DOI：10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.161101

空气间隙的储能特征与放电电压预测

邱志斌[1,2] 阮江军[1] 唐烈峥[1] 徐闻婕[1] 黄从鹏[1]

（1. 武汉大学电气工程学院 武汉 430072 2. 武汉大学动力与机械学院 武汉 430072）

摘要 通过数学计算而非试验研究获取空气间隙的放电电压是高电压工程领域长期以来希望达到的目标。为此，基于绝缘击穿缘于储能越限的物理思想，提出了一种空气间隙放电电压预测的新思路：将复杂的空气放电过程研究前移至间隙结构储能状态及其影响因素研究，从电场分布、冲击电压波形两个方面定义了表征空气间隙储能状态的特征集，采用支持向量机（SVM）建立了空气间隙的放电电压预测模型。利用该模型，成功实现了不同间隙长度的棒-板、棒-棒长空气间隙在不同波前时间的正、负极性操作冲击电压作用下的 50%放电电压预测，4 组测试样本预测结果的平均绝对百分比误差分别为 3.6%、3.25%、3.5%和 3.8%。该方法有助于推进电气外绝缘的数字化设计，可为构建“计算高电压工程”学科体系提供参考。

关键词：空气间隙 放电电压预测 储能特征 电场分布 冲击电压波形 支持向量机

中图分类号：TM85

Energy Storage Features and Discharge Voltage Prediction of Air Gaps

Qiu Zhibin[1,2] *Ruan Jiangjun*[1] *Tang Liezheng*[1] *Xu Wenjie*[1] *Huang Congpeng*[1]

(1. School of Electrical Engineering Wuhan University Wuhan 430072 China
2. School of Power and Mechanical Engineering Wuhan University Wuhan 430072 China)

Abstract It has been a long sought goal for the field of high voltage engineering to obtain the discharge voltage of air gaps by mathematical calculations instead of experiments. Therefore, a new idea for the discharge voltage prediction of air gaps was proposed in this paper, which is based on the physical thought that the insulation breakdown is due to the out-of-limit of the stored energy. The complicated air discharge process study was moved forward to the study of the energy storage status of the gap structure and its influence factors. The feature set used to characterize the energy storage status of air gap was defined from two aspects, including the electric field distribution and the impulse voltage waveform. The air gap discharge voltage prediction model was established by support vector machine (SVM). By the proposed model, the 50% discharge voltage prediction of rod-plane and rod-rod long air gaps with different gap lengths was successfully achieved, under positive and negative switching impulse voltage with different wavefronts. The mean absolute percentage errors of the predicted results of 4 test sample sets are respectively 3.6%, 3.25%, 3.5% and 3.8%. This method contributes to promoting the digital design of external insulation, and provide reference for establishing the discipline system of computational high voltage engineering.

Keywords: Air gap, discharge voltage prediction, energy storage features, electric field distribution, impulse voltage waveform, support vector machine (SVM)

中国博士后科学基金资助项目（2016M602354）。

收稿日期 2016-07-13 改稿日期 2016-08-29

0 引言

空气间隙是高压交、直流输电线路及变电站、换流站的主要外绝缘形式，合理选择空气间隙的结构和长度，兼顾电网运行的安全性与工程建设的经济性，是高压输变电工程外绝缘设计的重点关注问题。目前，输变电工程空气间隙绝缘结构的设计及绝缘距离的选择主要依赖于放电特性试验[1,2]，受到经验性的制约，难以适应现代装备智能制造[3]的潮流。通过数学计算获取空气间隙的放电电压并用于外绝缘的精细化设计，是高电压与绝缘技术领域长期以来所追求的目标。

近年来，部分学者提出了“计算高电压工程”的概念[4]，其目的在于推动高电压技术从传统的试验学科向仿真计算学科转型。绝缘介质的放电特性是高电压技术的研究基础，其放电电压是高压电气设备绝缘设计的重要依据。笔者认为，绝缘介质的放电电压预测是“计算高电压工程”学科体系的重要组成部分。空气介质的放电特性最为人们所熟悉，但其放电机理至今尚未完全被揭示。

目前，以 Townsend 理论、流注理论和先导理论为代表的气体放电经典理论已被广泛接受。在过去数十年里，国内外学者基于对空气间隙放电物理过程的认识，提出了许多形式的放电物理模型[5-8]。近年来，在特高压输电技术快速发展的驱动下，国内相关高校及科研院所对长空气间隙放电特性及放电机理开展了深入研究，取得了重要进展，已初步建立了标准操作冲击和雷电冲击作用下的空气放电物理模型[9-13]。然而，由于空气放电存在快速性、随机性的特点，放电发展过程的分散性较大，放电物理参数的可控可测性较差，建立科学的仿真模型并用于放电预测，仍需要进行长期的研究[14,15]。因此，探索空气放电理论研究的新途径，建立有效的空气间隙放电电压预测模型，对于指导输变电工程外绝缘设计、降低试验成本具有重要意义。

从微观角度来讲，空气放电起始于自由电子在电场作用下的加速运动及其与气体分子的碰撞电离[5]，其放电过程是一个涉及电子、离子、原子、分子、光子等多种粒子的复杂运动体系。从宏观角度来讲，空气放电是储存在间隙中的电场能量释放过程，其放电过程可认为是储存在电场中的电容能量向热能的转换，同时伴随着放电通道从绝缘状态向导电等离子体的转变[16]。引起空气放电的电离现象可认为是电场和气体的相互作用，若要对空气间隙的放电机制进行完整而准确的描述，则需考虑放电发展过程中任何可能引起电场分布和气体状态变化的因素，这显然是十分困难的。然而，空气放电必然是由放电起始之前的宏观因素所引起的，这些宏观影响因素可以归纳为电场分布、加载电压和空气介质属性 3 大类。其中，电场分布可通过仿真计算得到，加载电压波形可以通过测量或计算机模拟得到，而空气介质属性可以通过气压、温度、湿度等参数进行表征。因此，上述 3 类因素均为可以定量化的物理量。从上述影响因素中提取科学的特征集，采用合适的数学方法建立特征集与放电电压的关联性，成为实现空气间隙放电电压预测的关键。

