

基于改进支持向量机的绝缘子污秽度在线监测

隆重¹ 朱则祥² 胡冬梅² 戴宇辰³

(贵州送变电工程公司 贵阳 550000; 2. 国网绩溪县供电公司 宣城 245300;

3. 南京工程学院电力工程学院 南京 211167)

摘要: 针对传统绝缘子污秽度监测方法的不足,基于石英棒的光损耗原理,设计了光纤污秽传感器,通过实验测得温度、湿度、光功率衰减百分比与盐密的关系。利用改进的支持向量机对样本进行训练,通过大量数据比对,验证了该改进算法的准确性,较传统模型对数据的拟合度更高。在此基础上研制了污秽度监测终端,能进行温湿度及光功率数据的采集,并将采集的数据发送至后台。开发了输电线路绝缘子污秽度在线监测系统,可实现对采集数据的计算分析,得到实时盐密值及污秽度并绘制曲线图。测试结果表明,该系统实现了绝缘子污秽度的在线监测,为运行人员提供了参考。

关键词: 绝缘子;盐密;光纤传感器;支持向量机;在线监测

中图分类号: TM855; TN252 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Insulator pollution degree online monitoring based on improved support vector machine

Long Zhong¹ Zhu Zexiang² Hu Dongmei² Dai Yuchen³

(1. Guizhou Transmission and Transformation Engineering Company, Guiyang 550000, China;

2. State Grid Jixi Power Supply Company; Xuancheng 245300, China;

3. School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: Aiming at the shortcomings of traditional insulator pollution monitoring method, based on the optical loss of quartz rods, designed fiber optic contamination sensor, measured the relationship between temperature, humidity, percentage of luminous flux decay and equivalent salt deposit density (ESDD). Using the improved support vector machine (SVM) to training model, through a large number of data comparison, the accuracy of the improved algorithm is verified, compared with the traditional model, the fitting degree of data is higher. On this basis, developed a pollution degree online monitoring terminal, it can collection the temperature and humidity and luminous flux data, and send the collected data to the background. Developed the on-line monitoring system of transmission line insulator pollution degree on-line monitoring system, to achieve the calculation and analysis of the collected data, get the real-time ESDD and draw the curve. Test results show that, this system achieves online monitoring of insulator pollution degree, provide a reference for the operators.

Keywords: insulator; ESDD; fiber sensor; SVM; online monitoring

0 引言

输电线路的绝缘水平对于线路的长期安全稳定运行起着重要作用^[1]。由于输电线路处于室外,线路长期运行后绝缘子表面所积污秽较多,将影响绝缘子的绝缘特性,引发污闪事故,危及电网安全^[2]。因此,加强对输电线路绝缘子污秽度的检测对保障电网安全具有重要意义。

我国以绝缘子表面盐密(ESDD)为输电线路污秽度分

级的标志^[3]。目前国内对绝缘子表面盐密的检测方法主要还停留在传统方法,以等值盐密法和电导率法为主^[4]。传统方法虽然过程简单,但检测过程都需要线路停电拆解绝缘子,不仅费时费力,而且检测结果可能因为绝缘子搬运过程中人为接触而影响准确性^[5]。1992年日本人首次提出利用光功率衰减测量盐密,为光技术污秽度检测奠定了基础^[6]。近几年我国科研部门对此进行了实验,有了初步的进展^[7],验证了利用光传感器测量污秽度的可行性。

本文选用高纯度石英棒作为光纤传感器的核心检测元件,通过实验分析了光功率在石英棒中的衰减与盐密、温湿度的关系,利用支持向量机搭建模型,开发了输电线路污秽度在线监测系统,并通过模拟挂网运行,验证了监测系统的可靠性。

