

# 复杂地形和土壤电导率对雷电电磁波传播影响及雷电定位优化

王宇<sup>1,2,3,4</sup>, 谷山强<sup>1,2,3,4</sup>, 冯万兴<sup>1,2,3,4</sup>, 李健<sup>1,2,3,4</sup>, 李哲<sup>1,2,3,4</sup>, 赵多青<sup>5</sup>  
(1. 国网电力科学研究院有限公司(南瑞集团有限公司), 南京 211199; 2. 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 武汉 430206; 3. 国家能源雷电灾害监测预警与安全防护重点实验室, 武汉 430206; 4. 电网雷击风险预防湖北省重点实验室, 武汉 430206; 5. 国网西藏电力有限公司, 拉萨 850001)

**摘要:** 针对已有雷电电磁波传播研究主要通过理论分析或假设来获得定性影响规律, 研究结果对雷电监测应用支撑不足的问题, 该文构建了考虑真实复杂地形和土壤电导率分布的雷电电磁波传播模型, 并以西藏电网广域雷电监测系统为研究对象, 专门针对雷电探测站开展了雷电电磁波传播时延和幅值变化的定量计算, 在此基础上提出适用于工程应用的雷电定位优化方法。结果表明: 1) 雷电电磁波接收时间主要受地形影响, 在西藏 63 个探测站 300 km 范围内, 复杂地形可导致接收时间最大延迟 6  $\mu\text{s}$ ; 而雷电电磁波幅值受到地形和土壤电导率共同影响, 地形主要通过波形的折反射增加幅值, 而有限土壤电导率对波形幅值造成衰减。在地形相对平坦地区, 电导率分布对幅值影响较为明显, 电导率可造成幅值衰减 1/3; 而在地形复杂地区, 地形的影响则占主导, 可增强波形幅值达 1 倍以上。2) 考虑地形和土壤电导率后, 西藏电网雷电监测系统需要修正的雷电定位位置误差主要分布在 400 m 内, 定位误差在 0~200 m 和 200~400 m 的区域占比约 70%; 定位误差 400~600 m、600~800 m 的区域占比约 15%。雷电流经校正后在大部分地区雷电流值减小, 减小的区域占比约 90%。

**关键词:** 复杂地形; 土壤电导率; 雷电电磁波; 雷电流; 雷电定位

## Influences of Complex Terrain and Soil Conductivity on the Propagation of Lightning Electromagnetic Waves and Optimization of Lightning Location

WANG Yu<sup>1,2,3,4</sup>, GU Shanqiang<sup>1,2,3,4</sup>, FENG Wanxing<sup>1,2,3,4</sup>, LI Jian<sup>1,2,3,4</sup>, LI Zhe<sup>1,2,3,4</sup>, ZHAO Duoqing<sup>5</sup>

(1. State Grid Electric Power Research Institute Co., Ltd. (NARI Group Co., Ltd.), Nanjing 211199, China; 2. Wuhan NARI Limited Liability Company of State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430206, China; 3. State Key Laboratory of Lightning Disaster Monitoring and Warning and Protection, Wuhan 430206, China; 4. Hubei Provincial Key Laboratory of Power Grid Lightning Risk Prevention, Wuhan 430206, China; 5. State Grid Tibet Electric Power Co., Ltd., Lhasa 850001, China)

**Abstract:** The existing lightning electromagnetic wave propagation research mainly obtains the qualitative influence law through theoretical analysis or hypothesis, and the research results have insufficient support for the application of lightning monitoring. To address the issues above, this paper constructs a lightning electromagnetic wave propagation model considering the real complex terrain and soil conductivity distribution, and takes the Xizang power grid wide-area lightning monitoring system as the research object; moreover, a quantitative calculation of the propagation delay and amplitude changes of lightning electromagnetic waves is carried out specifically for lightning detection stations, and based on this, a lightning positioning optimization method suitable for engineering applications is proposed. The research results show that: (1) The receiving time of lightning electromagnetic wave is mainly affected by the terrain. Within the 300 km range of 63 detection stations in Xizang, the complex terrain can lead to a maximum delay of 6  $\mu\text{s}$ ; the amplitude of lightning electromagnetic waves is jointly affected by terrain and soil conductivity. Terrain mainly increases the amplitude through the refraction and reflection of the waveform, while limited soil conductivity causes attenuation of the waveform amplitude. In relatively flat terrain areas, the distribution of conductivity has a significant impact on the amplitude, and conductivity can cause a 1/3 attenuation of the amplitude; in areas with complex terrain, the influence of terrain

dominates and can enhance the waveform amplitude by more than one time. (2) Considering the terrain and soil conductivity, the lightning location error that needs to be corrected by the lightning monitoring system of Xizang Power Grid is mainly distributed within 400 m, and the area with location error between 0~200 m and 200~400 m accounts for about 70%; the area with positioning errors of 400~600 m and 600~800 m accounts for about 15%. After lightning peak current correction, it decreases in most areas, and the area where lightning peak current decreases accounts for about 90%.

**Key words:** complex terrain; soil conductivity; lightning electromagnetic wave; lightning current; lightning location

## 0 引言

我国每年因雷击引起的人员伤亡和财产损失严重<sup>[1-3]</sup>。在能源电力行业,雷击引发的电网、集电线路跳闸和相关事故频繁发生,给电力系统的安全稳定运行带来严重威胁<sup>[4-5]</sup>。雷电监测技术是一种重要的防雷减灾手段,在电力巡检、气象监测、森林防火、航空保障等方面发挥着重要作用<sup>[6-9]</sup>。目前,各行业推广应用的雷电监测技术是基于极低频/低频(very low frequency/low frequency, VLF/LF)频段雷电电磁波探测的广域雷电监测技术,该技术以雷电电闪回击过程为主要监测对象,通过雷电探测站的分布式组网同步探测和中心站的综合定位计算,实现雷击发生时间和位置的定位及雷击电流强度的反演等主要功能<sup>[6,10]</sup>。VLF/LF 频段雷电电磁波在数百千米内主要沿地球表面传播,在此距离外主要在地-电离层构成的波导中传播<sup>[11]</sup>。广域雷电监测网的组网基线一般为 200~300 km<sup>[10,12]</sup>,雷电探测站接收的雷电电磁波以地波为主。因此,地表的复杂起伏地形、地面有限电导率等成为保证广域雷电监测定位效果不可忽视的因素<sup>[13-14]</sup>。

