

杨春明. 建筑物对大气电场畸变影响的数值模拟[J]. 陕西气象, 2025(2): 73-78.

文章编号: 1006-4354(2025)02-0073-06

建筑物对大气电场畸变影响的数值模拟

杨春明

(马鞍山市气象局, 安徽马鞍山 243000)

摘要: 利用马鞍山 2 个大气电场仪站点 2019—2021 年的监测资料, 借助 MATLAB 工具, 运用数理统计、有限差分法, 模拟了建筑物对大气电场测量值的畸变影响, 对模拟结果进行了检验。结果表明: 大气电场仪安装在建筑物顶部时, 模拟的电场畸变系数与建筑物的高度成正相关, 建筑物越高, 大气电场畸变系数也越大, 畸变越显著, 畸变区域越趋于半球状; 在一定宽度范围内, 大气电场畸变系数随着建筑物宽度增加而减小, 建筑物最窄处电场电势最密集, 电场畸变效应表现也最剧烈。大气电场仪安装在地面时, 模拟的大气电场畸变系数与建筑物距离呈正相关; 在不同高度、宽度的群体建筑物之间, 畸变效应最显著位置为群体建筑物顶部最窄处, 群体建筑的共同屏蔽作用, 使得大气电场值较小区域位于群体建筑之间。模拟畸变系数对长期监测大气电场均值的修订具有一定的参考意义。

关键词: 建筑物; 大气电场; 畸变; 数值模拟

中图分类号: P427.3

文献标识码: A

大气电场仪是基于雷电效应唯一能贯穿于雷电发生、发展、消散过程的雷电监测设备, 可实时连续监测 10~15 km 范围内大气电场强度的变化, 可直观地反应目标区电场强度的分布状况, 能够记录闪电发生前、发生时的电场变化^[1-2], 因此被用于雷电预警系统^[3-6]。根据大气电场强度演变, 可以预警局部区域雷电活动, 满足户外人员活动、敏感通信电子场所、危化场所、旅游景点以及重大项目工程建设等对雷电精准预警的需求。大气电场仪已广泛应用于各行业, 成为预防雷电灾害的重要手段^[7-10]。受地面建筑物影响, 大气电场分布会改变^[11], 建筑物对大气电场产生了畸变效应^[12], 导致大气电场测量值和原始值存在一定的差异, 降低了利用大气电场仪进行雷电预警的可靠性。国内关于各地大气电场变化特征^[13-15], 大气电场与污染物关系^[16]、气象要素关系^[17], 以及利用大气电场资料开展雷电预警^[18-20]的研究较常见, 但环境对大气电场畸变影响的相关研究成

果还不多见。因此, 开展建筑物对大气电场测量值影响的研究, 有利于揭示大气电场畸变的相关规律。本文借助 MATLAB 工具, 运用数理统计、有限差分方法, 通过数值仿真模拟了不同高度、宽度的单体建筑和群体建筑对大气电场产生的畸变影响, 为大气电场仪安装环境的选择、电场测量值的修订以及雷电预报预警提供参考。

1 资料与方法

1.1 资料来源

大气电场仪数据来源于马鞍山市气象局在当地布设的 2 台 Pre-storm 2.0 大气电场仪 2019—2021 年的大气电场监测资料。资料信息包括日期、时间、大气电场强度和极性参数。2 台大气电场仪站点分别布设在马鞍山采石矶和安徽工业大学东校区, 其中采石矶站点大气电场仪安装在地面, 位于李白纪念馆旁, 安徽工业大学东校区站点安装在楼顶, 2 个站点间相距 5.8 km。同步大气电场监测资料来自马鞍山市气象观测站。

收稿日期: 2024-03-20

作者简介: 杨春明(1974—), 男, 汉族, 安徽明光人, 学士, 高工, 从事雷电防护和雷电预警等研究。

1.2 数值仿真方法

1.2.1 有限差分法 大气中的静电场问题可归结为在给定电荷分布和边界条件下求解泊松方程^[21]。利用有限差分方法可以计算地面建筑物对大气电场畸变的影响,可得到安装环境对大气电场仪测量结果造成影响的畸变系数。对于二维电场满足的泊松方程计算公式为

$$\nabla^2 \varphi = -\rho/\epsilon, \quad (1)$$

式中, φ 表示电势, ρ 表示自由电荷密度, ϵ 表示介电常数。在没有自由电荷区域里, $\rho=0$,此时泊松方程可简化为拉普拉斯方程,在二维直角坐标系下拉普拉斯方程可表示为