1 光纤污秽传感器原理

光纤污秽传感器测量的盐密原理是基于介质光波导中的光能损耗机理。当一束光以一定入射角在光纤中传输时,光线在光纤纤芯与包层交界处发生全反射而不断向前传输^[8]。高纯度石英棒可以看做是以石英为纤芯,大气为包层的特殊光纤,若一束光以一定的入射角射入表面洁净的石英棒使这束光在石英棒表面形成全反射,则大部分光功率能在石英棒内部传播^[9]。当石英棒沾有污秽时,污秽相当于石英棒的包层,石英棒与空气在沾污处的全反射临界角被打破,部分光线出射出石英棒,导致光功率衰减^[10],污秽度越高,光功率衰减越大。利用此变化量便可建立污秽与光功率之间的关系。光纤传感器结构如图1所示。

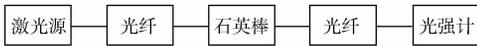


图1 光纤传感器

激光源要求输出波长为200~1100 nm,输出功率较大且光功率稳定。石英棒应选用高纯度圆柱形石英棒,表面光滑,折射率分布均匀^[11]。

2 基于支持向量机的盐密测量

2.1 数据样本获取

根据多年运行经验,绝缘子发生闪络的原因主要由于附着在绝缘子表面污秽中的盐分^[12],所以将绝缘子表面盐密的大小作为输电线路污秽度划分的依据。在相同盐密下,温湿度会改变污秽石英棒中光功率衰减的大小^[13],故将温度 T ,湿度 H ,与光功率衰减率 δ 作为变量。根据标准《交流系统用高压绝缘子人工污秽试验方法固体层法》配制污秽液,对洁净石英棒进行污染,记录污染前后光功率衰减,根据标准《高压架空线路和发电厂、变电所环境污区分级及外绝缘选择标准》中所述方法对污秽石英棒表面盐密进行人工测量,记录盐密值与此时环境温度。

改变环境温度及污秽液浓度进行重复实验,共确定样本60组样本,其中40组样本作为训练样本,20组样本作为测试样本,并利用归一化公式对样本作归一化处理。归一化公式如下:

$$\bar{x}_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (1)$$

式中: x_{\max} 与 x_{\min} 分别代表温度 T ,湿度 H ,与光功率衰减率 δ 变化区间的最大值与最小值。各变量变化区间如表1

所示。

表1 各变量变化区间

变量	温度/°C	湿度/%	光功率衰减/%
区间	[15,32]	[20,95]	[0,48]

2.2 支持向量机模型

支持向量机是可以根据小样本的信息,在兼顾模型学习型与复杂性的情况下,获得最好推广能力的通用学习机器^[14],其基本思想为寻找一超平面,该超平面可以使得平面两侧的区域间隔最大化^[15]。

构造样本集 $\{x_i, y_i\} i = 1, 2, \dots, l$, 其中 x_i 为样本输入数据, y_i 为输出数据。支持向量机的学习目标为在 n 维数据空间中找到某一分类超平面,构造如下函数:

$$f(x) = \omega^T \varphi(x) + b \quad (2)$$

式中: ω 为超平面法向量, $\varphi(x)$ 为将样本向量映射到高维特征空间的映射函数, b 为偏移量。利用二次优化^[16],将上式转化为如下最优解问题:

$$\min_{\omega, b, \xi} J(\omega, \xi) = \frac{1}{2} \omega^T \omega + \frac{1}{2} \gamma \sum_{i=1}^l \xi_i^2 \quad (3)$$

约束条件为:

$$y_i = \omega^T \varphi(x_i) + b + \xi_i (i = 1, \dots, l) \quad (4)$$

由于 ω 维数较高难以直接求解,则引入拉格朗日函数:

$$L(\omega, b, \xi, \alpha) = J(\omega, \xi) - \sum_{i=1}^l \alpha_i (\omega^T \varphi(x_i) + b + \xi_i - y_i) \quad (5)$$

