

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240636

# 基于数字孪生技术的 GIL 综合管廊气体泄漏与排除全过程风险性评估

徐长福<sup>1</sup>, 赵新冬<sup>1</sup>, 梁伟<sup>1</sup>, 贺兴<sup>2</sup>, 卜艺康<sup>2</sup>

(1. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103; 2. 上海交通大学, 上海 200240)

**摘要:** 针对气体绝缘输电线路(gas insulated transmission line, GIL)管廊内绝缘气体泄漏导致有害气体六氟化硫(SF<sub>6</sub>)扩散复杂分布的问题, 提出了一种基于数字孪生技术的全过程仿真风险评估方法。首先, 根据苏通 GIL 管廊的实际工况和通风系统的部署, 归纳综合管廊内气体大面积泄漏时的全过程通用排除方案。然后, 以 SF<sub>6</sub> 气体泄漏的物理过程与数学机理为基础, 在虚拟空间中构建管廊的数字孪生模型, 并设置了气体泄漏的约束条件。其次, 通过模拟孪生空间内 SF<sub>6</sub> 大面积泄漏气体的扩散分布, 推演排除过程中 SF<sub>6</sub> 分布数据并将其可视化。最后, 结合各阶段可视化结果, 对 GIL 综合管廊内气体泄漏全过程进行风险评估, 从而为制定管廊内的安全撤离方案与实现智能化监控提供参考。

**关键词:** 苏通 GIL 管廊; 数字孪生; SF<sub>6</sub> 气体; 气体扩散行为; 推演

## Risk assessment of gas leakage and elimination in GIL utility tunnels based on digital twin technology

XU Changfu<sup>1</sup>, ZHAO Xindong<sup>1</sup>, LIANG Wei<sup>1</sup>, HE Xing<sup>2</sup>, BU Yikang<sup>2</sup>

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China;

2. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** To address the challenges posed by the complex distribution of sulfur hexafluoride (SF<sub>6</sub>) gas leakage in gas-insulated transmission line (GIL) utility tunnels, this paper proposes a simulation-based risk assessment approach based on digital twin technology. Firstly, a general exclusion plan for large-scale gas leakage is summarized based on the actual working conditions of the Su-Tong GIL utility tunnel and the deployment of the ventilation system. Then, based on the physical process and mathematical mechanism of SF<sub>6</sub> gas leakage, a digital twin model of the utility tunnel is constructed in virtual space, and the constraints of gas leakage are set. Secondly, by simulating the diffusion distribution of large-scale SF<sub>6</sub> gas leakage in the twin space, the distribution data of SF<sub>6</sub> during the exclusion process is deduced and visualized. Finally, combining the visualization results of each stage, a full-process risk assessment of gas leakage in the GIL utility tunnel is carried out, providing a reference for formulating safe evacuation plans and achieving intelligent monitoring in the corridor.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. JF2023034).

**Key words:** Su-Tong GIL utility tunnel; digital twin; SF<sub>6</sub> gas; gas diffusion behavior; deduction

## 0 引言

随着数字化电网和数智化技术的快速发展, 电网的智能化水平不断提升, 为电力设备的监控和管理带来了革命性的变革, 基于数字化技术的数字孪生技术可以通过物理模型、传感器数据、历史运行

数据等进行数字化建模, 并在虚拟环境中进行仿真和分析<sup>[1-4]</sup>, 从而实现对实际运行设备的精准控制, 并高效识别设备的潜在运行风险<sup>[5]</sup>。气体绝缘输电线路(gas insulated transmission line, GIL)作为一种新型的输电方式, 具有占地面积小、传输效率高等优点, 逐渐成为城市电力输电的重要选择<sup>[6-7]</sup>。苏通 GIL 综合管廊工程则是目前世界上电压等级最高、输送容量最大、技术水平最高的超长距离 GIL 创新

基金项目: 国家电网有限公司科技项目资助(JF2023034)

工程<sup>[8-9]</sup>。管廊内部布置了双回路三相电压等级高达 1000 kV 的 GIL 管道, 长度约 5.5 km, 其中使用大量 SF<sub>6</sub> 气体作为绝缘介质<sup>[10-12]</sup>。然而, SF<sub>6</sub> 气体的高绝缘性虽然对电力设备起到关键作用, 但一旦其发生 SF<sub>6</sub> 气室爆裂导致 SF<sub>6</sub> 气体大面积泄漏的事故, 如 SF<sub>6</sub> 气室内部发生击穿短路的电应力导致法兰连接面、管道破裂或其他连接部位出现接口脱落泄漏等, 会影响线路的正常运行<sup>[13]</sup>。更为严重的是, 若有人正在进行现场作业, 由于管廊距离长、泄漏速度快, 导致可供人员逃生时间短造成人员被困事故, 因其重气的特性, 极易沉积在空间的底部或低洼处<sup>[14]</sup>, 极有可能对作业人员和救援人员的生命安全构成严重威胁<sup>[15-19]</sup>。

