献标识码: A

定位精度是闪电定位数据的重要参数, 如果定位的地理位置不准确, 会影响到地闪密度、雷击点密度等闪电定位数据的准确性和可靠性, 更会影响到闪电定位数据在灾害性天气预报预警^[1]、雷电灾害防御规划^[2]、雷电防护和雷电灾害调查^[3-4]等方面的有效应用。近年来, 人们已经关注定位精度的质量, 顾宇丹等^[5]认为上海市两套闪电定位系统的定位精度大部分集中在 5 km 以内, 主要在 0~2 km 范围内; 张悦等^[6]发现粤港澳闪电定位系统定位精度的算术平均数为 279 m; 侯安校等^[7]得出海南省闪电定位系统定位精度平均为 1 602 m。这些研究表明: 不同的闪电定位系统定位精度具有一定的差异性。

分析定位精度需要有雷击点位置和与之相对应的回击。利用人工触发闪电和雷电观测试验获取的数据满足要求并可得出定位精度的修正值^[6,8], 但这种方法需要投入大量人力物力, 很难针对每一套系统全面开展。实践中, 校验闪电定位系统定位精度常采用雷击案例验证法^[7,9-10], 这

种方法经常会出现雷击点位置或雷击时间不精准的问题, 如包坤等^[9]基于一次雷击事件计算的二站、三站、四站定位时的定位误差, 确定的灾害点是判断“选定”位置, 回击时间是依据闪电定位系统有探测数据“就近”一次回击时间; 侯安校等^[7]评估海南省闪电定位系统定位精度应用的雷击案例是雷灾事件记录的时间前后 10 min (或 20 min、30 min)、距离雷灾地点不超过 10 km 取最近点的定位数据; 卢炳夫等^[10]判断的定位指标是雷击发生前后 30 min、雷击点半径 3 km 和 1 km 范围内。

2022 年 8 月 26 日 19:25 安徽南陵发生了一次重大雷电灾害事件, 监控摄像机拍摄的视频影像近距离(62.0 m)完整记录了雷电灾害发生的过程。通过分析闪电的光学特征, 确定了雷电灾害点闪电过程各次回击的准确时间; 采用公式计算法和测绘图测量法, 对安徽 ADTD 探测的闪电定位点与雷电灾害点之间、各定位点之间的定位精度进行了定量分析, 得出了此次闪电过程定位

收稿日期: 2023-06-06

作者简介: 汪开斌(1966—), 男, 汉族, 安徽南陵人, 本科, 高级工程师, 主要从事雷电灾害防御技术工作及相关研究。

基金项目: 安徽省重点研究与开发标准化专项(202004h07020001)

精度的误差值,为安徽 ADTD 数据的有效应用提供参考。

1 数据来源

1.1 视频数据

1.1.1 数据采集现场情况 雷电灾害点位于南陵某户外活动场所。监控摄像机位于该场所南边边缘的地势最高点,距离雷电灾害点 62.0 m,可记录灾害点范围内的全景。经现场测量,视频帧照片全景可见雷电灾害点位置的垂直高度为地面以上 31.5 m。气象主管机构雷电灾害调查记录载明:雷电灾害点经纬度为 118.328 7°E,30.915 3°N。

1.1.2 视频数据处理 视频数据来源于监控摄像机的管理单位。视频数据为 MPEG-4 视频编解码格式,视频帧率为 25 帧/s(含起始帧);图像传输采用 100 Mbit/s 光纤,由 GPS 同步技术 NTP(network time protocol)授时,授时机制与安徽 ADTD 一致,两者具有相同的时间精度^[11];该网络时延 ≤ 20 ms,可认定视频帧照片上时间戳的时间与安徽 ADTD 数据的时间具有一致性^[12]。

