

输电线路覆冰厚度检测技术研究

覃家波 高杰 叶建琳 黄凯奕 邓阳宇

桂林电子科技大学, 广西壮族自治区桂林市, 541214;

摘要: 在智能电网技术迅猛发展的背景下, 输电线路覆冰厚度的准确测量对于保障电力系统的安全稳定运行具有重要意义。本文分析了输电线路覆冰的危害, 并系统梳理了当前基于传感器、图像处理的输电线路覆冰厚度检测方法和基于智能算法的输电线路覆冰厚度预测模型, 对比了这些技术的优缺点, 并对其实用性进行了评估。最后对未来输电线路覆冰厚度测量技术的发展方向进行了展望。

关键词: 输电线路; 覆冰厚度; 传感器; 图像处理; 智能算法

DOI:10.69979/3041-0673.24.6.039

引言

现代社会对电网的依赖性不断增强, 使得稳定可靠的电力供应成为国家经济发展和社会稳定的基石。输电线路覆冰是由热力学、流体力学和电场作用共同驱动的物理现象, 涉及过冷却水滴与导线的碰撞、冻结以及电场影响^[1]。线路覆冰后导致线路荷重增加, 引发断线、杆塔倒塌等事故。2008 年初, 我国南方遭遇罕见的持续性低温雨雪冰冻灾害, 导致电网瘫痪, 贵州、云南、广西、广东等省份电力供应中断, 直接经济损失高达 1500 多亿元人民币, 社会经济受到严重冲击^[2]。

覆冰厚度是评估线路覆冰危害程度、制定除冰方案和采取预防措施的关键参数, 研究和开发高效可靠的输电线路覆冰厚度测量方法, 对于

提升电力系统应对极端气候灾害的能力, 保障电力安全可靠供应, 具有重要的现实意义和工程价值。近年来, 国内外研究者在该领域进行了大量研究并取得了一定进展。本文将对各文献提出的输电线路覆冰厚度测量方法进行整理归纳, 比较各方法的优缺点及实用性, 并对未来研究解决输电线路覆冰厚度检测技术问题的主要方向进行展望。

1 输电线路覆冰厚度检测技术

现代输电线路覆冰厚度测量方法正朝着多样化和智能化方向发展, 主要包括基于传感器和图像处理的检测方法以及基于智能算法的模型预测等。基于传感器的检测方法通过安装在输电线路上的传感器实时采集与覆冰相关的数据信息, 并通过建立数学模型进行覆冰厚度的计算^[3]; 基于图像处理的检测方法则利用图像采集设备获取覆冰线路的图像, 运用图像处理技术提取覆冰

特征并计算覆冰厚度^[4]; 基于智能算法的预测方法则通过智能算法对覆冰历史数据进行深入分析, 从而构建覆冰厚度预测模型^[5]。

1.1 基于力学传感器的线路覆冰厚度检测法

基于力学传感器技术的覆冰厚度检测方法, 其核心原理是利用传感器感知覆冰引起的物理量变化, 例如重量、拉力和倾角等, 并将这些变化量转化为电信号, 通过信号处理和分析, 最终得到线路覆冰厚度信息。

力学传感器应用如文献^[6]通过安装力传感器和角度传感器来监测输电线路导线的拉力变化和绝缘子串的倾斜角度, 使用称重法且综合考虑导线长度变化、环境温度、风速和风向等因素, 来计算覆冰厚度。文献^[7]同样在覆冰的导线上安装拉力和倾角传感器测量覆冰导线的拉力和角度, 用 MATLAB 去噪后的数据输入覆冰预测模型, 计算导线的等值冰厚。文献^[8]通过计算无冰时绝缘子串张力和水平距离建立覆冰状态方程, 关联线路覆冰厚度、导线应力等参数, 从 0 毫米初始厚度开始迭代, 直至模型计算的张力值与实测值相等, 确定等效覆冰厚度。

