第 50 卷 第 11 期：4971-4980　　高电压技术　　Vol.50, No.11: 4971-4980
2024 年 11 月 30 日　　High Voltage Engineering　　November 30, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20232060

基于 DEM 分析的输电线路覆冰微地形分类识别及验证方法

邓　颖，蒋兴良，张志劲，曾蕴睿，马龙飞
（重庆大学雪峰山能源装备安全国家野外科学观测研究站，重庆 400044）

摘　要：普遍存在的微地形小气候是导致输电线路覆冰的严重隐患，但目前的微地形定义仍为模糊的描述性定义，现有的量化分类方法主要依赖于大量观测样本和经验知识。为此基于数字高程模型(digital elevation model，DEM)和覆冰灾害故障统计数据，提取地形特征线和地形表面参数，提出了微地形的分类识别条件。根据各类微地形的地理特征边界条件构建了简化地理模型，通过数值模拟计算和风洞试验对分类识别条件进行验证，模拟计算不同微地形条件下的微气象特征，验证了覆冰微地形识别条件的可靠性。结果表明：覆冰微地形通常为连续分布，较少孤立存在，且容易出现多种类型微地形同时存在的复杂微地形；符合识别条件的典型覆冰微地形具有明显的微气象特征，迎风入口处受到的影响最明显，除垭口微地形外最大风加速效应均出现在山顶位置。该方法克服了聚类法在地理意义上的不可描述性，降低了样本依赖性，为缺乏覆冰观测条件的输电线路提供了设计标准。
关键词：输电线路；覆冰微地形；数字高程模型；地形特征；计算流体动力学

Icing Micro-terrain Identification and Verification Method of Transmission Line Based on DEM Analysis

DENG Ying, JIANG Xingliang, ZHANG Zhijin, ZENG Yunrui, MA Longfei
(Xuefeng Mountain Energy Equipment Safety National Observation and Research Station, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Widespread micro-terrain microclimates pose a serious risk of icing for transmission lines. However, the current definition of micro-terrain remains a vague descriptive definition, and existing quantification methods mainly rely on a large number of observational samples and empirical knowledge. This paper proposes a method for extracting indicators and identification criteria for micro-terrain based on digital elevation models (DEMs) and statistical data on icing disasters. Simplified geographical models are constructed based on geographical feature boundaries for various micro-terrain types. Validation of the classification and identification conditions is performed through numerical simulation calculations and wind tunnel experiments. Moreover, the meteorological characteristics are simulated under different micro-terrain conditions, and the reliability of the identification conditions for ice-covered micro-terrain is verified. The results indicate that icing micro-terrain is typically distributed continuously and is less likely to exist in isolation, often exhibiting complex combinations of multiple micro-terrain types. Typical icing micro-terrain that meets the identification criteria displays distinct micro-meteorological characteristics, with the most pronounced effects at windward entrances and maximum wind acceleration occurring at mountain summits except for saddle types. This method overcomes the shortcomings of clustering methods that lack geographical interpretability and reduces sample dependence, providing design standards for transmission lines in the absence of icing observations.
Key words: transmission line; icing micro-terrain; digital elevation model; terrain feature; computational fluid dynamics

0　引言

随着特高压输电系统的建设，长距离输电将成为常态化发展趋势，我国幅员辽阔，地形气候条件相当复杂，几乎包含所有的地形和气候类型，许多输电线路不可避免地会经过一定范围内的复杂地形，气候环境差异相对较大，导致严重覆冰现象常有发生，甚至发展成输电线路覆冰灾害，严重威胁电力系统的安全运行，也使得中国成为输电线路覆冰事故高发的国家之一[1-5]。

基金资助项目：国家自然科学基金(51637002)；中国大学生创新创业训练项目专项经费资助项目(00140051070027)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (51637002), Special Funds for Innovation and Entrepreneurship Training Program for Chinese University Students (00140051070027).

根据覆冰灾害报告，输电线路覆冰主要发生在极寒、高海拔、峡谷等气象环境较为复杂的区域，主要可以分为以下 5 种类型[6]：高山分水岭、垭口型、地势抬升型、峡谷风道型以及水汽增大型。

国内外研究人员对输电线路覆冰已经有了深入的理论研究，其成因和原理有了系统的结论。但许多学者意识到不能忽视微地形小气候区域对输电线路覆冰的影响，已有许多学者针对某一个具体的气象因子或是地形因子的影响开展研究工作[7-8]，并逐渐尝试结合气象和地形两方面进行分析[9-11]。20 世纪 90 年代起，王守礼等根据输电线路的运行经验，结合大量实地考察资料，首次系统地介绍了微地形、微气象对输电线路的影响[6]。张弦介绍了微地形微气象的概念及其对覆冰的影响机制，并针对此类地区提出了相应的线路改进措施[12]。夏智宏等研究了各微地形因子与电线积冰厚度的影响关系及敏感性等级[13]。陆佳政等基于微地形对输电线路的影响程度，提出了输电线路覆冰等级判别模型[14]。何向奎等将微地形和微气象综合考虑，针对几类典型区域分析了线路覆冰因素及特征[9]。

为了实现输电线路的差异化防护，在选址和设计中，需要明确微地形的类型及其影响范围。因此地理信息系统(geographic information system, GIS)在该领域的应用得到了进一步的研究。目前的线路覆冰微地形分类识别方法主要是基于语义描述和数据驱动的方法。但语义描述概念不明确，不利于分析其特征。郭新春等和吴建蓉等利用 GIS 实现了线路易覆冰区的大范围识别[15-16]，但其对于类别选取较为简单，难以反映实际线路的微地形条件和覆冰情况。张露松等利用改进聚类算法和各微地形因子对覆冰的影响权重计算，得到了覆冰区量级修正系数，该方法准确性较高，但受限于稀疏的覆冰观测站分布，难以在全国范围推广[17]。周访滨等和胡京等分别基于优选的地形特征因子提出了微地形提取决策表[18-19]，通过线路实际灾害分布与分类结果来对比验证，然而微地形小气候区多位于交通不发达的偏远地区，实地勘测数据较少，所处时空背景具有差异，容易导致分类结果缺乏代表性。

