

基于激光透射原理的绝缘子NSDD测量与试验研究

为监测绝缘子的污秽度水平，基于激光透射原理和数据拟合方法，研制了NSDD光传感器监测终端，采集现场的温度、湿度以及光能参数等，并通过4G模块传送到数据中心。通过大量的对比试验研究得出不同污秽物的激光透射率与灰密值关系曲线，以及不同环境参数对激光透射的影响。此研究结果可为评估绝缘子的污秽状态提供方法和思路。

陈 涛/安徽农业大学工学院 潘天红/江苏大学电气信息工程学院

0 引言

架空输电线路绝缘子长期在自然条件下运行，其表面受到空气中固态、液态和气态导电物质的污染，在雾气、露水和毛毛雨等湿润作用下，使得绝缘子表面污层的电导增大，泄漏电流也随之增加，会产生局部放电现象，在当前的运行电压下，绝缘子表面的局部电弧会演变成完全闪络，产生污闪事故，直接影响供电线路的安全。典型案例如2005年1月底，广东电网因受大雾的影响，接连发生污闪跳闸的电网故障，导致500 kV线路停电4次，广东电网500 kV南部环网解环运行。由此可见，研发绝缘子污秽度在线监测系统，密切关注其污秽度的变化，并采取相应的清洗策略，可以避免电网污闪事故，保障电网的安全稳定运行，提高电力供应的可靠性。

绝缘子表面污秽物主要由不能溶于水的物质与能溶于水的物质两部分组成。不能溶于水的物质一般不具备导电性，用等效附灰密度NSDD表示；能溶于水的物质是可溶盐类物质，一般具备导电性，用等效附盐密度ESDD表示。不同现场等效附盐密度ESDD、不同现场等

效附灰密度NSDD地区污秽或地点污秽的绝缘子，其污秽等级可能相同，确定的外绝缘配置也应相同；相同现场等效附盐密度ESDD、不同现场等效附灰密度NSDD地区污秽或地点污秽的绝缘子，其污秽等级可能不同，确定的外绝缘配置差异很大。污秽等级应以连续3~5年现场的等效附盐密度ESDD（简称盐密）和现场等效附灰密度NSDD（简称灰密）两个参数的最大值共同确定，在此基础上合理配置外绝缘水平方能有效地防止污闪事故的发生。

国内外对NSDD检测方法已进行了大量研究，主要有电量检测方法（如绝缘电阻法、泄漏电流法、脉冲电流法和电压分布检测法等）及非电量检测方法（如红外热像仪法、超声波检测法、光纤测量法和激光多普勒振动法等）两种。在这些检测方法中，检测模型的构建十分关键，直接影响着检测的有效性。

本文在前人研究的基础上，开发了一种激光透射原理的绝缘子NSDD在线监测系统。通过检测透过污秽物激光光束的光强，计算光透射衰减，并与对应的灰密值进行曲线拟合，建立光透率与灰密的数学模型，从而实现对灰密的预测。该系统已经在江苏电网获得运行，效果良好。

1 检测系统设计

1.1 设计原理

绝缘子的外绝缘表面受到污染后，聚集的污染物会吸收和反射相应频谱



陈 涛/硕士研究生

关键词/Keywords

灰密 ·
光强传感器 ·
绝缘子 ·
污秽度 ·
回归分析 ·

的光线，所以光穿过污秽层会有不同的减弱。根据光电效应原理，光信号的减弱会导致测光装置的电信号变化，通过比较经过污秽层的光强度变化，即可计算出污秽层的灰密。

激光具有优良的单向性和会聚性，当激光束通过玻璃片时，一部分会发生反射，但透射过玻璃片的光束仍能保持良好的方向性，保证光强传感器接收到足够强度的光信号^[7]。激光透射原理如图1所示，图1中的激光发射端和光强传感器相对放置分别装设在绝缘子的上伞裙和下伞裙上，采样玻璃片1和采样玻璃片2分别用于采集上伞裙下表面和下伞裙上表面的污秽物。