早在 20 世纪 50 年代,Wait 即开展了地波在球体表面传播问题的理论研究,指出波形上升沿会受到衍射和有限电导率影响而发生偏移<sup>[15]</sup>。70 年代,Uman 等人在美国佛罗里达州开展了雷电回击电磁场波形的实验测量,获得了首次回击、后续回击在 200 km 内不同距离接收时的波形特征,分析了传播距离对波形特征的影响<sup>[16-17]</sup>。为通过遥测电磁场反演回击电流源,Willett 等<sup>[18]</sup>和 Rakov 等<sup>[19]</sup>提出了通过电场峰值估算电流峰值的经验计算式,计算式考虑了回击速度和传播衰减等因素<sup>[20]</sup>;Orville 等通过人工引雷实验检验了遥测磁场峰值和回击电流峰值的定量关系,拟合了磁场波形随传播距离衰减式<sup>[21]</sup>。上述雷电电磁波传播研究相关工作是开展雷电探测的重要基础。

近十多年,随着数值计算方法发展和计算机算

力提升,地形和土壤电磁条件对雷电精度定量影响进一步受到学者们关注。张明霞较系统地研究了土壤、建筑、山体等对雷电辐射磁场传播的影响,提出了考虑土壤电导率情况下雷电磁场反演雷电流强度的修正方法<sup>[22]</sup>。由于海水电导率较大( $>4$  S/m),Zhang 等研究了粗糙海面对雷电电磁波传输的影响,指出粗糙海面引起频率高于 10 MHz 的电场衰减非常显著<sup>[23]</sup>。Hou 等建立了二维锥形山体模型,比较了 0.3~50 km 处电磁场变化规律,发现近距离垂直电场受山体屏蔽作用其幅值被削弱,而远距离垂直电场幅值则由于山脚的反射而增强<sup>[24]</sup>。Zhang Jinbo 等同样利用上述模型开展了导体过电压计算,结果表明山体地形坡度对雷电过电压有显著影响,过电压幅值随地形坡度的升高而明显增大<sup>[25]</sup>。Li 等在瑞士阿尔卑斯山开展了山地地形对雷电定位精度影响仿真和实测分析,通过将数字高程模型数据表征的实际地形融合到时域有限差分方法(finite difference time domain, FDTD),估计出了考虑地形后雷电电磁波传播时间的增加量,认为这部分额外增加的传播时间会引起雷电定位误差达到千米级<sup>[14]</sup>。吉德志等在云南昆明地区的研究也表明,真实地形导致雷电脉冲波形峰值到达时间滞后大概分布在 4~5  $\mu$ s,推测可能引起定位精度偏差达 100 m 到 2 km 不等<sup>[13]</sup>。

总体而言,以上研究充分说明了复杂地形和土壤有限电导率对雷电定位精度、雷电流反演准确度均有明显影响。但已有研究大都通过理论分析或假设山体、土壤电导率等条件来获得定性规律。近年来,仅少量学者开展的研究采用了真实地形数据,尚未有学者面向实际工程应用,开展融合地形和土壤电导率数据的雷电电磁波传播和雷电定位优化研究。本文构建了考虑真实复杂地形和土壤电导率分布的雷电电磁波传播模型,并以西藏电网广域雷电监测系统为研究对象,专门针对雷电探测站开展了雷电电磁波传播时延和幅值变化的定量计算,在此基础上提出了适用于工程应用的雷电定位优化方法。

## 1 方法和数据

### 1.1 考虑复杂地形和土壤电导率的雷电电磁波传播模型构建方法

假设雷电流源沿  $z$  方向传播, 雷电电磁波在  $r$ - $z$  平面传播,  $r$  方向为电磁波沿地表传播方向,  $z$  方向为竖直向上方向, 如图 1 所示。基于麦克斯韦方程组构建出低频雷电电磁波沿地表传播基本方程, 在上述二维柱坐标系下可表示为式(1)。

$$\begin{cases} \frac{\partial E_r}{\partial t} = -\frac{1}{\varepsilon_r \varepsilon_0} \cdot \frac{\partial H_\varphi}{\partial z} - \frac{\sigma_r E_r}{\varepsilon_0} \\ \frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon_0} \cdot \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\gamma H_\varphi) - \frac{\sigma_z E_z}{\varepsilon_0} \\ \frac{\partial H_\varphi}{\partial t} = \frac{1}{\mu_0} \left( \frac{\partial E_z}{\partial r} - \frac{\partial E_r}{\partial z} \right) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $E_r$ 、 $E_z$ 、 $H_\varphi$  分别为传播方向电场、竖直方向电场、水平方向磁场;  $\sigma_r$  和  $\sigma_z$  表示电导率;  $\varepsilon_0$  为真空中介电常数;  $\mu_0$  为真空中磁导率;  $\varepsilon_r$  为相对介电常数。式(1)表示横电波(TE 波)。由于雷电探测站主要测量  $E_z$  和  $H_\varphi$ , 下文以式(1)为基础展开研究。

选取 FDTD 方法求解雷电电磁波传播方程<sup>[26]</sup>, 该方法不仅能直接计算如雷电信号的宽频信号传播问题, 而且具有高度的可并行性, 允许通过图形处理器(graphics processing unit, GPU)加速计算。同时, 为解决开放的电磁波模拟中可能出现的虚假反射波问题, 采用了完美匹配层(perfect matched layer, PML)边界条件<sup>[27]</sup>。采用 FDTD 方法求解时,  $z$  方向取最大高度 30 km, 地表起始高度取地形数据表示的高度, 网格大小 100 m,  $r$  方向步进长度取 50 m, PML 边界取 64 层网格。

在此模型中, 雷电回击通道电流被视为模型的激励源, 该通道被放置在二维柱坐标系的对称轴上(如图 1)。采用 MTLE(modified transmission line model with exponential decay)工程模型作为回击电流模型<sup>[28]</sup>, 如式(2), 其核心特点是基电流在其向上发展的过程中呈现指数衰减。基电流使用 Heidler 函数和双指数函数来构造, 如式(3)<sup>[29]</sup>。

$$I(z', t) = e^{-z'/\lambda} I(0, t - z'/v) \quad (2)$$

$$I(0, t) = \frac{I_{01}}{\eta} \cdot \frac{(t/\tau_1)^2}{(t/\tau_1) + 1} e^{-t/\tau_2} + I_{02} (e^{-t/\tau_3} - e^{-t/\tau_4}) \quad (3)$$

式(2)中电流源通道高度取 5 km, 回击速度  $v$  取  $1.5 \times 10^8$  m/s;  $z'$  为电流传播高度;  $\lambda$  为衰减系数。

