

文章编号: 2096-1618(2023)01-0092-06

新疆一次工业污水排气筒雷击起火事故的分析及对策

钱 勇¹, 张华明², 张淑霞³

(1. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 新疆 乌鲁木齐 830002; 2. 山西省气象灾害防御技术中心, 山西 太原 030002; 3. 贵州省气象灾害防御技术中心, 贵州 贵阳 550000)

摘要:为分析2017年9月8日克拉玛依市新疆油田某天然气处理站工业污水排气筒雷击起火事故原因,通过雷灾事故现场情况调查,结合气象数据资料,确定此次事件是由一次负极性地闪的首次回击导致,闪电发生时间是2017年9月8日07时55分41.48817秒,电流强度-37.3 kA,电流陡度-8.8 kA/ μ s。闪电击中排气筒旁边的树,因排气筒和金属围栏都未接地,由静电感应和电磁感应导致排气筒和金属围栏出现火花放电,引燃了排气筒排出的可燃性气体。针对存在的问题,提出了相应的防范措施。构建简化的仿真模型,评估了雷击瞬间人接触金属围栏门时,通过人体的瞬态电流及其可能产生的危害影响。

关键词:气象灾害;雷电防护;静电感应;电磁感应;仿真模型;瞬态电流

中图分类号:P429

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2023.01.014

0 引言

闪电是一种瞬态的大电流放电过程,其路径长度可延伸数千公里。云对地(cloud-to-ground, CG)闪电是电力、能源、通信系统面临的最严重威胁之一,被联合国有关部门列为“最严重的十种自然灾害之一”。近年来,随着科学技术的不断发展,大型石油储备库不断增多、高压电力线路越来越密集、通信设施不断升级,雷电产生的灾害损失愈演愈烈,人们对雷电防护也越来越重视。通过对相关雷击事故的深入分析,了解雷灾发生的具体原因,有助于人们对雷电致灾机理的认识,在此基础上开展有针对性的防护措施,可以减少或避免类似灾害事故的再次发生,对于防灾减灾具有重要的意义^[1-4]。

雷击引起的电击危险程度取决于多种因素,其中最重要的是雷击的持续时间、最大幅度、土壤电阻率以及结构体的接地网络,它们决定了结构体周围的跨步电压和接触电压。当雷击中物体时,会向结构体中注入巨大的电流,其电流峰值可达到几十甚至几百 kA,在不到几毫秒的时间内完成放电,短暂的时间内可以显著提高结构体周围的地电位,形成地电位反击,对结构体周围的电气设备造成损坏。除物理损坏之外,CG闪电产生的电磁场与其他电路的相互作用,也可能导致重要电气设施的损坏,甚至对人员造成安全隐患^[5]。

在中国,雷电灾害是危害程度仅次于暴雨洪涝、气象地质灾害的第三大气象灾害,许多研究人员开展了

雷电灾害事故的分析。田德宝等^[6]统计分析了2012-2017年全国雷电灾害事故,发现电力行业雷电灾害事故次数最多,其次是通信、石化和学校,交通和金融等行业发生雷电灾害事故相对较少。殷启元等^[7]分析了一次雷击致死事件,认为此次事件是雷电首先击中一棵大树,然后通过旁侧闪络击中树下人员头顶,从而导致人员死亡。李京校等^[8]利用多源气象资料,分析了2011年6月23日故宫博物院雷击事故,结合现场调查认为此次事件既有直接雷击、也有雷电感应及雷电波侵入。宋平健等^[9]分析了北京密云某养殖场雷击事故,认为此次事件是静电感应在金属棚上产生高电位,而金属棚钢结构未接地,棚顶与地面存在电位差,当电位差达到临界值后,发生旁侧闪络,当牲畜与钢结构接触,电荷通过牲畜向地面释放的,并提出了相应的防护措施。冯民学等^[10]利用闪电定位数据资料,分析了仪征储油罐雷击事故,认为此次事故是雷电感应在油罐罐体与浮顶两根连接电缆上产生较大的电位差,从而导致油罐罐体与浮顶之间密封处产生击穿放电,引起油汽外泄燃爆成灾,并提出相应的防护措施。徐鹏等^[11]通过对配电变压器雷击事故分析,提出配电变压器防雷措施目前存在的问题,并给出相应的防雷改进措施。以上研究涉及能源、电力、古建筑等领域,通过对雷电灾害事故的具体分析,提出针对性的防范措施,对雷电防护有积极的指导意义。

