

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.12.039

基于相关向量机的GIS气体绝缘状态评估

宋人杰¹, 赵 萌¹, 关潇卓², 杜轲琼², 刘 静²

(1. 东北电力大学信息工程学院, 吉林 132012; 2. 国网吉林省电力有限公司吉林供电公司信息通信分公司, 吉林 132012)

摘要:文中提出了基于多参量的GIS设备气体绝缘状态评估方法。该方法首先对影响GIS设备绝缘状况的因素进行了详细的分析,确定影响该气体绝缘状态的主要因素。然后利用气体组成成分、温度、湿度、压力、纯度作为因素集,对其进行绝缘评估。最后,采用一对一的分类方法建立基于相关向量机的GIS设备气体绝缘状态评估模型,并将GIS设备气体的绝缘状态分为“正常”、“注意”、“异常”和“故障”4类,利用训练样本对评估模型进行训练,进而实现GIS设备气体绝缘状态的评估。实例分析表明,相对传统方法,该方法在GIS设备气体的绝缘状态分类中具有较高的准确率。

关键词: GIS; 相关向量机; 绝缘状态评估模型; 一对一分类方法; 六氟化硫

Assessment of Gas Insulation State in GIS Equipment Based on Relevance Vector Machine

SONG Renjie¹, ZHAO Meng¹, GUAN Xiaozhuo², DU Keqiong², LIU Jing²

(1. College of Information Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China; 2. Information and Communication Branch, Jilin Power Supply Company of State Grid Jilin Electric Power Supply Company, Jilin 132012, China)

Abstract: A multi-parameter assessment method of the gas insulation state in GIS equipment is proposed. Factors affecting the insulation conditions of GIS equipment are analyzed in detail, and the most influencing factors determined. Assessment of insulation using a parameter set of gas composition, temperature, humidity, pressure and purity is carried out. Finally, a one-on-one (ORO) classification method is used to establish a GIS insulation state model based on a relevance vector machine(RVM). The GIS gas insulation condition can be divided into four categories corresponding to “normal”, “attention”, “abnormal” and “malfunction”. The model is trained with training samples before it is used for the evaluation of gas insulated equipment state. A use case analysis shows that the method has better accuracy in the classification of insulation state of the GIS equipment.

Key words: GIS; relevance vector machine(RVM); gas insulation state model; one-versus-one classification; SF₆

0 引言

气体绝缘金属封闭开关设备(gas insulated switchgear, GIS)因其技术先进、占地面积小、可靠性高、安全性强、维护工作量小等优点被广泛应用于城市供电的封闭式变电站中。近几年来随着中国GIS使用量迅速增加和早期投入的GIS运行年限的增长, GIS的故障率也明显提高。GIS故障与其他输变电设备不同,其故障影响范围较大, GIS故障往往会造成整个变

电所停电,给设备安全和电网运行造成很大的威胁。而且GIS电压等级越高,因故障停电造成的损失及维修成本也越大。因此,加强GIS的运行状态监测和诊断对提高设备可靠性发挥GIS优势至关重要^[1-2]。

SF₆气体是GIS内部绝缘的基本保障,当GIS设备中发生故障时, SF₆气体在电弧或电晕以及微氧和微水等杂质的作用下发生分解,生成SO₂F₂、SO₂F₂、SO₂、CO₂、CO、CF₄、SOF₄、H₂S和HF等特征气体^[3]。通过检测特征气体含量和变化规律可以判断GIS设备绝缘状态及潜伏性故障。目前国内外对造成GIS气体绝缘状态劣化的原因研究较少。文[4-5]

收稿日期:2016-06-29; 修回日期:2016-08-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61271115)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(61271115).

分析了不同放电类型下绝缘气体 SF_6 分解气体组分成分以及检测技术,但并未对其绝缘状况进一步研究;文[6]研究了微水微氧对气体分解特征组分比值的影响规律,并建立了具体的数学模型,为今后判断气体绝缘设备不同类型绝缘缺陷提供了理论基础,未涉及其对气体绝缘状态的影响分析;文[7-9]根据 SF_6 气体分解产物来判断气体绝缘开关设备的绝缘状态,将分解产物应用于绝缘状态评价中,但其评价所用分解气体相对较少,具有一定局限性;文[10-11]主要针对设备内温度和湿度来对其内部绝缘性能进行分析,并未提及设备内绝缘气体的变化,因此评价结果相对片面;文[12-15]利用实验数据来对 GIS 绝缘状态进行诊断,实验环境与实际运行状况有一定的差距,不能为绝缘状态评估提供相对有效的帮助。对于 GIS 设备的研究,目前主要研究集中在 GIS 设备故障的研究,而对其绝缘状态研究甚少。