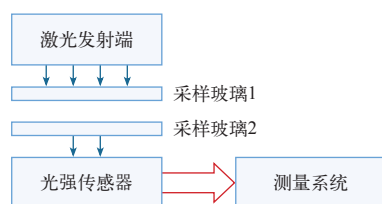


图1 激光透射原理

采样玻璃片表面的积污能等效地表征出绝缘子外绝缘表面的污秽程度。当采样玻璃片逐渐被污染时，透射过它们的激光束光强度由于散射而减弱，光强传感器输出的光强信号也会变小。将光强度信号与预先在实验室中通过试验标定好的光透射率与灰密值关系曲线进行对比，可得被测绝缘子外绝缘表面的灰密值。

将双伞型绝缘子上下伞裙取四个点，上下贯穿，使得光探测器设备可以探测上下表面的污秽物覆盖的程度。经过一定时间的积污后，利用铁帽端作为数据的输出线，将测量终端接于铁帽口，根据光强差进行表面灰密数据采集。图2为激光传感器安装示意图。

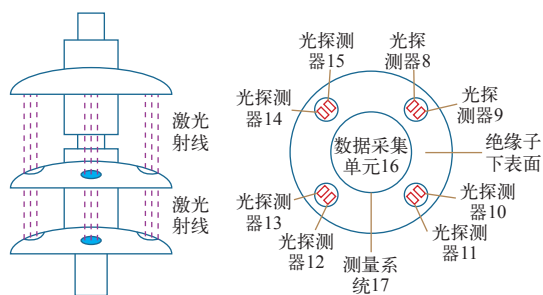


图2 激光传感器安装示意图

传感器测得光强与表面附着的不溶物量有直接关系。装置将上下表面均分为4个区，每个区中传感器布置的位置是对称的。光强测量值可反映附着在传感器表面的不溶物量，将其取平均值后可得绝缘子外绝缘表面的灰密值。因不溶物的遮盖引起的光透射衰减与灰密的关系曲线及数学模型的建立是非常困难的，本文采用人工涂刷法来实现灰密的标定和校验。

1.2 硬件组成设计

基于激光透射原理的绝缘子NSDD测量系统主要由激光发射端模块、激光接收端模块、触摸屏、通信模块、参数设置模块以及电源等模块构成，如图3所示。

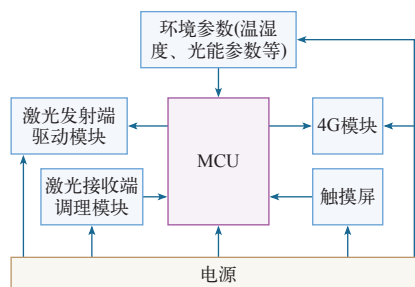


图3 系统设计框图

(1) 激光发射端模块

此模块采用了波长为650 nm的光波模组（其功率是20 mW），此模组发射的光强度较大，往往超出光强传感器的极限值，为此，本文设计的光强度调理电路如图4所示。

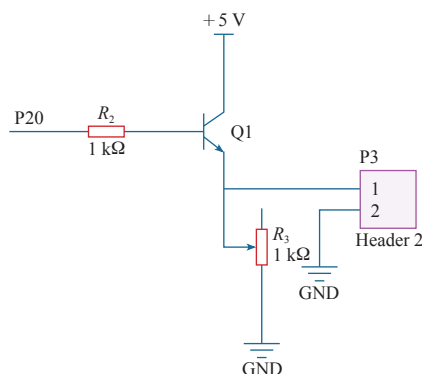


图4 激光发射端驱动电路

由图4可知，采用并联电阻分流方法，改变激光发出的光强，使得激光强度在传感器的检测范

围。此外,通过晶体管控制电路,利用MCU数字引脚P20输出高低电平,控制激光管启动与关断,只有需要检测时才打开激光管,从而降低激光发射模组的功耗。

(2) 光强接收端电路

光强接收传感器选用了BH1750FVI,它采用标准的I²C总线接口,直接与MCU相连,采用16位数字量输出(分辨率为1~65 536),检测时间仅为16 ms,能检测较大范围的光照强度变化。