本文基于绝缘击穿缘于储能越限的物理思想，从电场分布、冲击电压波形两个方面定义了表征空气间隙储能状态的特征集，将复杂的空气放电过程研究前移至间隙结构储能状态研究，采用支持向量机（Support Vector Machine，SVM）预测模型直接建立储能特征集与放电电压之间的多维非线性关系，结合少量的试验数据对模型进行训练，实现了空气间隙的放电电压预测。

1 空气间隙的储能特征集

1.1 电场分布特征

空气间隙的电场分布可以通过两方面的参数进行表征[5]：①静电场，取决于电极的几何形状、间隙距离、对地高度、与周围物体之间的距离等；②电场的暂态变化，取决于施加在间隙两端的电压波形。就物理机制而言，外施电压在电极之间产生的电场会对各个放电阶段产生影响，而放电发展过程中产生的空间电荷又会对间隙之间的电场产生畸变作用。可见，电场与放电过程之间是一种复杂的相互作用机制，这种机制难以进行定量化的准确描述。在特定的电压波形下，空气间隙在电晕起始之前的静电场分布特征不会改变，但其放电过程却可能截然不同[17]。因此，可考虑直接建立静电场分布与放电电压之间的灰关联性，避免物理机制复杂、分散性大的放电过程研究。由于电场是无穷维分布，所以需要从中提取出与放电电压存在强关联性的特征集，才能用于放电电压预测模型。

以棒-板间隙为例，说明电场分布特征量的定义。如图 1 所示，半球头棒电极的半径为 R，间隙距离为 d。若在棒电极施加高压将板电极接地，则在棒电极表面附近的区域会产生集中电场，电场强度最大值应出现在棒电极端部，且沿着最短间距 d 所在的路径逐渐降低。理想情况下，棒-板空气间隙的放

电过程是沿着轴线从棒电极向板电极发展的[18]。定义棒、板电极之间以 R 为半径的圆筒状区域为放电通道，间距 d 所在的路径为最短放电路径。如图 1 所示，易知放电起始及发展主要取决于放电通道内和放电路径上的电场分布情况，可认为这一区域的电场分布与放电电压存在强关联性。

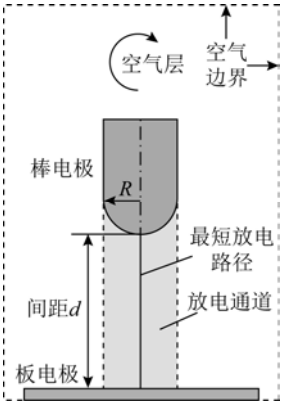


图 1　棒-板空气间隙放电通道与放电路径示意图

Fig.1　Schematic diagram of the discharge channel and discharge path of rod-plane air gap

空气间隙的电场分布可以通过有限元法计算得到，对电场计算结果进行后处理，便可以提取出表征电场分布情况的特征集。根据图 1 所示的放电通道与放电路径示意图，本文共定义了 20 个电场特征量，可分为 4 大类，其具体定义如下。

1）电场强度，包括放电通道内的电场强度最大值 E_{m} 和平均值 E_{a}。

$$E_{\mathrm{m}} = \max E_i \tag{1}$$

$$E_{\mathrm{a}} = \sum_{i=1}^{n} E_i / n \tag{2}$$

式中，E_i 为有限元计算结果中第 i 个体单元的电场强度，$i = 1, 2, \cdots, n$；n 为体单元总数。

2）电场能量，包括放电通道内的电场能量 W 和能量密度 W_{d}。

$$W = \sum_{i=1}^{n} W_i = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{1}{2} \varepsilon_0 E_i^2 V \right) \tag{3}$$

$$W_{\mathrm{d}} = W \Big/ \sum_{i=1}^{n} V_i \tag{4}$$

式中，ε_0 为真空介电常数；W_i、V_i 分别为第 i 个体单元的电场能量和体积。

3）电场梯度，包括最短放电路径上的电场梯度最大值 $E'_{\max}$、最小值 $E'_{\min}$ 和平均值 E'_{ave}。

$$E'_{\max} = \max\left(\left| -\mathrm{grad} E_i \right| \right) \tag{5}$$

$$E'_{\min} = \min\left(\left| -\mathrm{grad} E_i \right| \right) \tag{6}$$

$$E'_{\mathrm{ave}} = \sum_{i=1}^{n} \left(\left| -\mathrm{grad} E_i \right| \right) / n \tag{7}$$