针对上述对 GIS 设备气体绝缘状态评估存在的问题,文中综合设备运行时的环境与气体组分成分来对气体绝缘设备的绝缘状态进行评估,并利用 RVM 算法来实现状态划分,提高了气体绝缘状态分类的准确性。

1 相关向量机理论

相关向量机(relevance vector machine, RVM)是在支持向量机(support vector machine, SVM)基础上,根据稀疏贝叶斯理论框架提出的新型分类器。RVM 通过引入超参数对权重向量赋予均值高斯先验分布,在超参数估计的过程中自动调节规则化系数,因此不需要对规则化系数进行验证。此外, RVM 核函数无需满足 Mercer 条件,并能够得出各成分概率统计信息,便于分析不确定性问题。其中大部分权值的后验分布近似于零,所以 RVM 模型的稀疏性很强。根据自相关判定原理,其余不为零的权值相关的训练向量被称为相关向量(relevance vector, RV)。

设训练样本输入向量为 $\{x_n\}_{n=1}^N$, 输出向量为 $t=[t_1, \dots, t_N]^T$, 那么相关向量机的分类模型为

$$y(x, \omega) = \sum_{n=1}^N \omega_n K(x, x_n) + \omega_0. \quad (1)$$

式(1)中: $K(x, x_n)$ 为核函数; ω_n 为模型的权值。将 logistic sigmoid 连接函数 $\sigma(y) = 1/(1+e^{-y})$ 应用于 $y(x)$, 那么数据集的似然估计概率为

$$p(t|\omega) = \prod_{n=1}^N \sigma[y(x_n, \omega)]^{t_n} \{1 - \sigma[y(x_n, \omega)]\}^{1-t_n}. \quad (2)$$

式(2)中, $\omega = (\omega_0, \dots, \omega_N)^T$ 。对于二分类问题, 输出 $\{t_n\}_{n=1}^N$ 值只能为 0 或 1。

在贝叶斯框架下, 权值 ω 可以通过极大似然法获得, 但是为了避免过学习现象, 稀疏贝叶斯方法为每个权值定义了高斯先验概率分布来约束参数

$$p(\omega|\alpha) = \prod_{n=0}^N N(\omega_n | 0, \alpha_n^{-1}). \quad (3)$$

式(3)中, α 为 $N+1$ 维超参数向量。对每一个权值引入超参数是 RVM 的重要特征, 同时增加了模型的稀疏性。

在 RVM 中, 对于分类问题无法通过积分直接求解权值的后验概率, 但可用拉普拉斯理论来近似求解。

首先, 固定超参数 α , 求取最大可能的权值 ω_{MP} 。因为 $p(\omega|t, \alpha) \propto p(t|\omega)p(\omega|\alpha)$, 即求式(4)最大时的 ω_{MP} 值。对式(4)采用二阶牛顿法求得

$$\lg[p(t|\omega)p(\omega|\alpha)] = \sum_{n=1}^N [t_n \lg y_n + (1-t_n) \lg(1-y_n)] - \frac{1}{2} \omega^T A \omega. \quad (4)$$

式(4)中, $y_n = \sigma[y(t_n, \omega)]$; $A = \text{diag}(\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_N)$ 。

其次, 利用拉普拉斯方法, 对对数后验概率进行二次逼近。将式(4)两次求导得出

$$\nabla_{\omega} \nabla_{\omega} \lg p(\omega|t, \alpha)|_{\omega_{MP}} = -(\Phi^T B \Phi + A). \quad (5)$$

式(5)中, Φ 为 $N \times (N+1)$ 的结构矩阵, 即 $\Phi = [\phi(x_1), \phi(x_2), \dots, \phi(x_N)]^T$, $\phi(x_n) = [1, K(x_n, x_1), K(x_n, x_2), \dots, K(x_n, x_N)]^T$, $B = \text{diag}(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_N)$ 是一个对角阵, 且 $\beta_n = \sigma[y(x_n)]\{1 - \sigma[y(x_n)]\}$ 。对等式(5)中右半部分取负号再求逆矩阵得到协方差矩阵 Σ 。

