

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104130

# 有限元法在真实环境下大气电场仪误差修订中的应用\*

宋琳<sup>1,2</sup> 丁锋<sup>2</sup> 张金波<sup>3</sup> 张源源<sup>1</sup> 孟繁辉<sup>1</sup>

(1. 青岛市气象灾害防御技术中心 青岛 266003; 2. 青岛市气象灾害防御工程技术研究中心 青岛 266003;  
3. 南京信息工程大学 大气物理学院 南京 210044)

**摘要:**大气电场仪的环境误差修订对于提高雷电预警准确率具有非常重要的意义。针对已有的模拟计算方法难以准确还原真实复杂的边界条件这一问题,利用有限元法模拟大气电场仪所在位置处的真实地形和建筑物等对大气电场畸变的影响,并对实测数据进行了环境误差修订。与已有方法相比,有限元法既模拟还原了真实的边界形状又提高了求解精度和计算速度。结果表明,位于平地时大气电场仪的误差修订系数与导体距离之间具有幂函数的变化关系,在屏蔽距离内山地的修订系数变化率较平地更大;误差修订系数与屋顶边缘距离具有二次函数的变化关系,山地的修订系数较平地更小。通过模拟计算还得到,崂山各测站的环境误差修订系数均小于1,对于屋顶测站和地面测站,地形都是其环境误差的主要影响因素。

**关键词:**大气电场;有限元法;静电场畸变;误差修订系数;地形因子

**中图分类号:** TM151; TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 170.1510

## Application of finite element method in the revision of atmospheric electrostatic field instrument error in real environment

Song Lin<sup>1,2</sup> Ding Feng<sup>2</sup> Zhang Jinbo<sup>3</sup> Zhang Yuanyuan<sup>1</sup> Meng Fanhui<sup>1</sup>

(1. Qingdao Meteorological Disaster Prevention Technology Center, Qingdao 266003, China;

2. Qingdao Meteorological Disaster Prevention Engineering Technology Research Center, Qingdao 266003, China;

3. School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** The revision of the environmental error of the atmospheric electrostatic field (EF) instrument is of great significance for improving the accuracy of lightning early warning. Because the existing simulation calculation methods are difficult to accurately restore the true and complex boundary conditions, the Finite Element Method is used to simulate the influence of terrain and surrounding objects on the measurement results of the EF, and revised the error of the atmospheric EF instrument in the actual environment. Compared with the existing methods, the Finite Element Method not only simulates and restores the true boundary shape, but also improves the solution accuracy and calculation speed. The results show that there is a power function relationship between the error revision coefficient of the atmospheric EF meter and the conductor distance when it is located on flat ground. In the shielding distance, the error revision coefficient of mountainous areas has a greater change rate than that of flat ground; the revision coefficient have a quadratic function relationship with the instrument position, and the revision coefficient of mountainous areas is smaller than that of flat ground. Through simulation calculations, it is also obtained that the environmental error revision coefficients of various atmospheric EF instrument stations in Laoshan are all less than 1. For different stations, terrain is the main influence factor of their environmental errors.

**Keywords:** atmospheric electrostatic field; finite element method; electrostatic field distortion; error revision coefficient; terrain factor

## 0 引言

大气电场仪作为测量大气电场强度的仪器,越来越

广泛地应用在气象部门和雷电敏感行业的强对流天气监测预警中。大气电场仪的测量对象是大气静电场,而静电场很容易受到场地环境的影响产生畸变。由于选址条件的限制或雷电预警服务的需求等,一些大气电场仪须

安装在山区、海滨等复杂的地面环境中,这就大大增加了大气电场仪测量数据的环境误差,导致大气电场仪数据的准确性降低。因此,有针对性地对大气电场仪数据进行误差修订,消除环境误差的影响,对于提高大气电场仪多站联网监测的水平和提升雷电预警的准确率具有十分重要的意义。

近年来,国内外学者在大气电场仪测量误差修订方面已经做了很多研究。Cole 等<sup>[1]</sup>和 Byrne 等<sup>[2]</sup>通过飞机和气球观测实验,发现大气电导率随高度增大而增加,而大气电场强度在近地面随高度增加而减小;杨仲江等<sup>[3]</sup>指出同一区域不同高度的大气电场值具有相关性,可将一定高度处的观测结果换算为地表面处的电场值,保证了不同测站的数据统一性;杨波等<sup>[4]</sup>采用 MATLAB 软件自带的 pde 工具分析了研究区域的大气电场分布,并对大气电场测量数据的一致性进行修正,实现了多站大气电场组网预警;周璧华等<sup>[5]</sup>利用电磁场仿真软件 Ansoft Maxwell 分析了不同形状建筑物对于大气电场的影响,并通过曲线拟合得到大气电场变化与空间位置的近似关系;耿雪莹等<sup>[6]</sup>利用有限差分方法,分析了有雷暴云时地面建筑物(群)对大气电场的影响,为大气电场仪的测站安装及其数据应用提供思路;陈晓东等<sup>[7]</sup>利用有限差分方法对深圳地区地面大气电场仪进行了环境误差修订;周俊驰等<sup>[8]</sup>通过观测对比试验,建立了不同天气条件下仪器测量结果与地面电场值之间的关系;郭秀峰等<sup>[9]</sup>使用外推法研究了不同网格剖分对大气静电场计算的影响,得到不同空间分辨率下大气电场的估算方法。

对于大气电场数值模拟计算的研究大都归结为求满足边界条件的泊松方程解的过程<sup>[10]</sup>。上述研究假定了大气电场仪所在位置处的建筑物或山体较为规则,从而可以利用均匀网格进行环境误差分析。但实际上,由于选址条件的限制等原因,大气电场仪的安装位置复杂多变,利用均匀网格的剖分方法无法真实再现复杂的边界条件,得到的结果偏差较大。因此,本文利用有限元法在拟合复杂几何结构与处理复杂边界条件方面的优势,利用 COMSOL 软件来研究复杂真实地形和建筑物等对大气电场仪测量结果的影响,实现对复杂环境下的大气电场数据的误差修订,并与已有的均匀网格下的计算结果进行对比。