本文分析了2017年9月8日发生在克拉玛依市新疆油田某天然气处理站工业污水排气筒雷击起火事故。利用气象部门闪电定位系统,结合雷达、卫星等数据资料,确定了此次事故的放电过程。根据周围影像资料及现场调查情况,分析此次雷灾事故的原因,并借

收稿日期:2022-01-24

基金项目:中国沙漠气象科学研究基金资助项目(Sqj2020006);山西省气象局科研资助项目(SXKZDDW20205204, SXKMSDW20217116)

助仿真软件,对此次雷击事故进行模拟仿真,评估了雷击瞬间人接触金属围栏门时对人身产生的影响,并据此提出减少此类雷电灾害事故的防护建议。

1 事故背景

2017 年 9 月 8 日克拉玛依市白碱滩区出现强对流天气过程,07 时 53 分左右新疆油田某天然气处理站工业污水排气筒遭雷击起火。根据目击者描述的时间和位置,调取周围的影像资料,发现闪电击中事故点周边的树林,导致其中一个工业污水排气筒以及周围的铁管防护栏多处出现火花放电的现象,放电后铁管护栏火花放电现象消失,而工业污水排气筒由于排出的气体有可燃性气体,开始逐渐燃烧起来,随着火势逐渐变大再加上风力的作用,导致旁边另一个工业污水排气筒开始燃烧,图 1 为事故点周围监控拍摄的影像资料。调查组赶赴现场时,厂区已将附近树木砍伐,雷击点遭到破坏,不能准确判定雷击点的位置,但从影像资料上可以初步判定,闪电可能击中事故点旁边树梢,通过现场接地电阻测量,发现排气筒以及周围金属围栏均未接地,图 2 为本次雷灾事故现场情况示意图。



图 1 雷灾事故现场影像资料
(编号 1~8 是雷击之后连续的 8 帧图像,编号 17 是第 17 帧图像)

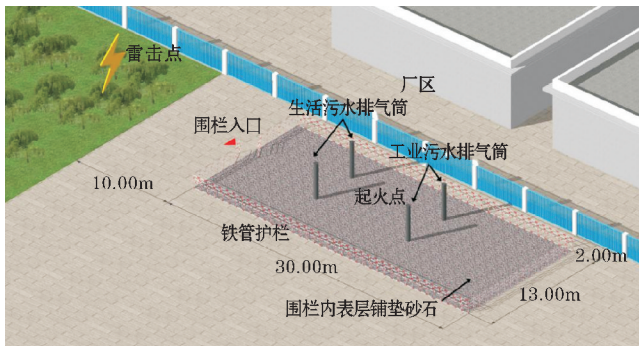


图 2 雷灾事故现场情况示意图

2 天气背景

2017 年 9 月 7 日 20 时 500 hPa 高空形势显示,欧亚范围内为两槽两脊的环流形势。根据静止卫星 FY-2G 相当黑体温度产品,选取此次天气过程 2 个时次的云顶亮温,并与前后 30 min 内的闪电活动进行叠加,如图 3 所示。可以发现,此次雷击事故是由北疆塔城地区至克拉玛依一带的对流云团造成的。9 月 8 日 07 时左右对流云团已缓慢西移至克拉玛依市,08 时左右整个白碱滩区被对流云团所覆盖,雷击事故点 (85.1972057 °E, 45.6824972 °N) 处于对流云中心区域,云顶亮温最低值接近 -50 °C。云顶亮温可用来表征对流活动,亮温越低表明云顶越高,云层越厚,对流越旺盛,说明此时段雷击事故点处于对流云发展旺盛阶段^[12]。