使用 Adobe Premiere 软件逐帧阅读视频数据并提取帧照片,以画面显示的时间戳转换到

19:25:02 的第一帧为基准,向前、向后按照次序逐帧提取视频帧照片。根据帧照片的内容,从 19:25:01.750 000 0 起到 19:25:03.458 333 3 止(含起止时刻)共得到 42 帧照片,按照英文字母顺序编号依次为 a、b、c、…、z、aa、ab、…ap,其中 g 为 19:25:02.000 000 0。雷电灾害点的地闪梯级先导—回击—直窜先导—继后回击的演变过程见图 1(只列入主要反映闪电特征的帧照片,帧照片仅对人和建筑物做了模糊处理)。为了与安徽 ADTD 数据进行对比分析,将帧照片的时间间隔 1/24 s 转化成 41.666 666 7 ms。

1.2 闪电定位数据

2022 年 8 月 26 日安徽省 ADTD 和合肥多普勒雷达、芜湖市气象局相控阵雷达探测数据表明:影响南陵某户外活动场所的局地强对流天气云团在发展、移动、消亡过程中,共发生地闪回击 126 次,时间为 19:02—20:42。

根据雷击发生过程中视频帧照片上时间戳,本文重点研究 19:25 的闪电定位数据,数据表明:19:25 共发生了 7 次回击。闪电定位数据的主要特征参数见表 1。

表 1 2022-08-26T19:25 安徽 ADTD 闪电定位数据的主要特征参数

序号	帧照片序号	地理坐标	雷电流		探测到的 站点数/个
			幅值/kA	陡度/(kA/ μ s)	
1	19:25:01.845 554 5	118.289 9°E,30.900 0°N	-65.488 4	-20.956 3	6
2	19:25:01.951 393 9	118.300 7°E,30.900 6°N	-29.031 9	-13.763 3	5
3	19:25:02.134 026 3	118.292 7°E,30.892 2°N	-25.554 1	-12.580 4	5
4	19:25:02.474 946 4	118.289 0°E,30.888 9°N	-32.637 1	-16.067 5	5
5	19:25:23.855 313 9	118.305 4°E,30.922 0°N	-32.734 9	-16.760 2	6
6	19:25:23.795 703 9	118.306 3°E,30.922 9°N	-31.437 8	-14.371 5	5
7	19:25:24.094 131 9	118.287 4°E,30.925 2°N	-31.446 8	-13.417 3	5

2 结果分析

2.1 雷电灾害点地闪回击的确认

逐帧审读帧照片并进行灰度值比对,确定人员伤亡过程发生在图 1 的第 e 帧~第 ap 帧,持续时间为 1.541 666 7 s。根据帧照片并结合已有光学观测对闪电梯级先导、回击、直窜先导、继后回击等过程的认识^[12-17],可得到如下判断。

2.1.1 雷电灾害发生前的回击 第 a 帧(19:25:01.750 000 0)及之前 2 min 内各帧照片的亮度与第 a 帧基本一致,无明显变化;安徽 ADTD 数据显示:19:25:01.845 554 5(表 1 中序号 1)之前 2 min 内,只产生了两次回击,分别在 19:24:00.201 694 6 和 19:23:29.795 312 7。结合视频中市民的行为动作,可以确定 19:25:01.750 000 0 之前的回击距

