

# 高速气流条件下污秽颗粒在复合绝缘子表面的沉积判据

律方成<sup>1</sup> 刘宏宇<sup>1</sup> 汪佛池<sup>1,2</sup> 杨升杰<sup>1</sup> 马建桥<sup>1</sup>

(1. 河北省输变电安全防御重点实验室(华北电力大学) 保定 071003

2. 中国电力科学研究院 北京 100192)

**摘要** 研究高速气流条件下的绝缘子积污对沙尘暴、动车组高速运行等状况下的绝缘子清洗、预防污闪等工作具有重要指导意义。提出了污秽颗粒在复合绝缘子表面的沉积判据,结合该判据建立了高速气流条件下复合绝缘子积污的计算流体力学(CFD)模型。以动车组高压隔离开关绝缘子为对象进行了算例分析,通过实验以及与相关文献结果对比,从污秽分布特性的角度验证了沉积判据及计算流体力学模型的有效性。仿真分析了不同粒径下的绝缘子积污,表明粒径对绝缘子积污有较为明显的影响。当粒径较小时,漩涡碰撞为污秽颗粒与绝缘子碰撞的主要方式,此时碰撞和沉积可能发生在迎风面和背风面;当粒径较大时,惯性碰撞为污秽颗粒与绝缘子碰撞的主要方式,此时碰撞和沉积只发生在迎风面;当粒径大到一定程度时,迎风面和背风面均不会发生沉积。

**关键词:** 高速气流 绝缘子积污 沉积判据计算 流体力学模型

**中图分类号:** TM216

## Deposit Criterion of Pollution Particles on Composite Insulators Surface under High Speed Aerosol

Lü Fangcheng<sup>1</sup> Liu Hongyu<sup>1</sup> Wang Fochi<sup>1,2</sup> Yang Shengjie<sup>1</sup> Ma Jianqiao<sup>1</sup>

(1. Hebei Provincial Key Laboratory of Power Transmission Equipment Security Defense

North China Electric Power University Baoding 071003 China

2. China Electric Power Research Institute Beijing 100192 China)

**Abstract** The studies of insulators contamination under high speed aerosol condition make great contributions to the cleaning and prevention of pollution flashover under the condition of sandstorm or high speed operation of electric multiple units (EMUs). The deposit criterion of contamination particles on the surface of composite insulators is proposed in this paper. Then the computational fluid mechanics (CFD) model of composite insulators contamination under high speed aerosol condition is established. The validities of the deposit criterion and the CFD model are verified in the pollution particle distribution character perspective by the experiments results and the references which gave an exponential analysis of the insulators with high voltage isolating switch in EMUs. The simulation analyzes the composite insulator contamination under different particle sizes and indicates that particle size has an obvious influence on the insulator contamination. When the particle size is small, eddy collision is the main way of collision between contamination particulates and insulators. So the collision and deposition may occur on windward and leeward sides. When the size is larger, the inertial impaction is the main mode. Therefore, the collision and deposition only occur on the windward side. When the size is large enough to a certain extent, the deposition will never occur on both windward and leeward sides.

**Keywords:** High speed aerosol, composite insulators contamination, deposit criterion, computational fluid mechanics (CFD) model

## 0 引言

绝缘子污闪问题可导致停电事故的发生,影响系统的安全运行<sup>[1-3]</sup>,该问题自 20 世纪初期已引起广泛关注<sup>[4-8]</sup>,其一般会经历积污、受潮、电弧发展和最终闪络 4 个阶段<sup>[9]</sup>。绝缘子积污是发生污闪的前提,因此有必要对绝缘子积污进行研究。

在沙尘暴、动车组运行等绝缘子周围气流速度较高场合,气流对绝缘子积污的影响起主导作用<sup>[6-8]</sup>。风洞实验是研究高速气流条件下绝缘子积污最直接的物理方法<sup>[10,11]</sup>,但由于绝缘子积污受到环境条件、绝缘子材质及结构等多种因素的影响<sup>[12,13]</sup>,单一的风洞实验难以对上述多种因素进行充分研究,且需要耗费大量的资源。随着计算机硬件性能的提升和数值计算技术的发展,建立绝缘子积污的计算流体力学模型已经成为研究高速气流条件下绝缘子积污的一种新方法<sup>[9,14-16]</sup>。

对于该方法,当污秽颗粒与绝缘子表面发生碰撞后,判断污秽颗粒能否沉积为关键之处,目前该方面存在以下判据:①碰撞后污秽颗粒全部沉积在绝缘子表面,不发生反弹<sup>[14]</sup>;②碰撞后污秽颗粒在碰撞力、相间曳力、重力、黏附力的作用下受力平衡且碰撞速度小于一定值时沉积在绝缘子表面<sup>[9]</sup>;③将碰撞后污秽颗粒的运动分为切向和法向运动,假设污秽颗粒切向和法向受到的作用力均有一定的作用距离,在法向判断污秽颗粒的法向动能能否克服法向作用力,在切向判断污秽颗粒受到的曳力是否大于摩擦力,如果切向和法向同时满足,则沉积在绝缘子表面<sup>[15,16]</sup>。在上述 3 种判据中,判据①起初用于飞机、绝缘子覆冰的研究,然而当空气湿度较低时污秽颗粒与水滴的物理性质不同,与绝缘子表面碰撞后可能发生反弹,因此该假设只能模拟污秽颗粒与绝缘子表面的碰撞,不能准确模拟绝缘子积污情况;判据②虽提出了一定的判定条件,但临界速度的取值仅取决于污秽颗粒密度、气流密度及黏度,与绝缘子材料特性无关,缺少明确物理意义;判据③在各种力的作用距离上存在较多的假设条件,碰撞后的反弹速度根据与碰撞速度和碰撞角相关的经验公式确定,未考虑污秽颗粒与绝缘子表面碰撞后绝缘子材料形变等物理过程。