目前缺乏对于微地形小气候的定义和识别方法的相关研究，难以实现特征描述和建模构建，研究结论通常存在较大的地域限制，较难推广。由于高山、垭口、峡谷等微地形区域仍存在大量覆冰观测盲区，现有的输电线路抗冰设计仍主要采用统一化标准设计，对微地形微气象环境考虑欠缺。因此，有必要对每一类区域开展有针对性的研究，提出普遍适用的覆冰微地形区域的分类识别方法。本文通过分析输电线路覆冰微地形的地理气象特征，提取相关地形特征并对其进行计算判断，提出了基于数字高程模型(digital elevation model，DEM)的微地形识别及验证方法。根据各类微地形的地理特征边界条件，实现微地形简化建模，模拟计算并总结了不同微地形条件下的微气象特征，验证了识别方法的有效性。

1 覆冰微地形的分类及特征

微地形相对普通地形而言，是属于大地形的一个局部的、能够引起气象参数变化的狭小范围。对输电线路而言，微地形通常被描述为：在近地侧一个具体的小地形范围内，局部地理特征使该处的气象因子产生巨变，使其中某些气象因子显著增强(如风速、湿度等)，从而使经过该小地形范围内的输电线路覆冰显著加强，因此覆冰事故往往发生在线路途经的几百米范围的局地，仅仅在 1 级或者几级杆塔之间，这样的小地形范围称为覆冰微地形。

根据地区输电线路历史覆冰数据、气象资料，并结合微地形区域的实地灾害调研情况，相关研究将典型的覆冰微地形总结为 5 类，为高山分水岭型、地势抬升型、垭口型、峡谷风道型、水汽增大型。由于水汽增大往往不会单独存在，且不具备地形特征，因此本文选择对高山分水岭型、地势抬升型、垭口型、峡谷风道型进行识别研究。

1）地势抬升

该地形由从地面突然升起的平原或丘陵组成，表现为较高的台地和陡峭的山坡。低洼地区通常有较多的水汽，当风速较高时，湿空气会沿着斜坡上升，在山顶或台地形成云。冬季冷空气入侵会导致输电线路出现严重覆冰现象。

2）分水岭

在冬季，分水岭迎风坡会经历冷强风，气团向上流动输送过冷却水滴。当空气沿着斜坡上升时，湿空气会发生绝热膨胀，导致过冷水滴浓度增加，从而加剧输电线路的覆冰情况。

3）峡谷风道

输电线路穿过宽阔的峡谷，通过狭管效应使风速显著增加。因此，输电线路上的风荷载大幅增加。这种配置会导致输电线路附近的水汽积聚，容易形

成严重覆冰。

4）垭口

气流经过山区低洼洼地或 2 座山脉之间(例如山口)时，被认为会受到加速效应，此类地形通常被称为垭口。这种现象导致输电线路穿越垭口时风速显著增加，从而增加了输电线路积冰的可能性。

2　方法与流程

DEM 是数字地形分析的基础，包含了平面位置和地形高程 2 类信息，栅格 DEM 是目前世界上较为通用的 DEM 数据，具有存储方便、计算效率高的优点。因此本研究采用阿拉斯加卫星设施分布式活动存档中心公开数据集中的 12.5 m 高分辨率 DEM 数据进行地形特征提取。

2.1　地形特征提取

在地貌形态类型的分类中，高程起着主导作用，而坡度和坡向则是地表形态的基本参数。然而，坡向是有方向性的，这可能导致坡向值相同但地貌形态不同，从而阻碍地貌形态分类。另一方面，山谷线和山脊线是地貌类型分类的重要特征。它们有助于定义不同地形之间的边界，并提供有关地貌景观的形状、方向的信息。因此，本研究基于栅格 DEM 提取了坡比、相对高程、山脊线、山谷线和鞍部点，以山脊线与山谷线等水文特征作为覆冰微地形的地形骨架，同时以具有明确数学定义的坡比、相对高程等地形曲面参数确定其边界范围。总体技术路线如图 1 所示。

在地形提取中，采用最大坡度算法[20]来提取基本地形参数，例如山顶点、山谷点、坡比。使用水文分析，矩阵经历洼地填充和高程平滑，产生无洼地高程矩阵，计算流向矩阵并沿流向累积流量以构建流域树[21]。同样通过反地形分析可以得到山脊线。对于微地形分析，以累计流量和流域树的地形起伏度特征指标将山脊线进一步聚类分为主级山脊和次级山脊[22]，提取流程如图 2 所示。根据山脉的空间特性，可知主级山脊线延伸出次级山脊，由于同一条山脊线上山顶点和鞍部点交替存在[23]，基于水文分析的山脊线提取结果通常是断续的，其完整山脊线两端结点属于次级山脊。因此利用山脊线分级结果和空间分布关系可以实现鞍部点判断：连续 2 档距内若存在 2 段没有连接关系的主级山脊线且端点连线间不存在山谷线，即存在鞍部点。提取结果如图 3 所示。