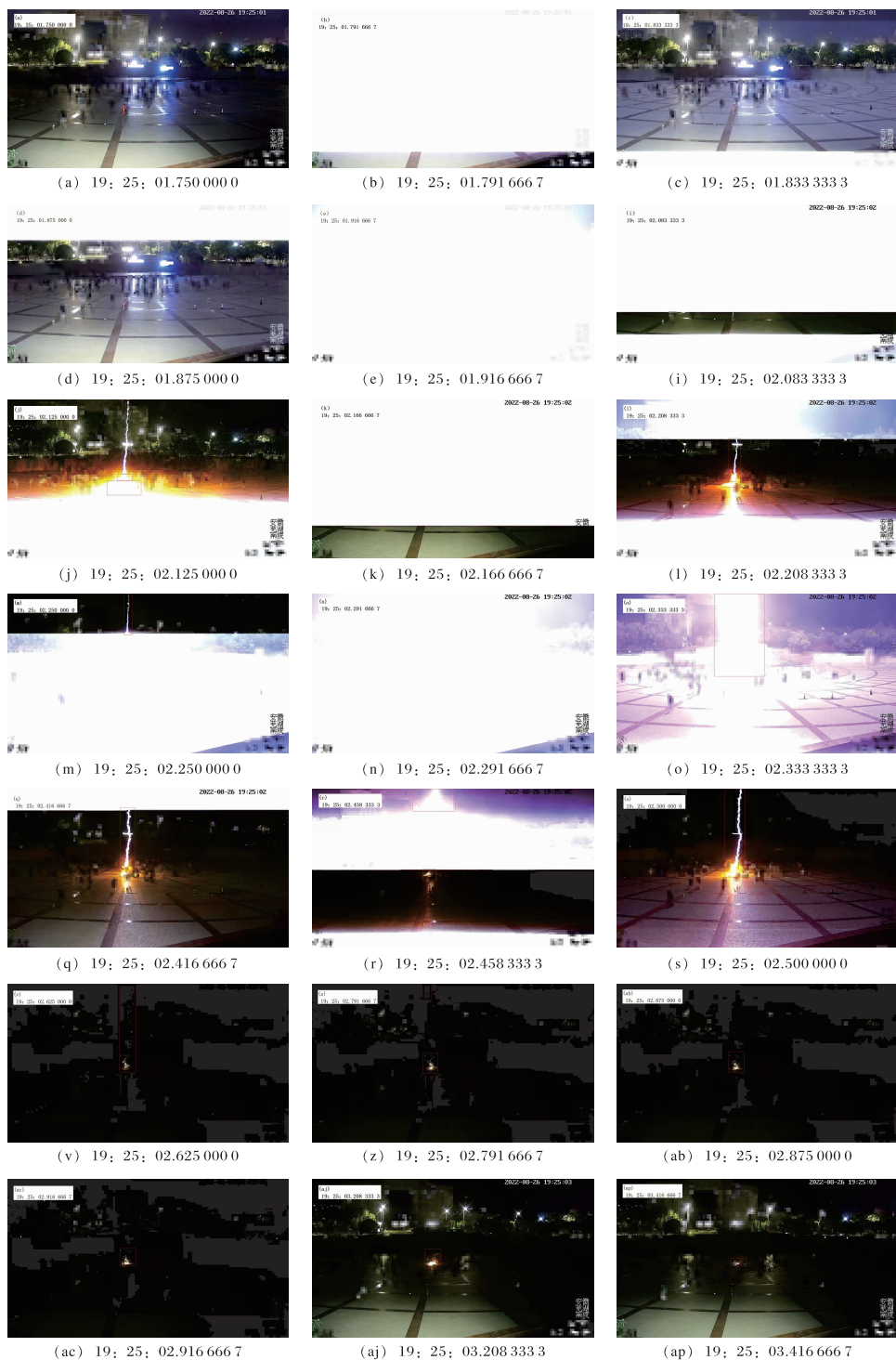


图1 安徽南陵 2022 年 8 月 26 日某场所雷电灾害点地闪活动演变过程(部分照片)

离雷电灾害点相对较远,本次事件与 19:24:00.201 694 6 和 19:23:29.795 312 7 的回击没有关系。

2.1.2 首次回击 RS1 第 b、c、d 帧照片的图像在采集、传输过程中监控摄像头可能遭到闪电流

光直射(或照射),也有可能处在闪电流光开始或消失的时刻。从第 b(19:25:01.791 666 7)帧时刻稍微往前一点时间,下行先导已经伸出该场所上空的云底,开始以梯级先导形式向地面发展,闪电通道发光增强,这是发生在连续电流过程中的