## 1 资料来源与研究方法

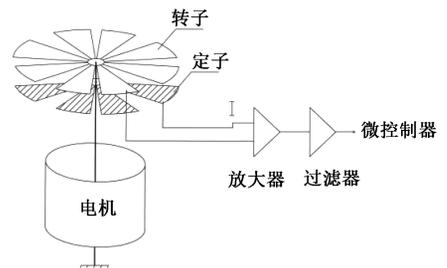
### 1.1 数据资料来源

本文的大气电场数据来自青岛市大气电场监测系统。如图 1 所示,大气电场仪通常由感应探头、处理单元等构成,探头的感应部件置于空间电场中在其表面产生感应电荷,转子交替地暴露在大气电场中从而产生交变

电流,由于电场强度与感应电流成正比,因此通过测量感应电流流经一个大电阻产生的等效电压值,即可得到大气电场强度值<sup>[11-13]</sup>。



(a) 大气电场仪探头实物  
(a) Electrostatic field instrument



(b) 大气电场仪测量原理  
(b) Measuring principle of electrostatic field instrument

图 1 大气电场仪探头示意图

Fig. 1 Schematic diagram of atmospheric electrostatic field (EF) instrument

青岛市大气电场监测系统包括覆盖全市的 31 个测站。本文选取位于崂山地区的巨峰、太清宫、仰口、北九水以及区气象局 5 个大气电场仪测站(图 2 中分别以序号 1~5 标注),模拟计算其在真实复杂的场地环境下大气电场的畸变情况,并对大气电场仪的环境误差进行修订。本文研究的地形数据采用地理空间数据云 (geospatial data cloud) 的数字高程模型 (DEM) 高程数据,选取青岛地区 90 m 分辨率的 SRTM 数据,分别以各测站所在位置坐标点为中心,沿西—东 (W-E)、北—南 (N-S)、西南—东北 (WS-NE)、西北—东南 (WN-SE) 4 个方向截取地形剖面数据。崂山地区 DEM 高程地形及区域内各测站位置如图 2 所示。

### 1.2 大气电场畸变的模拟计算方法

对于大气电场来说,晴天与雷暴天气下的电荷源是不同的,但是为了建立地物对大气电场畸变作用的研究模型,通常将其等效为导体处于静电场条件下来进行研究<sup>[14]</sup>。本文使用 COMSOL 软件通过有限元分析法模拟计算实际地形和建筑物对大气电场畸变的影响,从而对多站的大气电场仪进行环境误差修订。有限元法 (finite element method, FEM) 是以剖分插值和变分原理为基础,

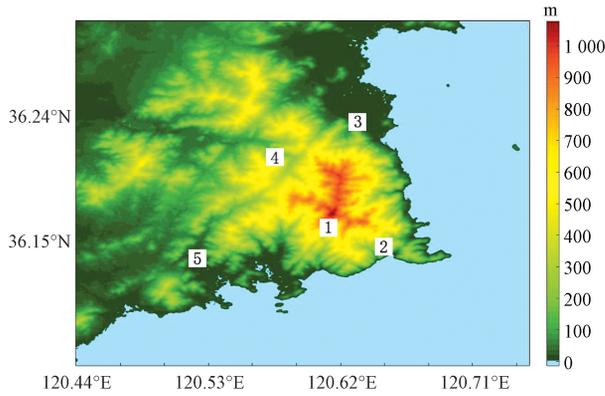


图 2 崂山地区 DEM 高程地形及研究测站位置

Fig. 2 Diagram of DEM elevation terrain and the distribution of EF meter stations in Laoshan area

采用三角形变网格剖分的一种应用广泛的电磁场数值分析方法<sup>[15]</sup>,有限元法的核心之一是离散化,即网格剖分。静电场分析模型得到的精度与所用的剖分网格直接相关,减小单元尺寸是最简单的网格细化策略,但为了适应实际问题的复杂性,有限元法通常在求解域上构建非均匀分布的网格,通过全局自适应将网格细化,以获得更真实可靠的解。典型的二维剖分单元有三角形、四边形等,三角形作为最简单最基础几何形状,几乎可以对任意几何图形进行网格划分<sup>[16]</sup>。有限元法的核心之二是通过变分方法求解偏微分方程边值问题的近似解,即在以上构建的剖分单元的基础上选出相应的插值函数进行计算。具体偏微分方程边值问题可表示为:

$$\begin{aligned} \Delta \times (\alpha \cdot \Delta \times \varphi) + \beta \cdot \varphi &= f, \text{ 在 } \Omega \text{ 上} \\ \varphi &= P, \text{ 在 } \Gamma_1 \text{ 上} \\ \alpha \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial n} \cdot \hat{n} + \gamma \varphi &= q, \text{ 在 } \Gamma_2 \text{ 上} \end{aligned} \quad (1)$$

其中  $\alpha, \beta$  是材料和位置的函数,  $\Omega$  是计算域,  $\Gamma_1$  和  $\Gamma_2$  是计算边界。变分方法求解偏微分方程边值问题可

表示为:

$$\begin{cases} \delta F(\varphi) = 0 \\ \varphi = P \end{cases} \text{ 在 } \Gamma_1 \text{ 上} \quad (2)$$

剖分场域  $\Omega$ , 选取三角形作为典型的剖分单元,并选出相应的插值函数。在任意单元中有:

$$\tilde{\Phi}^e = \sum_{j=1}^n N_j^e \Phi_j^e = [N^e]^T [\Phi^e] = [\Phi^e]^T [N^e] \quad (3)$$

将变分问题离散化为多元函数的极值问题,可得到如下代数方程组:

$$\sum_{j=1}^N K_{ij} \varphi_j = 0 \quad i, j = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

式中:  $K_{ij}$  为系数矩阵;  $\varphi_i$  为离散点插值。选择合适的代数解法求解式(4),即可得到待求边值问题的数值解  $\varphi_i(i, j = 1, 2, \dots, N)$ <sup>[17]</sup>。