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0. \quad (2)$$

在求解二维拉普拉斯方程时,采用5点差分格式,假定 x 和 y 方向上的步长 h 均相等,则场域的差分格式为

$$\left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2}\right)_{i,j} = \frac{\varphi_{i,j+1} - 2\varphi_{i,j} + \varphi_{i,j-1}}{h^2}, \quad (3)$$

$$\left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2}\right)_{i,j} = \frac{\varphi_{i+1,j} - 2\varphi_{i,j} + \varphi_{i-1,j}}{h^2}, \quad (4)$$

式中, i 、 j 分别表示场域内差分点所在的行和列。

将方程(3)、(4)代入直角坐标系下的拉普拉斯方程得

$$\varphi_{i-1,j} + \varphi_{i,j-1} + \varphi_{i,j+1} + \varphi_{i+1,j} - 4\varphi_{i,j} = 0. \quad (5)$$

边界条件设定:建筑物及地面满足 Dirichlet (狄利克莱)边界条件,即此边界上的电位为常数,空气边界满足 Neumann(诺埃曼)边界条件,此边界的法向电位梯度为常数。

利用超松弛迭代法可以实现差分方程组的求解。超松弛迭代在计算每一个节点时,会将之前计算得到的临近点的电势新值代入,即

$$\varphi_{i,j}^{n+1} = \varphi_{i,j}^n + \frac{\omega}{4} (\varphi_{i-1,j}^{n+1} + \varphi_{i,j-1}^{n+1} + \varphi_{i,j+1}^n + \varphi_{i+1,j}^n - 4\varphi_{i,j}^n), \quad (6)$$

式中, n 表示差分点数, ω 表示松弛因子,取值范围一般在1~2之间。

在上述计算的基础上,空间电场强度 E 的计算公式为

$$E = -\nabla \varphi. \quad (7)$$

定义大气电场测量值 E 与实际值 E_0 的比值

为畸变系数 k ,即

$$k = E/E_0. \quad (8)$$

通过计算,可得出模型空间不同位置处的 k ,根据某处地面大气电场测量值 E 和畸变系数 k 来确定地面大气电场的实际值 $E_0 = E/k$ 。

1.2.2 模型建立 应用 MATLAB 的 Neumann 边界条件,在地面上方建立二维空间模型域,空间域大小为 300 m × 100 m,空间分辨率为 1 m × 1 m,模拟区域背景电场取值为晴天大气电场的均值,即 130 V/m,电场方向垂直地面,且该模拟区域内没有其他自由电荷的影响,空间边界上电位为常数,那么边界的法向电位梯度也为常数,利用软件模拟大气电场仪安放在建筑物不同位置时的畸变效应。

2 结果分析

2.1 不同高度建筑物对大气电场畸变的影响

为研究不同高度建筑物对大气电场畸变的影响,设定大气电场仪安装于建筑物顶部,模拟建筑物高度在 5~100 m 范围时大气电场畸变系数变化情况(图 1)。当模拟建筑物高度为 5 m 时(图 1a),电场等势线分布近似均匀,畸变不显著;当建筑物增至 40 m 时(图 1b),其顶部电场等势线趋于密集,畸变出现了剧烈变化,大气电场畸变趋于半球状。从模拟的线性拟合结果看(图 1c),只要有高于地面的建筑物存在就会对大气电场产生畸变影响(畸变系数大于 1)。大气电场畸变系数随着建筑物高度的增加而增大,二者存在显著的正相关关系,建筑物越高,大气电场畸变系数也越大,畸变越显著。在 20 m 宽度下,建筑物高度为 5 m 时,产生的电场畸变系数达 1.152 4,即电场测量值约是原始电场值的 1.2 倍,可见,安装在建筑物顶部的大气电场仪受建筑物影响测量值存在显著偏差,高度超过 5 m 的建筑物就可导致测量值误差超过 20%,建筑物的屏蔽作用使得电场测量失真严重,需要对大气电场值进行必要的修订。在实际的应用场景中,可根据建筑物的宽度、高度和周围建筑物布局等,建立拟合方程获得畸变系数,用于电场测量值的修订,修正后的电场值才能更好地反映电场实际状况,从而提升大气电场雷电预报预警的可靠性。