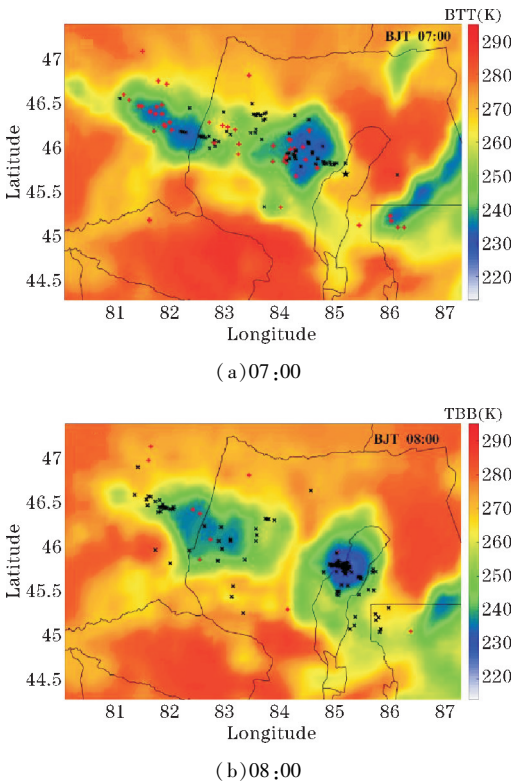


图 3 FY-2G 相当黑体温度与前后 30 min 的闪电频次的叠加
(★为雷击事故点,×为负极性地闪,+为正极性地闪)

根据气象部门闪电定位系统 (ADTD) 及克拉玛依市 C 波段天气雷达资料,分析了事故点周围雷达回波与闪电的分布。图 4 为 9 月 8 日 07:46、07:54、08:00 雷达回波组合反射率与后 6 min 内闪电频次的叠加。根据影像资料显示雷电灾害事故发生时刻为 07:53:20,但是通过 07:46 的雷达回波与闪电频次叠加图可以发现,该时刻事故点未处于强回波区域,回波强度在 20~30 dBZ,且事故点周围没有闪电发生,而在 07:54 事故点处于强回波区域,回波强度>45 dBZ,且旁边有一次负极性地闪发生,随后在 08:00 对流活动开始减弱,闪电频次减少,对流云团向西移动。