本文分别利用有限差分方法和有限元法模拟山体 and 地物附近的静电场畸变。利用有限差分方法进行模拟计算时,由于计算域较大,若采用的矩形剖分网格较粗,则对于较小尺度的物体就无法精确模拟,而若将剖分网格缩小,域单元数目则成几何级数增长,计算量巨大。表 1 为采用不同大小网格进行模拟的情况,采用 10 m 网格进行剖分,电场值的模拟计算结果偏差较大;而采用 1 m 网格进行剖分,域单元数目从  $1.44 \times 10^4$  增至  $1.44 \times 10^6$ ,计算量剧增。利用有限元法进行模拟计算时,根据模拟物体的不同尺度,采取了适当精细程度的网格剖分方案如图 3 所示,从图 3 可以看出,通过构建结构化的三角形变网格剖分单元,山体崎岖部分和导体尖端等处网格更细密,其他地方更稀疏,剖分方案越细化,计算结果偏差越小,因此可以最大程度地确保模拟精度,总体的计算量也较小。由此可见,对于真实山体和地物,利用有限元法既保证了还原真实的边界形状,又提高了求解精度和计算速度。本文以下将主要用有限元法来分析研究复杂真实地形和建筑物等对大气电场仪测量结果的影响,并对实测数据进行环境误差修订。

表 1 不同模拟方法的网格剖分方案及计算结果

Table 1 Meshing schemes and calculation results of different simulation methods

网格剖分方案	最大单元大小/m	最小单元大小/m	曲率因子	域单元	边界单元	顶点单元	某观测点 O 的模拟电场值/(V·m <sup>-1</sup> )	
有限差分方法	10 m 网格	10	-	$1.44 \times 10^4$	520	-	3 891	
	1 m 网格	1	-	$1.44 \times 10^6$	5 200	-	4 096	
有限元法	较粗化	234	10.8	0.6	3 403	282	191	4 326.73
	常规	121	0.54	0.3	6 720	430	191	4 337.48
	较细化	66.6	0.225	0.25	8 351	463	191	4 437.51

### 1.3 实际复杂环境下大气电场仪误差修订方法

大气电场仪的实际测量环境通常较为复杂,本文重点讨论地形、地物以及仪器本身形状这 3 个因素对大气电场仪修订系数  $k$  的影响,本文分别定义为地形修订系

数  $k_1$ 、地物修订系数  $k_2$  和仪器修订系数  $k_3$ ,如公式(5)所示。

$$k_i = \frac{E}{E_0} \quad (5)$$

式中:  $E$  为不受复杂地形环境等影响的理想电场值;  $E_0$

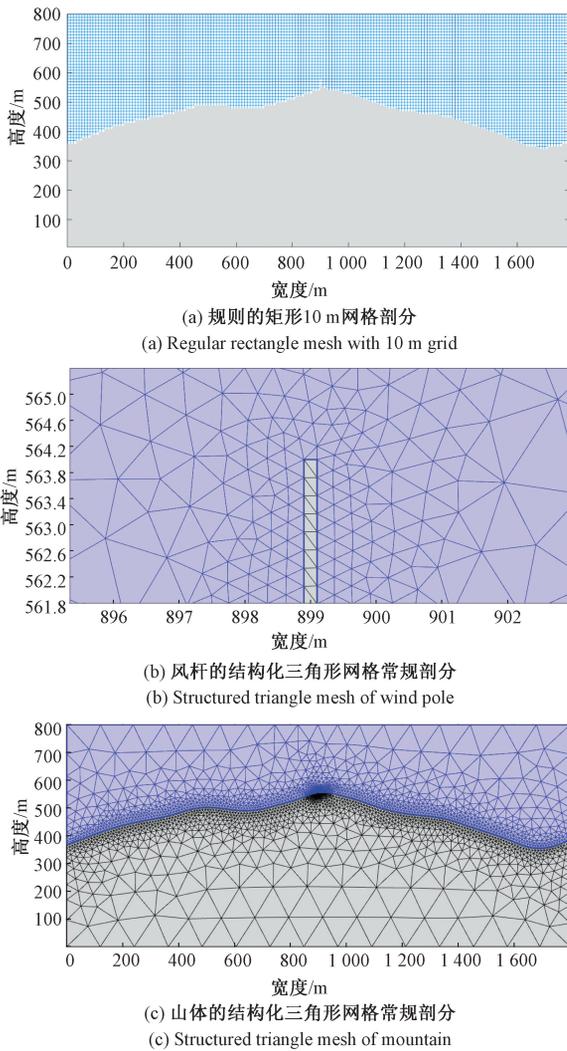


图 3 山体及地物不同的网格剖分方案示意图

Fig. 3 Schematic diagram of conventional subdivision method of structured triangle different mesh of mountain and wind pole

为畸变后的电场值;  $i = 1, 2, 3$ 。  $k$  是一个相对固定的比值, 为了更接近实际观测结果, 本文假定研究区域的大气电场平均值为  $1 \text{ kV/m}$ , 模拟计算域高度为  $800 \text{ m}$ , 空间总电位为  $8 \times 10^5 \text{ V}$ 。此外, 为了尽量减小模拟计算量, 本文纵向截取 4 个方向的剖面来分析大气电场的畸变并取平均值。需要说明的是, 仪器的实际测量环境通常较为复杂, 等效为二维静电场来进行模拟, 在不同方向剖面上必然存在一定的差异, 本文将综合考虑各因素, 最终得到一个综合的修订系数。