4）电场不均匀程度。采用放电通道和最短放电路径上与电场强度、电场能量、电场梯度相关的比例系数表征电场的不均匀程度，包括场强畸变率 E_{d}，放电通道内超过 $x\%E_{\mathrm{m}}$ 区域所占体积和能量的比例 V_{rx}、W_{rx}，最短放电路径上超过 $x\%E'_{\max}$ 的路径长度所占间隙长度的比例 E'_{rx}。

$$E_{\mathrm{d}} = (E_{\mathrm{m}} - E_{\mathrm{a}}) / E_{\mathrm{a}} \tag{8}$$

$$V_{\mathrm{rx}} = \sum_{xi=1}^{xn} V_{xi} / \sum_{i=1}^{n} V_i \tag{9}$$

$$W_{\mathrm{rx}} = \sum_{xi=1}^{xn} W_{xi} / W \tag{10}$$

$$E'_{rx} = L_x / L \tag{11}$$

式中，V_{xi} 为放电通道内第 i 个超过 $x\%E_{\mathrm{m}}$ 体单元的体积；xn 为放电通道内超过 $x\%E_{\mathrm{m}}$ 的体单元总数；W_{xi} 为放电通道内第 i 个超过 $x\%E_{\mathrm{m}}$ 体单元的能量；L_x 为最短放电路径上超过 $x\%\,E'_{\max}$ 的路径长度；L 为最短放电路径的总长度，即间隙距离。本文中，$x\%$ 取 90%、75%、50%和 25%。

上述特征量从场强、能量、梯度、不均匀度（畸变率）等多个方面对电场分布情况进行了比较全面的描述，基本可以反映空气间隙的空间结构。

1.2　电压波形特征

除静电场分布外，加载电压波形也会显著影响空气间隙的放电电压。这里所指的加载电压主要是冲击电压，因为直流和工频交流等稳态电压的作用时间远大于间隙击穿所需的时间，可忽略其对放电特性的影响。根据冲击电压波形的特点及其对空气间隙击穿的影响，本文以冲击电压全波为对象，采用如下基本特征量对电压波形进行表征。

1）幅值特征，即冲击电压峰值 $U_{\max}$，是电压波形在所有时刻下的最大值，表征了能量施加的上限。

$$U_{\max} = \max(u(t)) \tag{12}$$

式中，$u(t)$为电压。

2）时间特征，包括波前时间 T_{f} 和半峰值时间 T_2，它们分别描述了冲击电压波形的上升时间和持续时间。对于操作冲击电压，T_{f} 为电压波形实际原点到 $U_{\max}$ 时刻的时间间隔，T_2 为原点和电压第一次衰减到半峰值时刻的时间间隔。

3）陡度特征，指电压波形的平均上升率 $\mathrm{d}u/\mathrm{d}t$，

其定义为 30%和 90%冲击电压峰值之间拟合直线的斜率，该值表征了电压上升的速率。由于电压上升阶段电压值与时间近似呈线性关系，因此，近似采用式（13）计算电压上升率 du/dt。

$$\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t}=\frac{U_{\max}}{T_{\mathrm{f}}} \tag{13}$$

4）波形积分特征，指电压积分 S，它表征了能量施加过程对间隙击穿的累积作用。电压积分 S 指电压波形曲线与时间轴所围成的曲面面积，即

$$S=\int_0^{+\infty}u(t)\mathrm{d}t \tag{14}$$

上述基本特征量对冲击电压波形的整体特性进行了描述。此外，有文献研究表明，空气间隙的冲击放电特性几乎仅决定于电压波形中高于电压峰值 $U_{\max}$ 某一比例的区域。文献[19]通过试验研究表明，对于操作冲击电压波形，在电压上升阶段的 85%$U_{\max}$ 以上的区域是影响间隙击穿最重要的部分，而 85%$U_{\max}$ 以下的波前形状对 U_{50} 和标准差都没有明显影响。据此提出了 85%波前斜率以及 85%波前时间的概念，认为在波形变化较为平缓时，可用这两个参数表征电压波形。其中，85%波前斜率定义为在电压上升阶段 85%$U_{\max}$ 时刻切线的斜率，该切线与时间轴和 $U_{\max}$ 交点所确定的线段在时间轴上的投影定义为 85%波前时间。

为此，本文在冲击电压波形波前部分的 85%$U_{\max}$ 时刻定义 5 个参数，作为描述电压波形局部特性的附加特征量，其具体定义如下。

1）85%波前斜率 k_{85}。

$$k_{85}=\left.\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t}\right|_{t=t_{85}} \tag{15}$$

式中，t_{85} 为电压波形波前部分电压值上升到 85%$U_{\max}$ 的时刻。

2）超过 85%$U_{\max}$ 的时间间隔 T_{85}。

$$T_{85}=t'_{85}-t_{85} \tag{16}$$

式中，t'_{85} 为冲击电压波形的波尾部分衰减到 85%$U_{\max}$ 的时刻。

3）超过 85%$U_{\max}$ 的波前时间间隔 T_{f85}。

$$T_{\mathrm{f85}}=T_{\mathrm{f}}-t_{85} \tag{17}$$

4）超过 85%$U_{\max}$ 的波形区域电压积分 S_{85}。

$$S_{85}=\int_{t_{85}}^{t'_{85}}u(t)\mathrm{d}t \tag{18}$$

5）超过 85%$U_{\max}$ 的波前部分电压积分 S_{f85}。

$$S_{\mathrm{f85}}=\int_{t_{85}}^{T_{\mathrm{f}}}u(t)\mathrm{d}t \tag{19}$$

上述附加特征量的定义如图 2 所示，其中，k_{85} 为陡度特征，T_{85} 和 T_{f85} 为时间特征，S_{85} 和 S_{f85} 为波形积分特征。上述电压波形基本特征量和附加特征量共 10 个。