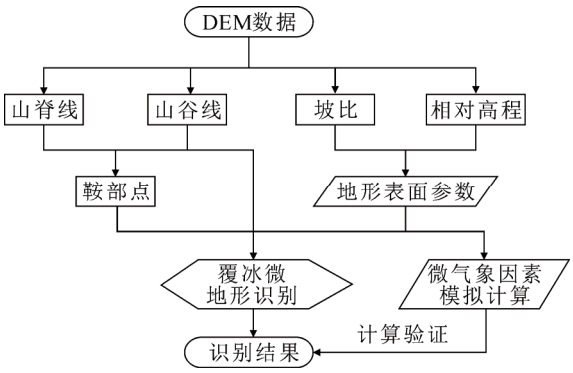


图 1　本文技术路线

Fig.1　Technical route of this study

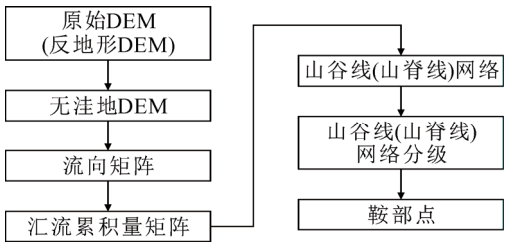


图 2　地形特征线及鞍部点的提取流程

Fig.2　Extraction process of topographic feature line and saddle point

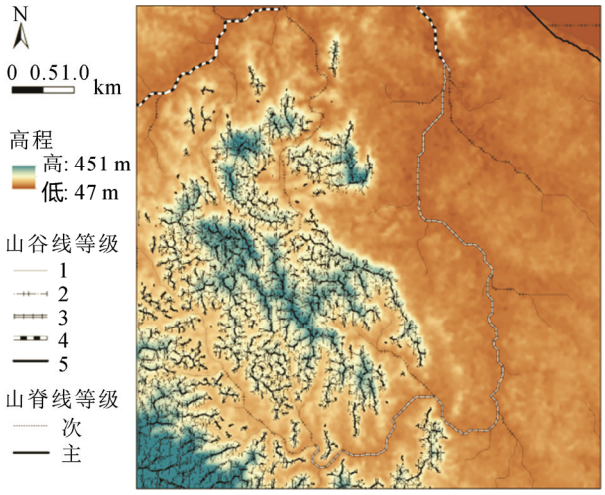


图 3　微地形山脊线山谷线提取结果

Fig.3　Extraction results of ridgeline and valley line in micro-terrain

2.2　覆冰微地形识别条件

基于上述地形特征，可以实现覆冰微地形的识别。根据架空输电线路勘测规范[24]，规定新建输电线路的 DEM 搜索范围为 2 km。但随着特高压工程的技术不断发展，大跨越设计将不断突破，单档距

将超过 2 km，考虑识别范围至少包含连续 3 级杆塔，其简化模型必将包含输电杆塔间的完整微地形，便于研究微地形对于架空输电线的影响，因此本文选择 3 km×3 km 的区域，对典型易覆冰微地形的输电线路进行计算分析，结合山地的划分标准及分水岭、地势抬升、垭口和峡谷 4 种微地形样本的特征量的统计规律[18]如图 4—图 7 所示意，根据现行标准[25]描述，对验证结果校正，可得到上述 4 种微地形的特征值边界范围，因此本研究的识别计算式如下所述。

1）分水岭：a 和 b 为山谷点，P 为山顶点，a、b 两点分别位于山脊线两侧，L_1 和 L_2 为 a、b 两点到 P 的水平距离，α 和 β 为点 a、b 与 P 点连线与水平方向的夹角。山顶点与山谷点的相对高度为 ΔH，相应表达式为：

$$\begin{cases} \Delta H \geq 147\ \text{m} \\ \tan\alpha = \dfrac{\Delta H}{L_1} \\ \tan\beta = \dfrac{\Delta H}{L_2} \\ \tan\alpha \geq 40\%, \tan\beta \geq 40\% \end{cases} \tag{1}$$

2）地势抬升：a 为山谷点，P 为山顶点，山谷点位于山脊线一侧，L 为 a 到 P 的水平距离，α 为点 a 与 P 点连线与水平方向的夹角。相应表达式为：

$$\begin{cases} \Delta H \geq 150\ \text{m} \\ \tan\alpha = \dfrac{\Delta H}{L} \\ \tan\alpha \geq 47\% \end{cases} \tag{2}$$

3）垭口：a 和 b 为山顶点，位于山脊线上，山脊线被鞍部点 P 隔断而不连续。L_1 和 L_2 为 a、b 2 点到 P 的水平距离，α 和 β 为点 a、b 与 P 点连线与水平方向的夹角。鞍部点两侧相邻山顶点的相对高度为分别为 ΔH_1 和 ΔH_2，鞍部点的相对高度为 Δh。相应表达式为：

$$\begin{cases} \Delta H_1 \geq 100\ \text{m}, \Delta H_2 \geq 100\ \text{m} \\ \tan\alpha = \dfrac{\Delta H_1 - \Delta h}{L_1} \\ \tan\beta = \dfrac{\Delta H_2 - \Delta h}{L_2} \\ \tan\alpha \geq 37\%, \tan\beta \geq 37\% \end{cases} \tag{3}$$

4）峡谷：与垭口具有类似的特征，山顶点 a 和 b 分别位于不同山脊线，水平距离间隔较大，通常被山谷线分隔，a、b 水平投影连线与山谷线相交于山谷点 P。L_1 和 L_2 为 a、b 两点到 P 的水平距离，

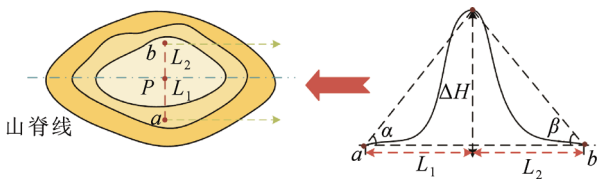


图 4 分水岭特征截面示意图

Fig.4 Schematic cross-section of watershed

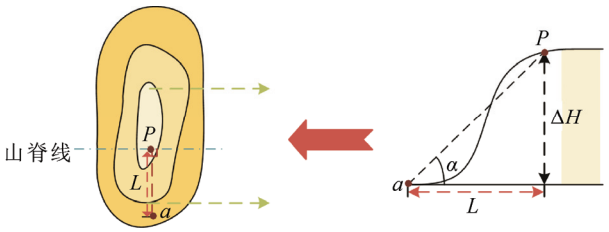


图 5 地势抬升特征截面示意图

Fig.5 Schematic cross-section of uplift terrain

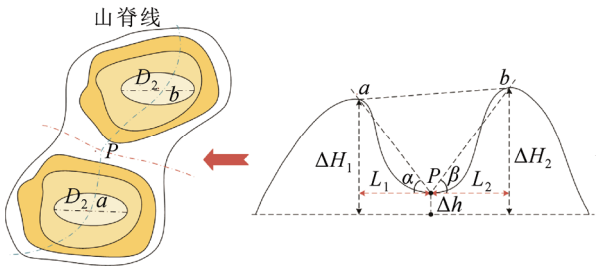


图 6 垭口特征截面示意图

Fig.6 Schematic cross-section of saddle

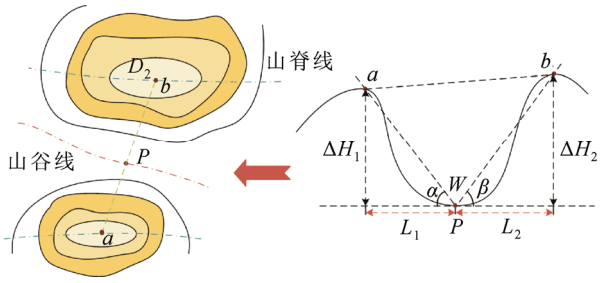


图 7 峡谷特征截面示意图

Fig.7 Schematic cross-section of canyon

α 和 β 为点 a、b 与 a 点连线与水平方向的夹角。相应表达式为：

$$\begin{cases} \Delta H_1 \geq 81\ \text{m}, \Delta H_2 \geq 81\ \text{m} \\ \tan\alpha = \dfrac{\Delta H_1}{L_1} \\ \tan\beta = \dfrac{\Delta H_2}{L_2} \\ \tan\alpha \geq 44\%, \tan\beta \geq 44\% \end{cases} \tag{4}$$