力学传感器的应用较早且较为简单, 然而使用力学传感器易受到不均衡张力引起的线路倾斜及绝缘子串倾斜后引起的垂直档距的变化使得测量不准确, 仍有待优化与改进。

1.2 基于非力学传感器的线路覆冰厚度检测法

输电线路覆冰厚度检测中, 非力学传感器的应用呈现出多样化的发展趋势。随着各类传感器的集成以及人工智能技术的应用, 越来越多的学者将一些非力学传感器应用于输电线路覆冰厚度检测之中。

a) 电容测量法: 电容测量法基于电容传感器对不同介质介电常数的敏感性, 例如, 冰、空气和水都有不同的介电常数, 当覆冰发生时, 电容传感器的电容值会随介电常数的变化而改变。通过监测电容变化, 可以估算冰层的厚度^[9]。文献^[10]通过设计了电容传感器, 基于冰与空气的介电常数差异, 建立电容值与线路覆冰厚度的关系曲线, 通过比较实测电容值与该曲线来确定输电线的覆冰厚度。文献^[11]采用了曲面贴面电极作为电容极板, 减少对覆冰过程的干扰, 更准确地检测覆冰厚度。

b) 超声波检测法: 超声波检测冰厚的本质是距离测量, 在无冰条件下, 超声波传感器与线路之间的距离与覆盖冰的距离不同, 冰厚实际上是无冰条件与结冰条件之间的距离差^[12]。文献^[13]通过发射和接收超声波信号来确定输电线路导线表面与覆冰表面的距离, 结合覆冰形状校正系数计算线路的等值均匀覆冰厚度。文献^[14]考虑了温度对超声波在介质中传播速度的影响, 并给出了考虑温度因素的超声波传播速度计算公式, 以提高测量的准确性。

c) 激光检测法: 激光传感器通过扫描技术获取输电线路点云数据, 重建三维模型, 并结合物理参数计算覆冰状态下的应力和比载, 通过比较空载与覆冰状态差异, 反演覆冰厚度, 实现快速、准确的非接触监测。文献^[15]提出了一种基于激光点云的高压输电线覆冰厚度反演方法, 即模型-应力-冰厚法, 通过精细提取输电线路三维空间模型、计算空载和覆冰状态下的水平应力, 以及综合比载, 实现覆冰平均厚度的快速高精度反演。文献^[16]利用激光 LiDAR 技术对输电线路的杆塔和导线进行高精度三维重建, 进而校核覆冰厚度计算模型的相关输入参数, 通过实际实验比对参数校核前后的模型效益, 证明了激光 LiDAR 技术能够显著提高覆冰厚度计算模型的准确性。

电容测量法具有高灵敏度和非接触式的优点, 但其校准过程较为复杂且容易受到环境因素的影响。超声波检测方法直观且具备温度补偿能力, 但受限于环境因素和设备复杂性, 可能导致准确性不足。激光检测法则具备高精度和全面性的优势, 然而, 由于设备成本高昂及数据处理复杂, 尚未得到广泛应用。

1.3 基于图像处理的线路覆冰厚度检测法

输电线路在覆冰前后有明显差别, 通过图像处理的方法对线缆覆冰前后的图像进行边缘轮廓提取, 把覆冰

前后线缆宽度进行比较, 计算得出覆冰厚度^[17]。覆冰厚度检测原理如图 1 所示。

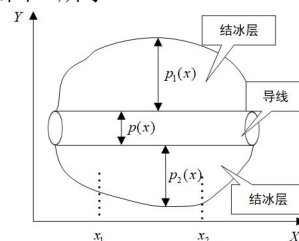


图 1 图像处理计算覆冰厚度原理

图中, $p(x)$ 表示导线的直径所对应的像素点数; $p_1(x)$ 和 $p_2(x)$ 分别表示导线的上下边缘结冰层所对应的像素点数: 另设导线直径 $D(\text{mm})$ 已知, 则导线的上下边缘的平均覆冰厚度 $h_1(\text{mm})$ 、 $h_2(\text{mm})$ 为:

$$h_1 = D \frac{\sum_{x=x_1}^{x_2} p_1(x)}{\sum_{x=x_1}^{x_2} p(x)} \quad h_2 = D \frac{\sum_{x=x_1}^{x_2} p_2(x)}{\sum_{x=x_1}^{x_2} p(x)} \quad (1)$$