式中: α 为引入的新参数即拉格朗日乘子,并利用库恩-塔克条件列出约束方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial \xi_i} = 0 & \alpha_i = \gamma \xi_i \\ \frac{\partial L}{\partial b} = 0 & \sum_{i=1}^l \alpha_i = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \omega} = 0 & \omega = \sum_{i=1}^l \alpha_i \varphi(x_i) \\ \frac{\partial L}{\partial \alpha_i} = 0 & y_i = \omega^T \varphi(x_i) + b + \xi_i \end{cases} \quad (6)$$

式中: $i = 1, \dots, l$ 。消去结果中 ω 与 ξ 保留 α 与 b , 可得:

$$\begin{bmatrix} 0 & y^T \\ y & H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1_l \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: $y = [y_1, \dots, y_l]^T$, $1_l = [1, \dots, 1]^T$, $\alpha = [\alpha_1, \dots, \alpha_l]^T$, H 为正定矩阵,其中元素 $h_{ij} = y_i(K(x_i, x_j) + \delta_{ij} \gamma^{-1})$, δ_{ij} 为克罗内克函数。通过求解上述方程组可得到 α 与 b , 便得到模型:

$$y(x) = \sum_{i=1}^l \alpha_i K(x, x_i) + b \quad (8)$$

本文选用高斯径向基函数作为支持向量机的核函数:

$$K(x, x_i) = \left\{ -\frac{\|x - x_i\|^2}{2\sigma^2} \right\} \quad (9)$$

2.3 基于改进遗传算法的最优核函数参数选择

1) 改进思想及方法

在遗传算法过程中,由于进化初期种群差异较大,交叉计算效果较突变计算更为显著,故应选用较高的交叉概率,较低的突变概率。反之,在进化后期种群差异较小,相似度较高,交叉过程效果降低,然而突变过程可使相似“基因”重新赋值,故在进化后期需要降低交叉概率提高突变概率。

根据上述思路,将交叉与突变概率表达式进行改进。交叉概率 P_c 的表达式如下:

$$P_c = P_{c0} + D_p \cdot K_p \quad (10)$$

$$D_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_i - f_{avg})^2 \quad (11)$$

式中: P_{c0} 为初始交叉概率, D_p 为种群适应度方差, K_p 为交叉概率缩放系数。

改进后的突变概率方程如下:

$$P_m = P_{m0} + D_p \cdot K_m \quad (12)$$

式中: P_{m0} 为初始突变概率, D_p 为种群适应度方差, K_m 为突变概率缩放系数。

2) 改进算法流程

求取最优参数值步骤如下:

- (1) 确定训练样本数据,将训练样本数据带入表达式中。
- (2) 确定各参数初始值,包括迭代次数 T 、种群大小 M 、

交叉概率与突变概率。

(3) 将惩罚参数 C 、核参数 σ 进行二进制编码,产生初始种群。

(4) 选择适应度函数,对每个个体适应度值进行计算。

(5) 判断结果是否达到标准,若达到标准则完成寻优,输出结果,得到最优参数。若未达到标准则对种群进行交叉、变异,产生新种群,迭代次数加一,重新执行步骤(4)。

本实验选用 LSSVMLAB 软件作为平台。选取惩罚参数 $C \in [0, 100]$, 核参数 $\sigma \in [0, 5]$, 利用上述过程对样本进行训练,最终得到的最优解为惩罚参数 $C = 15$, 核参数 $\sigma = 0.65$ 。

2.4 等值盐密预测

本文采用相对误差和平均相对误差公式作为模型性能评价公式来评价模型准确度:

$$e = \frac{|Q(i) - T(i)|}{T(i)} \times 100\% \quad (13)$$

$$\bar{e} = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l \frac{|Q(i) - T(i)|}{T(i)} \times 100\% \quad (14)$$