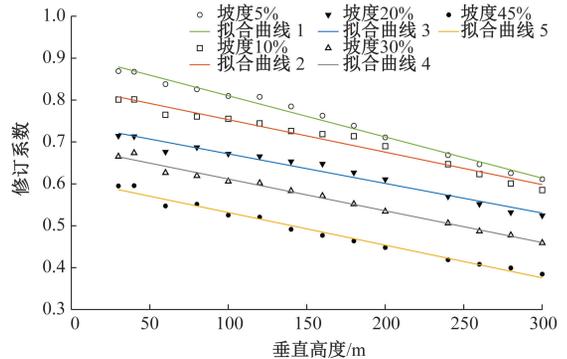
## 2 地形对大气电场仪环境误差的影响

### 2.1 不同山体几何模型对大气电场畸变的影响环境误差的影响

大气电场仪的理想测量环境是位于平原、平地, 且无

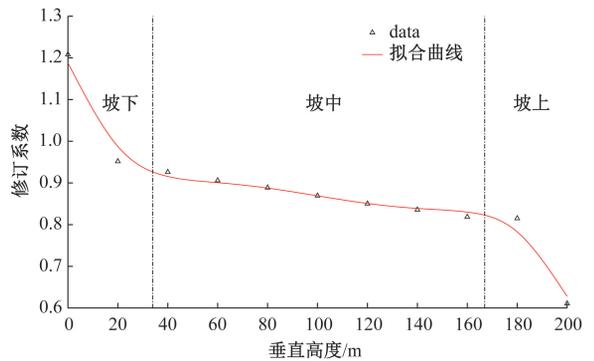
尖端效应处, 对于安装在山区的大气电场仪, 由于海拔高度和起伏山体地形的影响会使大气电场发生明显畸变<sup>[18]</sup>。在研究真实地形的影响之前, 本文先构造出简单的等腰三角形作为山体几何模型, 并选取高程、坡度和坡位 3 个最基础的地形因子作为山体模型的特征因子来进行模拟研究<sup>[19-20]</sup>, 从而为真实山体的模拟分析奠定基础。

通过模拟发现, 山体的垂直高度与山顶处的大气电场仪修订系数具有较好的线性关系(图 4(a)), 拟合函数为  $k = -ah + b$ , 其中  $a, b$  为常量。山顶处的修订系数均小于 1, 随着山体海拔越高, 坡度越大, 山体附近的大气电场畸变愈明显, 修订系数也愈小。其次模拟计算山体坡上(包括脊)、中、下(包括谷)位置处的修订系数, 通过 Smoothing Spline 拟合得到分段多项式, 从图 4(b)可以看出, 在坡中位置处大气电场的畸变程度随山体海拔的升高而增大, 呈线性变化关系; 山体对于坡下区域的静电屏蔽作用明显, 越靠近山脚处静电屏蔽作用愈明显, 大气电场仪的修订系数愈大; 而越靠近山顶的位置, 静电场畸变愈大, 大气电场仪的修订系数愈小。



(a) 修订系数随山体高度  $h$  的变化曲线

(a) Variation curve of revision coefficient with the height of the mountain coefficient with mountain  $h$



(b) 修订系数随山体坡位  $i$  的变化曲线

(b) Variation curve of revision coefficient with mountain slope position  $i$

图 4 大气电场仪修订系数随山体地形因子的变化曲线

Fig. 4 Variation curve of EF meter revision coefficient with mountain terrain factor

### 2.2 真实山体地形对环境误差的影响

以崂山巨峰测站为例,沿 W-E、N-S、WS-NE、WN-SE 四个方向取地形数据,模拟计算大气电场仪测站(图 5 中点 O)处的大气电场值。通过模拟可以看出,由于山体的

加入,大气电场畸变明显,等势面沿起伏山体表面分布,海拔高处电势不比平地更高,但由于计算域高度一定,坡度越大、坡位越高处等势线愈密集,大气电场值愈大,地形因子中坡度和坡位的影响较高程更大。

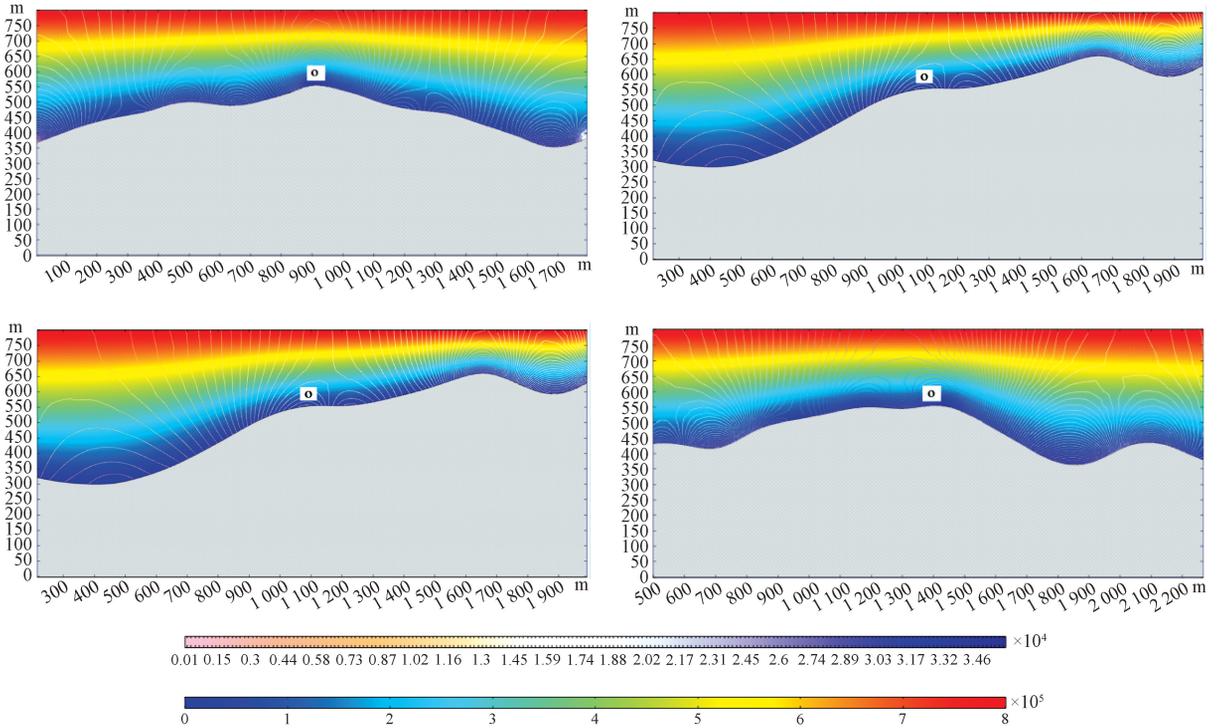


图 5 巨峰测站沿 W-E、N-S、WS-NE、WN-SE 方向做地形剖面的电势(阴影区)、大气电场值(等值线)