污秽颗粒与绝缘子表面碰撞后是否沉积,与污秽颗粒粒径、碰撞速度、绝缘子材料特性等因素有关<sup>[17]</sup>。本文基于接触力学、牛顿力学等相关理论,综合考虑了上述多种因素,分析了碰撞时污秽颗粒的运动、绝缘子材料的形变过程。从受力分析和能量守恒

的角度,提出了污秽颗粒在绝缘子表面沉积的法向判据和切向判据。结合该判据建立了高速气流条件下动车组高压隔离开关绝缘子积污的计算流体力学(Computation Fluid Dynamics, CFD)模型。和实验及相关文献结果对比,验证了该沉积判据及计算流体力学模型的有效性。仿真研究了不同污秽颗粒粒径下的绝缘子积污,并从污秽颗粒与绝缘子表面碰撞及沉积的角度进行了分析。

## 1 污秽颗粒沉积判据

通常情况下,污秽颗粒与绝缘子表面发生如图 1 所示的倾斜碰撞。碰撞速度的法向分量  $v_{pn}$  与弹性形变储能有关,影响污秽颗粒的法向沉积;切向分量  $v_{pt}$  与切向滑移相关,影响污秽颗粒的切向沉积。因此需将碰撞过程分为法向碰撞和切向碰撞进行分析,提出污秽颗粒发生沉积的法向判据和切向判据。

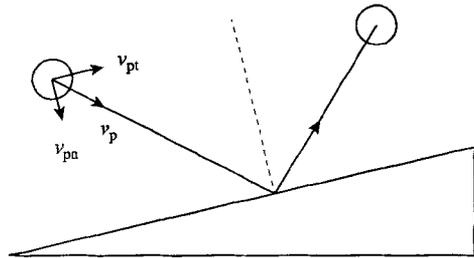


图 1 污秽颗粒与绝缘子表面碰撞示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the impaction between contamination particles with insulators surface

### 1.1 法向沉积判据

#### 1.1.1 法向碰撞过程分析

在污秽颗粒与绝缘子表面碰撞法线方向,根据法向碰撞速度、绝缘子材料特性的不同,碰撞过程可能经历弹性压缩、弹塑性压缩、弹性恢复 3 个阶段<sup>[18]</sup>。

1) 弹性压缩阶段。在此阶段,绝缘子材料发生弹性形变。根据赫兹接触理论,污秽颗粒与绝缘子表面之间存在接触应力,碰撞速度越大,接触应力越大。当接触应力最大值超过绝缘子表面的屈服强度  $y$  时,弹性压缩阶段结束,弹塑性压缩阶段开始。在弹性压缩阶段储存的弹性能量为

$$Q_e = \frac{1}{2} m_p \varphi^2 \quad (1)$$

式中,  $m_p$  为污秽颗粒的质量, kg;  $\varphi$  为绝缘子料仅发

生弹性压缩的临界速度,  $\varphi = \left( \frac{2\pi}{3K} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{2}{5\rho_p} \right)^{\frac{1}{2}} y^{\frac{2}{3}}$ , m/s;

$K = 4/[3\pi(k_1 + k_2)]$ ;  $k_i = (1 - \nu_i^2)/(\pi E_i)$ ;  $\nu_i$  为污秽颗粒和绝缘子材料的泊松比;  $E_i$  为污秽颗粒和绝缘子

材料的弹性模量, Pa;  $\rho_p$  为污秽颗粒的密度,  $\text{kg/m}^3$ 。

2) 弹塑性压缩阶段。在此阶段, 随着碰撞过程的继续, 污秽颗粒的法向速度将逐渐减小为0。在强度较低的接触区域出现塑性形变, 而其他接触区域仍为弹性形变, 如图2所示。在该过程中, 弹性形变区域储存的弹性能量为  $Q_{pe}$ , 塑性形变耗散的能量为  $Q_p$ 。文献[18]推导出  $Q_e$ 、 $Q_{pe}$ 、 $Q_p$  三者之间的关系为

$$Q_{pe} = \left( \frac{15}{4} Q_e Q_p \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