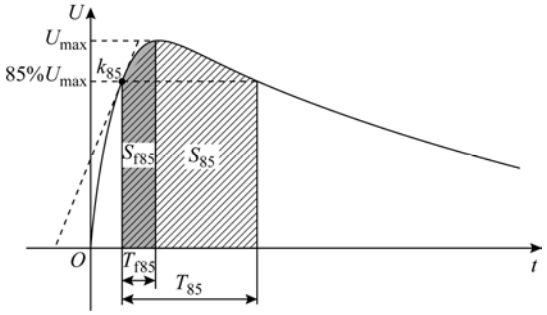


图 2 冲击电压波形附加特征量的定义

Fig.2 Definition of the additional features of impulse voltage waveform

通常采用双指数函数对冲击电压波形进行模拟，全波表达式可以写为

$$u(t)=A(\mathrm{e}^{-\alpha t}-\mathrm{e}^{-\beta t}) \tag{20}$$

式中，A 为幅值系数；α、β 分别是波尾、波前时间常数的倒数。这 3 个参数均为未知系数，需要求解得到。以操作冲击电压为例，可知其存在 3 个约束条件：①波前时间 T_{f} 对应时刻的电压为峰值电压 $U_{\max}$；②半峰值时间 T_2 对应时刻的电压为 $U_{\max}$ 的一半；③T_{f} 对应时刻的电压对时间的导数为 0。根据上述约束条件可列写如下方程组：

$$\begin{cases}u(T_{\mathrm{f}})=A\left(\mathrm{e}^{-\alpha T_{\mathrm{f}}}-\mathrm{e}^{-\beta T_{\mathrm{f}}}\right)=U_{\max}\\ u(T_2)=A\left(\mathrm{e}^{-\alpha T_2}-\mathrm{e}^{-\beta T_2}\right)=0.5U_{\max}\\ \left.\dfrac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t}\right|_{t=T_{\mathrm{f}}}=A\left(\beta\mathrm{e}^{-\beta T_{\mathrm{f}}}-\alpha\mathrm{e}^{-\alpha T_{\mathrm{f}}}\right)=0\end{cases} \tag{21}$$

在实际应用中，对冲击电压波形进行描述时，往往已知电压峰值 $U_{\max}$、波前时间 T_{f} 和半峰值时间 T_2，根据式（13）可求出电压波形上升率 du/dt。同时，根据上述已知参数，对式（21）中的非线性方程组进行求解，即可得到 A、α、β 三个参数，从而根据式（14）~式（19）求出其他电压波形特征量。

综上所述，本文定义的空气间隙储能特征集见表 1，包括电场分布和冲击电压波形两大类，共 30 个特征量。

表 1　空气间隙的储能特征集

Tab.1　Energy storage feature set of air gap

分类	特征量
电场分布	放电通道：场强最大值 E_m、平均值 E_a；电场能量 W、能量密度 W_d；场强畸变率 E_d、超过 x%最大场强区域所占体积和能量的比例 V_{rx}、W_{rx}
	放电路径：电场梯度最大值 E'_{max}、最小值 E'_{min}、平均值 E'_{ave}；超过 $x\%E'_{max}$ 的路径长度所占的比例 E'_{rx}
冲击电压波形	基本特征量：冲击电压峰值 U_{max}；波前时间 T_f、半峰值时间 T_2；电压上升率 du/dt；电压积分 S
	附加特征量：85%波前斜率 k_{85}；超过 85%U_{max} 的时间间隔 T_{85}、超过 85%U_{max} 的波前时间间隔 T_{f85}；超过 85%U_{max} 的波形区域电压积分 S_{85}、超过 85%U_{max} 的波前部分电压积分 S_{f85}

2　空气间隙的放电电压预测方法

2.1　支持向量机

本文采用 SVM 建立空气间隙的放电电压预测模型。SVM 是 V.N.Vapnik 等于 1995 年提出的一种机器学习算法，主要基于统计学习理论[20]中的 VC 维理论和结构风险最小化原则，对小样本、非线性问题具有较好的处理能力[21,22]。

SVM 是从线性可分情况下的最优分类超平面发展而来的，其实质是将最优化问题转换为一个二次规划问题。对于训练样本非线性可分的情况，需要通过核函数的引入，将原始数据通过非线性映射转换到高维线性空间，并在该特征空间中寻求最优分类超平面。核函数是 SVM 的重要组成部分，通常选用径向基（Radial Basis Function，RBF）核函数，其定义为

$$K(x_i,x_j)=\exp\left(-\gamma\left\|x_i-x_j\right\|^2\right) \qquad (22)$$

式中，γ 是一个大于 0 的参数，称为核函数参数。此外，为了允许有错分样本的存在，在最优化问题中引入松弛变量 ξ_i 和惩罚因子 C，用于控制对错分样本的惩罚程度。

惩罚因子 C 和核函数参数 γ 决定了 SVM 的分类识别性能[23]，本文基于 K 折交叉验证思想（K-Fold Cross Validation，K-CV）[24]，采用遗传算法（Genetic Algorithm，GA）对 C 和 γ 进行参数寻优。

2.2　遗传算法

遗传算法是一种基于进化论和遗传学的随机全局搜索和优化算法，其基本原理是[25]：将优化问题模拟为群体的适者生存过程，从任意一个初始种群出发，通过随机选择、交叉和变异操作，实现群体的一代代繁殖和进化，最终收敛到最适应环境的个体，从而求得问题的最优解。采用 GA 算法对 SVM 的参数组进行寻优时，其实现过程为：①在规定的搜索范围内随机产生几组 SVM 参数，对其进行二进制编码，生成初始群体；②确定适应度函数，即 K-CV 意义下 SVM 模型对训练样本集的分类准确率，计算种群中各个个体的适应度函数值，评估个体的优劣，误差越大则适应度越小；③从当前群体中选择适应度高的个体，直接遗传给下一代，使其进入下一次迭代过程；④对当前一代群体进行交叉、变异等遗传操作，产生下一代群体，重复步骤②，使初始群体确定的几组 SVM 参数不断进化，直到满足训练目标终止条件，得到最优解，通过解码输出最优参数 C 和 γ。