1.3 检测工艺流程

通过MCU控制激光发出的光强,并由光强接收传感器得到激光的光通量,经过计算得到光通量的差值,经查表得到绝缘子对应的灰密值,再由4G模块发送到系统的测试平台。其检测流程如图5所示。

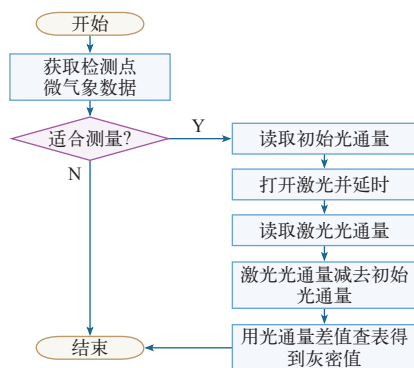


图5 灰密测试流程

2 绝缘子NSDD的试验研究

激光透射率与绝缘子表面污层的厚度有直接关系,因此需要分析激光透射率与灰密的关系,为实际绝缘子表面污秽的测试中灰密换算提供依据。

具体做法是在双层玻璃片和绝缘子上开展不同灰密下的大量试验,参照盘形悬式绝缘子进行涂污,然后通过试验得到不同灰密下的光透射率值,根据所测得的光透射率值对相应的灰密进行拟合,得出光透射率与灰密值关系曲线。

2.1 试验方法

试验方法具体如下:

1) 被测绝缘子。按测量原理准备好绝缘子,

安装好光传感器等。

2) 绝缘子涂污。按GB/T 4585—2004固体层法进行人工涂污。

3) 测量光强、空气湿度、温度和气压等,规范记录数据。

4) 每种试验参数应保证有3~5个有效测试数据,取平均值作为测量值。

2.2 光透射率对相应的灰密拟合算法

根据试验数据对获得的光透射率和灰密数据进行曲线拟合,拟合曲线如图6所示。

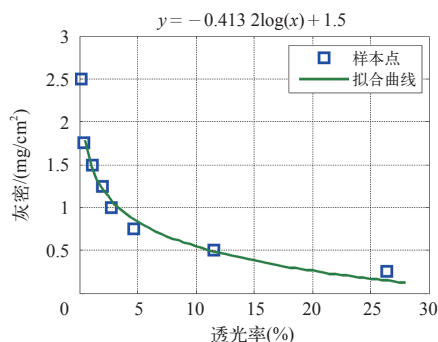


图6 透光率和样品灰密拟合曲线

由图6可知,试验样品的灰密与光透射率成反比,且存在自然对数关系,可用自然对数进行曲线拟合,即

$$y = -0.413 2\log(x) + 1.5 \quad (1)$$

式中, y 为样品灰密, mg/cm^2 ; x 为透光率。

经样机试验数据验证,样机灰密测试系统相对于基准值误差在5%以内,具有很高的准确度。

2.3 模拟现场灰密污秽及自然环境测试

通过在实验室内进行设备功能验证,表明了灰密测量系统测试的准确性,但污秽类型为人工模拟,较为单一,与实际自然积污和自然环境均有不同。为进一步分析装置测量的准确性,研究水泥污秽、化工污秽、煤炭污秽和沙土污秽等不同类型,模拟45%~98%相对湿度条件下,在-10~40℃温度范围内开展人工涂污灰密试验,分析激光透射率受相关因素的影响程度,以验证测量装置的适用性。

(1) 难溶物类型对激光透射率的影响

采用农业污秽、石灰污秽、煤灰污秽和高岭土等不同类型难溶物在实验室环境下开展人工涂

污模拟自然积污试验，每组进行4次试验，取平均值作为拟合数据，获得不同灰密与激光透光率的关系，建立拟合曲线，用于不同灰密数据的修正，如图7所示。试验结果表明：

- 1) 光透射率与绝缘子的积污趋势保持反比例关系，相关性良好。
- 2) 绝缘子盐污附着越多，盐密越大，光通量衰减也越大。
- 3) 曲线表明：光透射率与不同类型灰的形态及其在绝缘子表面厚度的拟合关系各不相同，同密度的灰密，高岭土污秽影响最大，煤灰污秽的影响最小。