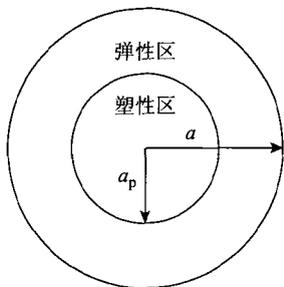


图2 弹塑性形变区域示意图

Fig.2 Schematic diagram of elastic-plastic area

弹塑性压缩阶段结束后, 污秽颗粒的速度为0。污秽颗粒的初始动能以及与绝缘子材料之间的吸附能  $Q'_A$  转换为弹性压缩阶段储存的弹性能量  $Q_e$ 、弹塑性压缩阶段储存的弹性能量  $Q_{pe}$ 、塑性形变消耗的能量  $Q_p$  以及因弹性波、内摩擦等损失的能量  $Q_l$ , 根据能量守恒定理

$$\frac{m_p v_{pn}^2}{2} + Q'_A = Q_e + Q_{pe} + Q_p + Q_l \quad (3)$$

由于  $Q'_A$ 、 $Q_l$  数值相对其他较小, 可忽略不计<sup>[19,20]</sup>, 在此基础上, 式(1)~式(3)联立可求得  $Q_{pe}$ 、 $Q_p$  为

$$Q_{pe} = \left( m_p \varphi^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\left[ \frac{\left( 2m_p v_{pn}^2 - \frac{1}{8} m_p \varphi^2 \right)^{\frac{1}{2}} - \left( \frac{15}{8} m_p \varphi^2 \right)^{\frac{1}{2}}}{2} \right] \quad (4)$$

$$Q_p = \left[ \frac{\left( 2m_p v_{pn}^2 - \frac{1}{8} m_p \varphi^2 \right)^{\frac{1}{2}} - \left( \frac{15}{8} m_p \varphi^2 \right)^{\frac{1}{2}}}{2} \right]^2 \quad (5)$$

式中,  $v_{pn}$  为污秽颗粒与绝缘子表面碰撞时的法向碰撞速度,  $\text{m/s}$ 。

3) 弹性恢复阶段。在此阶段, 弹性压缩和弹塑性压缩阶段储存的弹性能量  $Q_e$ 、 $Q_{pe}$  释放, 并全部转换

为污秽颗粒恢复时的动能。弹性能量释放完毕后, 污秽颗粒具有一定的初始动能。若该初始动能小于绝缘子材料的黏附能  $Q_t$ , 污秽颗粒沉积在绝缘子表面, 反之则发生反弹。根据 JKR (Johnson-Kendall-Roberts) 理论<sup>[21]</sup>, 绝缘子材料表面的黏附能  $Q_t$  由机械能  $Q_m$  和表面能  $Q_s$  组成, 即

$$Q_t = Q_m + Q_s \quad (6)$$

$$Q_m = F_0 \frac{\left( F_1^{\frac{2}{3}} + 2F_0 F_1^{-\frac{1}{3}} \right)}{3K^{\frac{2}{3}} R^{\frac{1}{3}}} \quad (7)$$

$$Q_s = \Delta\gamma\pi \left( \frac{R_s F_1}{K} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (8)$$

$$F_1 = F_0 + 3\pi R_s \Delta\gamma + \left[ (F_0 + 3\pi R_s \Delta\gamma)^2 - F_0^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

式中,  $F_0$  为污秽颗粒与绝缘子表面的碰撞力, N;  $F_1$  为法向接触力, N;  $\Delta\gamma$  为污秽颗粒与绝缘子表面之间的表面能密度,  $\text{J/m}^2$ ;  $R_s$  为有效半径, m。

### 1.1.2 法向沉积判据的数学表达式

图3为污秽颗粒与绝缘子表面发生碰撞后在碰撞法线方向相关能量转换的流程图。当法向碰撞速度小于速度  $\varphi$  时, 绝缘子材料只发生弹性压缩。在弹性压缩阶段, 污秽颗粒的初始动能全部转换为绝缘子材料弹性形变储存的弹性能量  $Q_e$ 。弹性压缩阶段结束后, 储存的弹性能量  $Q_e$  转换为污秽颗粒恢复的初始动能  $E_r$ 。如果初始动能  $E_r$  小于绝缘子材料的黏附能  $Q_t$ , 污秽颗粒沉积在绝缘子表面, 反之反弹。当法向碰撞速

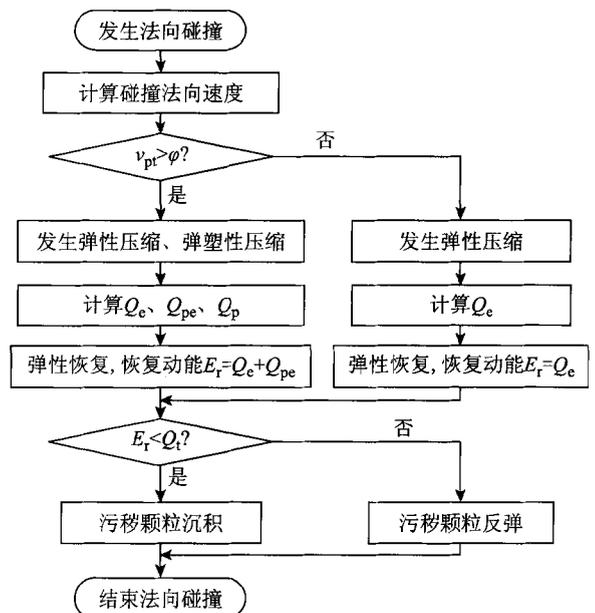


图3 法向沉积判断流程图

Fig.3 Analyzing flowchart of deposit criterion at normal direction

度大于速度  $\varphi$  时, 绝缘子材料不仅经历弹性压缩, 而且经历弹塑性压缩, 塑性形变引起的能量损耗  $Q_p$  不可忽略。弹塑性压缩阶段结束后, 由弹性压缩阶段和弹塑性压缩阶段储存的弹性能量  $Q_e$ 、 $Q_{pe}$  转换为污秽颗粒恢复的初始动能  $E_r$ 。同样, 当初始动能  $E_r$  小于绝缘子材料的黏附能  $Q_t$  时, 污秽颗粒沉积在绝缘子表面, 反之反弹。