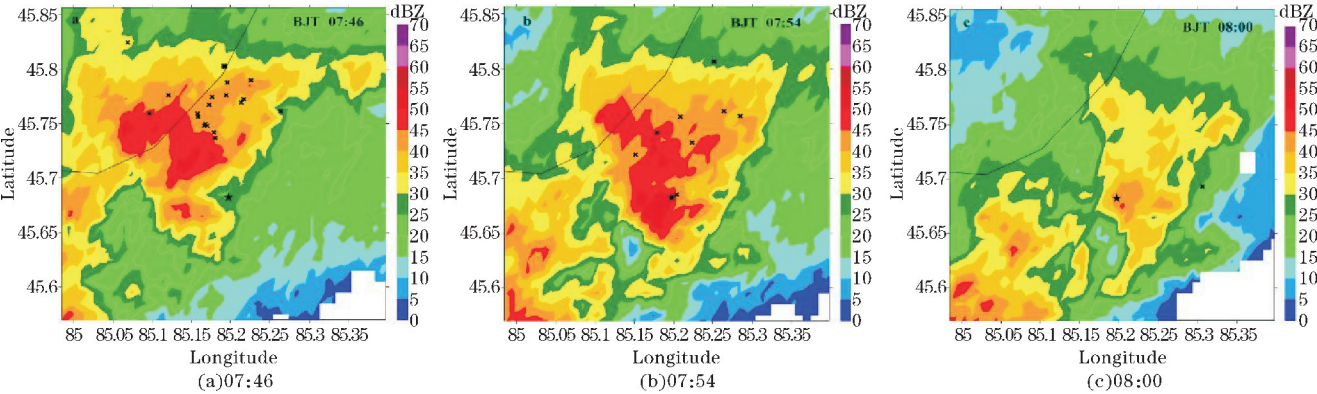


图4 雷达组合反射率与后 6 min 内的闪电分布(★为雷击事故点,x为负极性闪电,+为正极性闪电)

图5 是以雷击事故点为中心周围15 km、4 km的闪电分布。可以发现,07:00–15:00事故点周围15 km内共发生闪电46次,主要集中在07:00–08:00,事故点周围4 km以内只有一次闪电,距离事故点612 m,至少有4个探测站监测到了此次闪电过程,采用四站算法定位。根据影像资料显示,导致雷击事故的闪电只有首次回击,因此可以判定,距离事故点最近的闪电导致了此次事故的发生,闪电发生时间07:55:41.48817,电流强度–37.3 kA,电流陡度–8.8 kA/ μ s。

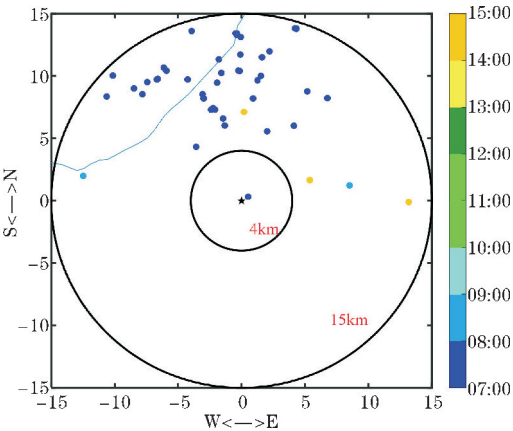


图5 事故点周围 15 km、4 km 范围内的闪电分布(★为雷击事故点)

3 雷击事故分析及对策

3.1 事故情况分析

根据影像资料显示,雷击瞬间在排气筒顶端未发现起火点,之后排气筒顶端出现火点,而围栏上共有9处出现火花放电现象。由于事故发生在早上,天还没有完全亮,影像资料比较暗,以致于发生在围栏侧边4个火点的具体位置不能确定。图6给出了发生在围栏入口处的5个火点位置,第1个火点发生在围栏的拐角处,第2个火点发生在悬挂警示牌的位置(警示牌材质是铁皮,用铁丝固定在围栏上),第3个火点发生在围栏入口两个门之间,第4个火点发生在门与围

栏的衔接处,第5个火点发生在另一个围栏拐角处。



图6 围栏起火点现场情况

根据现场情况以及影像资料,可初步判定此次雷击事故主要是由静电感应、电磁感应导致的。当云中负电荷在事故点上方聚集时,由静电感应在排气筒顶部聚集了大量的正电荷,当闪电放电后,云中电荷迅速被中和,聚集在排气筒顶端的电荷变成自由电荷泄放,因排气筒没有接地,电荷不能及时泄入大地,导致排气筒顶端出现高电位,达到临界值时对空放电,产生的电火花引燃排放气体。金属围栏不是一个整体而是由多段拼接组成,属于不可靠的等电位连接(图7),并且存在大量的闭合环路,当闪电放电时,因距离雷击点较近,闪电电磁感应使围栏闭合环路产生非常高的感应电动势,当电势差达到临界值时发生击穿放电的现象。此外,由于雷击点距离围栏较近,地电位抬升对围栏之间的放电也有一定的贡献。