Fig. 5 The electric potential (shaded area) and atmospheric EF mode (contours) of the terrain profile along the W-E, N-S, WS-NE, and WN-SE directions at the Jufeng station

模拟计算其他 4 个测站不同剖面方向的电场值和修订系数,再得到各站平均修订系数(表 2)。在不考虑周围地物影响时,巨峰、太清宫、仰口和北九水 4 个测站的大气电场实测值均偏大,其中巨峰测站因其所在位置海拔较高山势陡峭,由复杂地形引起的静电场畸变最明显,

大气电场仪实测值较理论值偏大较多;区气象局站点位于观测场内,该观测场属国家一般气象站,周围相对空旷平坦,基本避免了局部地形的影响,静电场畸变最小,大气电场仪实测值最接近理论值。

表 2 真实山体地形中各测站大气电场仪的修订系数

Table 2 Revision coefficients of atmospheric EF instruments at each station in real mountain terrain

站点	海拔高度/m	修订系数 $k_1$				平均值
		W-E 方向	N-S 方向	WS-NE 方向	WN-SE 方向	
1 巨峰	550	0.230 5	0.282 0	0.290 2	0.240 5	0.260 8
2 太清宫	310	0.634 3	0.709 7	0.595 8	0.673 7	0.653 3
3 仰口	360	0.461 6	0.561 9	0.539 2	0.486 7	0.512 3
4 北九水	430	0.421 5	0.486 1	0.404 1	0.489 1	0.450 2
5 区气象局	54	1.044 5	0.950 3	0.963 4	0.913 2	0.967 8

### 3 周围地物对大气电场仪环境误差的影响

为了在同一地点结合主要气象要素进行观测,大气电场仪通常会建在自动气象站附近,而考虑到人员、树木

的影响,以及太阳能板采光等因素,有相当一部分大气电场仪建在建筑物顶。因此,本文以风杆(或旗杆等尖端导体)和建筑物作为地物影响的主要研究对象。

大气电场仪修订系数受地物影响在不同安装位置的变化曲线如图 6 所示。模拟计算环境修订系数与大气电

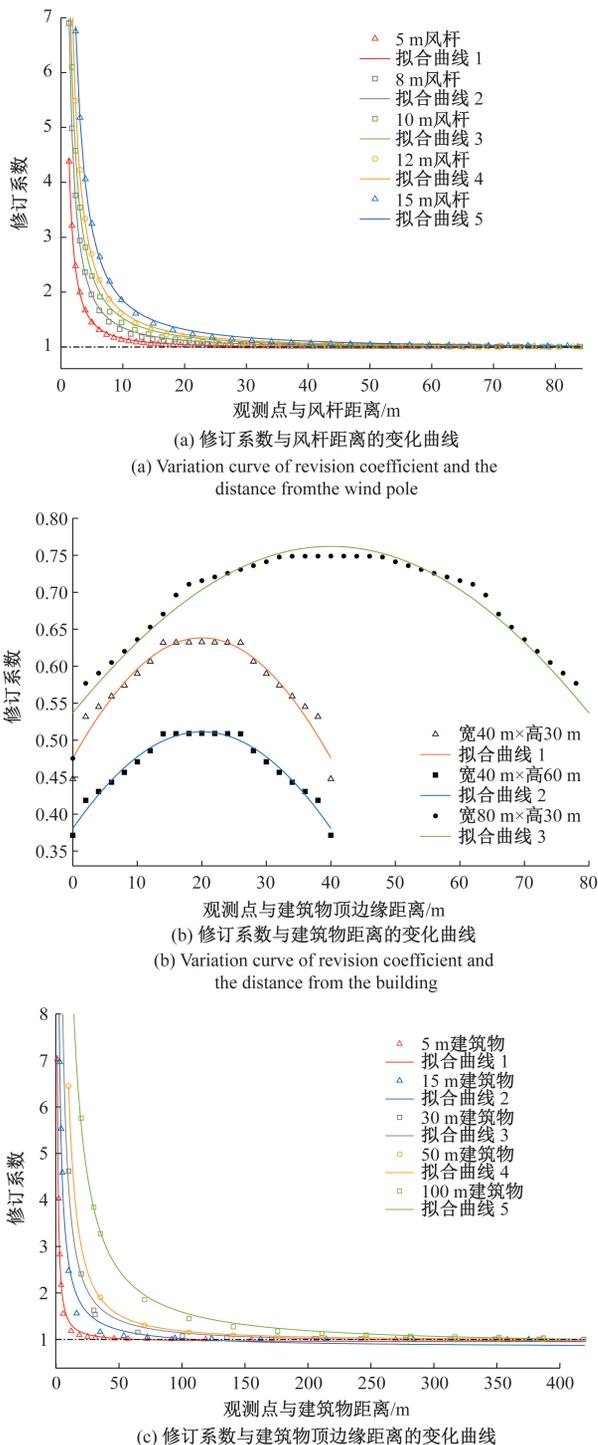


图 6 大气电场仪修订系数受地物影响在不同安装位置的变化曲线

Fig. 6 Variation curve of atmospheric EF meter revision coefficient affected by ground objects at different positions

场仪周围地物环境的关系,可以看出,随着观测点向风杆靠近,由于电场值迅速减小,大气电场修订系数呈指数级

增长,风杆高度越高,其屏蔽距离越大,但风杆高度越小,其修订系数变化得越快(图 6(a))。同样高度的建筑物具有相同的变化特征,但建筑物比风杆对于观测点大气电场的屏蔽作用更大(图 6(b))。建筑物的宽度相同时,高度越高,屋顶处的大气电场畸变越大,修订系数越小;而高度相同时,建筑物越宽电场畸变越不显著,但在靠近建筑物屋顶边缘处电场强度值有跃变,畸变都非常明显,相应的修订系数也更小,建筑物屋顶中间区域电场强度基本维持在一定的数值区间(图 6(c))。