2.3　预测方法的实现流程

工程上通常采用升降法进行冲击放电试验获取空气间隙的 50%放电电压 U_{50}，本文借鉴升降法试验的思想，将空气间隙放电电压预测由回归问题转换为二分类问题。设某一空气间隙 Ω_1 的放电电压为 U_b，定义$[(100\%-a)U_b, U_b)$为耐受电压区间，记为−1；$[U_b, (100\%+a)U_b]$为放电电压区间，记为 1。其中，a 根据经验取值。将 SVM 模型的输出由具体的放电电压值转换为−1 和 1 两个二分类的数值。基于 SVM 的空气间隙放电电压预测模型的实现流程如下：

1）采用训练样本集对 SVM 模型进行训练。首先进行电压区间分类，设 a 取 10%，在耐受区间$[0.9U_b, U_b)$和放电区间$[U_b, 1.1U_b]$内以 $0.01U_b$ 为步长选取电压序列，则耐受区间共 10 个电压值，放电区间共 11 个电压值。采用这种方式巧妙地由 1 个训练样本数据扩展至 21 个，若训练样本集共有 m 个数据，则实际用于 SVM 模型训练的样本数为 $21\times m$。

然后，针对训练样本集中的各个空气间隙，采用有限元分析软件 ANSYS 建立其仿真模型，分别加载耐受区间和放电区间内的电压值，对其进行静电场计算，对计算结果进行后处理，得到各加载电压下的电场分布特征集。此外，根据本文定义的冲击电压波形特征量的计算公式，求解得到各个电压波形特征量。

最后，将电场分布和冲击电压波形两类特征集进行汇总和归一化处理，归一化公式为

$$x_i'=\frac{x_i-x_{i\min}}{x_{i\max}-x_{i\min}} \qquad (23)$$

式中，x'_i 为特征量 x_i 归一化后的数值；$x_{i\max}$ 和 $x_{i\min}$ 分别为该特征量的最大值和最小值。

采用式（23）可将各个特征量归一化至[0,1]区间内，从而排除数量级和量纲不同对预测结果的影响。如此，即可得到训练样本的储能特征集，将其输入至 SVM 模型，耐受区间内的 10 个电压值对应的输出均为−1，而放电区间内的 11 个电压值对应的输出均为 1。采用 GA 算法对 C 和 γ 进行寻优，得到 SVM 模型对训练样本集具有最高分类准确率的最优参数组。

2）采用经过训练和优化后的 SVM 模型对测试样本集空气间隙的放电电压进行预测。以单个测试样本的放电电压预测流程进行说明，首先加载预估的放电电压初值 $U=U_0$，采用与训练样本集相同的方式提取储能特征集，将其输入至 SVM 模型，对其放电电压进行预测。

当 SVM 模型的 21 个输出值中同时包含−1 和 1 时，输出从−1 跳变至 1 所对应的加载电压即为放电电压预测值。若在电压初值 $U=U_0$ 下，SVM 模型的 21 个输出值均为−1，则升高加载电压至 $U=U_0+\mathrm{d}U$，直至输出 1；反之，若在电压初值 $U=U_0$ 下，SVM 模型的 21 个输出值均为 1，则降低加载电压至 $U=U_0-\mathrm{d}U$，直至输出−1。该方法与冲击耐压试验采用的升降法具有相似的原理，$\mathrm{d}U$ 可根据经验和精度要求进行设置。因此，当 SVM 预测模型输出−1 到 1 的变化时，输出为 1 的电压区间下限对应的加载电压即为放电电压预测值。

为了评估 SVM 模型的预测效果，本文采用方均根误差 e_{MSE}、平均绝对百分比误差 e_{MAPE}、方均百分比误差 e_{MSPE} 三种常用的误差指标对预测结果进行误差分析，其计算公式可参见文献[22]。

3 长空气间隙操作冲击放电电压预测

3.1 训练样本与测试样本

文献[26]开展了棒-板、棒-棒长空气间隙的正负极性操作冲击放电试验，本文引用其试验数据作为样本集，验证所提出预测方法的有效性。试验采用的棒电极为方形棒，长 10 m，截面边长为 12.5 mm；板电极为边长 13 m 的正方形薄板。试验电压波形为(80~550)/(1 800~2 200)μs。每个间距至少进行 50 次试验以获取 U_{50}，试验数据均校正至 101.3 kPa、20℃的大气条件，但没有进行湿度校正。试验结果见表 2，其中，d 为间距，T_{f} 为冲击电压波形的波前时间，σ 为试验数据的标准偏差。分别选取 2 个数据作为训练样本，将其他数据作为测试样本，见表 2，对棒-板和棒-棒间隙在正、负极性操作冲击电压作用下的 50%放电电压分别进行预测。

表 2 棒-板、棒-棒长空气间隙操作冲击 50%放电电压样本数据

Tab.2 Sample data of the 50% discharge voltage of rod-plane and rod-rod gap under switching impulse