最后, 利用 Σ 和 ω_{MP} , 采用最大化边缘似然函数的方法, 对超参数 α 进行更新直到达到合适的收敛尺度。

$$\alpha_n^{\text{new}} = \frac{\gamma_n}{\omega_{MPn}^2}. \quad (6)$$

式(6)中, $\gamma_n = 1 - \alpha_n \sum_{nn}$ 且 $\sum_{nn}$ 为 Σ 中第 n 个对角线元素。 ω_{MPn} 为权重向量 ω_{MP} 的第 n 个元素。

$$\Sigma = (\Phi^T B \Phi + A)^{-1}; \quad (7)$$

$$\omega_{MP} = \Sigma \Phi^T B t. \quad (8)$$

重复上述过程, 直到满足适合的收敛条件。非零权值的基函数对应的样本向量即为相关向量 RV (relevance vector)。

2 特征量的选择

2.1 运行环境参量选取

GIS 设备运行时, 其周围环境会对其绝缘状态产生一定的影响。运行过程中温度、湿度、压力、密度、酸度和气体纯度的变化都会导致 SF_6 气体绝缘

状态的改变。其中,湿度的高低对电器设备的灭弧性能、绝缘强度以及电气设备的寿命影响很大,直接影响电气设备的安全运行。湿度过大时,会阻碍 SF_6 由于电弧放电而分解的产物的重新复合,使其不能重新生成 SF_6 造成气室内 SF_6 气体体积分数的降低和杂质气体的增多,致使绝缘状况劣化。此外,水分含量偏高会明显腐蚀灭弧触头,使触头变短,严重时可导致灭弧触头不能灭弧而引起断路器爆炸事故。根据运行经验,文中采用相对湿度来表征设备内湿度情况,避免其他因素的干扰。温度对 GIS 气体绝缘状况也会产生一定的影响,设备在运行过程中由于内部损耗使其具有一定的温度。如果周围环境温度过高,或者空气流动性差使得设备的热量不能及时散开,将会使设备由于过热跳闸甚至烧坏设备。温度升高会导致有机材料会变脆老化,绝缘性能下降甚至击穿使得整个装置的绝缘状况下降。气压的变化也会对 GIS 设备的气体绝缘状况产生一定的影响,气压升高后由于分子间的间距缩短,减少了电子的平均自由行程,并且增加了具有强烈电负性的 SF_6 分子吸附电子而阻碍放电发展的可能性,使得 SF_6 气体不易分解^[16],在一定程度上提高了气体绝缘性能。实验研究表明,随着气体压力的增加 SOF_2 和 SO_2 气体产生速率有下降趋势^[17]。根据国内现行的六氟化硫电气设备用气质量标准,六氟化硫气体纯度在运行时不应小于特定值才能保障设备的安全运行,因此文中也将其作为表征气体绝缘状态的参量之一。综合分析设备环境影响,采取温度、湿度、压力、浓度为环境参量来对 GIS 设备气体绝缘状态进行评估。

2.2 气体特征组分成分参量选取

经验表明,通过检测开关设备中 SF_6 气体分解产物对设备内部绝缘进行故障诊断和状态评估,具有抗干扰能力强、灵敏度高等特点。 SF_6 在电弧、火花和电晕放电以及过热状态下发生分解并与设备内其他物质反应而导致绝缘状态劣化,生成的主要产物有 SOF_2 、 SO_2F_2 、 SOF_4 、 SO_2 、 H_2S 、 CO_2 、 CO 、 CF_4 、 HF 等。其中 SOF_2 、 SO_2F_2 、 SO_2 已被证明是局部放电下的稳定分解产物并且会随着故障的持续而积累,其含量能够有效地表示绝缘气体分解情况。此外,为了更准确地对设备的气体绝缘状态进行评估,文中对特征组分气体的体积分数进行处理,并选取恰当的特征参数对其进行定量分析。其中 CO_2 和 CF_4 中 C 由高能放电下电离缺陷电极所得,C 原子的数量取决于放电的剧烈程度且 C 原子的存在直接反映出导致绝缘状态下降的因素涉及固体绝缘材料^[18]。因此 $(\text{CO}_2+\text{CF}_4)$ 的体积分数和可以反映出放电设备内积

累的放电能量以及绝缘材料绝缘状态的劣化程度。 $(\text{SOF}_2+\text{SO}_2\text{F}_2+\text{SO}_2)$ 体积分数和可以很好地反映 SF_6 总体放电分解程度,对设备的气体绝缘状态评估有一定的指导作用。因此 $(\text{SOF}_2+\text{SO}_2\text{F}_2+\text{SO}_2)/(\text{CO}_2+\text{CF}_4)$ 体积分数比可以反映出 GIS 绝缘状态劣化程度。而 $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 体积分数比可以反映出设备电弧放电和发热的程度从而对之后的绝缘劣化原因分析提供参考。因此,文中也将其作为绝缘状态参量之一。综合分析气体各分解产物反映出的设备的绝缘状态,文中将 SO_2 、 CF_4 、 CO 、 $(\text{CO}_2+\text{CF}_4)$ 、 $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 、 $(\text{SOF}_2+\text{SO}_2\text{F}_2+\text{SO}_2)/(\text{CO}_2+\text{CF}_4)$ 作为气体组分成分参量来对 GIS 气体绝缘状态进行评估。