经过拟合环境修订系数与周围地物距离的关系,得到幂函数方程  $k = a \cdot x^{-b} + c$  (见表 3),其中  $x$  为观测点与地物的距离, $k$  为环境修订系数, $a$ 、 $b$ 、 $c$  为常数。利用拟合函数关系方程进行外推求极限,得到不同建筑物的屏蔽距离,具体如表 3 所示。

表 3 大气电场仪修订系数与周围地物距离的拟合函数方程  
Table 3 Fitting function equation between the revised coefficient of atmospheric EF meter and the distance of surrounding objects

	高度/ m	典型拟合 函数	标准差 RMSE	决定系数 $R^2$	屏蔽距离/ m
风杆	5	$k = 5.051 \cdot x^{-1.458} + 0.9809$	0.01800	0.9990	45
	8	$k = 8.464 \cdot x^{-1.339} + 0.9672$	0.03299	0.9989	63
	10	$k = 10.46 \cdot x^{-1.259} + 0.949$	0.04708	0.9993	68
	12	$k = 13.62 \cdot x^{-1.303} + 0.9584$	0.03894	0.9989	85
	5	$k = 6.165 \cdot x^{-1.131} + 0.948$	0.10460	0.9951	68
建筑物 (宽 40 m)	15	$k = 17.31 \cdot x^{-0.9754} + 0.8262$	0.19170	0.9954	111
	30	$k = 53.25 \cdot x^{-1.202} + 0.933$	0.11610	0.9958	258
	50	$k = 146.5 \cdot x^{-1.428} + 0.9798$	0.008818	1	505

模拟观测点位于不同宽度与高度建筑物顶的情况,经过拟合得到二次函数方程  $k = -a \cdot x^2 + b \cdot x + c$ ,比较不同函数模型的标准差与决定系数发现该模型拟合优度较好,其中  $x$  为观测点与建筑物顶边缘的距离, $k$  为环境修订系数, $a$ 、 $b$ 、 $c$  为常数,具体如表 4 所示。

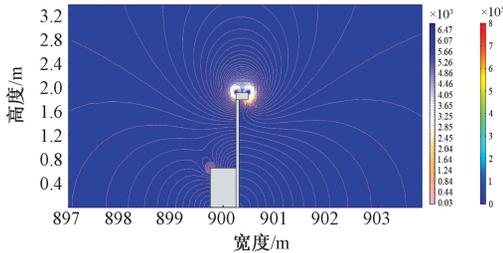
#### 4 仪器自身形状对环境误差的影响

大气电场仪自身的高度与形状也是不容忽视的影响因素,其探头一般置于距离地面 1.5~2.0 m 处,大气电场仪的探头、金属杆、控制箱等也会引起周围电场的畸变,从而产生测量误差。本研究中的大气电场仪探头高 1.8 m,假定设备在出厂前未对探头进行自身形状标定。通过模拟可以看出,探头周围、控制箱边角处的电场畸变明显,计算得到地表至探头传感器叶片处的电场值变化曲线,从点 A 至点 O 的电场模值先逐渐增大后迅速减小,并得到电场仪自身引起的误差修订系数  $k_3 = 2.36$  (图 7)。

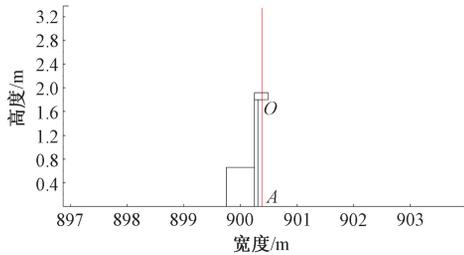
表 4 大气电场仪修订系数与建筑物顶位置的拟合函数方程

Table 4 Revision coefficient of atmospheric EF meter and fitting function equation of instrument on top of building

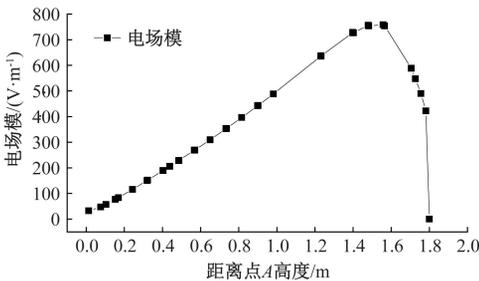
高度/m	宽度/m	典型拟合函数	标准差 RMSE	决定系数 $R^2$
30	40	$k = -0.000\ 409\ 2 \cdot x^2 + 0.016\ 37 \cdot x + 0.474\ 1$	0.013 970	0.944 8
60	40	$k = -0.000\ 327\ 7 \cdot x^2 + 0.013\ 11 \cdot x + 0.379\ 7$	0.007 579	0.973 9
30	80	$k = -0.000\ 142\ 2 \cdot x^2 + 0.011\ 38 \cdot x + 0.533\ 8$	0.016 880	0.950 4



(a) 大气电场仪附近电场值等值线  
(a) Contour of electric fieldmode near atmospheric EF meter



(b) 大气电场仪附近截线AO示意图  
(b) Section AO near atmospheric EF meter



(c) 大气电场仪附近电场值的变化曲线  
(c) Variation curve of EF modulus near atmospheric EF meter

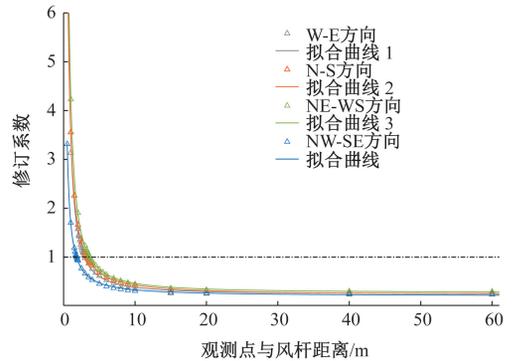
图 7 大气电场仪附近电场值的变化情况  
Fig. 7 The change of the EF modulus near the atmospheric EF meter

事实上,在大气电场仪设备出厂前,一般会对探头电子元器件进行形状标定,以消除仪器本身的测量误差。本研究中用到的大气电场仪已考虑到设备自身对误差的影响,在出厂前对探头已进行了仪器标定,因此在实际应用中可以忽略  $k_3$ ,而主要分析  $k_1$ 、 $k_2$  的影响。