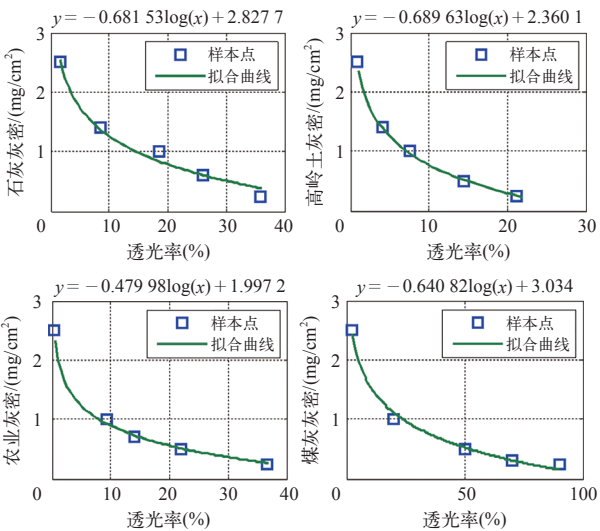


图7 难溶物与透光率的拟合曲线

因此，在利用模型进行绝缘子灰密预测，应给出当地的实际灰的类型，选用相应的拟合曲线，但是无论哪种类型的灰，随灰密的增大，激光的透射率都降低，可见灰的类型和灰密的大小对激光透射率影响较大。

(2) 受潮程度对污层激光透射的影响

利用小型恒温恒湿箱，在45%~98%湿度条件下开展人工涂污（高岭土）试验，其结果如表1所示。

表1 受潮程度对污层激光透射的影响

相对湿度(%)	涂污灰密/(mg/cm ²)	测量灰密/(mg/cm ²)	相对误差(%)
45	1.0	0.996 2	0
60	1.0	0.989 5	-1.0
70	1.0	0.999 6	0
80	1.0	0.989 5	-1.0

(续)

相对湿度(%)	涂污灰密/(mg/cm ²)	测量灰密/(mg/cm ²)	相对误差(%)
90	1.0	0.989 5	-1.0
98	1.0	1.003 0	0.3

由表1可知，在不同的相对湿度条件下，灰密值基本稳定（误差在1%左右），也即，受潮程度对污层激光透射的影响有限，在不同的湿度天气下，激光透射传感器均能对绝缘子表面灰密给予较客观的反映。

(3) 温度对污层激光透射的影响

利用小型恒温恒湿箱，在-10~40℃温度条件下开展人工涂污（高岭土）试验，并与一般环境数值进行比对，其结果如表2所示。

表2 温度对污层激光透射的影响

温度/℃	涂污灰密/(mg/cm ²)	测量灰密/(mg/cm ²)	相对误差(%)
-10	1.0	1.017 5	1.75
0	1.0	1.007 8	0.78
10	1.0	0.976 4	-2.5
20	1.0	0.989 5	-1.0
30	1.0	1.010 0	1.0
40	1.0	1.048 0	4.8

由表2可知，日常环境温度对污层激光透射的影响在可接受范围内（误差在5%以下），建议灰密测量在40℃以下天气温度状况时进行测量。

3 结束语

本文提出一种基于激光透射原理的灰密测量新方法。基于所研发的检测装置，分析了激光透射率与灰密的拟合算法，并对系统测试人工污秽和模拟自然污秽的准确度进行了验证，分析了自然环境等因素对测试准确度的影响。结论如下：

- 1) 试验研究表明，灰密测试系统相对于灰密基准值误差在5%以内，具有很高的准确度。
- 2) 光透射率随灰密的增大而降低，且呈自然对数关系规律；获得了石灰、煤灰、农田灰和高岭土的灰密值和激光透射拟合曲线和函数关系。
- 3) 模拟45%~98%相对湿度条件和-10~40℃温度条件下，激光透射率受两者的影响最大误差在5%以内，能够满足工程应用要求。

(收稿日期：2018-03-04) EA