2.3 验证方法

目前采用的验证方法主要分为人工识别法和

历史覆冰数据统计法，人工识别法需要有足够的先验知识和研究经验，而历史覆冰数据统计法中主要采用了多因素回归分析，存在对样本的高度依赖性，对样本质量与数量要求较高，但环境恶劣的微地形小气候区域的样本获取难度较大。此外，微地形与小气候联系紧密，但大部分研究通常将微地形和小气候分开考虑，微地形条件下的小气候耦合特征尚不明确。本文提出了一种基于数值模拟计算的识别结果验证方法，同时考虑了微气象和微地形特征，适用于不具有覆冰观测条件的区域。

为了简化复杂地形的仿真模型构建，基于地形特征极值进行外轮廓参数计算[26]，对于不同类型的微地形，采用不同的方法进行建模。对于地势抬升型和高山分水岭型微地形，可以近似认为是由山体外轮廓截面拉伸一定长度构成，其内部风场沿拉伸方向对称，因此采用 2D 平面模型节约计算消耗，而对于峡谷风道和垭口型微地形，需要考虑山脉延伸部分，山脉入口和出口由外轮廓曲线旋转半周构建，山脉内部由外轮廓截面拉伸构成 3D 模型。将提取的特征截面作为外轮廓参数来源，将地理要素转换为模型参数，以垭口微地形为例，地理模型示意图如图 8 所示，主要建模参数转换计算式为：

$$H=\max\left(\Delta H_1,\Delta H_2\right) \tag{5}$$

$$D=2H/\tan\alpha \tag{6}$$

$$W=L_1+L_2 \tag{7}$$

$$L'=\max\left(L_a,L_b\right) \tag{8}$$

式中：H 为山脉高度；D 为山体直径；W 为山脉间隔；L' 为山脉长度；L_a、L_b 分别为 a、b 所在山脊长度。

在本文计算中为考虑最危险情况，风速方向均取垂直线路走向方向，平坦地貌来流风速取覆冰期内观测最大风速。由我国载荷标准和日本建筑标准给出了微地形条件下的数值模拟计算入口风速、湍动能和耗散率条件设置，即：

$$v_0(z)=v_{\mathrm{r}}\left(\frac{z}{z_{\mathrm{r}}}\right)^{\alpha} \tag{9}$$

$$k(z)=0.5\left(v(z)I(z)\right)^2 \tag{10}$$

$$\varepsilon(z)=\frac{4C_{\mathrm{u}}^{0.75}k(z)^{1.5}}{KL_{\mathrm{u}}} \tag{11}$$

式中：$v(z)$表示受微地形影响下距平底 z 高度处的实际风速；$v_0(z)$为平地高度 z 处的风速；z_{r} 为参考高度；α为地表粗糙度系数；v_{r} 为参考高度的风速；$I(z)$表示高度 z 下的湍流度；L_{u} 为湍流积分尺度；C_{u} 取值为 0.09；K 取值 0.42。

根据输电线路架设标准，地表类别以地表粗糙度从低到高分为 4 类，如表 1 所示，通常认为微地形分布于远离开阔地貌的复杂地形条件下，因此地表粗糙系数最小取值以 B 类地貌下近地面风场为基准，计算微地形条件对风场的加速程度来验证边界条件设置的有效性。来流加速比 S 的计算式为：

$$S=\frac{v(z)}{v_0(z)} \tag{12}$$

这种方法可以有效地将复杂地形对大气环境的影响量化计算，并可以方便地根据地形特征设置模型参数。

3　结果与分析

本研究选取邻近南昌—长沙 1000 kV 特高压输电工程及雅中—江西±800 kV 特高压输电工程的 110 kV 以上线路区域，全长共约 664.34 km。

3.1　识别结果及分析

沿线历史 110 kV 以上冰灾点位的微地形分类结果如图 9 所示。实验区共有 588 基杆塔，经计算，共有 235 基杆塔位于覆冰微地形区。江西省实验区的分类结果如表 2 所示。大部分区域没有微地形，占实验区总体的 60.03%，主要为平坦地区，地势分布较均匀；但也有部分同时存在 2 种或 2 种以上复杂微地形，占 21.26%，这些区域具有丰富地形变化。对实验区微地形分布进一步分析，分水岭类型占微

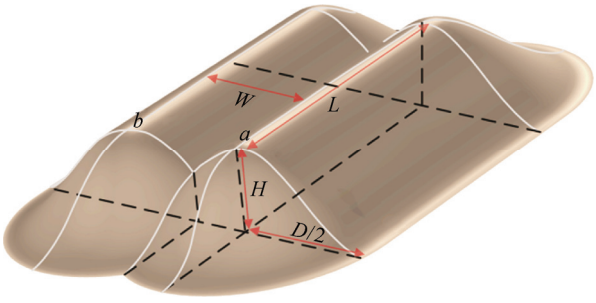


图 8　垭口微地形地理模型

Fig.8　Micro-topographic geo-model of the saddle

表 1　地表分类

Table 1　Landform classification

地表类别	地表状况	地表粗糙度系数
A	海面、海岸、开阔水面、沙漠	0.12
B	田野、乡村、丛林、低层建筑物稀少地区	0.16
C	树木及低层建筑物等密集地区、平缓的丘陵地	0.22
D	中高层建筑物密集地区、起伏较大的丘陵地	0.30