因此污秽颗粒在绝缘子表面发生法向沉积的判定条件的数学表达式为

$$\begin{cases} \frac{1}{2}m_p v_{pn}^2 \leq Q_t & v_{pn} \leq \varphi \\ \frac{1}{2}m_p v_{pn}^2 \leq Q_p + Q_t & v_{pn} > \varphi \end{cases} \quad (10)$$

### 1.2 切向沉积判据

在污秽颗粒与绝缘子表面碰撞的切线方向, 根据牛顿力学, 当污秽颗粒受到的碰撞力的切向分量小于摩擦力时发生沉积<sup>[22]</sup>, 即

$$F_t = k_t v_{pt} \Delta t < \mu_* F_{adh} = \mu_* 3\pi R_* \Delta \gamma \quad (11)$$

式中,  $F_t$  为污秽颗粒受到的碰撞力的切向分量, N;  $F_{adh}$  为污秽颗粒与绝缘子表面之间的黏附力,  $F_{adh} = 3\pi R_* \Delta \gamma$ , N;  $\mu_*$  为有效摩擦系数, 取 0.2;  $k_t$  为切向刚度, N/m;  $\Delta t$  为接触时间, s。

污秽颗粒的切向动能  $Q_{pt}$  为

$$Q_{pt} = \frac{1}{2}k_t (v_{pt} \Delta t)^2 \quad (12)$$

污秽颗粒的法向动能  $Q_{pn}$  可近似表示为污秽颗粒与绝缘子表面之间的沉积能  $Q'_A$ , 即

$$Q_{pn} \approx Q'_A = 2\pi a^2 \Delta \gamma \quad (13)$$

$k_t$  与有效剪切模量  $G_*$  和接触半径  $a$  有关, 即

$$k_t = 8G_* a \quad (14)$$

式(11)~式(14)联立可得污秽颗粒在切向发生沉积时切向动能  $Q_{pt}$  与法向动能  $Q_{pn}$  的关系为

$$\frac{Q_{pt}}{Q_{pn}} < \frac{9\pi \mu_*^2}{32} \frac{\Delta \gamma R_*^2}{G_* a^3} \quad (15)$$

接触半径  $a$  可由有效系数  $\beta$  表示为

$$a = \beta \left( \frac{9\pi R_*^2 \Delta \gamma}{E_*} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (16)$$

式中,  $E_*$  为有效弹性模量, Pa。

将式(16)带入式(15)可得

$$\frac{Q_{pt}}{Q_{pn}} < \frac{u_*}{(32\beta^3)^{\frac{1}{3}}} \frac{E_*}{G_*} \quad (17)$$

综上所述, 法向沉积判据和切向沉积判据一起构成了高速气流条件下污秽颗粒在绝缘子表面的沉积判

据。在高速气流的作用下, 污秽颗粒与绝缘子表面发生倾斜碰撞后, 只有同时满足法向和切向沉积判据时, 污秽颗粒才会沉积在绝缘子表面, 否则, 污秽颗粒发生反弹。

## 2 绝缘子积污仿真与实验

### 2.1 仿真模型

本文利用商用流体计算软件 ANSYS FLUENT 14.5, 以动车组高压隔离开关绝缘子为对象, 基于离散相模型 (Discrete Phase Model, DPM), 将高速气流当作连续相、污秽颗粒当作离散相, 考虑两相之间质量、动量的相互作用, 建立了高速气流下绝缘子积污的计算流体力学模型。动车组高压隔离开关绝缘子伞形结构及尺寸 (单位为 mm)、仿真模型的计算域及网格结构分别如图 4、图 5 所示, 计算域的截面尺寸与下文风洞系统结构的截面尺寸一致。

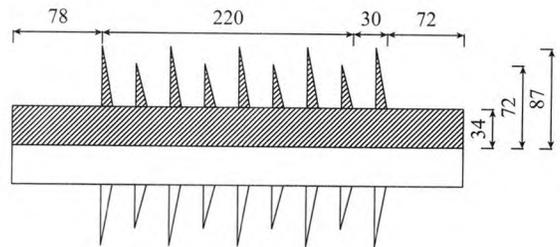


图 4 绝缘子结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of insulators

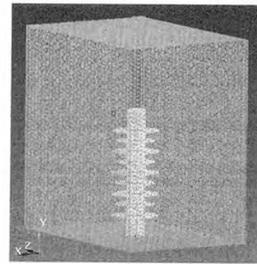


图 5 仿真模型的计算域及网格结构

Fig. 5 Compute domain and grid of simulation model

高压隔离开关绝缘子周围流场为三维黏性不可压缩湍流流动, 选择 Realizable  $k-\varepsilon$  湍流模型进行求解, 为准确模拟近壁面湍流流动, 采用标准壁面函数对近壁面进行处理。计算域的入口边界为速度入口, 出口边界为压力出口, 在入口处气流速度的取值结合动车组实际运行速度, 大小为 55 m/s, 方向垂直于速度入口, 选择湍流强度和水利直径为表征湍流的参数<sup>[23]</sup>。