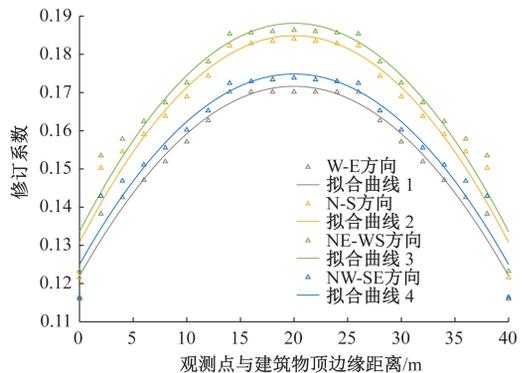
## 5 实际环境下大气电场仪的环境误差修订结果

### 5.1 真实地形与地物影响的对比分析

在真实山体地形中,山体对大气电场的畸变作用使得测量值偏大,而地物对于大气电场的屏蔽作用使得测量值偏小。当地物高度一定时,随着观测点向地物靠近,大气电场仪与地物距离存在一临界值,使得地物影响与山体的影响抵消,此时修订系数  $k = 1$ 。图 8(a) 为当风杆高度为 10 m 时,不同地形剖面上修订系数随风杆距离的拟合曲线,通过拟合自定义函数也可得到幂函数方程。



(a) 山体地形中修订系数与风杆距离的变化曲线  
(a) Variation curve of the revision coefficient and the distance from the wind pole in the mountain terrain



(b) 山体地形中修订系数与建筑物距离的变化曲线  
(b) Variation curve of the revision coefficient and the top position of the building in the mountain terrain

图 8 修订系数受地形和地物共同影响在不同安装位置的变化曲线

Fig. 8 The revision coefficient is affected by the combination of terrain and ground features at different positions

由于山体和建筑物的叠加作用,屋顶处的大气电场畸变更明显,测量值比地面处更大。可以看出,建筑物的宽度、高度、屋顶位置对修订系数的影响作用与在平地近似,但修订系数值明显偏小,二次函数方程  $k = -a \cdot x^2 + b \cdot x + c$  的系数  $a$  的绝对值,山体地形的小于平地的,二次函

数曲线的开口更大(图 8(b))。

### 5.2 大气电场仪的环境误差修订结果

崂山地区各个大气电场仪测站的实际环境差异较大(图 9),本文具体分析每个测站所处的实际场地环境,同时结合实际地形,构建出不同的二维模型。



图 9 崂山地区大气电场仪各测站实际环境

Fig. 9 Environment of each station of atmospheric EF instrument in Laoshan area

模拟计算 4 个剖面方向上的环境误差修订系数,最后得到各测站的综合误差修订系数(表 5)。可以看出,对于屋顶测站,建筑物上较高的物体抵消了一部分地形与建筑物的影响,但由于山体与建筑物的叠加影响更大,实际大气电场值还是较大;对于地面测站,大气电场仪位

于屏蔽距离影响的范围内,较高的风杆抵消了一部分山体的影响,但由于山体的影响作用更大,因此地形成为环境误差的主要影响因素;而对于观测场内的测站,其环境接近理想测量环境,实际的大气电场值更接近真实值。

表 5 各测站大气电场仪环境误差修订系数

Table 5 Revision coefficient of environmental error of atmospheric EF instrument at each station

站点	周边环境描述	修订系数 $k$				综合值
		W-E 方向	N-S 方向	WS-NE 方向	WN-SE 方向	
巨峰	位于高 20 m 宽 40 m 的建筑物顶,旁 3 m 处有 10 m 高自动站风杆,另有排风管等物体	0.688 8	0.201 6	0.229 1	0.208 3	0.331 9
太清宫	位于高 38 m 宽 40 m 的建筑物顶边缘处	0.263 6	0.448 7	0.272 5	0.515 7	0.375 1
仰口	位于高 20 m 宽 50 m 的建筑物顶边缘处	0.224 7	0.439 3	0.331 8	0.399 2	0.348 7
北九水	位于地面,旁 4 m 处有 10 m 高自动站风杆	1.243 5	0.479 0	0.404 2	0.489 1	0.653 9
区气象局	位于崂山区气象局观测场内	1.044 5	0.950 3	0.963 4	0.913 2	0.967 8

## 6 结 论

本文针对实际测量环境中的真实地形和不同地物,

研究了大气电场仪的环境误差修订方法。结果表明,有限元法更适于模拟计算真实山体和地物影响下的静电场;大气电场仪在实际测量环境中的主要影响因素为地形、地物以及仪器本身形状;在平坦地形和山体地

形中,误差修订系数均与导体距离具有幂函数的变化关系,与屋顶边缘距离具有二次函数的变化关系。通过模拟计算还得到,崂山的各大气电场仪环境误差修订系数均小于 1,对于屋顶测站和地面测站,地形因子都是环境误差的主要影响因素。对于单体雷暴,在地表附近较小范围内的大气电场仍可视作均匀的,本研究结果一定程度上仍然适用。但由于强对流天气系统的复杂性,雷暴的电荷结构也更复杂,因此还需要进一步研究。