表 2 覆冰微地形分类结果统计表

Table 2 Statistical table of the results of the classification of icing micro-terrain

覆冰微地形类型				数量/基	占比/%
非分水岭	非地势抬升	峡谷	非垭口	3	1.28
		非峡谷	垭口	10	4.26
			非垭口	74	31.49
分水岭	地势抬升	非峡谷	垭口	5	2.13
			非垭口	29	12.34
	非地势抬升	非峡谷	垭口	4	1.70
		峡谷	非垭口	110	46.81
总计				235	100.00

地形区域的 82.55%，地势抬升类型占 14.47%，峡谷类型占 48.09%，垭口类型占 8.09%，垭口类型所占比例最小，通常为主级山脉之间的低洼地区。

根据文献中江西省输电线路冰区分布及历史自然灾害资料，江西省输电线路实验区按覆冰等级统计结果见表 3。非微地形区几乎所有的杆塔都位于覆冰厚度<15 mm 的区域，地势变化较小，主要为平坦地貌。输电线路实验区 93.19%的微地形杆塔位于 10~20 mm 中冰区。相比之下，实验区内山脉丘陵丰富，分水岭和多种类型并存的复杂微地形占比较高，对输电线路覆冰的影响较广。对于峡谷、垭口类微地形，由于地形特征丰富而较少单独存在，仅占微地形总体的 2.98%，主要位于 10~15 mm 中冰区。由微地形分布结果图可知，微地形主要连续集中分布，较少孤立存在，因为山脉在空间分布上存在延伸发展特性，地形突变较少。

3.2 验证

覆冰的增长与风力密切相关，而风力又与地形密切相关。在气流的运动过程中，地形的起伏变化导致了气流的分流、扩散与集中。此外，风速是受地形影响特征最显著的环境因素。为了说明前述覆冰微地形区识别条件的有效性，选取了满足各地形因子条件的 1 组代表性参数，构建了各类微地形的仿真模型，模拟其对风场微气象因素的影响，建模参数设置如表 4 所示。根据仿真模型参数制作了缩放比为 1:500 的实体模型，在重庆大学 CQ-1 风洞完成了 4 类微地形的风场特性试验。风洞试验布置示意图如图 10 所示。

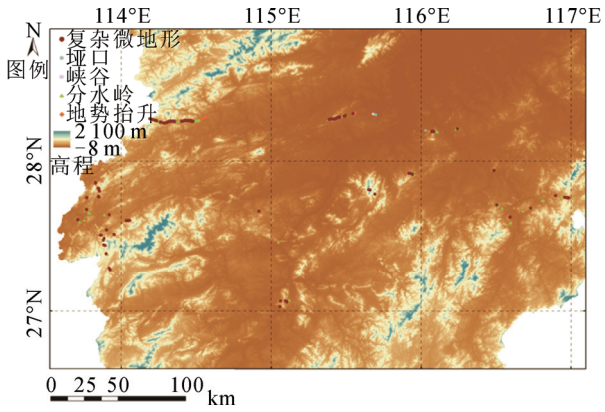


图 9 实验区覆冰微地形分类结果

Fig.9 Classification results of icing micro-terrain in experimental areas

表 3 杆塔所在微地形冰区等级统计结果

Table 3 Statistical results of icing level of micro-terrain

冰区等级/mm	分水岭/基	地势抬升/基	复杂微地形/基	峡谷/基	垭口/基
5~10	2		4		
10~15	35	26	65	3	4
15~20	36	3	47		
20~30	1		9		

表 4 各类微地形仿真模型参数

Table 4 Parameters of various microtopographic simulation models

微地形类型	*D*/m	*H*/m	*W*/m	*L*/m
分水岭	300	150		
地势抬升	600	150		
垭口	300	100	200	300
峡谷	300	100	325	300

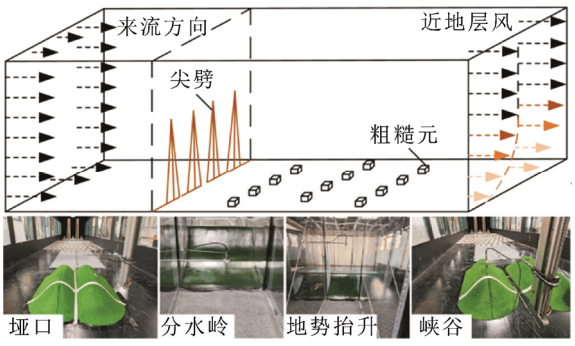


图 10 风洞试验布置示意图

Fig.10 Schematic diagram of wind tunnel test arrangement

考虑输电线路杆塔高度，本研究选取对平地垂直高度 10 m 的风速处为参考风速，数值模拟计算

和风洞试验所得的微地形风场各测点加速比剖面如图 11—图 16 所示。气流从左往右进入山体，以 1.2 倍加速比为图中参照线，参照线左侧为减速区域，右侧为加速区域。通过风洞测试结果验证所有测量点的 CFD 计算结果，结果表明在模拟计算条件下低于参考高度的近地面数据会产生一定的误差，参考高度以上的计算结果与风洞测试结果基本一致，最大相对误差≤0.2%。因此，可以认为使用校正后的数值模拟计算模型验证微地形对气象条件的影响具有有效性。

分水岭迎风坡前段坡度较缓，近地层风受到的影响小，随着山坡的陡增，来流受到分水岭的阻碍被迫上升，此时风速由于受阻而大幅减小，当来流爬升至山顶时阻碍消失，此时加速效应最大。地势抬升前段和分水岭类似，但坡度变化率较小，山坡的阻碍作用也相对较弱，因此在地形抬升与分水岭类型爬升高度相同的情况下，最大加速效应均出现在山顶位置，随着对地高度升高加速效应逐渐稳定。

地形抬升型的最大加速比可达 1.887，小于分水岭的最大加速比 1.891，远超设计标注修正值。垭口和峡谷的加速比最大出现在山脉迎风面入口，最大加速比分别为 1.740 和 1.683，进入山体内部加速效应减弱，出口处加速效应略有回升。通常越靠近山脊处加速效应越显著，但在迎风面，垭口内侧的加速效应会略高于山脊处。峡谷内侧具有一定的风加速效应，但远低于垭口内侧。