式中: $Q(i)$ 为算法测量盐密值, $T(i)$ 为实测盐密值,误差越小表示模型输出越准确。

将测试样本 20 组数据输入训练完成的支持向量机模型中,得到每个样本条件下盐密的算法测量值,表 2 列出了部分盐密实测值与算法测量值对比情况。

表 2 支持向量机盐密输出结果对比

序号	温度/°C	相对湿度/%	光功率衰减/%	实测值/(mg·cm ⁻²)	改进的支持向量机		传统支持向量机	
					算法测量值/(mg·cm ⁻²)	相对误差/%	算法测量值/(mg·cm ⁻²)	相对误差/%
1	24	64	21.7	0.1886	0.1852	1.81	0.1974	4.67
2	29	56	32.4	0.2715	0.2648	2.45	0.2606	3.98
3	18	74	42.2	0.4198	0.4313	2.73	0.4368	4.05
4	27	42	13.9	0.0821	0.0803	2.14	0.0781	4.87
5	31	31	9.8	0.0462	0.0471	1.98	0.0485	5.02
6	21	20	25.7	0.1219	0.1192	2.21	0.1158	4.97

实验结果显示,利用改进与传统支持向量机对 20 组测试样本进行拟合后平均相对误差分别为 2.32% 与 4.56%,表明利用改进的支持向量机模型进行的盐密估算拟合输出误差较小,更符合实际要求。

3 输电线路绝缘子污秽度在线监测系统

本输电线路绝缘子污秽度在线监测系统主要由硬件部分和软件部分组成,能实现全天候不间断测量监测区域内的数据信息,并通过实时无线传输进入后台,处理并存储数据,进行数据曲线的绘制及污区分级。

3.1 系统硬件

硬件部分由南京工程学院输配电教研室自主开发的

光纤污秽传感器作为核心元件,并采用 STM32F107 处理器作为主要控制器。外围电路包括温湿度模块、信号处理模块、通信模块、电源模块等几个部分组成。

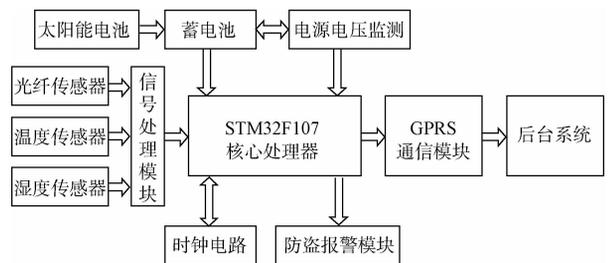


图 2 系统硬件结构

通信模块采用华为 GPRSEM310 模块,频段为 900~1 800 MHz,最高速率可达 85.6 Kbps,内嵌 TCP/IP 协议,提供大容量缓存。STM 控制器对通信模块进行控制将检测数据通过 GPRS 发送至主机,实现硬件与主机通信。

电源模块采用太阳能电池板对设备及蓄电池进行供电。在阳光充足时,太阳能电池板单独对设备供电,并对蓄电池进行充电,当遇到阴雨天气时,蓄电池对设备供电。在选择太阳能电池板时为保证设备正常运行的同时还能对蓄电池充电,电源的功率及供电电流必须足够大,工作电压应保持在 12 V,电流应达到 2 A。

在输电线路杆塔上每隔一定距离安装一台监测终端,每台终端对本区域内的温度、湿度和盐密数据进行监测,并将数据传入 STM 芯片处理后,通过 GSM 模块发送到系统后台。

3.2 系统软件

系统软件部分采用 Visual C++ 作为编程开发语言,SQL Server2008 作为数据存储数据库。系统接收硬件发送的监测数据,并对接收到的数据进行曲线绘制和绝缘子污秽度的标定。

1)温度曲线:以实时日期时间为 X 轴,实时温度为 Y 轴绘制曲线。

2)湿度曲线:以实时日期时间为 X 轴,实时湿度为 Y 轴绘制曲线。

2)光功率衰减百分比曲线:以实时日期时间为 X 轴,光功率衰减百分比为 Y 轴绘制曲线。

4)盐密曲线:以实时日期时间为 X 轴,实时测量盐密为 Y 轴绘制曲线。

5)杆塔绝缘子污秽度标定:依据盐密值,根据污秽度分级标准标定某区域内杆塔绝缘子的污秽度分级。

级变动情况,历年绝缘子清洁周期等,并设置了打印功能,可对选中数据进行打印。

3.3 运行验证

为测试传感器采集数据的准确性与系统运行的可靠性,于 2017 年 5 月起开展了对比测试,测试地点选在南京工程学院及学院周边。在测试范围内选择不同环境类型的五块待测地块,分别标记为地块 #1~#5,表 3 列出了 5 块待测地块周边环境类型。