式(3)中  $I_{01}=9.9$  kA,  $I_{02}=7.5$  kA,  $\eta=0.845$ ,  $\tau_1=0.072$   $\mu$ s,  $\tau_2=5$   $\mu$ s,  $\tau_3=100$   $\mu$ s,  $\tau_4=6$   $\mu$ s。以上为模拟雷电流源的常用方法和参数设置<sup>[14,30]</sup>。

### 1.2 地形数据和土壤电导率数据

#### 1) 地形数据

本文研究地形数据采用 ETOPO1 全球数字高程模型数据集, 该数据集的空间分辨率为  $1' \times 1'$ (约  $1.6$  km $\times$  $1.6$  km)<sup>[31]</sup>。该数据集被广泛用于地质学、地理学、海洋学和气候研究等领域。图 2 显示了青藏高原地区( $24^\circ \sim 36^\circ$ N,  $76^\circ \sim 102^\circ$ E)地形分布情况。图中黑点表示西藏电网广域雷电探测站, 圆圈表示以探测站为中心的 300 km 范围。从图 2 可看出地形的复杂性, 雷电探测站 300 km 内海拔在 1 000~6 000 m 不等。

#### 2) 土壤电导率数据

土壤电导率数据采用世界土壤数据库(harmonized world soil database, HWSD)数据<sup>[32]</sup>。该数据库为空间分辨率为 30 弧秒(约 1 km)的土壤栅格数据库, 包括土壤名称、分类、参考深度、有效含水量、有机碳含量、酸碱度、电导率等。图 3 显示了我国西藏地区( $24^\circ \sim 36^\circ$ N,  $76^\circ \sim 102^\circ$ E)土壤电导率分布情况, 大部分地区电导率在 1 S/m 以下, 少部分区域达到 2~3 S/m, 土壤电导率分布极不均匀。

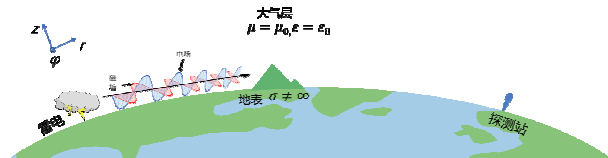


图 1 雷电电磁波传播示意图

Fig.1 Schematic illustration of the propagation of lightning electromagnetic wave

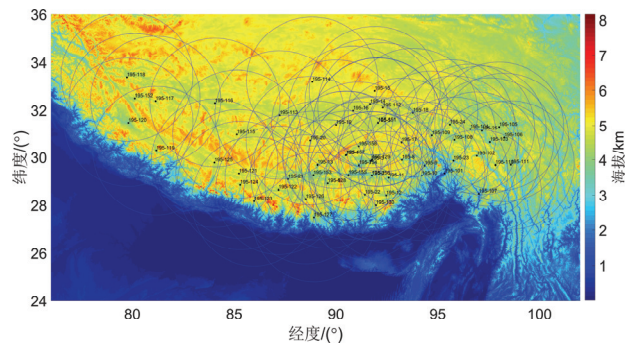


图 2 基于 ETOPO1 模型的青藏高原地区地形分布

Fig.2 Terrain distribution of the Qinghai-Tibet Plateau region in China based on the ETOPO1 model

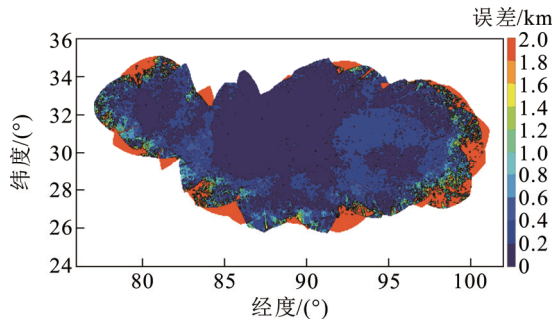


图3 基于 HWSO 数据的青藏高原地区电导率分布

Fig.3 Conductivity distribution of the Qinghai-Tibet Plateau region in China based on HWSO data

## 2 复杂地形和土壤电导率对 VLF/LF 频段雷电电磁波传播影响

### 2.1 针对西藏电网雷电探测站的模拟实验

以雷电探测站为中心, 采用如下仿真设置: 每隔 10 km, 最远至 300 km, 从 0°到 360°(从正北方向开始逆时针排列), 每隔 3°设置仿真点位。在每个仿真点位上设置雷电流源, 仿真获得考虑与不考虑地形和土壤电导率时的雷电电场波形。按照该设置, 可以一次仿真计算雷电探测站同一偏转角上 30 个点位的雷电电磁波波形, 既保障了分辨率与准确度, 又保证了一定的仿真计算速度。图 4 展示了西藏电网某雷电探测站一次雷电电磁波模拟接收结果, 雷击位置距离雷电探测站 124 km。从图 4 可明显看出, 考虑地形和不考虑地形时雷电探测站接收到的雷电波形差异较大。

对于仿真波形, 按照如图 5 所示方法提取与雷电定位相关的波形峰值时间差异和波形峰值幅度差异。基于仿真计算的雷电电磁波波形, 分别提取不考虑地形和地质因素下探测站接收到波形到达时间  $t_a$  和幅值  $A_a$ , 以及考虑地形和地质因素下探测站接收到波形到达时间  $t_b$  和幅值  $A_b$ 。时延校正正值  $\Delta t$  和幅值校正系数  $k$  分别由式(4)和式(5)给出。

$$\Delta t = |t_a - t_b| \quad (4)$$

$$k = \frac{A_a}{A_b} \quad (5)$$

### 2.2 模拟结果

对西藏电网广域雷电地闪监测系统的 63 个探测站周围 300 km 进行了仿真。根据雷电探测站周边地形和土壤电导率分布情况, 分类说明复杂地形和土壤电导率对 VLF/LF 频段雷电电磁波传播影响。共分为 4 类: 第 1 类为地形平坦、土壤电导率