对于污秽颗粒, 采用面发射源的方式从速度入口处发射, 发射速度与流体速度相同, 为模拟湍流的脉动, 选择离散随机游走 (Discrete Random Walk, DRW)

模型对污秽颗粒的运动进行追踪<sup>[24]</sup>。为符合统计特性,时间尺度常数为0.15,追踪次数为1 000,总计追踪的颗粒数为3 794 000;仿真中,假设污秽颗粒的形状为球体,其密度为2 800 kg/m<sup>3</sup>,质量流率为2 × 10<sup>-7</sup> kg/s,粒径在0.1~200 μm内随机分布。

污秽颗粒与绝缘子表面发生碰撞后,根据提出的判据对污秽颗粒是否沉积做出判断。利用ANSYS FLUENT 14.5提供的DEFINE\_DPM\_BC预定义宏,将沉积判据通过C语言实现,并动态链接到求解器,同时计算污秽颗粒的沉积数、积污面积等参数。

### 2.2 实验平台

绝缘子积污实验在风洞实验室内进行,风洞系统结构如图6所示。主要由低速实验段、高速实验段和风机3部分构成,风洞截面尺寸为0.75 m × 0.75 m,风机风速在0~57 m/s内可调。

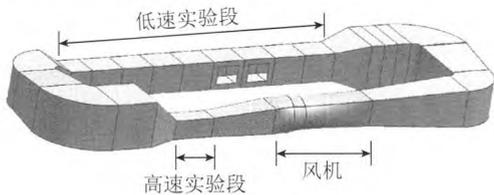


图6 风洞系统结构图

Fig. 6 Wind tunnel system configuration diagram

本次实验在高速实验段进行,实验风速和仿真气流速度相同,均为55 m/s。随着积污时间的延续,绝缘子出现积污饱和现象<sup>[25]</sup>,本次实验绝缘子积污时长20 h,该时长下绝缘子积污已达到饱和状态。

### 2.3 沉积判据的验证

绝缘子积污饱和是一个复杂的物理现象,包括污秽颗粒与绝缘子表面碰撞后的沉积、污秽颗粒与已沉积的污秽颗粒之间的碰撞引起的污秽颗粒从绝缘子表面的剥离、气流对已沉积的污秽颗粒的作用可能使得污秽颗粒再次脱离绝缘子表面进入气流等。本文提出的沉积判据是仿真绝缘子积污饱和的基础,因此尚不能通过饱和后的积污量验证本文的沉积判据。为此,将从风洞试验后绝缘子迎风面与背风面积污分布的异性角度来验证沉积判据。

图7为绝缘子1-2、5-6、8-9号伞裙表面的污秽颗粒分布云图。仿真云图效果受取值范围的影响较大,若以整个绝缘子为对象,则云图分布的取值范围较广,使得部分伞裙迎风面、背风面的分布效果不明显。因此,本文以单片绝缘子伞裙而不是以整个绝缘子为对象,这样即可避免上述缺点。

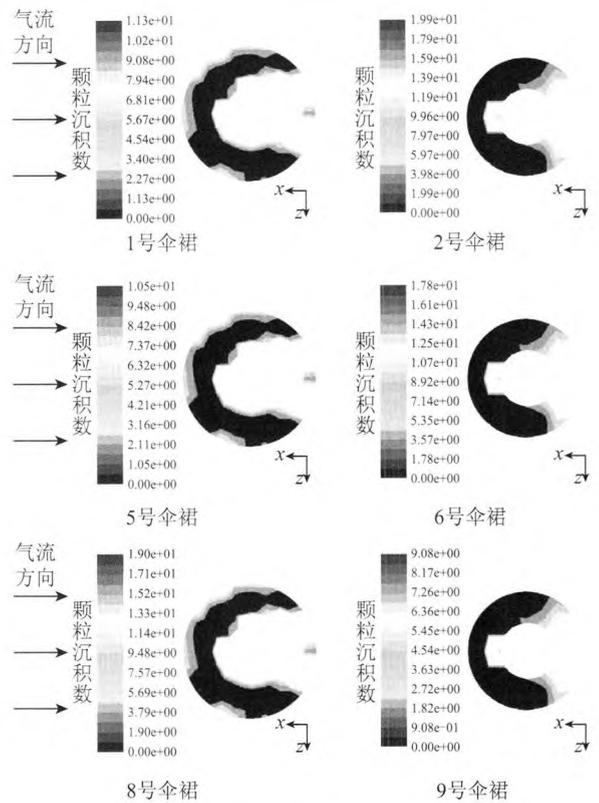


图7 绝缘子表面污秽分布云图

Fig. 7 Contamination distribute contours on insulators surface

图8为风洞实验后绝缘子表面的污秽颗粒分布特性结果。从污秽颗粒分布特性的角度讲,图7和图8具有一定的相似性,仿真和实验结果均表明:在高速气流条件下,绝缘子伞裙不同部位的积污呈现差异性。背风面污秽颗粒分布区域较广,而迎风面污秽颗粒主要集中在伞裙根部和边缘,该差异性在数值上则可表现为背风面的积污面积明显大于迎风面。表1为各伞裙迎风面和背风面污秽颗粒分布面积的统计结果,可直观地表现出背风面的积污明显大于迎风面。