一种大电流脉冲事件,即 M 分量^[13]。连续电流中的 M 分量持续时间主要集中在 3 ms 以内,相邻 M 分量之间的时间间隔主要分布在 0~10 ms 之间^[13];而连续电流的持续时间与连续电流中 M 分量的个数存在线性关系,连续电流持续时间越长,M 分量的个数就越多,且长连续电流(持续时间>40 ms)很少有大幅值的 M 分量^[14]。19:25 时间段内第 1 次回击为 19:25:01.845 554 5(表 1 序号 1),该时刻距离第 c(19:25:01.833 333 3)、d(19:25:01.875 000 0)帧照片的时间分别是 12.221 2 ms、29.445 5 ms;该回击的雷电流幅值-65.488 4 kA,说明帧照片间隔时间内存在多个 M 分量的可能性较小。因此判断:第 b(19:25:01.791 666 7)帧时刻稍微往前一点时间是梯级先导开始,第 c(19:25:01.833 333 3)、d(19:25:01.875 000 0)帧时刻之间产生了回击,雷电灾害点 RS1 的时间为 19:25:01.845 554 5。

2.1.3 第 1 次继后回击 RS2 安徽 ADTD 探测到 RS1 之后的 1 次回击发生在 19:25:01.951 393 9(表 1 序号 2),对比帧照片的时间,该时刻位于第 e(19:25:01.916 666 7)帧照片记录的时间之后 34.727 2 ms,位于完全曝光的第 f(19:25:01.958 333 3)帧照片(图略)记录的时间之前 6.939 4 ms。经比对,视频帧照片显示的光学特征及时间间隔与文献^[15-16]观测的结果具有一致性,因此可以确定雷电灾害点 RS2 的时间为 19:25:01.951 393 9。

2.1.4 第 2 次继后回击 RS3 安徽 ADTD 探测到 RS2 之后的 1 次回击发生在 19:25:02.134 026 3(表 1 序号 3),该时刻位于第 j(19:25:02.125 000 0)帧照片记录的时间之后 9.026 0 ms,位于曝光的第 k(19:25:02.166 666 7)帧照片记录的时间之前 32.640 7 ms;回击产生的雷电流幅值为-25.554 1 kA,明显小于 RS1。第 j(19:25:02.125 000 0)帧照片中可见一条上细下粗、近似垂直的“闪电光柱”,近地面呈现的锥形光团可能是灾害点周边多个未连接上行先导或脉冲,也有可能是地闪连接点位于近地面的电晕流光;第 k 帧曝光可能是受连续电流的影响,闪电流光持续存在。因此可以确定雷电灾害点 RS3 的时间为 19:25:02.134 026 3。

2.1.5 第 3 次继后回击 RS4 安徽 ADTD 探测到 RS3 之后的 1 次回击发生在 19:25:02.474 946 4(表 1 序号 4),该时刻位于第 r(19:25:02.458 333 3)帧照片记录的时间之后 16.613 1 ms,位于第 s(19:25:02.500 000 0)帧照片记录的时间之前 25.053 6 ms。根据第 k(19:25:02.166 666 7)帧~第 s(19:25:02.500 000 0)帧照片曝光程度、光柱亮度及形状、背景亮度变化情况判断,是一个上行先导、直窜先导和回击的过程,画面呈现不规则的曝光是闪电连续电流中存在各种分量^[14,17]等。因此可以确定雷电灾害点 RS4 的时间为 19:25:02.474 946 4。

2.1.6 RS4 之后的回击 19:25:02.500 000 0(第 s 帧)之后未见到有闪电光学特征的帧照片。因此可确定:安徽 ADTD 于 19:25:23.855 313 9(表 1 序号 5)探测到的以及该时刻后的所有回击与本次雷电灾害没有无关。