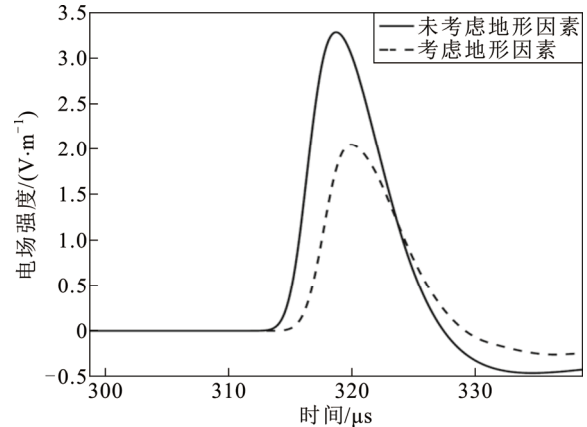


图4 雷电电磁波接收模拟

Fig.4 Simulation of the reception of lightning electromagnetic wave

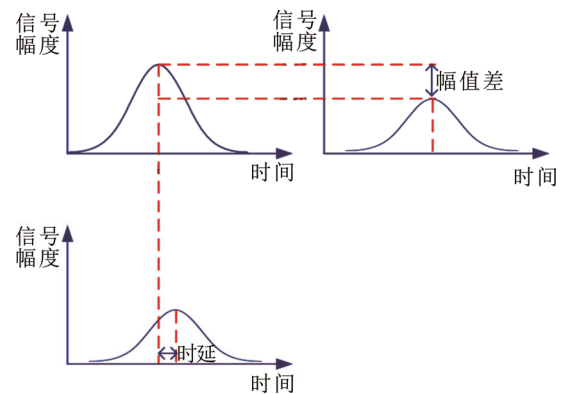


图5 波形参数提取示意图

Fig.5 Schematic diagram of waveform parameter extraction

低地区(A类); 第 2 类为地形平坦、土壤电导率高地区(B类); 第 3 类为地形起伏大、土壤电导率低地区(C类); 第 4 类为地形起伏大、土壤电导率高地区(D类)。分类标准如下: 雷电探测站 300 km 范围内地形落差超过 2 km 即认为是复杂地形, 反之则认为是平坦地形<sup>[33]</sup>; 土壤电导率超过 2 S/m 的区域面积超过 50%即认为土壤电导率高, 反之则认为土壤电导率低。下面选取各类的典型探测站分别展开分析。

#### 1) 地形平坦、土壤电导率低地区(A类)

A类站以双湖站为代表。如图 6 中海拔和电导率分布图所示, 双湖探测站海拔 4 900 m, 其 300 km 范围内地形变化相对较小, 仅东侧有海拔 6 000 m 高山, 此范围内其他地点相对探测站的海拔落差小于 1 000 m; 电导率整体偏低, 仅在探测站东侧和西南侧存在部分较高电导率区域。从图 6 时延分布图可看出, 在双湖探测站 300 km 范围内, 考虑地形起伏和土壤电导率后波形到达时间延迟不超过

1  $\mu\text{s}$ , 说明时延主要受地形影响, 受电导率影响较小; 从图 6 幅值比分布图可看出, 全域内幅值以衰减为主(幅值比大于 1), 说明在地形起伏较小的情况下, 电导率的作用减弱了波形幅值。

2) 地形平坦、土壤电导率高地区(B 类)

B 类站以江达站为代表。如图 7 中海拔和电导率分布图所示, 江达探测站海拔 4 000 m, 其 300 km

范围内地形变化比双湖站稍剧烈, 全域相对探测站海拔落差超过 2 000 m; 土壤电导率北部低、南部高。从图 7 时延分布图可以看出, 全域时延大部分在 2  $\mu\text{s}$  以内, 仅西南侧小面积区域达到 3  $\mu\text{s}$ ; 从图 7 幅值比分布图看出, 全域幅值比分布非常复杂, 幅值比大于 1 的区域和幅值比小于 1 的区域占比都比较高, 这是地形和土壤电导率共同作用的结果。

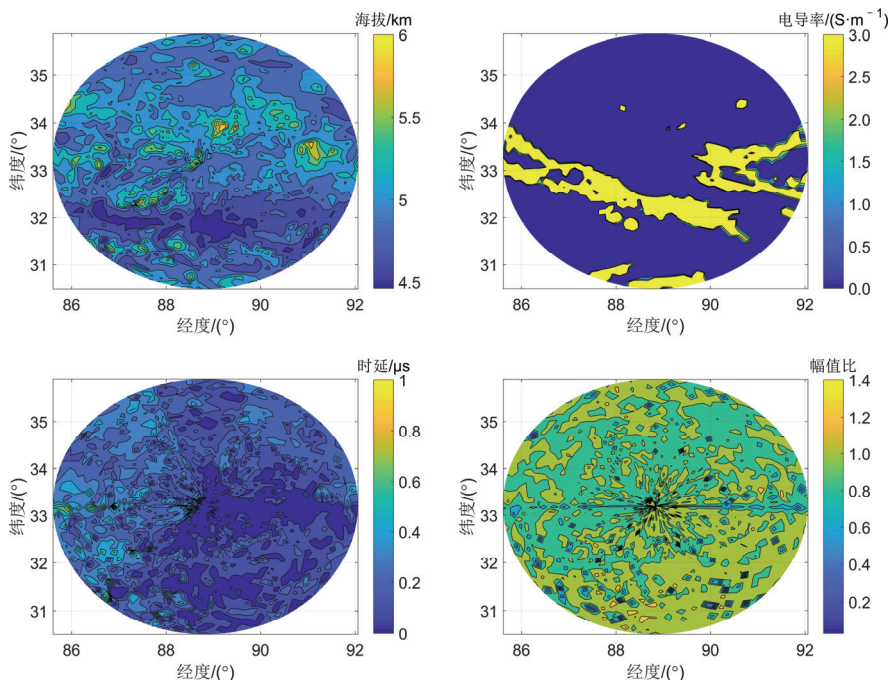


图 6 双湖站 300 km 范围内海拔、电导率、时延和波形幅值比分布

Fig.6 Distribution of altitude, conductivity, time delay, and waveform amplitude ratio within 300 km of Shuanghu station