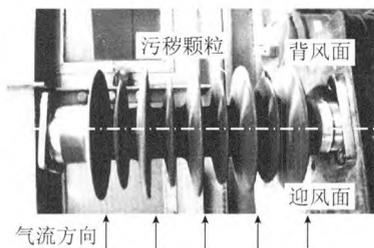


图8 风洞实验污秽分布图

Fig. 8 Contamination distribute of wind tunnel system experiment

由上述分析可知,从污秽颗粒分布差异性角度看,仿真和实验结果较为一致,可以证明该沉积判据及计算流体力学模型的有效性。此外,文献[25]在研

表 1 各伞裙污秽分布面积

Tab. 1 Contamination distribute area of each shed

伞裙编号	积污面积/mm <sup>2</sup>	
	迎风面	背风面
1	669.886	5 477.15
2	1 777.75	4 019.76
3	3 740.87	5 153.00
4	1 408.64	3 983.61
5	3 644.67	5 164.78
6	1 592.49	3 835.82
7	3 491.50	5 302.42
8	1 534.82	4 055.41
9	3 428.83	5 409.45

究自然横风下绝缘子积污特性时也曾得到和本文仿真类似的结论，即背风面的积污大于迎风面，也可说明本文沉积判据和流体计算模型的有效性。

### 3 污秽颗粒粒径对绝缘子积污的影响

绝缘子积污受到污秽颗粒粒径、气流速度、绝缘子伞形结构及材质等多种因素的影响。其中，粒径为影响绝缘子积污的最主要因素<sup>[18]</sup>，本文通过仿真来研究污秽颗粒粒径对绝缘子积污的影响。

由图 7 可知，在相同条件下，绝缘子不同伞裙的污秽分布规律基本相同，因此，在研究污秽颗粒粒径对绝缘子积污的影响时，均以单片绝缘子伞裙(本文中为 5 号伞裙)为例进行分析。

对气流速度为 55 m/s，污秽颗粒粒径分别为 0.1 μm、0.5 μm、1 μm、5 μm、10 μm、25 μm 时的绝缘子积污进行计算，污秽颗粒分布如图 9 所示。由图 9 可知，污秽颗粒粒径对绝缘子积污有较为明显的影响。当粒径较小时，积污主要发生在绝缘子背风面，且分布区域较广。随着粒径的增大，积污主要发生在迎风面，但是和背风面积污相比，其分布较为集中。但当粒径大到一定程度时，污秽颗粒与绝缘子表面发生碰撞后全部发生反弹，迎风面和背风面均不会发生积污。

对上述结果作出如下解释：在高速气流的带动下，污秽颗粒追随气流运动并与绝缘子表面发生碰撞，污秽颗粒的斯托克斯数(Stk)决定其与绝缘子伞裙表面发生碰撞的部位，其数学表达式为

$$Stk = \frac{\rho_p d_p^2 U}{9\mu D} \quad (18)$$

式中， $U$  为高速气流的平均速度，取 55 m/s； $D$  为芯棒直径，取 68 mm； $\mu$  为气体动力黏度，取  $1.78 \times 10^{-5}$  kg/(m·s)。

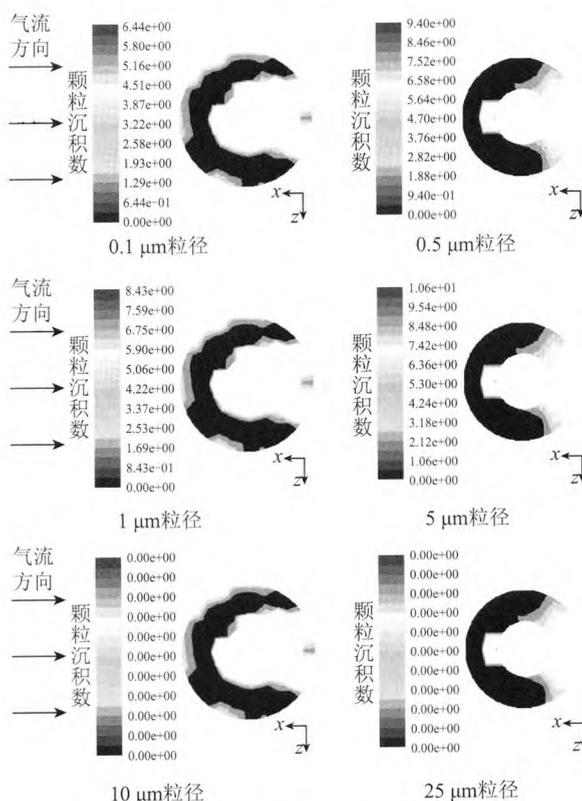


图 9 不同粒径下绝缘子表面的污秽分布云图

Fig. 9 Contamination distribute contours of insulator surface under different particle sizes

由式(18)可知，当污秽颗粒的粒径较小时，Stk 较小，污秽颗粒受气流流线的影 响较大，对气流的追随性较好，容易绕过芯棒与伞裙背风面发生碰撞并进一步发生沉积。在湍流的作用下，使得背风面的污秽颗粒分布范围较广，此时，漩涡碰撞为污秽颗粒与绝缘子碰撞的主要方式。随着污秽颗粒粒径的增大，污秽颗粒的 Stk 增大，气流的追随性变差，污秽颗粒容易摆脱气流流线与迎风面发生碰撞，此时，惯性碰撞为污秽颗粒与绝缘子碰撞的主要方式。