根据现行线路设计标准可知，架空输电线路运行条件下微地形修正风速通常为设计风速的 1.2 倍，最大修正风速可达 1.5 倍，若实际运行风速超过微地形的修正风速，则受微地形影响的输电线路覆冰厚度将极易超过设计标准，同时发生风灾的概率也将极大地提升。

本文以参照线作为判断依据，在满足覆冰微地形的地形特征边界条件下，其数值模拟计算结果表明上述微地形均具有明显的微气象特征，其中迎风入口处的风场受到的影响最明显。CFD 模拟风场结果与风洞试验测量结果相对比，两者最大误差基本不超过 0.1%，表明其数值模拟计算结果的准确性，也证明了上述识别方法选取的地形特征边界值具有一定有效性。

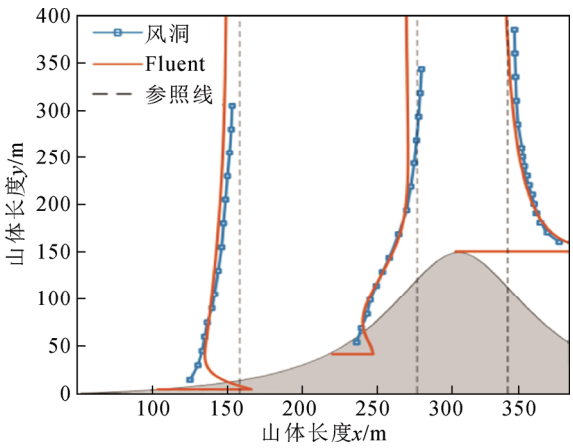


图 11　分水岭微地形风速加速比剖面图

Fig.11　Wind speed acceleration ratio profile for watershed micro-terrain

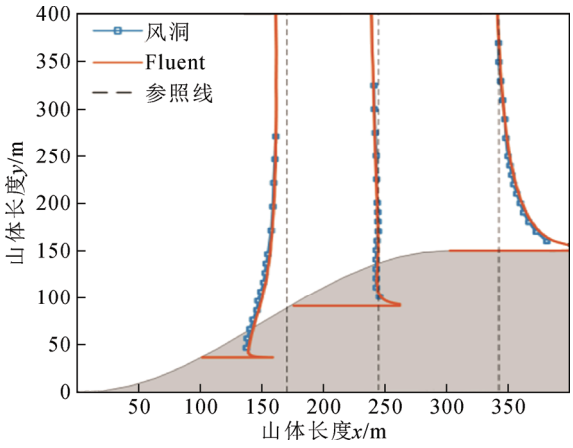


图 12　地势抬升微地形风速加速比剖面图

Fig.12　Wind speed acceleration ratio profile for uplift micro-terrain

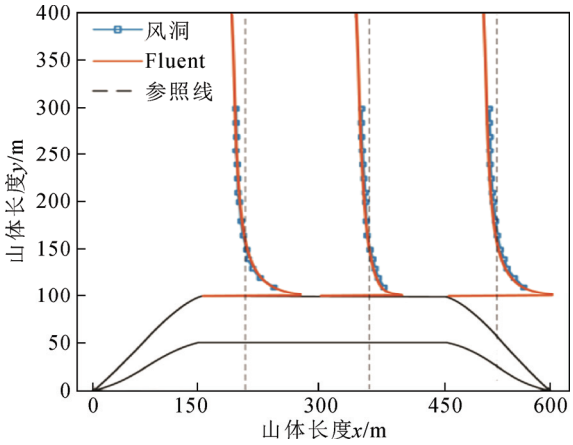


图 13　垭口微地形山脊风速加速比剖面图

Fig.13　Wind speed acceleration ratio profile for ridge in saddle micro-terrain

4　结论

1）主要山脊线延伸形成次级山脊，因为在同一山脊线上存在交替的山顶点和鞍部点。这特性使得基于水文分析的山脊线提取结果通常表现为断续

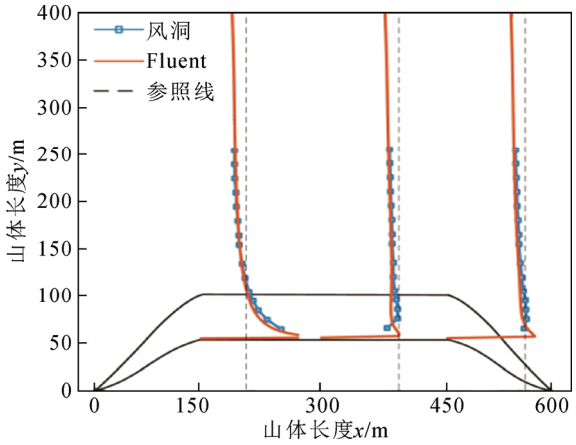


图 14 垭口微地形内侧风速加速比剖面图

Fig.14 Wind speed acceleration ratio profile for depression in saddle micro-terrain

