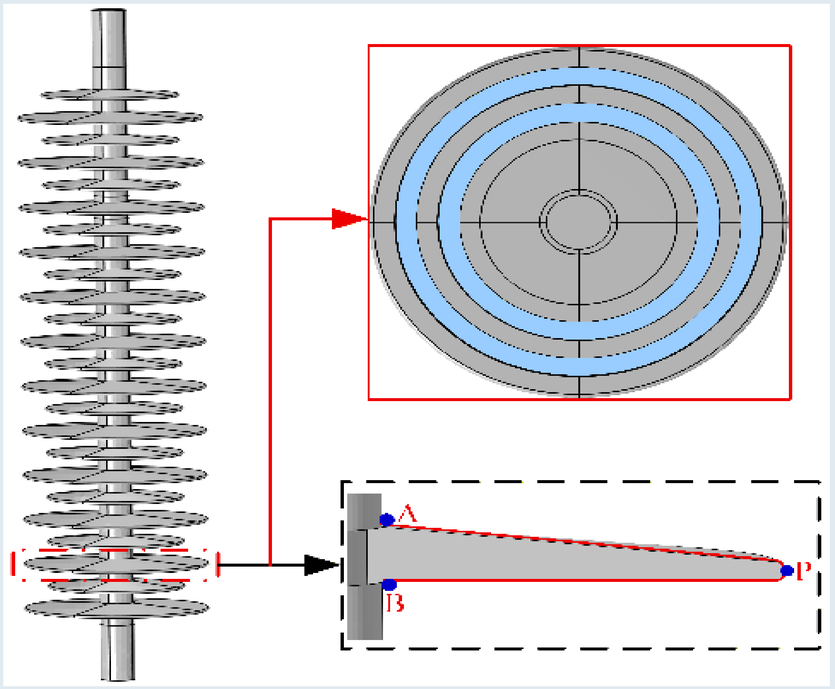
绝缘体下表面亲水-疏水梯度排列结构在流状放电路径调控与气隙闪络抑制中的应用



绝缘子闪络是高压外绝缘设计中的关键问题。气隙闪络发生于相邻绝缘子边缘间最短气隙处，它直接缩短了有效爬电距离。因此，实现爬电距离的全路径利用，并避免气隙闪络引发的短路效应，已成为优化外绝缘设计的核心挑战。

杨怡轩[1]，李鑫豪[1]，李一昉[1]

1.山西大学，太原，山西，中国

摘要

绝缘子伞裙间气隙闪络会直接桥接气隙、短路有效爬电距离，严重威胁外绝缘可靠性。本研究提出在绝缘子下表面交替构筑亲水-疏水环，使潮湿环境下凝露仅在亲水环上成膜，引导放电沿表面发展并耗散能量。首先建立了计及水膜生长的气隙与表面闪络竞争判别模型，得到流注路径转变的临界条件；随后利用COMSOL Multiphysics建立110 kV复合绝缘子串电热耦合电流场仿真模型，在高压端伞裙下表面布置亲水环组，计及污层电导率与亲水-疏水界面电荷注入，参数化仿真了亲水环数目、电导率及与伞沿距离对电场分布和体积损耗密度的影响，并在伞沿设置鸟粪复现气隙闪络场景；最后以高速摄影与泄漏电流监测实验验证。仿真结果表明：伞沿存在鸟粪时，局部电场峰值由1.07×10⁶ V/m 降至5.17×10⁵ V/m，降低57.1%；亲水-疏水边界切向电场畸变约为法向分量的2.5倍，将更多电荷压入亲水环内消耗。实验表明：亲水环引导局部放电转为表面闪络，泄漏电流显著减小。结论：下表面亲水-疏水梯度布置通过界面电场畸变实现电荷引导与能量耗散，可有效降低气隙闪络概率，为高压外绝缘可靠性提升提供实用的表面工程策略。

方法

我们构建了一个计算模型，用于计算在潮湿环境下，绝缘板表面形成水膜时，电荷积聚位置处的漏电流与电场强度。若无亲水环结构，鸟粪边缘处的峰值局部电场强度可达1.07×10⁶ V/m，满足局部放电起始条件；而引入亲水环结构后，峰值局部电场强度降至5.17×10⁵ V/m，电场强度衰减率达57.1%。

表面电导率的完整时域表达式：

$$\gamma_s(t) = \sigma_v \delta_{eq}\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_a}}\right)$$