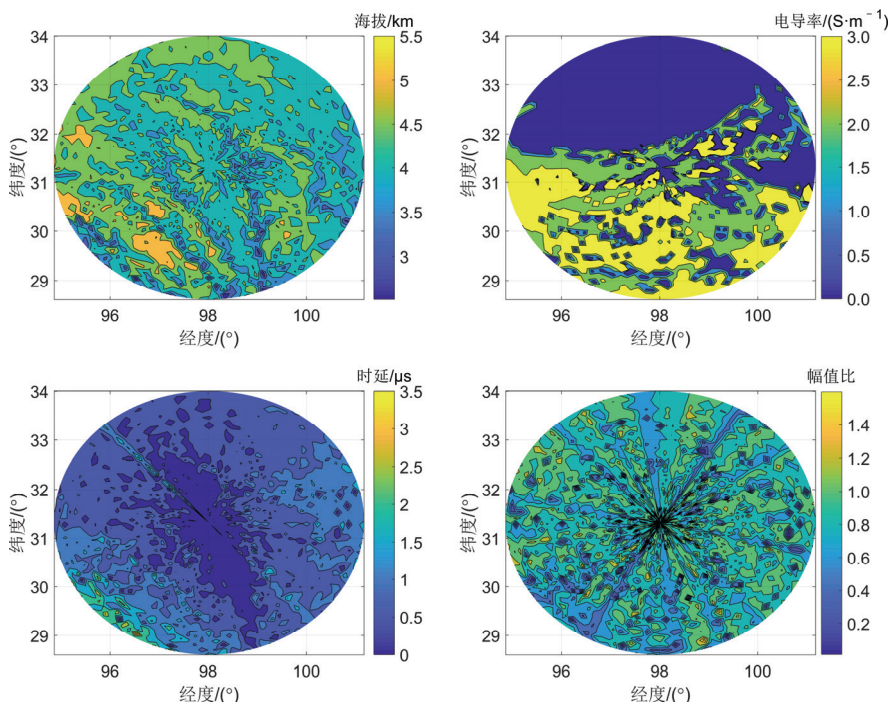


图 7 江达站 300 km 范围内海拔、电导率、时延和波形幅值比分布

Fig.7 Distribution of altitude, conductivity, time delay, and waveform amplitude ratio within 300 km of Jiangda station

3) 地形起伏大、土壤电导率低地区(C类)

C类站以吉隆站为代表。如图8海拔和电导率分布图所示, 吉隆探测站海拔4 200 m, 位于中国与尼泊尔边境地带, 其300 km范围地形呈现北高南低的态势, 海拔落差很大, 同时在地形突变区北部和南部地区, 地形相对较平坦; 全域土壤电导率较低, 在探测站北侧和东南侧存在带状高电导率区。从图8时延分布图可以看出, 全域大部分地区时延

在2  $\mu\text{s}$  及以下, 但在地形突变区时延增大, 最大可达到6  $\mu\text{s}$ ; 从图8幅值比分布图也发现在地形突变区幅值比下降, 即考虑地形和土壤电导率后雷电电场波形峰值增大。除地形突变区以外, 其他大部分地区幅值比在1左右。

4) 地形起伏大、土壤电导率高地区(D类)

D类站以墨脱站为代表。如图9中海拔和电导率分布图所示, 墨脱探测站海拔1 000 m, 其300 km

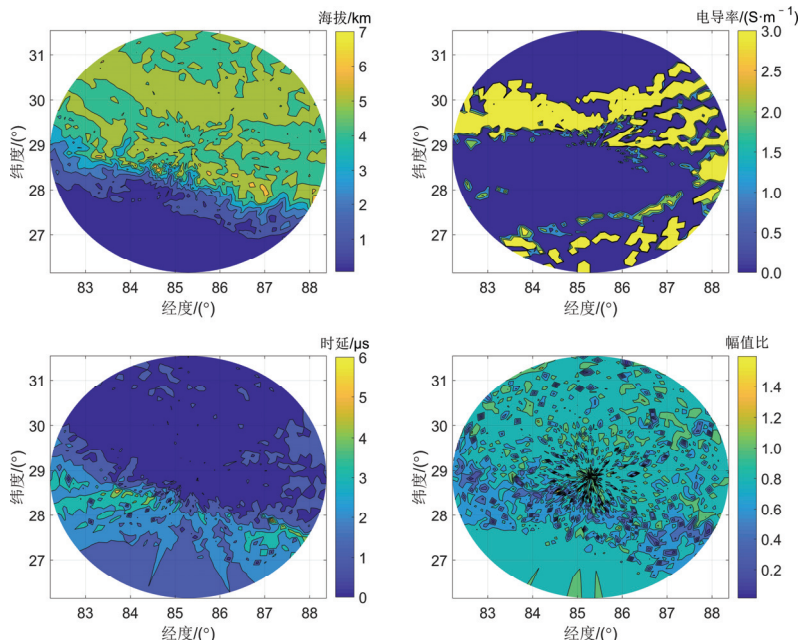


图8 吉隆站300 km范围内海拔、电导率、时延和波形幅值比分布

Fig.8 Distribution of altitude, conductivity, time delay, and waveform amplitude ratio within 300 km of Jilong station

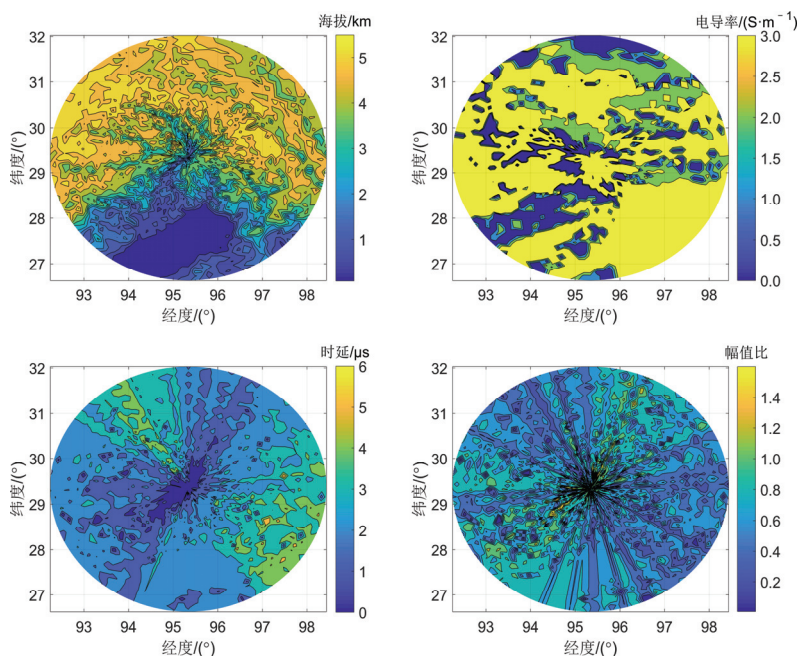


图9 墨脱站300 km范围内海拔、电导率、时延和波形幅值比分布

Fig.9 Distribution of altitude, conductivity, time delay, and waveform amplitude ratio within 300 km of Motuo station

范围地形呈现北高南低的态势, 海拔落差极大; 由于该地区雨量充沛、植被丰富, 土壤电导率较高, 全域大部分土壤电导率达到 3 S/m; 从图 9 时延分布图可看出, 时延差异较大, 西北侧和东南侧存在部分高时延区域, 最高可达 6  $\mu\text{s}$ , 其他地区时延大部分在 2  $\mu\text{s}$  以下; 从图 9 幅值比分布图可看出, 在地形和电导率双重作用下, 全域幅值比大部分地区小于 1。