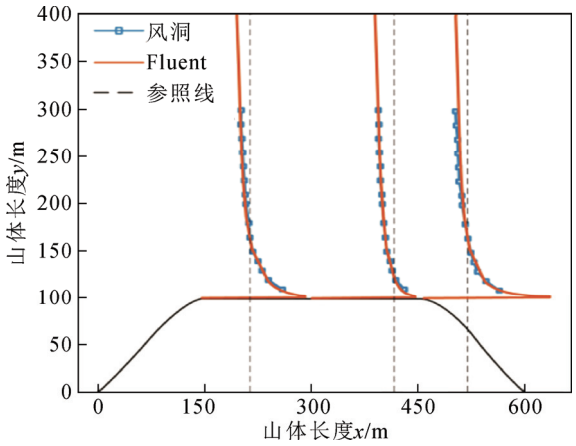


图 15 峡谷微地形山脊风速加速比剖面图

Fig.15 Wind speed acceleration ratio profile for ridge in canyon micro-terrain

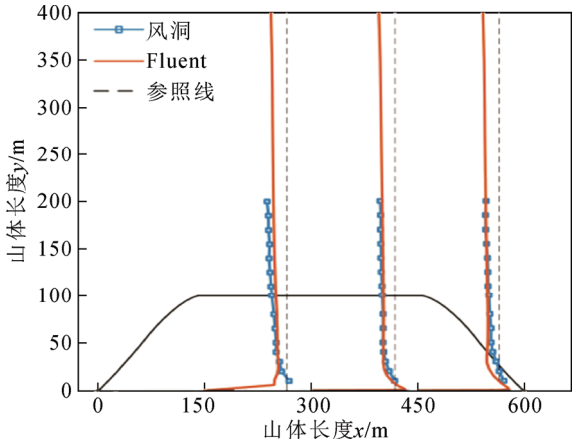


图 16 峡谷微地形内侧风速加速比剖面图

Fig.16 Wind speed acceleration ratio profile for valley in canyon micro-terrain

的，同时表明完整山脊线的两端结点属于次级山脊。这为鞍部点的判断提供了依据。

2）由于覆冰微地形区位于高海拔、地形复杂的地区，且难以进行实地考察和验证，因此提出了一种基于数值模拟计算的微地形验证方法。该方法通过简化地理建模，模拟微地形条件下对微气象的影响程度，以风速为主要微气象因素，根据现行的输电线路设计标准来评估基于统计方法得出的边界条件的有效性。

3）超高压输电线路的规划避免穿越较高的山峰、明显的峡谷或水体附近，以减少风灾和冰灾的风险。因此，重冰区内的微地形比例相对较小。然而，这些中冰区内的微地形常常被忽视，导致覆冰事故时常发生。大多数输电线路覆冰微地形主要存在于覆冰 15~30 mm 的区域，通常为连续分布，较少孤立存在，且容易出现多种类型微地形同时存在的复杂微地形。而非微地形区域主要集中在 15 mm 以下的冰区。微地形下的输电线路更容易受覆冰危害，从而验证了本研究提出的定义和分类识别方法的有效性。

4）各类微地形的加速效应最大均出现在山顶迎风面，在满足识别条件的情况下均超过了 1.2 的一般修正标准，在极端情况下均超过 1.5 的最大修正标准。地势抬升的情况与分水岭类似，在爬升高度相同但坡度变化率较小时，迎风坡的阻碍作用相对较弱，山顶的风加速效应也相对较小。垭口和峡谷的加速效应最大出现在山脉迎风面入口，进入山谷内，加速效应减弱，但在出口处略有回升。加速效应越靠近山顶处越显著，但在迎风面，垭口内侧的加速效应会略高于山脊处。随着对地高度的升高，加速效应逐渐稳定。垭口内侧由于具有一定的爬升高度，加速效应比峡谷更显著。

5）本文通过分析输电线路覆冰微地形的地理气象特征，提出了基于 DEM 的微地形识别及验证方法。该方法在中低纬度的温湿度条件下表现较为可靠，但在其他气象条件下可能存在差异。未来研究应考虑更复杂的气象参数耦合计算。此外，方法仅考虑了地形和风场特征，忽略了其他环境因素，如太阳辐射、植被和河流分布，未来的研究可深入探讨这些方面，以提高方法的全面性和准确性。

参考文献 References

[1] 蒋兴良，吴建国，邓 颖，等. 垭口微地形下档内线路不均匀覆冰研究[J]. 中国电机工程学报，2024，44(6)：2462-2474.
JIANG Xingliang, WU Jianguo, DENG Ying, et al. Research on uneven icing of lines in adjacent towers under pass micro-topography[J].

Proceedings of the CSEE, 2024, 44(6): 2462-2474.

[2] 张志劲，周天宇，蒋兴良，等. 典型覆冰形状下输电线路风荷载影响研究[J]. 电网技术，2023，47(12)：5247-5255.
ZHANG Zhijin, ZHOU Tianyu, JIANG Xingliang, et al. Influence of wind loads on transmission lines under typical ice shapes[J]. Power System Technology, 2023, 47(12): 5247-5255.

[3] 王新宽，喻建波，刘振华，等. 等效扩径导线与分裂导线覆冰比较[J]. 高电压技术，2022，48(7)：2698-2705.
WANG Xinkuan, YU Jianbo, LIU Zhenhua, et al. Comparison of icing between equivalent expanded diameter conductor and bundle conductor[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(7): 2698-2705.

[4] 胡建林，刘　杰，蒋兴良，等. 基于弧垂测量的综合荷载下导线等值覆冰厚度监测方法[J]. 高电压技术，2022，48(2)：584-593.
HU Jianlin, LIU Jie, JIANG Xingliang, et al. Monitoring method for equivalent icing thickness of conductor under complex load based on sag measurement[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(2): 584-593.

[5] 王　斌，李立涅，魏发生，等. 不均匀覆冰下的架空地线覆冰在线监测力学计算模型改进[J]. 高电压技术，2022，48(11)：4538-4545.
WANG Bin, LI Licheng, WEI Fasheng, et al. Research on improvements in the mechanical calculation model of on-line icing monitoring of overhead ground wires under uneven icing[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(11): 4538-4545.

[6] 王守礼，李家垣. 微地形微气象对送电线路的影响[M]. 北京：中国电力出版社，1999.
WANG Shouli, LI Jiayuan. Impact of micro-terrain micro-meteorology on transmission lines[M]. Beijing, China: China Electric Power Press, 1999.

[7] 楼文娟，张跃龙，徐海巍. 考虑冰风耦合作用的输电导线脱冰动张力及参数影响分析[J]. 高电压技术，2022，48(3)：1052-1059.
LOU Wenjuan, ZHANG Yuelong, XU Haiwei. Dynamic tension following ice shedding and parameters' influence analysis of transmission conductor considering the coupling effect of ice and wind[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(3): 1052-1059.

[8] 熊　玮，徐　浩，徐林享，等. 计及时间累积效应的 RF-APJA-MKRVM 输电线路覆冰组合预测模型[J]. 高电压技术，2022，48(3)：948-957.
XIONG Wei, XU Hao, XU Linxiang, et al. Combined model of icing prediction of transmission lines based on RF-APJA-MKRVM considering time cumulative effect[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(3): 948-957.

[9] 何相奎，孔　韬，董能伦，等. 几种典型的微地形微气象区对输电线路的影响[J]. 湖北电力，2020，44(2)：33-38.
HE Xiangkui, KONG Tao, DONG Nenglun, et al. Impact of several typical micro-terrain and micro-meteorological areas on electric transmission lines[J]. Hubei Electric Power, 2020, 44(2): 33-38.