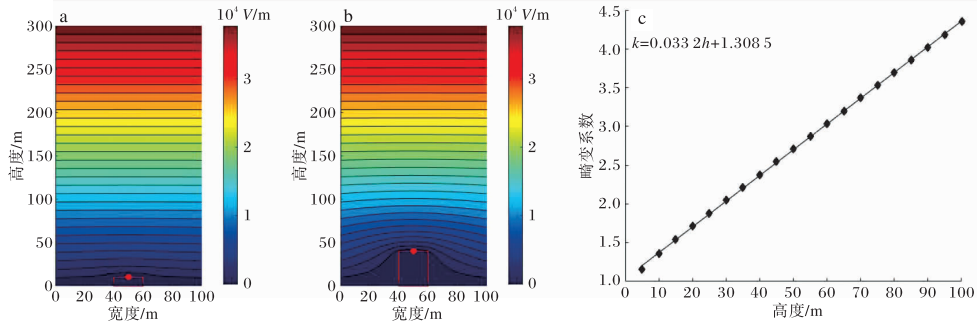


图1 宽为20 m的建筑物在不同高度条件下对大气电场畸变效应模拟示例(红点表示大气电场仪位置;a高度5 m,b高度40 m,c高度5~100 m畸变系数线性拟合)

2.2 不同宽度建筑物对大气电场畸变的影响

建筑物高度不变情况下,大气电场同时还受建筑物宽度影响。设定建筑物高度为20 m,大气电场仪安装于建筑物顶部,模拟建筑物宽在5~35 m时大气电场畸变效应,模拟结果如图2所示。由图2a、图2b可以看出,建筑物高度不变情况下,宽度为5 m的建筑物周围电场等势线密集畸变程度显著高于宽度为20 m的电场等势线,说明建筑物越窄,对大气电场产生的畸变越显著,电场等势线也愈密集,电场畸变效应也越明

显。图2c为大气电场畸变系数与建筑物宽度在5~35 m时的模拟结果。建筑物高度为20 m,宽度范围在5~35 m时,大气电场畸变系数均高于1.5,即电场测量值是原始电场值的1.5倍以上。在此高度下,宽度小于5 m的建筑物顶部电场测量值约是实际电场值的2.4倍,电场测量误差超过140%,说明建筑物对电场产生的尖端效应十分明显。从拟合方程可以看出,在一定宽度范围内,大气电场畸变系数与建筑物宽度成线性递减关系。

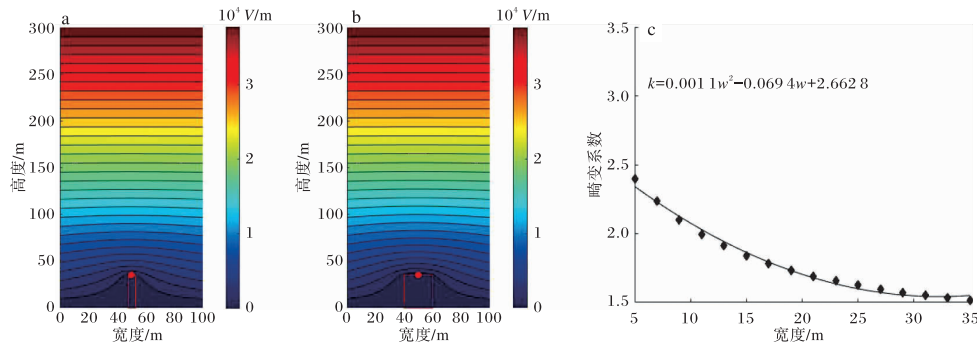


图2 高度为20 m的建筑物在不同宽度条件下对大气电场畸变效应模拟示例(红点表示大气电场仪位置;a宽度5 m,b宽度20 m,c宽度5~35 m畸变系数线性拟合)

2.3 距建筑物不同距离对大气电场畸变的影响

设定大气电场仪安装在地面,建筑物高度和宽度分别为35、20 m,模拟大气电场仪距建筑物2~32 m时大气电场畸变效应,模拟结果见图3。模拟结果显示,大气电场仪周围有障碍物存在,即便大气电场仪不在屋顶,处在地面的大气电场测量值同样会受建筑物屏蔽影响产生畸变(图3a)。模拟结果(图3b)表明,大气电场仪越靠近建筑