综上,本次雷电灾害的闪电过程至少有 4 次回击,4 次回击的时间与安徽 ADTD 探测到地闪定位点的时间具有一致性,因此,雷电灾害点及回击的时间可以用来校验安徽 ADTD 定位精度。

2.2 闪电定位点与雷击灾害点之间的距离

闪电定位点与雷电灾害点之间、各闪电定位点之间的距离 S ,由公式(1)^[18]计算得出。

$$S=r \cdot \cos^{-1}[\cos(\alpha_0)\cos(\alpha_l)\cos(\beta_0-\beta_l)+\sin(\alpha_0) \cdot \sin(\beta_l)]。 \quad (1)$$

公式(1)中, S 为两点之间的距离,单位为 km; r 为地球半径, $r=6371$ km; α_0 、 β_0 分别表示雷电灾害点的纬度和经度, α_l 、 β_l 分别表示地闪定位点的纬度和经度,纬度、经度的单位为弧度。

为了精确比较实际存在的误差,根据闪电定位点和雷电灾害点的经纬度,在当地规划部门的测绘地形图上得到了精准的测绘值。闪电定位点与雷电灾害点之间的距离见表 2。应用最小二乘法分析测绘值与计算值之间的关系,结果表明:测绘值与计算值具有线性回归特征,回归系数为 2.534 8,截距为 91.412, $R^2=0.998 2$,具有很高的拟合度;同时,闪电定位点位于雷电灾害点方位 $239.12^\circ \pm 6.15^\circ$ 之间。

表 2 2022-08-26 安徽南陵雷电灾害闪电定位点与雷电灾害点之间距离和方位角

定位点与雷电灾害点	计算值/m	测绘值/m	方位角/(°)
定位点 1—雷电灾害点	1 458	3 775	245.27
定位点 2—雷电灾害点	1 106	2 888	238.58
定位点 3—雷电灾害点	1 498	3 926	233.49
定位点 4—雷电灾害点	1 670	4 306	232.57
算术平均值(几何平均值)	1 433(1 417)	3 724(3 685)	237.48(237.42)
中值	1 478	3 851	236.04

闪电定位点之间的距离见表 3。测绘值与计算值具有线性回归特征,回归系数为 2.626,截距为-8.150 7, $R^2=0.999\ 9$,具有很高的拟合度。

表 3 2022-08-26 安徽南陵雷电灾害

闪电定位点之间距离		单位:m
定位点之间	计算值	测绘值
定位点 1—定位点 2	377	984
定位点 1—定位点 3	292	759
定位点 1—定位点 4	394	1 020
定位点 2—定位点 3	407	1 057
定位点 2—定位点 4	581	1 522
定位点 3—定位点 4	174	452
算术平均值(几何平均值)	371(348)	966(906)
中值	386	1 002

3 结论和讨论

应用监控摄像机在距离雷电灾害点 62.0 m 拍摄的视频数据,确定了雷电灾害闪电过程是一次多回击地闪过程,并采用雷电灾害点 4 次回击校验安徽 ADTD 定位精度,结论如下。

(1)4 个定位点在地面 0.0~31.5 m 高度范围内为同一个地理位置(即雷电灾害点),4 个定位点之间的距离:计算值为 174~581 m,算术平均值为 371 m,几何平均值为 348 m,中值为 386 m;测绘值为 452~1 522 m,算术平均为 966 m,几何平均值为 906 m,中值为 1 002 m。

(2)4 个定位点与雷电灾害点之间的距离:计算值为 1 106~1 670 m,算术平均值为 1 433 m,几何平均值为 1 417 m,中值为 1 478 m;测绘值