[10] YANG G L, JIANG X L, LIAO Y, et al. Research on load transfer melt-icing technology of transmission lines: its critical melt-icing thickness and experimental validation[J]. Electric Power Systems Research, 2023, 221: 109409.

[11] DAVALOS D, CHOWDHURY J, HANGAN H. Joint wind and ice hazard for transmission lines in mountainous terrain[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2023, 232: 105276.

[12] 张　弦. 输电线路中微地形和微气象的覆冰机制及相应措施[J]. 电网技术，2007，31(增刊 2)：87-89.
ZHANG Xian. Mechanism and countermeasures for ice-coated transmission line in micro-terrain and microclimate region[J]. Power System Technology, 2007, 31(Supplement 2): 87-89.

[13] 夏智宏，周月华，刘　敏，等. 湖北省电线积冰微地形因子影响识别研究[J]. 气象，2012，38(1)：103-108.
XIA Zhihong, ZHOU Yuehua, LIU Min, et al. The recognization and study of microrelief's influence on wire icing in Hubei Province[J]. Meteorological Monthly, 2012, 38(1): 103-108.

[14] 陆佳政，曾　敏，田　凌，等. 基于微地形的输电线路覆冰等级判别方法[J]. 电力科学与技术学报，2013，28(4)：24-30.
LU Jiazheng, ZENG Min, TIAN Ling, et al. Microtopography based icing grades judging method for transmission lines[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2013, 28(4): 24-30.

[15] 郭新春，吴国强. 基于 GIS 的微地形因子识别与提取[J]. 电力勘测设计，2019(增刊 1)：207-209，217.
GUO Xinchun, WU Guoqiang. A GIS-based method for identifying and extracting micro-topography factors[J]. Electric Power Survey & Design, 2019(Supplement1): 207-209, 217.

[16] 吴建蓉，文　屹，张啟黎，等. 基于 GIS 的易覆冰微地形分类提取算法与三维应用[J]. 高电压技术，2023，49(增刊 1)：1-5.
WU Jianrong, WEN Yi, ZHANG Qili, et al. GIS-based algorithm for extracting and classifying easy-to-ice micro-terrain and its 3D application[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(Supplement 1): 1-5.

[17] 张露松，马晓红，彭　赤，等. 基于改进聚类分析算法的微地形归类及对冰区量级修正系数研究[J]. 电力大数据，2021，24(11)：41-47.
ZHANG Lusong, MA Xiaohong, PENG Chi, et al. Micro terrain classification based on improved cluster analysis algorithm and research on correction coefficient of ice area magnitude[J]. Power Systems and Big Data, 2021, 24(11): 41-47.

[18] 周访滨，孟凡一，邹联华，等. 输电线路的数字微地形自动提取方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版)，2022，47(9)：1398-1405.
ZHOU Fangbin, MENG Fanyi, ZOU Lianhua, et al. Automatic extraction of digital micro landform for transmission lines[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(9): 1398-1405.

[19] 胡　京，邓　颖，蒋兴良，等. 输电线路覆冰垭口微地形的特征提取与识别方法[J]. 中国电力，2022，55(8)：135-142.
HU Jing, DENG Ying, JIANG Xingliang, et al. Feature extraction and identification method of ice-covered saddle mircotopography for transmission lines[J]. Electric Power, 2022, 55(8): 135-142.

[20] 周启鸣，刘学军. 数字地形分析[M]. 北京：科学出版社，2006.
ZHOU Qiming, LIU Xuejun. Digital terrain analysis[M]. Beijing, China: Science Press, 2006.

[21] YANG W C, ZHENG C X, JIANG X L, et al. Study on urban flood simulation based on a novel model of SWTM coupling D8 flow direction and backflow effect[J]. Journal of Hydrology, 2023, 621: 129608.

[22] 黄萌萌，李　灿，郭凤娇. 基于流域边界分析的山脊线提取方法研究[J]. 地理空间信息，2021，19(9)：19-22，37.
HUANG Mengmeng, LI Can, GUO Fengjiao. Research on ridge line extraction method based on watershed boundary analysis[J]. Geospatial Information, 2021, 19(9): 19-22, 37.

[23] 吴　婕，董有福，彭　瑾，等. 基于 DEM 的山顶点和鞍部点一体化提取[J]. 测绘地理信息，2018，43(5)：85-88.
WU Jie, DONG Youfu, PENG Jin, et al. Integrated extraction of surface peaks and saddles based on DEM[J]. Journal of Geomatics, 2018, 43(5): 85-88.

[24] 中华人民共和国住房和城乡建设部，中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 330 kV~750 kV 架空输电线路勘测规范：GB 50548—2010[S]. 北京：中国计划出版社，2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision,

Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for investigation and surveying of 330 kV~750 kV overhead transmission line: GB 50548—2010[S]. Beijing, China: China Planning Press, 2010.

[25] 国家能源局. 架空输电线路荷载规范：DL/T 5551—2018[S]. 北京：中国计划出版社，2018.

National Energy Administration. Load code for the design of overhead transmission line: DL/T 5551—2018[S]. Beijing, China: China Planning Press, 2018.

[26] WENG W S, TAYLOR P A, WALMSLEY J L. Guidelines for airflow over complex terrain: model developments[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2000, 86(2/3): 169-186.



邓　颖(通信作者)
1997—，女，博士生
主要从事复杂大气环境输电线路外绝缘设计方面的研究工作
E-mail: yingdeng@cqu.edu.cn

DENG Ying
Ph.D. candidate
Corresponding author



蒋兴良
1961—，男，博士，教授，博导
主要从事防冰减灾、能源电力装备安全、极端环境电气外绝缘等方面的研究
E-mail: xljiang@cqu.edu.cn

JIANG Xingliang
Ph.D., Professor



张志劲
1976—，男，博士，教授，博导
主要从事复杂环境电气外绝缘、恶劣环境能源电力装备安全与灾害防御等方面的研究
E-mail: zhangzhijing@cqu.edu.cn

ZHANG Zhijin
Ph.D., Professor

收稿日期　2023-11-20　修回日期　2024-04-09　　编辑　曾文君