样本分类	棒-板间隙								棒-棒间隙							
	正极性				负极性				正极性				负极性			
	d/m	T_{f}/μs	U_{50}/kV	σ(%)	d/m	T_{f}/μs	U_{50}/kV	σ(%)	d/m	T_{f}/μs	U_{50}/kV	σ(%)	d/m	T_{f}/μs	U_{50}/kV	σ(%)
训练样本	9.0	80	2 200	3.6	3.0	80	2 040	6.3	5.5	80	2 150	5.6	3.0	80	1 940	5.2
	9.0	110	2 070	4.0	3.0	180	2 300	6.3	5.5	110	2 100	4.8	3.0	110	1 960	5.3
测试样本	5.0	180	1 340	6.7	1.5	180	1 500	4.0	4.0	180	1 690	5.3	1.5	180	1 110	5.5
	7.0	180	1 650	6.7	2.0	180	1 800	5.5	5.0	180	1 940	3.6	2.0	180	1 450	5.4
	8.0	180	1 790	6.1	2.5	180	2 080	3.4	5.5	180	2 080	6.7	2.5	180	1 790	4.5
	9.0	180	1 950	4.9	3.0	110	2 060	3.4	5.5	250	2 050	5.5	3.0	180	2 020	4.5
	9.0	250	1 930	4.9	3.0	250	2 340	6.0	5.5	550	2 050	5.5	3.0	250	2 030	4.5
	9.0	550	1 900	4.8	3.0	550	2 340	5.9	6.0	180	2 180	6.8	3.0	550	2 040	5.3
	10.0	180	2 050	4.9	3.5	180	2 480	6.2	7.0	180	2 490	4.9	3.5	180	2 330	3.2
	11.0	180	2 100	4.8	4.0	180	2 620	5.6	7.5	180	2 490	4.0	4.0	180	2 620	4.0
	12.0	180	2 180	6.6	—	—	—	—	—	—	—	—	4.5	180	2 780	3.8
	13.0	180	2 300	6.8	—	—	—	—	—	—	—	—	5.0	180	2 970	3.6

3.2　预测结果及分析

将 20 维电场分布特征量和 10 维冲击电压波形特征量共同作为 SVM 模型的输入参量。在 3 折交叉验证（3-CV）意义下，采用 GA 算法进行参数寻优，设置种群数量为 20，最大进化代数为 200，交叉概率为 0.9，惩罚因子 C 和核函数参数 γ 的取值范围分别为[10,500]和[0.005,0.25]。SVM 预测模型的最优参数和预测结果的误差指标见表 3。可见，4 组测试样本预测结果的平均绝对百分比误差 e_{MAPE} 分别为 3.6%、3.25%、3.5%和 3.8%。

表 3　预测模型的最优参数和误差指标

Tab.3　Optimal parameters and error indexes of the prediction model

预测	棒-板间隙		棒-棒间隙	
结果	正极性	负极性	正极性	负极性
C	13.429 4	16.895 9	332.320 0	23.672 6
γ	0.091 5	0.096 5	0.213 0	0.147 9
e_{MSE}	24.405 2	26.871 5	35.884 7	30.137 7
e_{MAPE}	0.036 0	0.032 5	0.035 0	0.038 0
e_{MSPE}	0.014 9	0.013 1	0.015 8	0.015 1

将棒-板和棒-棒间隙在正、负极性操作冲击下的 U_{50} 预测值与试验值进行对比，如图 3~图 6 所示，为方便对比，这里将训练样本的预测结果也绘于图中。可见，预测值和试验值整体上吻合良好，绝大多数样本的预测值均在试验值的标准偏差范围内，说明 SVM 模型具有较高的预测精度。

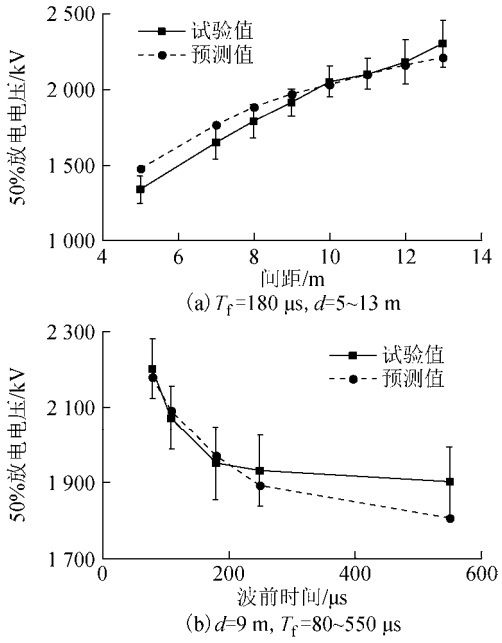


图 3　棒-板间隙正极性操作冲击 U_{50} 预测结果

Fig.3　Predicted results of the positive switching impulse U_{50} of rod-plane gaps

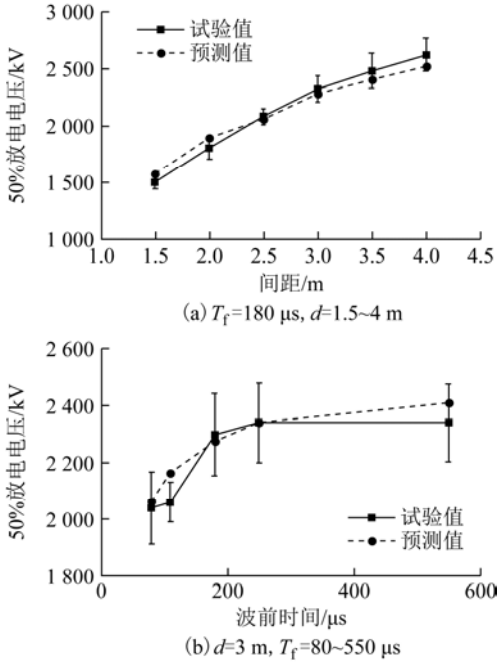


图 4　棒-板间隙负极性操作冲击 U_{50} 预测结果

Fig.4　Predicted results of the negative switching impulse U_{50} of rod-plane gaps