## 参考文献

- [ 1 ] COLE JR R K, PIERCE E T. Electrification in the earth's atmosphere for altitudes between 0 and 100 kilometers[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1965, 70(12): 2735-2749.
- [ 2 ] BYRNE G J, BENBROOK J R, BERING E A. Balloon observations of stratospheric electricity above the South Pole: vertical electric field, conductivity, and conduction current [J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1991, 53(9): 859-868.
- [ 3 ] 杨仲江,朱浩,唐宏科,等. 地面电场仪测量数据的误差来源及分析处理[J]. *大气科学学报*, 2010, 33(6): 751-756.  
YANG ZH J, ZHU H, TANG H K, et al. Research on source of error and analytical processing of atmospheric electric field data [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2010, 33(6): 751-756.
- [ 4 ] 杨波,邱实,高太长. 大气电场仪联网数据一致性及预警方式的改进[J]. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 2007(4): 400-403.  
YANG B, QIU SH, GAO T CH. Atmospheric electric field monitoring net's data coherence and amelioration for alarm mode[J]. *Journal of PLA University of Science and Technology*, 2007(4): 400-403.
- [ 5 ] 周璧华,姜慧,杨波,等. 地物环境对地面大气电场测量的影响[J]. *电波科学学报*, 2010, 25(5): 839-844,1018.  
ZHOU B H, JIANG H, YANG B, et al. Influence of surface features on atmospheric electric field near ground [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2010, 25(5): 839-844,1018.
- [ 6 ] 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.  
GENG X Y, ZHANG Q L, LIU M Y. Effect of tall buildings on thunderstorm electric field [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2012, 40(5): 827-833.
- [ 7 ] 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, 108.  
CHEN X D, SUN J H. Atmospheric electric field meter space factor amendment and EMD decomposition analysis [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2016, 39(12): 93-97, 108.
- [ 8 ] 周俊驰,王振会,郭凤霞,等. 大气电场仪观测结果的修订[J]. *南京信息工程大学学报(自然科学版)*, 2011, 3(3): 244-249.  
ZHOU J CH, WANG ZH H, GUO F X, et al. Calibration of the atmospheric electric field mill [J]. *Journal of Nanjing University of Information Science & Technology: Natural Science Edition*, 2011, 3(3): 244-249.
- [ 9 ] 郭秀峰,谭涌波,郭凤霞,等. 建筑物尖端对大气电场畸变影响的数值计算[J]. *应用气象学报*, 2013, 24(2): 189-196.  
GUO X F, TAN Y B, GUO F X, et al. Numerical simulation of effects of building tip on atmospheric electric field distortion [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2013, 24(2): 189-196.
- [ 10 ] 豆桂芳,吴振远,杜艳林. 三维泊松方程的七点差分格式[J]. *工程地球物理学报*, 2009, 6(6): 802-805.  
DOU G F, WU ZH Y, DU Y L. The seven-point difference scheme for the three-dimensional poisson's equation [J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2009, 6(6): 802-805.
- [ 11 ] 徐伟,夏志祥,行鸿彦. 基于集成经验模态分解和极值梯度提升的雷电预警方法[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(8): 235-243.  
XU W, XIA ZH X, XING H Y. Lightning warning method based on EEMD and XG boost [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(8): 235-243.
- [ 12 ] XING H, HE G, JI X. Analysis on electric field based on three dimensional atmospheric electric field apparatus[J]. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2018, 13(4): 1697-1704.
- [ 13 ] XU W, ZHANG C, JI X, et al. Inversion of a thunderstorm cloud charging model based on a 3D atmospheric electric field[J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(12): 2642.
- [ 14 ] 王燕京. 电磁场数值分析方法[J]. *北京建筑工程学院学报*, 2003:78-83,14.  
WANG J Y. Numerical analysis method of electromagnetic field[J]. *Journal of Beijing Institute of Civil Engineering and Architecture*, 2003: 78-83,14.
- [ 15 ] 魏明,刘尚合. 静态电磁场数值分析方法比较[J].

军械工程学院学报,1998:75-78.

WEI M, LIU SH H. Comparison of numerical analysis methods of static electromagnetic field [J]. Journal of Ordnance Engineering College, 1998: 75-78.

- [16] 龚亚军, 李建清. 理想导电圆柱电磁场分布二维有限元方法分析[J]. 真空电子技术, 2011(1): 16-20.  
GONG Y J, LI J Q. Electromagnetic field distribution of two-dimensional perfectly cylinder of Finite Element Method[J]. Vacuum Electronics, 2011(1): 16-20.
- [17] 曲利岩. 电磁场有限元分析技术的研究和实现[D]. 杭州:浙江大学, 2002.  
QU L Y. Research and realization of finite element analysis technology of electromagnetic field [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002.
- [18] 张义军, 言穆弘, 郭凤霞. 大气电过程与日地关系[M]. 北京: 气象出版社, 2010: 75-89.  
ZHANG Y J, YAN M H, GUO F X. Atmospheric electrical process and the relationship between the sun and earth[M]. Beijing: Meteorological Press, 2010: 75-89.
- [19] 陈学兄, 常庆瑞, 郭碧云, 等. 基于 SRTM DEM 数据的中国地形起伏度分析研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2013, 21(4): 670-678.  
CHEN X X, CHANG Q R, GUO B Y, et al. Analytical study of the relief amplitude in China based on SRTM DEM data [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2013, 21(4): 670-678.
- [20] 朱红春, 刘海英, 张继贤, 等. 基于 DEM 的流域地形因子提取与量化关系研究——以陕北黄土高原的实验为例[J]. 测绘科学, 2007(2): 138-140, 182.

ZHU H CH, LIU H Y, ZHANG J X, et al. Research on the relationship between extraction and quantification of watershed topographic factors based on DEM[J]. Science of Surveying and Mapping, 2007(2): 138-140, 182.

## 作者简介



**宋琳**, 2005 年于南京信息工程大学获得学士学位, 2012 年于南京信息工程大学获得硕士学位, 现为青岛市气象灾害防御技术中心工程师, 主要研究方向为雷电监测与预警技术。

E-mail: qdsonglinyy@163.com

**Song Lin** received her B. Sc. degree in 2005 from Nanjing University of Information Science & Technology, M. Sc. degree in 2012 from Nanjing University of Information Science & Technology. Now she is a meteorological engineer at Qingdao Meteorological Disaster Protection Technology Center. Her main research interests include lightning monitoring and warnings technology.



**丁锋**, 2010 年于南京信息工程大学获得气象学博士学位, 现为青岛市气象灾害防御工程技术研究中心研究员级高级工程师, 主要研究方向为气象灾害防御、海洋气象和应用气象技术。

E-mail: fdingqd@126.com

**Ding Feng** received his Ph. D. degree in 2010 from Nanjing University of Information Science & Technology, He is currently a senior engineer at Qingdao Meteorological Disaster Prevention Engineering Technology Research Center. His main research interests include meteorological disaster prevention, marine meteorology and applied meteorological technology.