由式(1)可得整个导线的平均覆冰厚度 $h(\text{mm})$ 为:

$$h = \frac{h_1 + h_2}{2} \quad (2)$$

由于图像检测法检测线路覆冰厚度具有非接触性测量的安全性、实时监测的及时性、大范围覆盖的高效性, 以及高分辨率数据支持精确评估等优点^[18], 越来越多的学者对传统单一的图像监测进行改进, 如王杰^[19]提出基于优化卷积神经网络 (Visual Geometry Group Network 19, VGG19), 以及融合拉丁超立方抽样算法 (LHS)、随机梯度下降算法 (SGD) 和秃鹰搜索算法 (BES) 优化的支持向量机 (L-SBES-SVM) 的覆冰类型识别模型, 实现了对导线覆冰类型的准确判断, 吴迪^[20]提出使用覆冰分割优化网络 (SGAN-UNet) 网络对线路覆冰图像进行分割以解决线路覆冰图像背景各异, 对比度低的问题。

使用图像检测法进行输电线路覆冰厚度检测的优点在于能够提供直观的覆冰情况图像, 便于实时监控和人工分析, 但也受到环境条件影响如光照、天气影响较大, 可能导致图像质量下降, 影响检测准确性, 且在复杂环境下可能存在较高的误报率和漏报率。

1.4 基于智能算法的线路覆冰厚度预测

随着人工智能算法技术的不断进步, 一些学者使用机器学习、深度学习等算法应用于线路覆冰厚度预测之中。使用智能算法进行覆冰预测原理如图 2 所示。

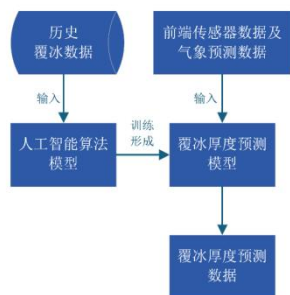


图 2 智能算法预测线路覆冰厚度原理

沈欢^[21]利用极限学习和支持向量机这两种机器学习算法，通过输入环境温度、湿度和风向等关键因素到神经网络中进行深度学习，预测覆冰厚度，并使用相同的环境数据在支持向量机的回归网络中得出覆冰结果。

王身丽等^[22]运用反向传播 (BackPropagation, BP) 在 MATLAB 中构建输电线路覆冰预测模型，通过训练历史数据来预测覆冰厚度，但该模型依赖大量历史数据，且存在收敛慢和易陷入局部最小值的问题。

汪勋婷等^[23]改进 BP 神经网络算法，引入思维进化算法 (Mental Evolutionary Algorithm, MEA) 以获得全局最优解，结合 MEA 的全局优化和 BP 网络的泛化能力，构建了 MEABP 模型用于短期覆冰厚度预测。结果表明，MEABP 模型的预测精度高于传统 BP 网络。

近年来，许多学者将人工智能算法应用于线路覆冰厚度预测之中，智能算法虽无需考虑物理过程只需覆冰历史数据且有较好的预测精度，但对覆冰历史数据要求较高，历史数据的质量直接影响覆冰的预测结果准确性。

2 总结与展望

基于传感器的检测方法，如力学传感器和非力学传感器，能够提供实时、准确的覆冰数据，但易受环境因素影响，且设备成本较高，维护难度大。

基于图像处理的检测方法，通过分析覆冰前后的图像变化来计算覆冰厚度，具有非接触、直观和成本相对较低的优点。然而，这种方法对图像质量要求高，环境光线和天气条件的变化可能会影响检测的准确性。

基于智能算法的预测方法，如机器学习和深度学习，能够利用历史数据进行覆冰厚度的预测，具有较高的预测精度。但这类方法对历史数据的质量和数量有较高要求，且模型的构建和训练过程复杂，需要大量的计算资源。

未来输电线路覆冰检测技术将追求高精度、低成本、易实施，通过多传感器融合提高监测准确性，图像处理

技术提升算法效率和图像质量，增强复杂环境下的检测准确度。人工智能将减少对历史数据的依赖，提供更精准预测模型。新研发的无人机和机器人技术使监测更灵活安全，大数据与云计算提升数据处理效率和预测实时性。