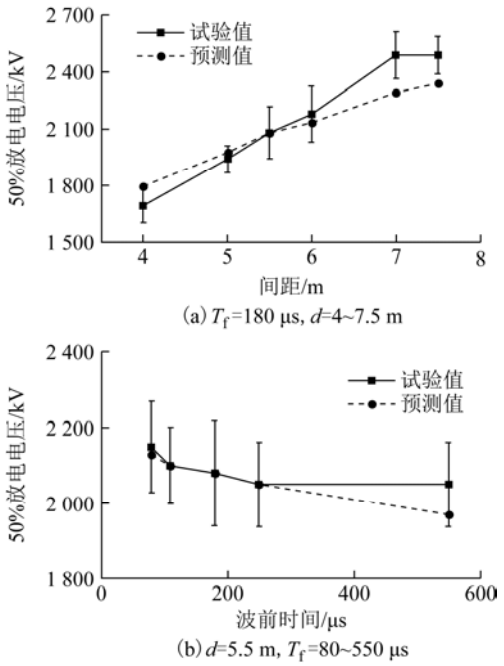


图 5　棒-棒间隙正极性操作冲击 U_{50} 预测结果

Fig.5　Predicted results of the positive switching impulse U_{50} of rod-rod gaps

此外，从图 4b 可以看出，棒-板间隙在波前时间为 250 μs 和 550 μs 的负极性操作冲击电压下，其 U_{50} 试验值相等。从图 5 中也可以看出，当 T_f=180 μs，d=7 m 和 d=7.5 m 时的 U_{50} 试验值相等；d=5.5 m 时，T_f=250 μs 和 T_f=550 μs 时的 U_{50} 试验值也相等，这

可能是由于文献[26]中的试验数据未进行湿度校正，而上述样本对应的 SVM 模型预测值则呈现出了明显差异，这说明预测值相比于试验值来说与实际情况更加相符。

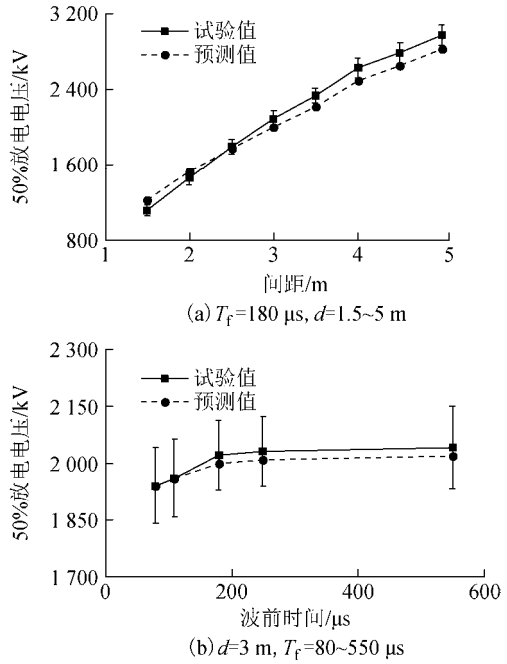


图 6 棒-棒间隙负极性操作冲击 U_{50} 预测结果

Fig.6 Predicted results of the negative switching impulse U_{50} of rod-rod gaps

4 结论

本文从影响空气间隙放电电压的电场分布、冲击电压波形两个方面定义了表征空气间隙储能状态的特征集；采用 SVM 构建放电电压预测模型，将储能特征集作为输入参量，对加载电压区间进行二分类，采用表征耐受和放电两种情况的二分类值−1 和 1 作为 SVM 模型的输出参量；通过遗传算法对 SVM 模型进行参数寻优，可以实现空气间隙在不同间隙距离、不同电压波形下的放电电压预测。

采用所提出的 SVM 模型对不同间隙距离的棒-板、棒-棒长空气间隙在不同波前时间下的操作冲击电压作用下的 50%放电电压进行了预测，预测结果与试验值整体上基本吻合，4 组测试样本的平均绝对百分比误差分别为 3.6%、3.25%、3.5%和 3.8%，验证了方法的有效性。该方法为获取空气间隙的放电电压提供了新思路，有助于减少外绝缘设计所依赖的试验量，可为构建“计算高电压工程”学科体系提供参考。

参考文献

[1] 霍锋，万启发，谷定燮，等. 1 000 kV 与 500 kV 交流线路同塔架设相间放电特性及绝缘配合[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(34): 142-150.
Huo Feng, Wan Qifa, Gu Dingxie, et al. Flashover characteristics and insulation coordination of phase- to-phase air-gaps for AC transmission line with 1 000 kV double-circuit and 500 kV double-circuit on the same tower[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(34): 142-150.

[2] 丁玉剑，廖蔚明，宿志一，等. ±800 kV 同塔双回直流线路杆塔空气间隙的放电特性影响因素研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(18): 2983-2989.
Ding Yujian, Liao Weiming, Su Zhiyi, et al. Research on the influence factors of discharge characteristics of air gaps for ±800 kV double line transmission towers [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(18): 2983-2989.

[3] 周济. 智能制造——“中国制造 2025”的主攻方向[J]. 中国机械工程, 2015, 26(17): 2273-2284.
Zhou Ji. Intelligent manufacturing—main direction of “made in China 2025” [J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(17): 2273-2284.

[4] 李庆民，黄旭炜，刘涛，等. 分子模拟技术在高电压绝缘领域的应用进展[J]. 电工技术学报，2016, 31(12): 1-13.
Li Qingmin, Huang Xuwei, Liu Tao, et al. Application progresses of molecular simulation methodology in the area of high voltage insulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(12): 1-13.

[5] CIGRE Working Group 33.07. Guidelines for the evaluation of the dielectric strength of external insulation[R]. CIGRE Technical Brochures 72, 1992.