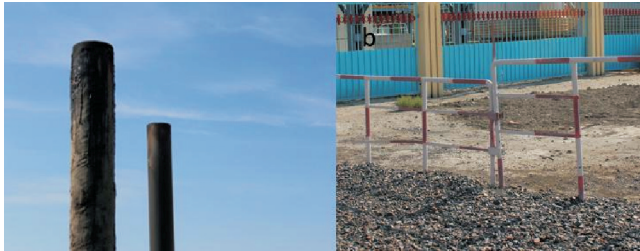


图7 灾后排气筒管口烧灼痕迹及现场围栏连接情况

3.2 仿真分析

围栏入口是人经常接触的位置,从人身安全的角

度考虑,将围栏入口两个门之间的放电进行具体分析。图8为围栏入口现场情况,两个门之间有个铁链锁(红色矩形框内),门间隔约为0.1m。铁链锁是倾斜悬挂在两个门之间,发生在两个门之间的放电现象,可能是两个门之间电势差或者是门与铁链锁之间的电势差导致击穿放电。借助仿真软件CDEGS,根据事故现场情况,构建仿真模型,仿真分析中暂不考虑铁链锁的影响,假设人的双手与围栏两个门接触,评估雷击瞬间是否对人造成伤害。



图8 围栏入口现场情况

CDEGS具有接地系统设计分析、电磁干扰研究等功能,其核心主要是基于电磁场理论计算在稳态、故障、雷击等暂态条件下,由地上或地下任意形状导体构成网络周围的电磁场分布与导体、地表电位分布等。该软件包含8个工程应用模块:RESAP(用于土壤电阻率分析和土壤结构分析)、MALT(用于任意土壤结构的低频接地分析)、MALZ(用于任意土壤结构的频域接地分析和复杂埋设网络的阴极保护分析)、SPLITS(用于负载或故障电流分布与共用走廊中的感应和电容干扰分析)、TRALIN(用于架空和埋设的导体线路或复杂的管装电缆结构的参数计算)、HIFREQ(用于任意带电导体网络产生的电磁场的频域分析)、FCDIST(用于故障电流分析)和FFTSES(用于作快速傅里叶变换)^[13-17]。

本次仿真主要用到HIFREQ和FFTSES两个应用模块,对输入信号进行快速傅里叶变换,在频域中进行电磁场计算,再利用快速傅里叶反变换计算得到系统在时域的瞬态响应。国内外一些专家学者借助CDG-ES开展了雷击暂态环境下电磁场时域或者频域的分析、架空线路耦合感应过电压的计算、仿真雷击建筑物地电位的分布等相关方面的分析。Nazari等^[5]建模分析雷击输电线杆塔时停靠在输电线下方的车辆表面的感应过电压以及人接触车辆是通过人体的电流,另外他们通过两种方式建立雷击模型,一种是直接在输电线杆塔顶端注入短路雷电流,另外一种是采用天线理论AT模型,将闪电通道等效为一根5200m的垂直有

损的单极天线,研究发现电流注入模型可以准确地预测塔附近雷击造成的影响,而无法准确揭示远距离雷击造成的辐射和感应效应。Aghabarati等^[18]建模分析了雷击风力发电机时相关的电磁干扰(EMI)效应,表明屏蔽电缆可以提供良好的防雷效应保护。刘明杰等^[19]基于CDEGS仿真软件对地铁杂散电流分布规律展开研究,针对现有单区间单机车运行模式中存在的不足,构造地上牵引供电系统,并基于石家庄地铁3号线的线路条件,搭建更贴近实际工况的多区间多机车运行模型,通过对比两种供电模式的仿真结果,表明采用多区间供电模型研究杂散电流分布规律的必要性。