物,电场测量值受屏蔽影响越大;距离越远,受屏蔽影响越小,畸变系数越接近1,电场测量值越接近实际电场值。电场畸变系数和建筑物水平距离成正相关关系。在上述给定条件下,电场仪距离建筑物小于2 m时,电场测量值不足实际电场值的10%。可见,电场仪的安装应充分考虑环境因子的影响,尽可能减少实际值和测量值之间的误差。

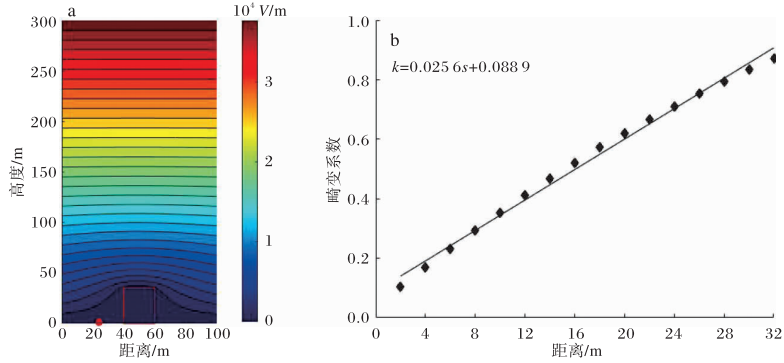


图3 与高度和宽度分别为 35、20 m 的建筑物不同距离大气电场畸变效应模拟示例(红点表示大气电场仪位置;a 距建筑物 14 m,b 距建筑物 2~32 m 范围畸变系数线性拟合)

2.4 群体建筑物对大气电场畸变的影响

将大气电场仪安装于地面且位于群体建筑物之间,分四种情况模拟建筑物对大气电场畸变的影响,模拟结果如图 4 所示。第一种情况(图 4a):取建筑物高度不同,宽度相同。左侧建筑物高 20 m,右侧建筑物高 30 m,宽均为 10 m,大气电场仪距左、右建筑物距离分别为 25、20 m。第二种情况(图 4b):将右侧建筑物高度调至 40 m,其他数据保持不变。第三种情况(图 4c):位于大气电场仪左右两侧建筑物高度仍为 20、30 m,右侧建筑物宽度由 10 m 缩小至 5 m,此时大气电场仪距右侧建筑物水平距离变为 22.5 m。第四种情况(图 4d):大气电场仪左侧建筑物高度仍为 20 m,将右侧建筑物高度调至 40 m,宽度 5 m 不变。可见,受群体建筑物影响,畸变效应显著位置为建筑物顶部最窄处电势分布密集区。第一种情况模拟的电场畸变系数为 0.333 27,畸变系数明

显小于 1。说明群体建筑物对电场产生了较大的屏蔽影响,导致电场实测值偏小。第二种情况,在左侧建筑物几何尺寸保持不变的情况下,仅改变右侧建筑物高度至 30 m,大气电场畸变系数变化至 0.248 42,说明建筑物越高对大气电场畸变影响越大。第三种情况,模拟的电场畸变系数为 0.385 63,畸变效果接近第一种情况。右侧建筑物高度不变情况下宽度虽然变窄,但电场仪和建筑物距离增加了 2.5 m,导致大气电场畸变结果存在相互抵消现象,所以相比第一种情况畸变系数没有明显变化。第四种情况,模拟的电场畸变系数为 0.294 03。同样因为畸变效应相互抵消,使得畸变系数近似于第二种情况结果;和第三种情况相比,因为拉高了右侧建筑物,导致大气电场畸变进一步加剧。进一步分析发现,群体建筑物之间的电场值较其他范围明显偏小,这是由于群体建筑对大气电场的共同屏蔽作用导致,这将使