表 3 待测地块环境类型

地块	#1	#2	#3	#4	#5
环境	学院	河流	野外	交通	电厂
类型	内部	沿岸	荒地	要道	周边

在上述 5 块地块内设置空杆塔,分别在 5 处杆塔上放置绝缘子与监测终端,模拟挂网运行。每隔 1 个月人工测量 5 处杆塔绝缘子盐密值,并与系统中显示的实时盐密值进行比对。人工测量绝缘子盐密值时,拆卸待测绝缘子串上、下两片绝缘子,分别测量两片绝缘子盐密值,取其均值作为此绝缘子串人工测量值,绝缘子串中其余绝缘子则继续积污,以备下次人工测量。表 4 列出了模拟挂网运行 4 个月监测系统所采集的数据与人工测量盐密值对比情况。

根据表 4 中的数据可以看出,监测系统对盐密的测量值很好地反映了绝缘子真实的盐密值,相对误差基本保持在 4% 以内,且盐密值越大,测量误差越小。满足运行要求。观察数据发现,地块 #4 与地块 #5 的盐密值明显高于地块 #1、地块 #2、地块 #3 的盐密值,原因是地块 #4、地块 #5 分别为交通要道与电厂附近,空气中的污染物明显多于地块 #1、地块 #2 和地块 #3,符合实际。

依据上述测试结果,在未来的工作中可以进行两方面深化:一方面,增加低盐密值训练样本个数,进一步降低盐密值较低时测量的相对误差;另一方面,持续对监测系统及人工测量值进行采样,使实验周期覆盖一个循环年,观察两者是否始终保持较小的相对误差。

4 结 论

本文采用自主研发的光纤传感器替代原始方法对绝缘子污秽度进行检测,实现了绝缘子表面盐密的实时在线监测,克服了以往检测绝缘子污秽度必须要停电的弊端。利用改进的支持向量机建模,较传统支持向量机提高了模型输出的精度,有效降低了相对误差,更准确地反映了绝缘子当前污秽度。在线监测系统将实时数据绘制成曲线进行显示,并支持查询功能,加强了设备运维人员对绝缘子污秽度的掌握。并经过一定时间的运行验证,设备运行情况良好,系统运行稳定,相对误差较小,对输电线路的维护工作有一定的参考意义。

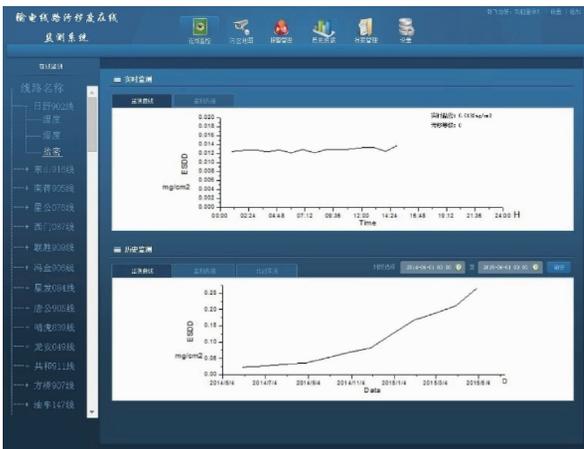


图 3 系统界面及盐密曲线

为了加强运行人员对设备污秽历史数据的掌握,本系统在工具中还可查询及调阅历年数据。历年数据包括指定年月的各数据表格与曲线,某区域杆塔绝缘子污秽度分

表4 模拟挂网运行数据比对结果

采样日期	地块#1			地块#2		
	人工测量值/ ($\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$)	监测系统测量值/ ($\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$)	相对 误差/%	人工测量值/ ($\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$)	监测系统测 量值/($\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$)	相对 误差/%
2017.6.11	0.0097	0.0093	3.89	0.0089	0.0085	4.10
2017.7.16	0.0125	0.0129	3.65	0.0113	0.0109	3.98
2017.8.13	0.0198	0.0205	3.56	0.0145	0.0150	3.76
2017.9.17	0.0221	0.0218	3.45	0.0182	0.0189	3.87