3.2.1 简化的等效仿真模型

Aghabarati等^[20]基于CDEGS建立两种雷击模型。第一种模型包括沿闪电通道的电流分布,将闪电通道等效为1300m的有损耗的垂直单极天线,该模型需要占用大量的计算资源,耗时较长;第二种模型仅包括注入塔顶的浪涌电流。对2个模型的性能在频域和时域都进行了评估,分析表明,雷击模型对电场的影响较大,对磁场的影响较小。考虑到此次雷击事故对金属围栏的影响主要以磁场为主,本文采用第二种雷击模型,节约计算时间。将大树等效为70Ω/m导体^[7],树高8m,入地2m,在顶端注入雷电流。围栏采用内径0.02m,外径0.022m的钢管,钢材料的相对电阻系数为12,相对渗透性为250,围栏导体表面涂有0.0005m厚的电阻系数为10000Ω/m的绝缘材料,围栏高1m,埋地深度0.5m。由于围栏周围铺垫砂石,当人站在围栏入口时可认为与大地绝缘,将人体等效为1000Ω的导体。采用均匀的土壤模型,土壤电阻率为352Ω/m,相对介电常数为1,相对磁导率为1,图9为简化的等效仿真模型。

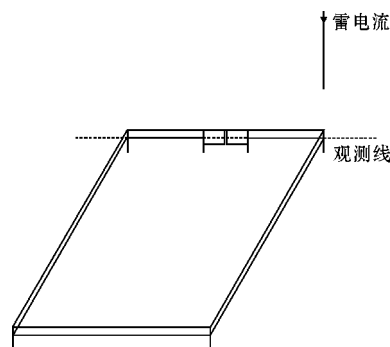


图9 简化的仿真模型

3.2.2 初始雷电流波形

利用标准的雷电流波形作为激励源。根据闪电定位系统监测的电流强度-37.3kA,电流陡度-8.8kA/μs,通过FFTSES模块内置雷电波暂态发生器生成标准的雷电波形,其表达式为

$$I(t) = 49294.75(e^{-48598.39t} - e^{-675086.6t})$$

雷电流波形如图10所示。

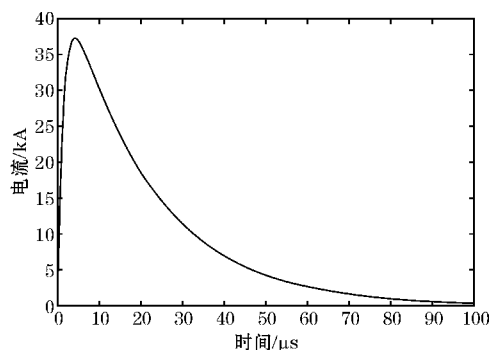


图10 初始雷电流波形

3.2.3 通过人体的瞬态电流

图11为雷击大树时通过人体的瞬态电流,电流峰值为5.36 A。Dalziel等^[21]指出当一个人接触由瞬态电流激励的导体时,人体耗散的能量近似为

$$W = R_B \int_0^T i_B^2(t) dt$$

其中 i_B 是通过身体电流的有效值, R_B 是身体电阻。Dalziel 计算了导致心脏出现纤维性颤动最小能量,当身体电阻取500 Ω时, W 为27 J,当身体电阻取1000 Ω时, W 为54 J。此次事故分析中身体电阻取500 Ω,根据上述仿真结果,计算10 μs内身体耗散能量为0.017 J,满足 Dalziel 提到的安全水平,表明该区域安全。对于西北地区大电流的地闪时常发生,假设此次雷击大树时电流强度为500 kA,通过人体瞬态电流峰值为71.8 A,10 μs内身体耗散能量为30.01 J,已超出人体所能承受的最大能量27 J。

在以往的防雷安全检查中发现,大部分重点企业油库废水池都安装了金属围栏,由于部分厂区废水池设置在厂区外围,从而忽略了给金属围栏做防雷接地等防护措施。通过此次事故发现,雷击金属围栏附近时,金属围栏出现了火花放电现象,虽不会给厂区带来严重的影响,但从人身安全角度考虑,会给进出工作人员带来安全隐患。因此,为避免可能存在的危害,在做好防雷接地的同时,建议在围栏上悬挂警示标记,雷雨天气人员尽量避免与金属结构体接触。