[6] Goelian N, Lalande P, Bondiou-Clergerie A, et al. A simplified model for the simulation of positive-spark development in long air gaps[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1997, 30(17): 2441-2452.

[7] Fofana I, Béroual A. A model for long air gap discharge using an equivalent electrical network[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1996, 3(2): 273-282.

[8] Becerra M, Cooray V. A self-consistent upward leader propagation model[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2006, 39(16): 3708-3715.

[9] 耿屹楠，庄池杰，曾嵘，等. 正极性雷电冲击电压下流注起始特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2012,

32(19): 148-153.
Geng Yinan, Zhuang Chijie, Zeng Rong, et al. Streamer inception characteristics under positive lightning impulse voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(19): 148-153.

[10] 谢耀恒, 贺恒鑫, 陈维江, 等. 操作冲击下正极性长间隙放电物理仿真模型[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31): 177-184.
Xie Yaoheng, He Hengxin, Chen Weijiang, et al. A physical model to simulate long air gap discharge at positive switching impulse voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 177-184.

[11] 谷山强, 谢施君, 向念文, 等. 长间隙正极性放电流注-先导发展 3 维物理仿真研究[J]. 高电压技术, 2014, 40(9): 2903-2910.
Gu Shanqiang, Xie Shijun, Xiang Nianwen, et al. Research on simulation of three-dimensional streamer-leader propagation for positive long gap discharge[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(9): 2903-2910.

[12] 陈维江, 贺恒鑫, 何俊佳, 等. 输电线路雷电先导发展三维仿真模型[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(36): 6601-6612.
Chen Weijiang, He Hengxin, He Junjia, et al. On the 3-dimentional leader progression model for the lightning shielding failure performance estimation of overhead transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(36): 6601-6612.

[13] 师伟, 李庆民. 基于先导放电理论的雷击上行先导起始研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(15): 2470-2477.
Shi Wei, Li Qingmin. Research on the lightning upward leader inception based on leader discharge theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(15): 2470-2477.

[14] 陈维江, 曾嵘, 贺恒鑫. 长空气间隙放电研究进展[J]. 高电压技术, 2013, 39(6): 1281-1295.
Chen Weijiang, Zeng Rong, He Hengxin. Research progress of long air gap discharges[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(6): 1281-1295.

[15] 曾嵘, 庄池杰, 余占清, 等. 长空气间隙放电研究的挑战与进展[J]. 高电压技术, 2014, 40(10): 2945-2955.
Zeng Rong, Zhuang Chijie, Yu Zhanqing, et al. Challenges and achievement in long air gap discharge research[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(10): 2945-2955.

[16] Boggs S A, Uchii T, Nishiwaki S. Analytical approach of SF_6 breakdown under transient conditions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(3): 751-757.

[17] 舒胜文, 阮江军, 黄道春, 等. 基于电场特征量和 SVM 的空气间隙击穿电压预测[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(3): 742-750.
Shu Shengwen, Ruan Jiangjun, Huang Daochun, et al. Prediction for breakdown voltage of air gap based on electric field features and SVM[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(3): 742-750.

[18] 廖瑞金, 伍飞飞, 刘康淋, 等. 棒-板电极直流负电晕放电脉冲过程中的电子特性研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(10): 319-329.
Liao Ruijin, Wu Feifei, Liu Kanglin, et al. Simulation of characteristics of electrons during a pulse cycle in bar-plate DC negative corona discharge[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(10): 319-329.

[19] Menemenlis C, Isaksson K. The front shape of switching impulses and its effect on breakdown parameters[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1974, 93(5): 1380-1389.

[20] Vapnik V N. The nature of statistical learning theory [M]. New York: Springer-Verlag, 1995.

[21] Qiu Z B, Ruan J J, Huang D C, et al. Hybrid prediction of the power frequency breakdown voltage of short air gaps based on orthogonal design and support vector machine[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(2): 795-805.

[22] 邱志斌, 阮江军, 黄道春, 等. 直流导线和阀厅金具的电晕起始电压预测[J]. 电工技术学报, 2016, 31(12): 80-89.
Qiu Zhibin, Ruan Jiangjun, Huang Daochun, et al. Prediction on corona onset voltage of DC conductors and valve hall fittings[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(12): 80-89.

[23] 邱志斌, 阮江军, 黄道春, 等. 基于支持向量机的棒-板空气间隙击穿电压预测方法及其应用[J]. 电工技术学报, 2017, 32(19): 220-228.
Qiu Zhibin, Ruan Jiangjun, Huang Daochun, et al. Breakdown voltage prediction method of rod-plane air gaps based on support vector machine and its

applications[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(19): 220-228.

[24] 薛浩然, 张珂珩, 李斌, 等. 基于布谷鸟算法和支持向量机的变压器故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 8-13.
Xue Haoran, Zhang Keheng, Li Bin, et al. Fault diagnosis of transformer based on the cuckoo search and support vector machine[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 8-13.

[25] 杨淑莹. 模式识别与智能计算——Matlab 技术实现[M]. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2011.

[26] Watanabe Y. Switching surge flashover characteristics of extremely long air gaps[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1967, 86(8): 933-936.

作者简介

邱志斌 男，1991 年生，博士，助理研究员，研究方向为输变电设备外绝缘、空气绝缘预测。

E-mail：whuerliumin@whu.edu.cn（通信作者）

阮江军 男，1968 年生，教授，博士生导师，研究方向为高电压与绝缘技术、电工装备多物理场仿真及状态评估。

E-mail：ruan308@126.com

（编辑 赫蕾）