地块#3			地块#4			地块#5		
人工测量/ ($\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$)值	监测系统 测量值/ ($\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$)	相对 误差/%	人工测量值/ ($\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$)	监测系 统测量值/ ($\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$)	相对 误差/%	人工测量值/ ($\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$)	监测系统 测量值/ ($\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$)	相对 误差/%
0.0121	0.0117	3.45	0.0156	0.0161	3.11	0.0278	0.0284	2.14
0.0155	0.0160	3.23	0.0228	0.0234	2.68	0.0398	0.0391	1.89
0.0189	0.0184	2.98	0.0298	0.0290	2.87	0.0479	0.0490	2.45
0.0233	0.0240	3.10	0.0345	0.0354	2.72	0.0590	0.0607	2.88

参考文献

- [1] 韩玉康,宁森福,杨帅,等. 基于光传感技术的特高压直流输电线路污秽度在线监测[J]. 水电自动化与大坝监测,2013,37(2):13-16.
- [2] 冯宏恩. 污湿瓷绝缘子放电紫外图像特征及闪络预警研究[D]. 北京:华北电力大学,2015.
- [3] 帅海燕. 输电线路污闪运行风险评估及相关技术研究[D]. 武汉:武汉大学,2010.
- [4] 高维钊,张庆超,郑明忠,等. 绝缘子表面盐密分布式测量系统的设计[J]. 电网技术,2015,39(10):2929-2934.
- [5] 王国胜,高广德,李洪涛,等. 基于光传感器的输电线路盐密在线监测系统设计[J]. 水电能源科学,2013,31(8):170-172.
- [6] 骆东松,黄靖梅. 绝缘子盐密在线监测系统及其应用[J]. 中国电力,2013,46(8):123-127.
- [7] 吴尚. 光传感器在绝缘子盐密测试中的应用[J]. 华北电力技术,2012(9):38-40,43.
- [8] 骆东松,黄靖梅. 基于RBF网络的盐密光纤在线监测系统的研究[J]. 陕西电力,2012,40(10):40-43,52.
- [9] 黄靖梅. 污秽绝缘子盐密在线监测系统的研究与开发[D]. 兰州:兰州理工大学,2013.
- [10] 宋云海. 基于表面电导的绝缘子积污在线监测系统[D]. 广州:华南理工大学,2011.
- [11] 张锐,吴光亚,刘亚新,等. 光技术在线监测绝缘子盐密和灰密的实现及应用[J]. 高电压技术,2010,36(6):1513-1519.
- [12] 王思捷,胡滨,黄松,等. 基于光传感技术的现场污秽度在线监测装置在热带海岛污湿特征下的研究及应用[J]. 电瓷避雷器,2014(2):104-107.
- [13] 李彬. 光技术在输变电设备盐密在线监测系统上的应用[J]. 电力技术,2010,19(5):30-33.
- [14] 王培,金聪. 遗传优化支持向量机在软件缺陷预测中的应用[J]. 电子测量技术,2012,35(2):126-129.
- [15] 刘涛,王华. 传感器非线性校正的遗传支持向量机方法[J]. 电子测量与仪器学报,2011,25(1):56-60.
- [16] 焦卫东,林树森. 整体改进的基于支持向量机的故障诊断方法[J]. 仪器仪表学报,2015,36(8):1861-1870.

作者简介

戴宇辰,硕士研究生,主要研究方向为电力系统运行与控制、输配电装备与电网安全。

E-mail:1690328786@qq.com