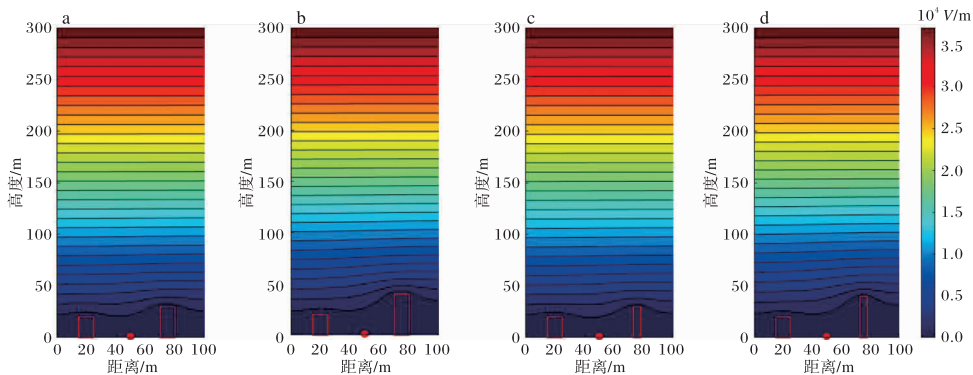


图4 群体建筑对大气电场畸变效应模拟示例(红点表示大气电场仪位置;a 右侧建筑物高和宽为 30、10 m, b 右侧建筑物高和宽为 40、10 m,c 右侧建筑物高和宽为 30、5 m,d 右侧建筑物高和宽为 40、5 m)

得该区域雷击上行先导概率进一步降低,遭受雷击概率也远小于其他位置^[24]。

2.5 监测值与模拟值的比较

安徽工业大学东校区站点的大气电场仪安装在楼高 19.6 m 的屋顶,该建筑长、宽分别为 40.9、20.2 m,该高度电场畸变系数为 1.960 27, $E = -\nabla\varphi = 254.70 \text{ V/m}$,即模拟电场强度为 254.70 V/m。采石矶站点的大气电场仪距李白纪念馆 30.7 m,该建筑高 12.4 m,长、宽分别为 44.5、17.2 m,该高度电场畸变系数 1.732 18,同样方法,得到模拟电场强度为 113.73 V/m,两站电场强度模拟比值为 2.24。2019—2021 年安徽工业大学东校区站点年平均电场强度分别为 221.25、198.54、230.64 V/m,采石矶站点年平均电场强度分别为 109.47、101.87、117.31 V/m,两站年度电场监测均值比值分别为 2.02、1.95 和 1.97,两站 3 a 的均值比值接近两站模拟结果比值。选取两个站点 2019 年 3 月 21 日、2020 年 6 月 6 日和 2021 年 5 月 15 日 3 次雷暴过程个例再做进一步分析检验,得到两站 3 次雷暴过程电场强度均值比值分别为 2.76、2.87 和 2.62,明显高于两站模拟结果的比值。可见模拟畸变系数比较适合长期观测大气电场均值的修订。

3 结论

为提升大气电场仪雷电预警的可靠性,揭示大气电场畸变的相关规律,借助 MATLAB 工具,运用数理统计、有限差分法,模拟了建筑物对大气电场的畸变影响,并利用马鞍山 2 个大气电场仪站点 2019—2021 年的历史监测资料,对模拟结果进行了检验。得出如下结论。

(1)大气电场仪安装在宽度不变(20 m)高度不同的建筑物顶部时,大气电场畸变系数与建筑物高度成正相关,建筑物越高,大气电场畸变系数越大。在此宽度下,超过 5 m 高的建筑物顶电场测量值是原始电场值的 1.2 倍以上,产生电场测量误差超过 20%。当建筑物高度不变(20 m),宽度范围在 5~35 m 时,大气电场畸变系数随着建筑物宽度增加而减小,在此宽度范围内,电场测量值是原始电场值的 1.5 倍以上,宽度小于 5 m 的建筑物可导致电场测量误差超过 140%,说明尖

端效应对电场产生的畸变效应十分明显。

(2)大气电场仪安装在地面,建筑物高度、宽度分别为 35、20 m 时,电场仪距建筑物 2~32 m 范围时,大气电场畸变系数与建筑物距离成正相关,大气电场仪距建筑物小于 2 m,可导致电场测量值不足实际电场值的 10%,可见一定范围内的建筑物会对大气电场测量值造成显著性偏差。

(3)大气电场仪安装于地面且位于的群体建筑物之间时,群体建筑物顶部畸变最显著,群体建筑物之间的电场值相对较小。这是由于群体建筑对大气电场的共同屏蔽作用导致,这将使得该区域遭受雷击概率也远小于其他位置。