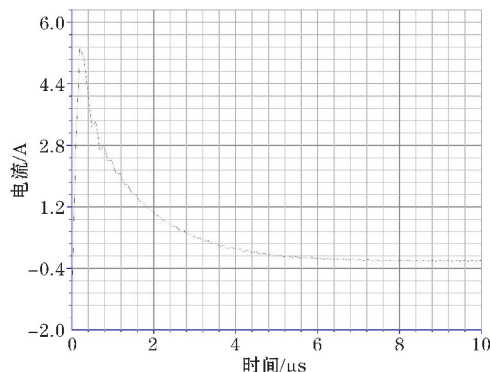


图11 通过人体的瞬态电流

4 结论与讨论

对2017年9月8日克拉玛依市新疆油田某天然气处理站工业污水排气筒雷击起火事故进行调查分析,利用气象资料分析了此次雷击事故是由一次负极性地闪的首次回击导致的,闪电发生时间为07时55分41.48817秒,电流强度37.3 kA,电流陡度8.8 kA/μs。

根据雷电灾害事故现场情况及影像资料,可以判定工业污水排气筒主要由静电感应导致出现火花放电引燃可燃性气体,金属围栏主要是由电磁感应导致出现多处火花放电现象,其中地电位抬升也有一定的贡献。建议采取相应的防范措施:对有可燃性气体排出的排气筒应与接地装置连接,为起到更好的防护效果可加装阻火装置;周围铁管防护栏均应做好等电位连接,并与接地装置连接;根据仿真结果,雷击瞬间人接触围栏入口两个门时,通过人体的瞬态电流,虽不会导致人身伤亡,但是仅限于此次雷击事故,对于西北地区大电流地闪时常发生,为避免可能存在的危害,建议在围栏上悬挂警示标记,雷雨天气人员尽量避免与金属结构体接触;及时获取雷电预警信息,采取合理的规避措施;雷雨天气监控值班人员应提高警觉,及时发现雷击位置或起火点,采取应急措施。

此次事故的直接原因是工业污水排气筒和金属围栏都没有与接地装置连接,且金属围栏没做好等电位连接。以往在开展雷电灾害隐患排查过程中,容易忽视小型的金属围栏的防护措施。通过此次雷电灾害事故,相关检查部门及企业应引起重视,同时也不可忽略对人身可能存在的伤害,对存在风险的区域,通过悬挂警示标记、业务培训等方式,最大限度减少灾害事故的发生。

参考文献:

- [1] 马明,吕伟涛,张义军,等.我国雷电灾害及相关因素分析[J].地球科学进展,2008,23(8):856-865.
- [2] 崔逊,高金阁,樊荣.WWLLN与江苏省ADTD闪电定位系统数据的对比分析[J].大气科学学报,2016,39(2):270-279.
- [3] 程向阳,朱浩,周昆,等.安徽地区一次致灾雷暴过程的闪电特征分析[J].暴雨灾害,2018,37(3):265-273.
- [4] 殷启元,范祥鹏,陈绿文,等.广东省雷电伤亡事故特征分析[J].自然灾害学报,2019,28(6):204-213.
- [5] Nazari M, Aghabarati A, Moini R, et al. Evaluating