为 2 888~4 306 m,算术平均值为 3 724 m,几何平均值为 3 685 m,中值为 3 851 m。

(3)4 个定位点位于雷电灾害点的方位角为 232.57°~245.27°,算术平均值为 237.48°,几何平均值为 237.42°,中值为 236.04°。

(4)在以往研究中,人们往往关注某 1 次回击定位点与雷电灾害点的位置关系^[4,9,19],而此次是一次单通道、多回击的闪电过程,不同定位点在近地面具有相同的闪电通道和回击点。虽然一次闪电过程的定位精度并不能代表闪电定位系统的定位误差,计算值与测绘值也存在一定的差距,但两者具有显著的线性关系,计算值或测绘值本身也具有收敛性。结论以及计算值与实际值(测绘值)的线性关系是否可作为安徽 ADTD 定位精度的修正值使用,还需要有一定的实例来验证。

参考文献:

[1] 张林梅,苏亚乔,庄晓翠. 新疆北部短时强降水过程的闪电特征统计分析[J]. 陕西气象,2023(3): 41-48.

[2] 徐耕,白铎,焦美玲,等. 庆阳市闪电活动与雷电灾害特征分析[J]. 陕西气象,2020(4):40-44.

[3] 张磊,许勇,付亚平,等. 基于闪电定位资料的太朴山广电发射台雷电防御分析[J]. 陕西气象,2016(1):40-42.

[4] 汪开斌. 一次雷电灾害成因分析及防御对策[J]. 安徽师范大学学报(自然科学版),2012,35(6): 572-576.

[5] 顾宇丹,虞敏,林文旻. 上海市两套闪电定位系统探测能力对比分析[J]. 气象与环境科学,2018,41(3):126-131.

- [6] 张悦,吕伟涛,陈绿文,等. 基于人工引雷的粤港澳闪电定位系统性能评估[J]. 应用气象学报,2022,33(3):329-340.
- [7] 侯安校,周方聪,邓发斌,等. 近10年海南省雷电灾情及其对闪电定位性能的评估[J]. 气象研究与应用,2022,43(2):80-86.
- [8] 陈绿文,吕伟涛,张义军,等. 粤港澳闪电定位系统对高建筑物雷电的探测[J]. 应用气象学报,2020,31(2):165-174.
- [9] 包坤,赖晋科,李庆申,等. 基于一次机场雷击事件评估 ADTD 地闪定位性能[J]. 气象科技,2020,48(4):459-464.
- [10] 卢炳夫,植耀玲,陈丹,等. 广西 VLF/LF 和 ADTD 闪电定位系统对比分析[J]. 气象研究与应用,2020,41(2):39-44.
- [11] 王树宝,拱长青,王富良,等. TCP/IP 网络时间同步机制的误差分析[J]. 计算机工程,2009,35(18):111-112.
- [12] CUMMINS K L, KRIDER E P, OLBINSKI M, et al. A case study of lightning attachment to flat ground showing multiple unconnected upward leaders[J]. Atmospheric Research, 2018, 202: 169-174.
- [13] 张义军,吕伟涛,张阳,等. 广州地区地闪放电过程的观测及其特征分析[J]. 高电压技术,2013,39(2):383-392.
- [14] 张义军,吕伟涛,陈绍东,等. 广东野外雷电综合观测试验十年进展[J]. 气象学报,2016,74(5):655-671.
- [15] 李俊,张义军,吕伟涛,等. 一次多回击自然闪电的高速摄像观测[J]. 应用气象学报,2008,19(4):401-411.
- [16] 王晓蕾,蔡汉生,赵贤根,等. 典型负地闪放电过程的光学观测分析[J]. 高电压技术,2020,46(12):4300-4308.
- [17] 武斌,张广庶,王彦辉,等. 青藏高原东北部闪电 M 变化多参量观测[J]. 物理学报,2013,62(18):189202.
- [18] 张科杰,谢超,郑琦玉. 湖北 ADTD 闪电定位系统监测数据质量分析[J]. 气象科技,2022,50(2):179-188.
- [19] 殷启元,范祥鹏,张义军,等. 一次“晴天霹雳”致死事件分析[J]. 气象学报,2019,77(2):292-302.