3 基于 RVM 的绝缘状态评估

将上节中提到的环境参量和气体特征组分成分参量共 10 个统计参数作为 RVM 的输入特征向量。由于输入的统计参数包含不同性质的物理量,且各类参数间的数值差异性较大,为了消除向量间的量纲从而使得各参数间具有可比性,对输入数据的各类统计参数分别按式(9)进行归一化处理

$$X_{\text{new}} = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (9)$$

式(9)中: X 、 X_{new} 分别表示归一化前后的样本值; $X_{\min}$ 、 $X_{\max}$ 分别表示样本的最大值和最小值。在相关向量机算法中,常用的核函数有线性核函数、多项式核函数、Sigmoid 核函数和高斯径向基核函数(radial basis function, RBF)^[19]。文中采用 RBF 核函数,该函数具有较宽的收敛域,可适用低维、高维、小样本、大样本等多种情况,是较为理想的分类函数。该函数的表达式为

$$K(x, x') = \exp\left(-\frac{\|x - x'\|^2}{\sigma^2}\right) \quad (10)$$

RVM 算法本质上是二分类算法,而文中 GIS 绝缘状态评估是一个多分类问题,因此需要将算法延伸至多分类识别,目前用于多分类的方法有一对一算法、一对多算法、二叉树算法等。一对一算法组合了所有可能的二元分类器,每次对二类问题进行训练,构造出的分类器机构简单,计算量小且精确度高;一对多算法将其中一类与其他类区分开来依次训练;二叉树算法依次将样本分成两个子类进行训练。为了得到更精准的分类器,采用一对一算法进行多分类器的构造。

根据 GIS 装置的特点,文中将其总体运行的绝缘状态划分为正常、注意、异常、故障 4 类。各类状态的具体描述见表 1。

基于 RVM 的绝缘状态分类模型,见表 2。

表 1 各类状态描述

Table 1 Description of all kinds of state

绝缘状态	状态描述
正常	正常运行
注意	继续运行,缩短监测周期
异常	监视运行,适时安排停电检修
故障	安排停电检修

每一个样本输入都要经过 6 个分类器来判断,依次判断属于那一类状态,例如在 i, j 两类之间分类时,机器判别结果其属于第 i 类,就在第 i 类上增

表 2 基于 RVM 的绝缘状态分类模型

Table 2 Insulation state classification

model based on RVM						
状态	RVM_1	RVM_2	RVM_3	RVM_4	RVM_5	RVM_6
正常	≥ 0.5	≥ 0.5	≥ 0.5	—	—	—
注意	< 0.5	—	—	≥ 0.5	≥ 0.5	—
异常	—	< 0.5	—	< 0.5	—	≥ 0.5
故障	—	—	< 0.5	—	< 0.5	< 0.5

加 1 否则对第 j 类投票加 1,直到所有的分类器分类完成,最后统计得票最多的类别即为测试样本所属类别,见图 1。

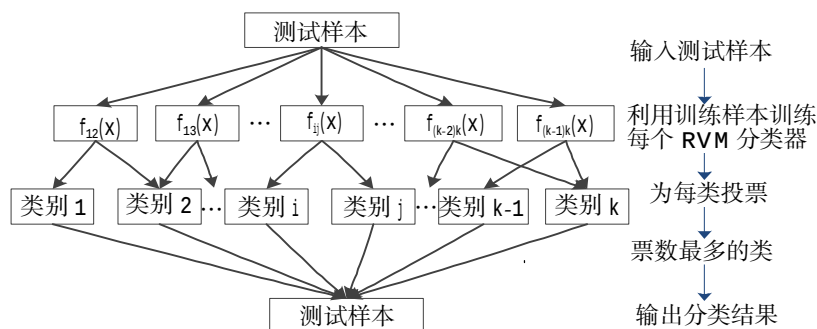


图 1 基于 RVM 的“一对一”算法

Fig. 1 “One against one” algorithm based on RVM

基于 RVM 的绝缘状态评估实现过程如下:

1)依据评估需要,选取 GIS 绝缘状态评估所需要的监测数据。

2)选取特征变量和样本数据,并将数据标准化后按一定的比例分为训练集和测试集。

3)确定 GIS 设备绝缘状态评估模型。为了保证分类的精确性,采用一对一分类算法建立绝缘状态评估模型。

4)选取核函数以及核函数的参数,利用已分好的训练集进行 RVM 分类模型的学习,并采用最大化边缘似然函数的方法进行超参数的估计。

5)利用测试集来对训练好的 RVM 分类器进行测试,来检验分类器的分类性能。

基于 RVM 的 GIS 绝缘状态评估流程图见图 2。

4 实例分析

4.1 对比传统绝缘评估

选用跨区电网和华南地区供电公司提供的实测数据以及从相关文献中获取的 GIS 设备监测数据共 120 组来验证文中所提方法的可行性^[20-22],并与传统的利用气体组分方法^[23]来评判绝缘状态进行对比,进一步说明此方法的科学有效性^[24-30]。

其中,RVM 多分类器中一对一法是对样本构造所有的二分类器,构造出的分类器结构简单、计算量

小并且具有相对较高的精确度,所以文中采用一对一分类算法。试验表明,与核函数选用线性核函数和多项式核函数相比,RVM 核函数采用 RBF 时分类正确率相对较高,因此选取 RBF 作为核函数且宽度参数取 0.5。GIS 绝缘状态评估过程中相关向量的数量在模型学习中的变化情况见图 3。由图 3 可以看出,相关向量机模型最终只需要少量的相关向量,模型稀疏度高,泛化效果好,输入新的样本数据进行评估时,计算复杂度低。

将传统特征参量与文中所提到的特征参量分别作为输入量进行绝缘状态分类效果对比。对比识别结果见表 3。

从表 3 中可以看出,与传统仅利用部分气体组分成分作为参量来判断 GIS 绝缘状态相比,引入环境参量之后整体的评估正确率有显著提高,由此说明文中方法的准确合理性。追根溯源,分析造成状态误判的原因主要有以下 3 点:首先,传统方法未涉及绝缘状态劣化指标,该指标可以在一定程度上减小由于个别气体含量超标而造成的绝缘状况误判;其次,与其他状态相比,注意与异常两种状态的数据值差异较小,易造成判断失误;最后,由于样本量有限,导致模型分类精度还有所欠缺。应采取大量的运行数据来完善本评估以达到更加精准的绝缘状态判断。实例表明,采用 RVM 进行分类,算法本身具有