参考文献

- [1] 刘春城, 刘佼. 输电线路导线覆冰机理及雨淞覆冰模型[J]. 高电压技术, 2011, 37(01): 241-248.
- [2] 丁一汇, 王遵娅, 宋亚芳, 等. 中国南方 2008 年 1 月罕见低温雨雪冰冻灾害发生的原因及其与气候变暖的关系[J]. 气象学报, 2008, (05): 808-825.
- [3] 李明, 等. 基于光纤传感的输电线路覆冰厚度检测系统. 高电压技术, 2017, 43(12): 3969-3976.
- [4] 徐恒, 彭曙蓉, 毛亚珍, 等. 基于图像处理的输电线路覆冰厚度检测方法研究[J]. 陕西电力, 2017, 45(05): 32-35.
- [5] 杨尉薇. 基于智能辨识的输电线路覆冰厚度模型研究[D]. 太原理工大学, 2010.
- [6] Hong L, Tianzheng W, Min J. Error analysis about on-line icing-monitoring device based on weighing method[C]//2016 IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC). IEEE, 2016: 1-4.
- [7] 常恒. 基于动态拉力和倾角的输电线路覆冰预测与试验研究[D]. 重庆大学, 2013.
- [8] Yang L, Chen Y, Hao Y, et al. Detection method for equivalent ice thickness of 500-kV overhead lines based on axial tension measurement and its application[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 1-11.
- [9] 史兆强, 李明. 新型电容式传感器的设计与优化[J]. 传感器与微系统, 2023, 42(02): 105-108+113.
- [10] 张思建, 林志赞, 颜钢锋. 基于电容传感器的架空输电线路覆冰厚度检测方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(17): 99-102.
- [11] 邹瑜. 基于电容效应的覆冰检测方法[D]. 重庆大学, 2021.
- [12] 孙宇凤. 基于超声波传感器测距系统关键技术的研究[D]. 西安电子科技大学, 2019.

- [13] 宦群庆. 基于超声波的输电线路覆冰厚度监测预警和防除冰技术研究[D]. 合肥工业大学, 2018.
- [14] Liu Y, Xiao X, Li Y, et al. Ultrasonic Direct Detection Method for Ice Thickness Monitoring of Distribution Lines[C]//2023 7th International Conference on Smart Grid and Smart Cities (ICSGSC). IEEE, 2023: 47-53.
- [15] 麻卫峰, 王成, 王金亮, 等. 基于激光点云的高压输电线路覆冰厚度反演[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(04): 89-95.
- [16] 吴建蓉, 马晓红, 姜苏, 等. 基于激光 LiDAR 技术的线路参数校核及耐张塔覆冰厚度计算模型效益评估研究[J]. 电力大数据, 2021, 24(08): 33-39.
- [17] 王小明, 胡建林, 孙才新, 等. 应用图像边缘检测方法在线监测输电线路覆冰厚度研究[J]. 高压电器, 2009, 45(06): 69-73.
- [18] Hu M, He J, Alsabaan M. Image Identification Method of Ice Thickness on Transmission Line Based on Visual Sensing[J]. Mobile Networks and Applications, 2023: 1-10.
- [19] 王杰. 基于机器视觉的输电线路覆冰智能识别与监测研究[D]. 重庆交通大学, 2024.
- [20] 吴迪. 基于视觉图像的输电线路覆冰厚度检测与分类技术研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2022.
- [21] 沈欢. 基于极限学习机和支持向量机的输电线路覆冰预测[J]. 电气开关, 2020, 58(06): 86-88.
- [22] 王身丽, 翁永春, 张学锋, 等. 基于神经网络的架空输电线路覆冰增长预测方法研究[J]. 电气时代, 2018, (03): 75-77.
- [23] 汪勋婷, 丁津津, 张峰, 等. 基于改进 BP 神经网络的输电线路覆冰预测技术研究[J]. 机械设计与制造, 2024, (09): 306-310.
- 基金项目: 自治区级桂林电子科技大学大学生创新创业训练计划项目资助(项目号: S202410595285)
- 作者简介: 覃家波 (2004.10), 男, 壮族, 广西壮族自治区来宾市人, 本科在读, 研究方向: 电力系统自动化。