一般认为，当  $Stk \ll 1$  时，污秽颗粒会与背风面发生碰撞<sup>[26]</sup>；文献[27]在研究燃炉中灰飞颗粒的管道沉积时进一步指出  $Stk > 0.1$  后，颗粒将与迎风面发生碰撞。

污秽颗粒密度、气流速度、黏度采用仿真时设定的参数，不同污秽颗粒粒径下的 Stk 见表 2。由表 2 可知，当污秽颗粒的粒径小于 5 μm 时， $Stk < 0.1$ ；而当污秽颗粒的粒径大于或等于 5 μm 时， $Stk > 0.1$ 。结合上述分析和沉积判据，这可合理解释污秽颗粒粒径较小时在绝缘子表面的积污情况。

对于粒径大于 10 μm 的污秽颗粒，Stk 较大，虽然其与迎风面发生碰撞，然后其并不能够满足本文提

表2 不同污秽颗粒粒径下的斯托克斯数

Tab. 2 Stokes number of different particle sizes

粒径/ $\mu\text{m}$	Stk	粒径/ $\mu\text{m}$	Stk
0.1	0.000 14	5	0.353 42
0.5	0.003 53	10	1.413 67
1	0.014 14	25	8.835 46

出的沉积判据,迎风面和背风面均不会发生污秽颗粒的沉积。

由上述分析可知,本文中沉积在绝缘子表面的污秽颗粒粒径小于 $10\ \mu\text{m}$ ,表3为本文与相关研究绝缘子表面污秽颗粒粒径的文献的对比结果。由表3可知,文献[28,29]指出绝缘子表面的污秽颗粒的粒径均小于一定的数值。由于试验环境、计算参数的一致性,造成该数值的差异性,但均表明当粒径大到一定程度时,污秽颗粒将不会沉积在绝缘子表面,这和本文仿真得到的结果一致,也可证明本文提出的沉积判据及计算流体力学模型的有效性。

表3 绝缘子表面污秽颗粒粒径大小

Tab. 3 Particle sizes on insulators surface

相关结果	数据来源
污秽颗粒粒径 $<10\ \mu\text{m}$	本文
50%的污秽颗粒粒径 $<15\ \mu\text{m}$	文献[28]
90%的污秽颗粒粒径 $<20\ \mu\text{m}$	文献[29]

## 4 结论

1)提出了高速气流条件下污秽颗粒在绝缘子表面发生沉积的判据,建立了绝缘子积污的流体计算模型,从绝缘子积污分布特性的角度,验证了沉积判据及计算流体力学模型的有效性。

2)基于污秽颗粒的斯托克斯数探讨了不同粒径的污秽颗粒与绝缘子积污的碰撞机理,指出当污秽颗粒的粒径较小时,漩涡碰撞为主要方式,背风面可能发生碰撞;当污秽颗粒的粒径较大时,惯性碰撞为主要方式,碰撞只发生在迎风面。

### 参考文献

- [1] 李和明,王胜辉,律方成,等.基于放电紫外成像参量的绝缘子污秽状态评估[J].电工技术学报,2010,25(12):22-29.  
Li Heming, Wang Shenghui, Lü Fangcheng, et al. Contamination condition evaluation of insulators based on discharge ultraviolet imaging parameters [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(12): 22-29.
- [2] 金立军,张达,段绍辉,等.基于红外与紫外图像

信息融合的绝缘子污秽状态识别[J].电工技术学报,2014,29(8):309-318.

Jin Lijun, Zhang Da, Duan Shaohui, et al. Recognition of contamination grades of insulators based on IR and UV image information fusion[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 309-318.

- [3] 孟志高,蒋兴良,董冰冰,等.自然雾条件下严重污染污玻璃,复合绝缘子交流污闪特性[J].电工技术学报,2016,31(12):65-71.  
Meng Zhigao, Jiang Xingliang, Dong Bingbing, et al. AC pollution flashover characteristics of surged polluted glass and composite insulators under natural fog conditions [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(12): 65-71.
- [4] 谷裕,阳林,张福增,等.海拔地区特高压换流站大尺寸复合支柱绝缘子直流污闪特性[J].电工技术学报,2016,31(10):93-101.  
Gu Yu, Yang Lin, Zhang Fuzeng, et al. DC pollution flashover performance of ultra high voltage convert stations large-size composite post insulators at high altitude areas [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(10): 93-101.
- [5] 戴罕奇,赵晨龙,梁建瑜,等.染污硅橡胶在不同憎水性时的污闪特性[J].电工技术学报,2016,31(10):102-111.  
Dai Hanqi, Zhao Chenlong, Liang Jianyu, et al. Flashover characteristic of polluted silicone rubber with different hydrophobicity [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(10): 102-111.
- [6] Austin A O. The high efficiency suspension insulator [J]. Proceedings of the American Institute of Electrical Engineers, 1911, 30(6): 1319-1344.
- [7] John W J, Sayers F M. Transmission-line insulators under deposit conditions [J]. Journal of the Institution of Electrical Engineers, 1935, 77(467): 629-648.
- [8] Jolly D C. Contamination flashover theory and insulator design [J]. Journal of the Franklin Institute, 1972, 294(6): 483-500.
- [9] Gertsik A K, Korsuntser A V, Nikol' Skii N K. The effect of fouling on insulators for HVDC overhead lines [J]. Direct Current, 1957, 3: 219-226.
- [10] He Bo, Jin Haiyun, Gao Naikui, et al. Characteristics of dust deposition on suspended insulators during simulated sandstorm [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(1): 100-105.
- [11] Sun Jixing, Gao Guoqing, Zhou Lijun, et al. Pollution accumulation on rail insulator in high-speed aerosol [J].

- IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(3): 731-738.
- [12] 李恒真, 刘刚, 李立涅. 广州地区线路盘式防污型玻璃绝缘子的自然积污规律[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(25): 118-124.  
Li Hengzhen, Liu Gang, Li Licheng. Natural contamination deposit law of line disc anti-contamination glass insulator in Guangzhou area[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(25): 118-124.
- [13] 范建斌, 宿志一, 李武峰, 等. 高压直流支柱绝缘子和套管伞形结构研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(21): 1-6.  
Fan Jianbin, Su Zhiyi, Li Wufeng, et al. Research on profiles of HVDC post insulator and bushing[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(21): 1-6.
- [14] 蒋兴良, 李海波. 计算流体力学在绝缘子积污特性分析中的应用[J]. 高电压技术, 2010, 36(2): 329-334.  
Jiang Xingliang, Li Haibo. Application of computational fluid dynamics to analysis of contamination depositing characteristics of insulators[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(2): 329-334.
- [15] 李恒真, 赖江宇, 雷乾, 等. 污秽颗粒在绝缘表面的碰撞和吸附[J]. 高电压技术, 2012, 38(10): 2596-2603.  
Li Hengzhen, Lai Jiangyu, Lei Qian, et al. Collision and adsorption of pollution particles on the surface of electrical insulator[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(10): 2596-2603.
- [16] 贺博, 陈邦发, 高乃奎, 等. 沙尘微粒在硅橡胶绝缘材料表面的沉降模型[J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(12): 86-90.  
He Bo, Chen Bangfa, Gao Naikui, et al. A model for sand/dust deposition on the surface of silicon rubber[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(12): 86-90.
- [17] Blanchard R P. Measurements and modeling of coal ash deposition in an entrained-flow reactor[D]. Provo: Brigham Young University, 2008.
- [18] Rogers L N, Reed J. The adhesion of particles undergoing an elastic-plastic impact with a surface[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1984, 17(4): 677-689.
- [19] Dahneke B. The capture of aerosol particles by surfaces[J]. Journal of colloid and interface science, 1971, 37(2): 342-353.
- [20] Reed J. Energy losses due to elastic wave propagation during an elastic impact[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1985, 18(12): 2329-2337.
- [21] Johnson K L, Kendall K, Roberts A D. Surface energy and the contact of elastic solids[C]//Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1971, 324(1558): 301-313.
- [22] Konstandopoulos A G. Particle sticking/rebound criteria at oblique impact[J]. Journal of Aerosol Science, 2006, 37(3): 292-305.
- [23] Ferziger J H, Perić M. Computational methods for fluid dynamics[M]. Berlin: Springer, 2001: 103-105.
- [24] Crowe C T, Schwarzkopf J D, Sommerfeld M, et al. Multiphase flows with droplets and particles[M]. Boca Raton: CRC Press, 2011: 214-217.
- [25] 律方成, 黄华, 刘云鹏, 等. 风洞模拟自然横风条件下绝缘子带电积污特性[J]. 高电压技术, 2014, 40(5): 1281-1289.  
Lü Fangcheng, Huang Hua, Liu Yunpeng, et al. Contamination depositing characteristics of insulators under natural crosswind conditions with wind tunnel simulation[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(5): 1281-1289.
- [26] Bouris D, Papadakis G, Bergeles G. Numerical evaluation of alternate tube configurations for particle deposition rate reduction in heat exchanger tube bundles[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2001, 22(5): 525-536.
- [27] Sandberg J. Fouling in biomass fired boilers[D]. Västerås: Mälardalen University, 2011.
- [28] 刘瑛岩, 李燕, 王晶, 等. 绝缘子表面对污秽颗粒的粘附力及长程吸引力[J]. 高电压技术, 2014, 40(4): 1010-1016.  
Liu Yingyan, Li Yan, Wang Jing, et al. Adhesion force and long-range attractive force between contamination particles and insulator surface[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(4): 1010-1016.
- [29] 屠幼萍, 孙佑飞, 彭庆军, 等. 雾霾环境下自然积污绝缘子的污秽颗粒粒径分布特性[J]. 高电压技术, 2014, 40(11): 3318-3326.  
Tu Youping, Sun Youfei, Peng Qingjun, et al. Particle size distribution characteristics of naturally polluted insulators under the fog-haze environment[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(11): 3318-3326.

#### 作者简介

律方成 男, 1963年生, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为高电压与绝缘技术, 电气设备在线监测与故障诊断。

E-mai: lfc0818@sohu.com

刘宏宇 男, 1990年生, 博士研究生, 研究方向为高速气流下绝缘子积污的建模仿真、实验。

E-mai: lhy3120@126.com(通信作者)

(编辑 赫蕾)