(4)对安徽工业大学东校区站点和采石矶站点大气电场监测值与模拟值检验表明,模拟的畸变系数对长期监测大气电场均值的修订有一定的指示意义。

(5)综合看来,建筑物的屏蔽作用使得大气电场测量失真严重,电场仪布设应充分考虑安装环境的影响,尽可能的减少实际值和测量值之间的误差。但在实际应用中,因环境限制,大气电场仪安装位置周围或多或少存在一定的建筑物畸变影响,其测量结果需要进行影响误差修订。本文的模拟方法为实际电场测量值的修订提供了思路,因选取检验数据样本有限,其代表性有待于收集更多的实际观测数据来验证。

参考文献:

- [1] 朱彪,林彬彬,于晨,等. 不同类型大气电场雷电预警效果研究[J]. 气象与环境科学,2022,45(5):49-54.
- [2] 周继威,唐慧强,白雪美,等. 微型化大气电场检测仪的设计[J]. 气象科技,2017,45(5):825-828.
- [3] 刘邕,姚慧茹. 雷电过程中大气电场信号处理方法探究[J]. 沙漠与绿洲气象,2021,15(5):123-131.
- [4] 许洪泽,周梅. 基于假设性检验的地面大气电场预警阈值确定方法[J]. 气象与减灾研究,2017,40(1):56-63.
- [5] 王乐乐. 两站大气电场仪观测数据对比分析[J]. 内蒙古气象,2022(3):44-48.
- [6] 高菊霞,杨碧轩,程永进,等. 闪电和大气电场资料在预警业务中的应用[J]. 陕西气象,2015(增刊):

- 20-24.
- [7] 梅建娇,王超然. 地面大气电场分析及雷电预警应用[J]. 气象水文海洋仪器,2017,34(2):108-112.
- [8] 行鸿彦,张强,季鑫源. 基于地面电场资料的雷暴临近预报研究[J]. 大气科学学报,2017,40(1):111-117.
- [9] 靳小兵,俊伟,张亮,等. 川西高原典型雷电天气电场特征初步分析[J]. 高原山地气象研究,2017,37(4):66-71.
- [10] 王小亚,闫景东,纪凡华,等. 成都电场仪资料在雷暴天气过程中的应用分析[J]. 农业灾害,2017,7(4):29-34.
- [11] 张谦,柴健,黄克俭. 雷暴天气下建筑物周围电场畸变区域的研究分析[J]. 中国农学通报,2016,32(6):145-150.
- [12] 刘晓东,李庆君,宋昊泽,等. 安装场地环境对地面大气电场观测的影响研究[J]. 电气应用,2023,42(4):41-48.
- [13] 高菊霞,杨碧轩,杨舟. 西安市周边大气电场特征分析[J]. 陕西气象,2015(2):27-31.
- [14] 吴晗,陈涛,李仁康,等. 锡林浩特市火山地质公园平台山顶近地面大气电场变化特征[J]. 空间科学学报,2020,40(3):357-363.
- [15] 方俏娴,殷启元,李翔,等. 广州两次雷暴过程地闪与大气电场特征对比分析[J]. 暴雨灾害,2023,42(1):47-56.
- [16] 李芳,付亚平,郝孝智,等. 山西省中北部地区近地面晴天大气电场特征及其与污染物的关系[J]. 沙漠与绿洲气象,2018,12(2):50-56.
- [17] 李刚,谢清霞,许可,等. 安顺站不同天气类型下大气电场与气象要素间的关系[J]. 高原山地气象研究,2023,43(1):135-140.
- [18] 章尔震,张红梅,刘伟,等. 基于地面电场的凉山地区雷电预警方法研究[J]. 高原山地气象研究,2019,39(1):87-90,95.
- [19] 行鸿彦,张强,季鑫源. 基于地面电场资料的雷暴临近预报研究[J]. 大气科学学报,2017,40(1):111-117.
- [20] 吴蓓,闫景东,任兆鹏,等. 青岛地区电场仪资料在一次雷暴天气过程中的应用分析[J]. 海洋气象学报,2017,3(1):92-97.
- [21] 地面大气电场观规范:QX/T 594-2020[S]. 2021.
- [22] 黄钰,吴安坤,张淑霞. 场地环境对大气电场测量的影响及修正[J]. 电子测量技术,2018,41(1):35-38.
- [23] 陈晓东,孙金华. 大气电场仪场地因子修订及EMD分解分析[J]. 电子测量技术,2016,39(12):93-97.
- [24] 耿雪莹,张其林,刘明远. 地面建筑物(群)对雷暴云大气电场影响的模拟研究[J]. 气象科技,2012,40(5):827-833.