通过分析总结, 雷电电磁波接收时间主要受地形影响, 在西藏 63 个探测站 300 km 范围内, 复杂地形可导致接收时间最大延迟 6  $\mu\text{s}$ ; 而雷电电磁波幅值受到地形和土壤电导率共同影响, 地形主要通过波形的折反射增加幅值, 而有限土壤电导率对波形幅值造成衰减。在地形相对平坦地区(300 km 范围内海拔落差不超过 2 000 m), 电导率分布对幅值影响较明显, 电导率可造成幅值衰减 1/3; 而在地形复杂地区, 地形的影响则占主导, 可增强波形幅值达 1 倍以上。上述数据将用于西藏地区雷电定位优化, 对西藏高海拔地区雷电探测站选址也具有重要参考意义。

### 3 考虑复杂地形和土壤电导率的雷电定位优化方法

#### 3.1 雷电定位优化方法

本文提出的考虑地形、土壤电导率对雷电电磁波传播影响的雷电定位优化方法主要包括两个步骤。

第 1 步: 采用现有雷电定位算法<sup>[34]</sup>和雷电流反演方法<sup>[20]</sup>计算得到雷击位置和雷电流强度。

雷电定位算法即求解式(6)。

$$\begin{cases} t_i = t + \frac{S_{iP}}{c} + \varepsilon_{Ti} \\ \alpha_i = \beta_{iP} + \varepsilon_{Ai} \end{cases} \quad (6)$$

式中: 雷电发生在位置  $P$  处, 发生时间用  $t$  表示。 $t_i$  和  $\alpha_i$  分别为雷电到达探测站  $S_i$  的时间和方位角;  $S_{iP}$  为探测站  $S_i$  与地闪发生位置之间的大地线长度;  $\beta_{iP}$  为大地线方位角;  $c$  为电磁波传播速度;  $\varepsilon_{Ti}$  和  $\varepsilon_{Ai}$  分别为到达时间观测量和到达方向观测量对应的误差。

雷电流反演方法见式(7)。

$$I_p(t) = \frac{2\pi c D}{\mu_0 v} B_p \left( t + \frac{D}{c} \right) \quad (7)$$

式中:  $I_p$  和  $B_p$  分别表示回击电流峰值和磁通密度峰值;  $D$  为回击点与观测点之间的水平距离;  $v$  为回

击速度。

第 2 步: 根据雷击位置检索参与定位的雷电探测站的时延校正值  $\Delta t_i$  和幅值校正系数  $k_i$ , 假设各站的到达时间为  $t_i$ , 雷电流为  $I_i$ ,  $i=1, 2, 3, \dots, N$ , 表示参与雷电定位的探测站个数, 则校正后到达时间  $t'_i$  和雷电流  $I'_i$  分别为式(8)和式(9)所示。

$$t'_i = t_i - \Delta t_i \quad (8)$$

$$I'_i = I_i k_i \quad (9)$$

再次采用现有雷电定位算法和雷电流反演方法计算即可得到优化的雷击位置和雷电流强度。

#### 3.2 西藏电网雷电定位系统优化结果

基于上文获得的西藏雷电探测站 300 km 半径范围内的时延校正参数和幅值校正参数, 下面仿真分析青藏高原地区(24°~36°N, 76°~102°E)雷击定位和雷电流反演误差。图 10 为青藏高原地区地形叠加雷电探测站分布图, 图中圆圈表示以探测站为中心 300 km 半径范围。从图中可看出, 在假设雷电探测站探测范围可达到 300 km 时, 青藏高原地区大部分区域可被多站有效覆盖。

仿真分析方法为: 将区域(24°~36°N, 76°~102°E)网格化, 网格大小 0.05°(约 5 km), 对每个格点, 搜索 300 km 范围内雷电探测站可达数量, 若超过 3 个, 即启动仿真分析流程; 检索该格点在各可达雷电探测站的极坐标位置, 提取对应的时延校正参数; 按照式(6)和式(7)校正参数, 计算优化的雷击位置和雷电流强度; 最后, 将计算位置与格点位置比较, 得到该格点的仿真误差。该误差值也可认为是考虑了地形和土壤电导率后可以校正的差值。

从图 10 可以看出, 考虑地形和土壤电导率后, 西藏电网雷电监测系统需要修正的雷电定位位置误差大部分分布在 400 m 以内, 从图 11 可以看出, 定位误差在 0~200 m 和 200~400 m 的区域占比约

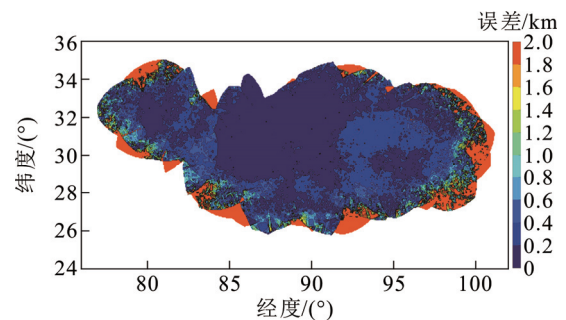


图 10 雷击定位误差空间分布

Fig.10 Spatial distribution of lightning location errors

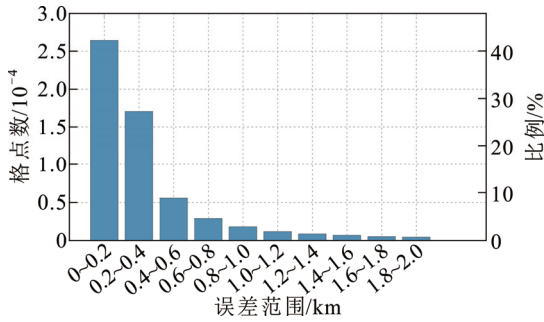


图 11 雷击定位误差直方图

Fig.11 Histogram of lightning location errors

70%; 定位误差 400~600 m、600~800 m 的区域主要在日喀则以西、山南南部地区, 沿喜马拉雅山脉分布, 占比约 15%; 误差超过 800 m 的区域主要分布在西藏雷电监测系统的外围, 包括阿里地区北部和南部、喜马拉雅山脉沿线地区、昌都以东和以南地区。

雷电流反演误差按式(10)计算。

$$\rho_l = \frac{I'}{I} - 1 \quad (10)$$

式中:  $\rho_l$  表示反演误差;  $I'$  为校正后雷电流;  $I$  为校正前雷电流。误差为正值, 表示校正后雷电流增大; 误差为负值, 表示校正后雷电流减小。图 12 显示了雷电流反演误差空间分布, 从图中可看出, 校正后雷电流在大部分地区减小。从图 13 可以看出, 校正后雷电流减小的区域占比 90%。特别在喜马拉雅山脉沿线、昌都南部地区, 校正后雷电流减小最高达 70%。校正后雷电流增大的个例, 其增幅主要分布在 0~10% 之间, 主要分布在那曲地区以北, 该地区地形平坦、土壤电导率较低, 地形和地质条件对雷电电磁波主要以衰减为主, 因而校正后雷电流得到提高。