- hazards of lightning strike on stationary vehicles under overhead lines[C]. 5th International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC-Beijing). IEEE, 2017.
- [6] 田德宝,冯瑜骅,张雪慧,等. 2012-2017 年全国雷电灾害事故统计分析[J]. 科技通报, 2020, 36(5): 46-51.
- [7] 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.
- [8] 李京校,宋平健,甘璐,等. 故宫博物院“6·23”雷击事件分析[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2014, 6(4): 326-335.
- [9] 宋平健,李京校,李如箭,等. 北京密云某养殖场雷电灾害事故分析与对策[J]. 中国农学通报, 2016, 32(2): 163-169.
- [10] 冯民学,罗慧,焦雪. 闪电定位资料对仪征储油罐雷灾成因的分析应用[J]. 气象科学, 2007, 27(6): 679-684.
- [11] 徐鹏,李世元,甘鹏,等. 雷击配电变压器事故分析及防雷措施研究[J]. 电瓷避雷器, 2011, 242(4): 57-62.
- [12] 孙萌宇,郝秀书,孙凌,等. 北京城区相继多次降雹的一次强雷暴的闪电特征[J]. 大气科学, 2020, 44(3): 601-610.
- [13] Ladan S, Aghabarati A, Moini R, et al. Induced transient currents on stationary vehicles under power lines hit by lightning[C]. 2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). IEEE, 2016: 571-575.
- [14] 谭波,童雪芳,张康伟,等. 雷击线路杆塔时埋地油气管道防护措施与防护效果研究[J]. 电瓷避雷器, 2019, 288(2): 9-13.
- [15] Ladan S, Aghabarati A, Moini R, et al. Electromagnetic shielding analysis of buildings under power lines hit by lightning[C]. 2016 33rd International Conference on Lightning Protection (ICLP). IEEE, 2016: 1-5.
- [16] Taha M, Li L, Wang P. Estimation Performance of the Lightning Protection System in an Urban 110 kV Grounding Grid Substation[J]. Results in Engineering, 2020: 100140.
- [17] 马超,刘渝根,梁科,等. 基于 CDEGS 降阻材料对接地电阻影响的仿真[J]. 电瓷避雷器, 2019(6): 13-19.
- [18] Aghabarati A, Nazari M, Moini R, et al. Lightning susceptibility analysis of cables in a wind turbine [C]. 2017 IEEE 5th International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC-Beijing). IEEE, 2017: 1-6.
- [19] 刘明杰. 基于 CDEGS 的杂散电流动态特性分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- [20] Aghabarati A, Moini R, Fortin S, et al. Electromagnetic shielding analysis of buildings for different models of lightning strike[C]. 2017 International Symposium on Electromagnetic Compatibility-EMC EUROPE. IEEE, 2017: 1-6.
- [21] Dalziel C. A Study of the Hazards of Impulse Currents[J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems, 1953, 72(5): 1032-1043.

Analysis and Countermeasures of a Lightning Fire Accident of Industrial Sewage Exhaust Funnel in Xinjiang

QIAN Yong¹, ZHANG Huaming², ZHANG Shuxia³

(1. Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China; 2. Meteorological Disaster Prevention Technology Center of Shanxi Province, Taiyuan 030002, China; 3. Meteorological Disaster Prevention Technology Center of Guizhou Province, Guiyang 550000, China)

Abstract: In order to analyze the cause of lightning stroke fire accident of industrial sewage exhaust funnel of a natural gas treatment station in Xinjiang Oilfield, Karamay City on September 8, 2017. Through the investigation of the scene of the thunder disaster accident and combined with the meteorological data, it can be determined that the event was caused by the first return stroke of a negative ground lightning. The lightning occurred at 07:55:41.48817 on September 8, 2017, with current intensity of -37.3 kA and current steepness of -8.8 kA/μs. The lightning strikes the tree beside the exhaust cylinder, because the exhaust cylinder and metal fence are not grounded. The electrostatic discharge and electromagnetic induction lead to spark discharge of the exhaust cylinder and metal fence, and ignite the flammable gas discharged from the exhaust cylinder. In view of the existing problems, the corresponding preventive measures are put forward. A simplified simulation model is constructed to evaluate the transient current passing through the human body and its possible harmful effects when people touch the metal fence door at the moment of lightning strike.

Keywords: meteorological disaster; lightning protection; electrostatic induction; electromagnetic induction; simulation model; transient current