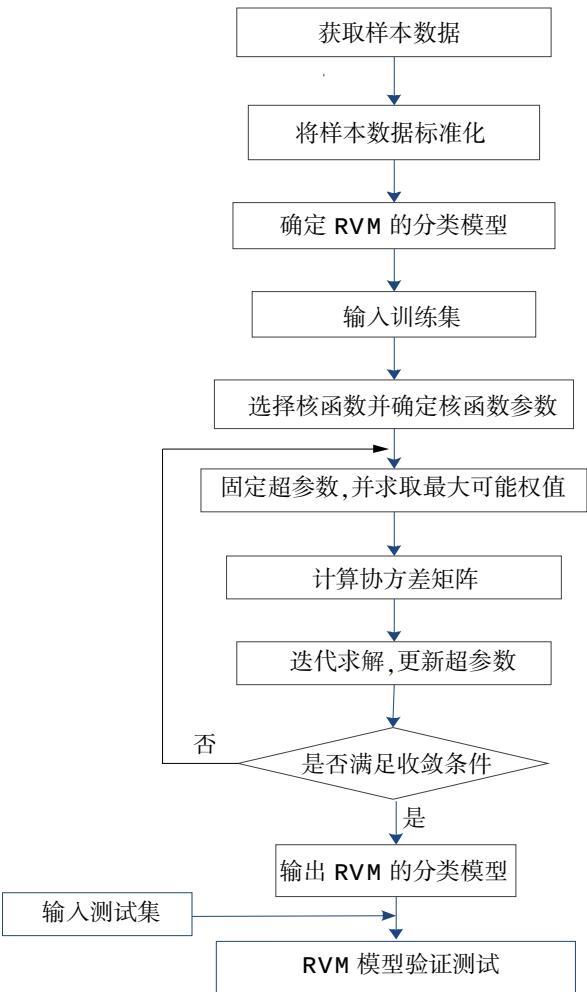


图 2 基于 RVM 的绝缘状态识别流程
Fig. 2 Insulation state recognition procedure based on RVM

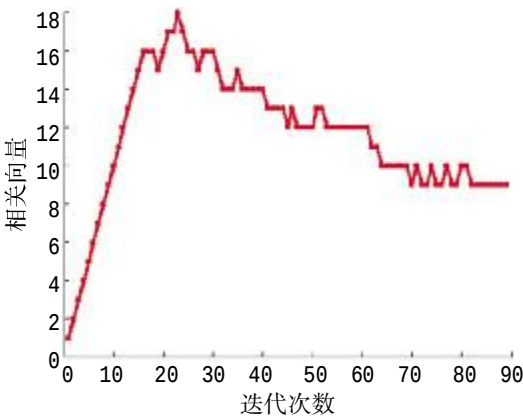


图 3 相关向量在模型学习迭代过程中的变化情况

Fig. 3 Changes of the number of relevance vector during the iteration process of model learning

较强的稀疏性,可以应用于目前 GIS 绝缘状态评估。

4.2 绝缘评估应用

以某地区的 GIS 设备为例,测得各个参量数据见表 4,根据文中提到的方法进行评估,将数据归一化[0.244 2 0.407 6 0.181 5 0.378 8 0.443 2 0.165 6

表 3 不同参量识别结果

Table 3 Identification results of different parameters				
绝缘状态	训练样本	测试样本	传统精度	文中精度
正常	20	10	100	100
注意	20	10	80	90
异常	20	10	80	90
故障	20	10	80	90

0.004 2 0.542 3 0.342 7 0.772 9] 输入已训练好的 RVM 分类器中进行分类识别,输出结果为异常状态。观察实测数值并与运行标准值相对比发现二氧化硫浓度过高,气体组分成分比值表明设备可能存在放电现象且涉及绝缘材料,进而导致绝缘状态处于异常。停电检查后发现出线套管下端水平盆式绝缘子表面发生了闪络放电,且存在少许黑色杂质。评价结果与实际运行情况相符,表明该评估方法的可行性。并且可以更科学准确的反应设备的绝缘状态,在电力设备在线检测与绝缘状态评估领域有良好的应用前景。

表 4 GIS 设备实测数据

Table 4 Measured data of GIS equipment					
测量参量	参量 1/℃	参量 2/%	参量 3/MPa	参量 4/%	参量 5/($\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$)
实测数值	25.300	11.510	0.443	99.560	8.000
测量参量	参量 6/($\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$)	参量 7/($\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$)	参量 8/($\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$)	参量 9	参量 10
实测数值	18.000	2.000	27.000	3.630	15.120

5 结语

文中首次提出将 RVM 分类算法应用于 GIS 设备的绝缘状态评估,并构建了一对一的多分类 RVM 模型,将 GIS 绝缘状态分为正常、注意、异常、故障 4 类状态。针对以往单一地根据温度、湿度或是 SF₆ 气体分解组分来对 GIS 设备进行绝缘状态评估,文中在综合以往评估参量的基础上又增加了压力、浓度以及部分气体组分成分来对 GIS 设备绝缘状态进行综合评估,弥补了传统评价参量的单一性,从环境参量和气体组分成分参量两方面进行综合绝缘状态评估,提高了准确性。由于文中样本量有限,因而建立的综合绝缘状态评估系统存在一定的局限性。今后仍需结合设备运行情况开展大量的试验和实时检测工作,逐步完善设备绝缘状态评估系统从而加强对 GIS 设备绝缘状态的分析。

参考文献:

- [1] CHU F Y. SF₆ decomposition in gas insulated equipment [J]. IEEE Transactions on Electric Insulation, 1986, 21(5): 693-725.
- [2] 刘有为, 吴立远, 弓艳朋. GIS 设备气体分解物及其影响因素研究[J]. 电网技术, 2009, 33(5): 58-61.
LIU Youwei, WU Liyuan, GONG Yanpeng. Investigation on SF₆ decomposition products in GIS and affecting factors [J]. Power System Technology, 2009, 33(5): 58-61.
- [3] 颜湘莲, 王承玉, 杨 韧, 等. 应用 SF₆ 气体分解产物的高压开关设备故障诊断研究[J]. 电网技术, 2011, 35(12): 120-123.
YAN Xianglian, WANG Chengyu, YANG Ren, et al. Fault diagnosis of high voltage switchgears by decomposition products of SF₆ [J]. Power System Technology, 2011, 35(12): 120-123.
- [4] 张晓星, 姚 尧, 唐 炬, 等. SF₆ 放电分解气体组分分析的现状和发展[J]. 高电压技术, 2008, 34(4): 664-747.
ZHANG Xiaoxing, YAO Yao, TANG Ju, et al. Actuality and perspective of proximate analysis of SF₆ decomposed products under partial discharge [J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(4): 664-747.
- [5] 齐 波, 李成榕, 骆立实, 等. GIS 中局部放电与气体分解产物关系的试验[J]. 高电压技术, 2010, 36(4): 957-963.
QI Bo, LI Chengrong, LUO Lishi, et al. Experiment on the correlation between partial discharge and gas decomposition products in GIS [J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(4): 957-963.
- [6] 唐 炬, 梁 鑫, 姚 强, 等. 微水微氧对 PD 下 SF₆ 分解特征组分比值的影响规律[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(31): 78-84.
TANG Ju, LIANG Xin, YAO Qiang, et al. Analysis of SF₆ gaseous decomposition components under two kinds of PD defects [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(31): 78-84.
- [7] 颜湘莲, 王承玉, 季严松, 等. 气体绝缘设备中 SF₆ 气体分解产物与设备故障关系的建模[J]. 电工技术学报, 2015, 30(22): 231-238.
YAN Xianglian, WANG Chengyu, JI Yansong, et al. Modeling of the relation between SF₆ decomposition products and interior faults in gas insulated equipment [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(22): 231-238.
- [8] 颜湘莲, 宋 昊, 王承玉, 等. 基于 SF₆ 气体分解产物检测的气体绝缘开关设备状态监测[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(6): 83-88.
YAN Xianglian, SONG Gao, WANG Chengyu, et al. Gas insulated switchgear state monitoring based on SF₆ decomposition products detection [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(6): 83-88.
- [9] 潘 臻, 温定筠, 彭 鹏, 等. SF₆ 气体分解产物检测技术在开关类设备状态诊断中的应用[J]. 高压电器, 2016, 52(7): 196-201.
PAN Zhen, WEN Dingjun, PENG Peng, et al. Application of SF₆ gas decomposition products detection technology to switchgear state diagnosis [J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(7): 196-201.
- [10] 黎 斌. 再论 SF₆ 气体湿度的监控与限值[J]. 高压电器, 2006, 42(2): 109-115.
LI Bin. Further discussion on monitoring and threshold of moisture in SF₆ gas [J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(2): 109-115.
- [11] 黎 斌, 沈栋良, 杨 洁. SF₆ 温度与湿度对其产品绝缘性能影响[J]. 高压电器, 2010, 46(1): 97-98.
LI Bin, SHEN Dongliang, YANG Jie. Influence of environmental temperature and humidity of SF₆ on insulating properties of SF₆ circuit breaker [J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(1): 97-98.
- [12] 颜湘莲, 王承玉, 季严松, 等. 开关设备中 SF₆ 气体产物检测的应用[J]. 电网技术, 2010, 34(9): 160-165.
YAN Xianglian, WANG Chengyu, JI Yansong, et al. Application of decomposition products detection of SF₆ in switchgears [J]. Power System Technology, 2010, 34(9): 160-165.
- [13] 李 明, 李 娟, 金子惠. 基于 SF₆ 气体分解产物测试的电气设备故障诊断分析[J]. 高压电器, 2014, 50(3): 33-37.
LI Ming, LI Juan, JIN Zihui. Fault diagnosis of electrical equipment based on SF₆ gas decomposition product test [J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(3): 33-37.
- [14] ARAKELIAN V G, KOVALENKO A J. Diagnostics for the condition of SF₆ equipment based on physico-chemical parameters [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2009, 17(2): 42-51.
- [15] TOMINAGA S, KUWAHARA H, HIROOKA K, et al. SF₆ gas analysis technique and its application for evaluation of internal conditions in SF₆ gas equipment [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, 100(9): 4196-4206.
- [16] 袁 亮. 高压电器中 SF₆ 气体分解物的检测与研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2009.
YUAN Liang. The detection of and research of the SF₆ gas decomposition products in the high voltage apparatus [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2009.
- [17] SAUERS I, ELLIS H W, CHRISTOPHOROU L G. Neutral decomposition products in spark breakdown of SF₆ [J]. IEEE Trans. on Electr. Insul., 1986(21): 111-120.
- [18] 王 宇, 李 智, 姚唯建, 等. 广东省 220 kV 及以上 GIS 中 SF₆ 分解产物分析[J]. 高电压技术, 2009, 35(4): 823-827.