#### 4 结论

1) 本文建立了可考虑地形和土壤电导率的雷电电磁波传播计算模型, 研究了西藏电网 63 个广域雷电探测站周围(300 km 范围内)雷电电磁波传播特性。经分析总结, 雷电电磁波接收时间主要受地形影响, 在西藏电网 63 个探测站 300 km 范围内, 复杂地形可导致接收时间最大延迟 6  $\mu$ s; 雷电电磁波幅值受地形和土壤电导率共同影响, 地形主要通过波形折反射增加幅值, 而有限土壤电导率对波形幅值造成衰减。在地形相对平坦地区, 电导率分布对幅值影响较明显, 电导率可造成幅值衰减 1/3; 而

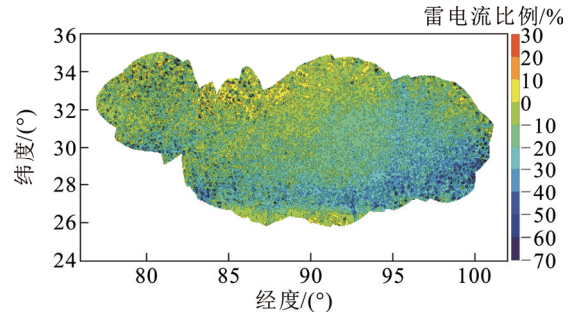


图 12 雷电流反演误差空间分布

Fig.12 Spatial distribution of lightning current inversion errors

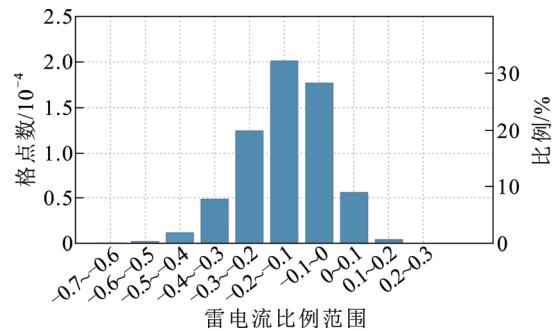


图 13 雷电流反演误差分布直方图

Fig.13 Histogram of lightning current inversion errors

在地形复杂地区, 地形的影响则占主导, 可增强波形幅值达 1 倍以上。

2) 仿真获得了考虑与不考虑地形和土壤电导率时的雷电电磁波波形, 从波形中提取出了对雷电定位有明显影响的时延和幅值关键参数; 提出了雷电定位优化方法, 实现了查表获得雷电优化参数, 进而优化计算雷电位置和雷电流强度。经仿真分析, 考虑地形和土壤电导率后, 西藏电网雷电监测系统需要修正的雷电定位位置误差主要分布在 400 m 内, 定位误差 0~200 m 和 200~400 m 区域占比约 70%; 定位误差 400~600 m、600~800 m 的区域主要在日喀则以西、山南南部地区, 沿喜马拉雅山脉分布, 占比约 15%; 误差超过 800 m 的区域主要分布在西藏雷电监测系统的外围, 包括阿里地区北部和南部、喜马拉雅山脉沿线地区、昌都以东和以南地区。

3) 对于西藏电网广域雷电监测系统, 雷电流经校正后在大部分地区减小, 雷电流减小的区域占比 90%, 特别在喜马拉雅山脉沿线、昌都南部地区, 校正后雷电流减小最高达 70%。校正后雷电流增大的个例, 其增幅主要分布在 0~10% 之间, 主要分布在那曲地区以北, 该地区地形平坦、土壤电导率较低, 地形和地质条件对雷电电磁波主要以衰减作用