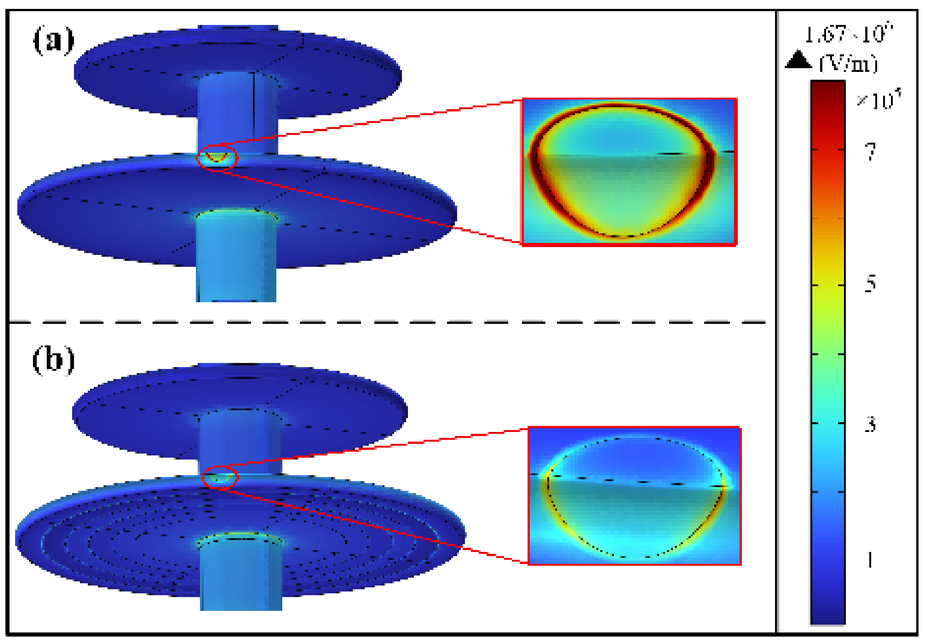


图1 不同疏水-亲水构型下绝缘体的电场分布

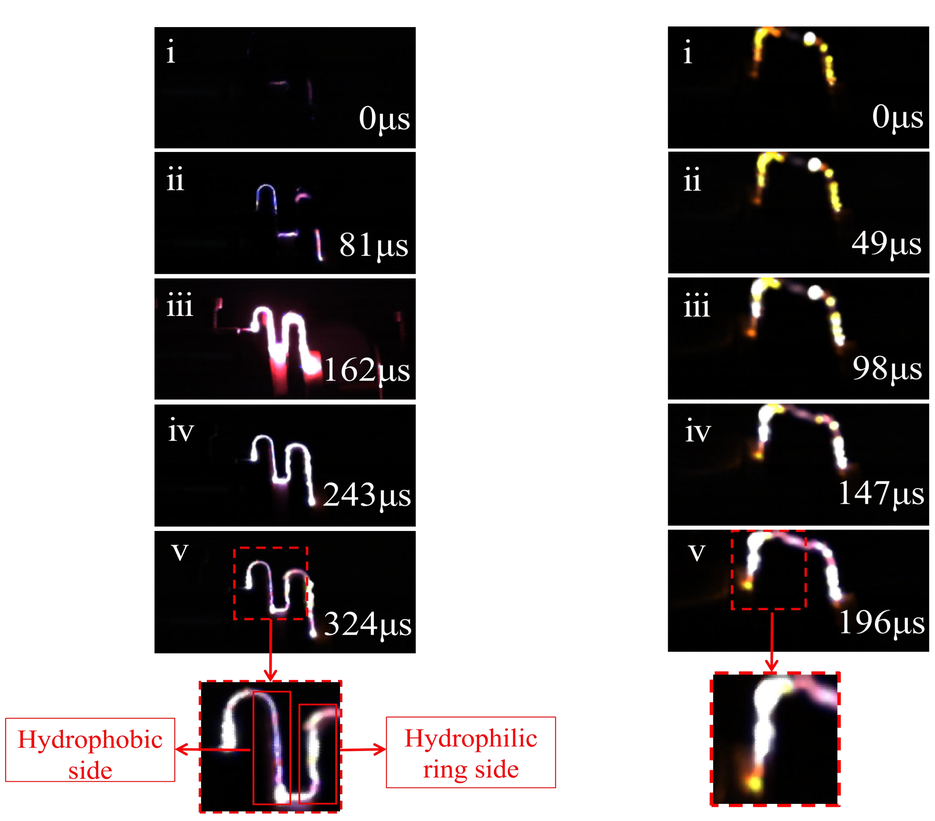


图2 模拟悬浮条件下放电路径的比较

结果

COMSOL 电流场仿真结果表明：当绝缘子边缘存在鸟粪等高导电性污秽时，亲水-疏水排列可使局部电场畸变降低；随着湿度增加导致亲水表面电导率升高，亲水-疏水边缘处的切向电场畸变约为法向电场的2.5倍；增强的切向电场促使更多电荷向亲水环内聚集并被消耗，从而进一步削弱局部电场畸变程度，进而增加沿表面发生闪络的可能性。此外，在相同亲水环宽条件下，将导电性更高的环数较少地布置在放电边缘附近，更有利于表面电流的形成，从而降低放电间隙间放电的概率。