- WANG Yu, LI Zhi, YAO Weijian, et al. Analysis of SF₆ byproducts of gas insulated switchgear(220 kV and above) in Guangdong Province[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(4): 823-827.
- [19] 戴武昌, 王建国, 徐天锡. 基于神经网络的蓄电池荷电状态估算[J]. 东北电力大学学报, 2016, 36(5): 1-6.
- DAI Wuchang, WANG Jianguo, XU Tianxi. Estimation of battery state of charge based on neural network[J]. Journal of Northeast Dianli University, 2016, 36(5): 1-6.
- [20] 蔡 萱, 余建飞, 肖雅. SF₆ 气体分解产物检测在电气设备故障诊断中的应用[J]. 湖北电力, 2013, 37(1): 36-38.
- CAI Xuan, YU Jianfei, XIAO Ya. Application of decomposition products detection of SF₆ in fault diagnosis of electrical equipment[J]. Hubei Electric Power, 2013, 37(1): 36-38.
- [21] BELAR B I, PRADAYROL A C, CASANOVAS J, et al. Influence of discharge production conditions, as pressure, current intensity and voltage type, oil SF₆ dissociation under point-plane corona discharges[J]. Journal of Applied Physics, 1995, 77(4): 1398-1406.
- [22] 王晶晶. 六氟化硫气体分解产物分析对气体绝缘开关设备(GIS)潜伏性故障判断的应用[J]. 山东电力高等专科学校学报, 2015, 13(4): 13-17.
- WANG Jingjing. Analysis of SF₆ byproducts of gas insulated switchgear on judgment of latent fault of the electric equipment[J]. Journal of Shandong Electric Power College, 2015, 13(4): 13-17.
- [23] 王先培, 肖 伟, 胡明宇, 等. 基于 SF₆ 分解产物融合判断的 GIS 绝缘劣化趋势划分[J]. 高电压技术, 2016, 42(6): 1834-1840.
- WANG Xianpei, XIAO Wei, HU Mingyu, et al. GIS insulation deterioration trend division based on SF₆ decomposition products fusion judgment[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(6): 1834-1840.
- [24] 尚海昆, 苑津莎, 王 瑜, 等. 多核多分类相关向量机在变压器局部放电模式识别中的应用 [J]. 电工技术学报, 2014, 29(11): 221-228.
- SHANG Haikun, YUAN Jinsha, WANG Yu, et al. Partial discharge pattern recognition in power transformer based on multi-class relevance vector machines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(11): 221-228.
- [25] 宋人杰, 徐 洁. 继电保护状态评价指标体系的构建及应用[J]. 东北电力大学学报, 2015, 35(6): 70-76.
- SONG Renjie, XU Jie. Establishment and application of evaluation indicator system for relay protection device[J]. Journal of Northeast Dianli University, 2015, 35(6): 70-76.
- [26] 唐 炬, 林俊亦, 卓 然, 等. 基于支持向量数据描述的局部放电类型识别[J]. 高电压技术, 2013, 39(5): 1046-1053.
- TANG Ju, LIN Junyi, ZHUO Ran, et al. Partial discharge type recognition based on support vector data description [J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(5): 1046-1053.
- [27] 徐凌雁. 基于粗糙集的 BP 神经网络空气品质预测模型 [J]. 东北电力大学学报, 2015, 33(5): 81-87.
- XU Lingyan. Research of air quality prediction model based on rough set-BP neural network[J]. Journal of Northeast Dianli University, 2015, 33(5): 81-87.
- [28] BELARBI A, PRADAYROL A C, CASANOVAS J, et al. Influence of discharge production conditions, as pressure, current intensity and voltage type, oil SF₆ dissociation under point-plane corona discharges[J]. Journal of Applied Physics, 1995, 77(4): 1398-1406.
- [29] SUEHIRO J, ZHOU G B, HARA M. Detection of partial discharge in SF₆ gas using a carbon nanotube based gas sensor[J]. Sensors and Actuators, 2005, 105(2): 164-169.
- [30] 全国化学标准化技术委员会. GB/T 12022—2006 工业六氟化硫[S]. 北京: 中国国家标准化管理委员会, 2006.
- Chemical of Standardization Administration of China. GB/T 12022—2006 Sulphur hexafluoride for industrial use[S]. Beijing: Standardization Administration of the People's Republic of China, 2006.
- 宋人杰(1963—), 女, 硕士, 教授, 研究方向为计算机在电力系统中的应用。
- 赵 萌(1993—), 女, 硕士研究生, 研究方向为高压开关设备绝缘性能及故障诊断(通信作者)。