为主, 因而校正后雷电流得到提高。

## 参考文献 References

- [1] 梅 贞, 陈水明, 顾勤伟, 等. 1998~2004 年全国雷电灾害事故统计[J]. 高电压技术, 2007, 33(12): 173-176.  
MEI Zhen, CHEN Shuiming, GU Qinwei, et al. Statistic of lightning accidents during 1998~2004 in China[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(12): 173-176.
- [2] 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): 42-47.  
TIAN Debao, FENG Yuhua, ZHANG Xuehui, et al. Statistics analysis of lightning disaster accidents in China from 2012 to 2017[J]. Bulletin of Science and Technology, 2020, 36(5): 42-47.
- [3] 许小峰. 雷电灾害与监测预报[J]. 气象, 2004, 30(12): 17-21.  
XU Xiaofeng. Lightning induced disasters and its detecting and forecasting[J]. Meteorological Monthly, 2004, 30(12): 17-21.
- [4] 刘沐杰. 防止同塔双回输电线路雷击同跳事故的方案研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.  
LIU Mujie. Study on the scheme to prevent lightning strike trip accidents on same tower double circuit transmission lines[D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2015.
- [5] 邓渝亭, 陈 亮. 风电场集电线路防雷保护的研究[J]. 电气技术, 2016(6): 167-169.  
DENG Yuting, CHEN Liang. Study on lightning protection of collection lines in wind farms[J]. Electrical Technology, 2016(6): 167-169.
- [6] 陈家宏, 张 勤, 冯万兴, 等. 中国电网雷电定位系统与雷电监测网[J]. 高电压技术, 2008, 34(3): 425-431.  
CHEN Jiahong, ZHANG Qin, FENG Wanxing, et al. Lightning location system and lightning detection network of China power grid[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(3): 425-431.
- [7] 赵多青, 谷山强, 王 宇, 等. 西藏高海拔地区输电线路沿线雷电地闪时空分布特征[J]. 高电压技术, 2023, 49(7): 3090-3101.  
ZHAO Duoqing, GU Shanqiang, WANG Yu, et al. Spatio-temporal characteristics of the cloud-to-ground lightning activity along the transmission lines in the Tibet high-altitude area[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 3090-3101.
- [8] 孟晓阳, 王佳权, 马启明, 等. 2020 年基于 VLF/LF 三维闪电定位系统的全国闪电数据集[J]. 中国科学数据, 2022, 7(1): 25-38.  
MENG Xiaoyang, WANG Jiaquan, MA Qiming, et al. A dataset of lightning in China based on VLF/LF lightning location monitoring system[J]. China Scientific Data, 2022, 7(1): 25-38.
- [9] 李 兵, 周 剑, 卜俊伟, 等. 木里县森林火灾原因分析及闪电监测资料应用[J]. 灾害学, 2021, 36(3): 125-130, 159.  
LI Bing, ZHOU Jian, BU Junwei, et al. Analysis of forest fire causes and application of lightning monitoring data in Muli county[J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(3): 125-130, 159.
- [10] CUMMINS K L, MURPHY M J, BARDO E A, et al. A combined TOA/MDF technology upgrade of the U. S. national lightning detection network[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1998, 103(D8): 9035-9044.
- [11] Naval Education and Training Professional Development and Technology Center. Navy Electricity and Electronics Training Series Module 10-Introduction to wave propagation, transmission lines, and antennas[M]. [S.l.]: Naval Education and Training Professional Development and Technology Center, 1998.
- [12] 陈家宏, 赵 淳, 谷山强, 等. 我国电网雷电监测与防护技术现状及发展趋势[J]. 高电压技术, 2016, 42(11): 3361-3375.  
CHEN Jiahong, ZHAO Chun, GU Shanqiang, et al. Present status and development trend of lightning detection and protection technology of power grid in China[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(11): 3361-3375.
- [13] 吉德志, 张运龙, 王 磊, 等. 昆明地区连绵起伏山体对地闪回击定位精度影响的模拟研究[J]. 电波科学学报, 2021, 36(2): 179-186, 312.  
JI Dezhi, ZHANG Yunlong, WANG Lei, et al. Simulation study on the impact of rolling hills in Kunming area on the accuracy of cloud-to-ground return stroke location[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2021, 36(2): 179-186, 312.
- [14] LI D S, RUBINSTEIN M, RACHIDI F, et al. Location accuracy evaluation of ToA-based lightning location systems over mountainous terrain[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2017, 122(21): 11760-11775.
- [15] WAIT J. The transient behavior of the electromagnetic ground wave on a spherical earth[J]. IRE Transactions on Antennas and Propagation, 1957, 5(2): 198-202.
- [16] UMAN M A, SWANBERG C E, TILLER J A, et al. Effects of 200 km propagation on Florida lightning return stroke electric fields[J]. Radio Science, 1976, 11(12): 985-990.
- [17] LIN Y T, UMAN M A, TILLER J A, et al. Characterization of lightning return stroke electric and magnetic fields from simultaneous two-station measurements[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1979, 84(C10): 6307-6314.
- [18] WILLETT J C, BAILEY J C, IDONE V P, et al. Submicrosecond intercomparison of radiation fields and currents in triggered lightning return strokes based on the transmission-line model[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1989, 94(D11): 13275-13286.
- [19] RAKOV V A, THOTTAPPILLIL R, UMAN M A. On the empirical formula of Willett et al. Relating lightning return-stroke peak current and peak electric field[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1992, 97(D11): 11527-11533.
- [20] 王 宇, 谷山强, 孟 刚, 等. 雷电定位系统反演地闪回击电流的准确度受回击速度取值的影响[J]. 高电压技术, 2021, 47(5): 1617-1624.  
WANG Yu, GU Shanqiang, MENG Gang, et al. Effect of lightning return stroke speed on accuracy of inversed return stroke peak current using lightning location system[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1617-1624.
- [21] IDONE V P, SALJOUGHY A B, HENDERSON R W, et al. A reexamination of the peak current calibration of the National Lightning Detection Network[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1993, 98(D10): 18323-18332.
- [22] 张明霞. 雷电电磁场计算方法及沿地表传播特性的研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2009.  
ZHANG Mingxia. Research on the calculation method and propagation along ground surface of lightning electromagnetic field[D]. Beijing, China: North China Electric Power University (Beijing), 2009.
- [23] ZHANG Q L, YANG J, JING X Q, et al. Propagation effect of a fractal rough ground boundary on the lightning-radiated vertical electric field[J]. Atmospheric Research, 2012, 104-105: 202-208.
- [24] HOU W H, ZHANG Q L, WANG L, et al. Effect of striking a cone-shaped mountain top on the far lightning-radiated electromagnetic field[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2019, 61(4): 1147-1156.
- [25] ZHANG J B, ZHANG Q L, HOU W H, et al. Evaluation of the lightning-induced voltages of multiconductor lines for striking cone-shaped

- mountain[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2019, 61(5): 1534-1542.
- [26] YEE K. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1966, 14(3): 302-307.
- [27] BERENGER J P. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves[J]. Journal of Computational Physics, 1994, 114(2): 185-200.
- [28] RAKOV V A, UMAN M A. Review and evaluation of lightning return stroke models including some aspects of their application[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1998, 40(4): 403-426.
- [29] HEIDLER F, CVETIĆ J. A class of analytical functions to study the lightning effects associated with the current front[J]. European Transactions on Electrical Power, 2002, 12(2): 141-150.
- [30] KARNAS G. Computation of lightning current from electric field based on Laplace transform and deconvolution method[J]. Energies, 2021, 14(14): 4201.
- [31] NOAA National Geophysical Data Center. ETOPO1 1 Arc-minute global relief model[EB/OL]. NOAA National Centers for Environmental Information.[2023-07-19]. <https://www.ncei.noaa.gov/access/metadata/landing-page/bin/iso?id=gov.noaa.ngdc.mgg.dem:316#Lineage>.
- [32] FAO/IIASA/ISRIC/ISS-CAS/JRC. Harmonized world soil database (version 1.2)[M]. FAO, Rome, Italy and IIASA, Laxenburg, Austria, 2012.
- [33] 柴宗新. 四川城镇的地貌分类与灾害[J]. 西南师范大学学报, 1990, 15(4): 519-524.  
CHAI Zongxin. On the landform classification and hazards of cities and Townsin Sichuan province[J]. Journal of Southwest University, 1990, 15(4): 519-524.
- [34] 赵文光, 陈家宏, 张 勤, 等. 新的雷电综合定位系统的定位计算[J]. 高电压技术, 1999, 25(4): 66-68.  
ZHAO Wenguang, CHEN Jiahong, ZHANG Qin, et al. Positioning calculation on new combined lightning location system[J]. High Voltage Engineering, 1999, 25(4): 66-68.



WANG Yu

Ph.D.

Senior engineer

王 宇

1987—, 男, 博士, 高工

主要从事雷电物理及电力系统防雷技术研究工作

E-mail: wangyu16@sgepri.sgcc.com.cn



GU Shanqiang

Ph.D., Professor

Corresponding author

谷山强(通信作者)

1980—, 男, 博士, 研究员级高工

主要从事高电压绝缘与电力系统防雷技术研究工作

E-mail: gushanqiang@sgepri.sgcc.com.cn

收稿日期 2024-04-12 修回日期 2024-09-10 编辑 卫李静