针对 SF<sub>6</sub> 气体泄漏问题, 文献[20]通过风洞实验和计算流体力学模拟实验, 发现 SF<sub>6</sub> 气体在建筑群中的流动方式受环境影响很大; 文献[21]通过全尺寸实验分析得到机械通风方式较自然通风更能使得 SF<sub>6</sub> 气体分布均匀; 文献[22]采用计算流体力学理论针对不同泄漏口特性对管廊内 SF<sub>6</sub> 气体空间分布特性的影响开展了研究, 为 SF<sub>6</sub> 检测器布点提供参考; 文献[23]针对管廊内风机安装方案对排漏速率的影响开展了研究, 旨在缩短泄漏气体排出时间; 文献[24]针对管廊 SF<sub>6</sub> 气体排除方案开展了研究, 提出采用主通道通风系统加上 SF<sub>6</sub> 专用排风系统的组合方式进行排除; 文献[25]针对不同通风条件下的 SF<sub>6</sub> 扩散分布情况开展了研究, 目标是优化安全逃生距离; 文献[26-27]针对出线竖井中的 SF<sub>6</sub> 泄漏扩散规律进行分析, 为通风系统设计提供参考。

基于目前研究现状, 当前研究多侧重于管廊内部传感器的布置和通风方案的优化。在数智化电网背景下, 可以进一步利用数字孪生技术针对 GIL 管廊构建精确的数字化模型, 其中通过对管廊内 SF<sub>6</sub> 气体大面积泄漏时 SF<sub>6</sub> 气体的扩散及排除全过程的模拟分析, 实现对管廊内部各类电力设备运行状态的实时感知, 同时也能对风险进行模拟预测。

本文针对实际管廊工程的 SF<sub>6</sub> 气体大面积泄漏排除方案和 SF<sub>6</sub> 气体泄漏特性, 通过构建 GIL 管廊发生 SF<sub>6</sub> 气体大面积泄漏时的排除全过程数字孪生模型, 对 GIL 综合管廊内 SF<sub>6</sub> 气体泄漏排除全过程进行系统性的推演、研究及分析, 从而精准掌握其潜在风险以最大限度地减少大面积泄漏事故带来的损失, 保障管廊系统的安全稳定运行。

## 1 GIL 管道 SF<sub>6</sub> 大面积泄漏排除方案分析

### 1.1 隧道通风系统

隧道通风系统分为隧道上腔主通道通风系统、

下腔巡视通道通风系统和 SF<sub>6</sub> 排除通风系统<sup>[23]</sup>。本文的研究内容为主通道内的 SF<sub>6</sub> 气体大面积泄漏时排除全过程, 因此只考虑隧道上腔主通道通风系统的运行工况。

隧道上腔主通道有 3 种运行工况, 分别是排热工况、巡视工况和事故工况。在两岸配套辅助建筑配有大型立式流风机各 3 台, 单台风机风量 85 m<sup>3</sup>/s、全压 1400 Pa, 南岸为送风, 北岸为排风。隧道通风系统如图 1 所示。

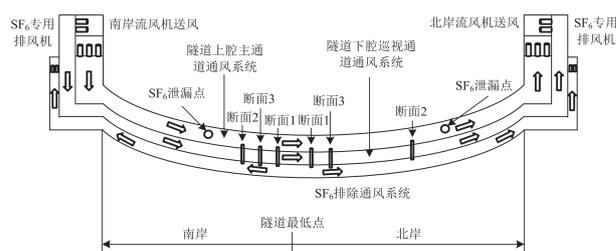


图 1 隧道通风系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the tunnel ventilation system

SF<sub>6</sub> 气体排除通风系统由隧道通风系统和 SF<sub>6</sub> 排除通风系统两部分组成。SF<sub>6</sub> 排除通风系统共有 4 台 SF<sub>6</sub> 专用离心排风机, 南北岸各设置两台, 通过风管与隧道底部的排风腔相连接。隧道每隔 100 m 设置一组排风断面, 通过风管将排风腔与上腔主通道联通。SF<sub>6</sub> 气体排除通风系统截面如图 2 所示。

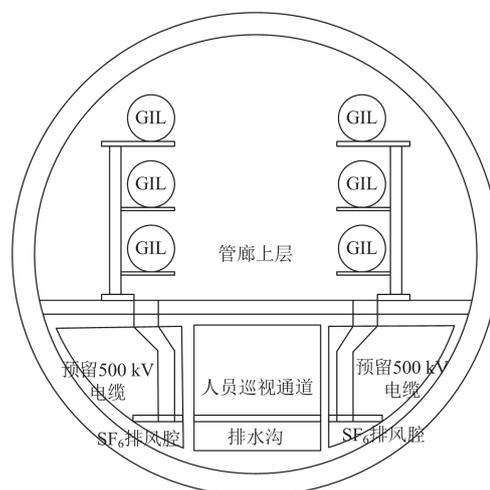


图 2 管廊截面布置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the cross-sectional layout of the pipe tunnel

### 1.2 SF<sub>6</sub> 气体大面积泄漏时全过程排除方案

在综合管廊气体泄漏全过程排除中, 考虑重力的影响因素, 通常以隧道最低点为界, 将 SF<sub>6</sub> 排除系统划分为不同区域。根据 SF<sub>6</sub> 泄漏点不同和 SF<sub>6</sub>

监测浓度不同,采取不同的排除措施,并根据实际工况设置相应的监测预警浓度与报警浓度。针对大面积泄漏的事故工况可以分为以下4个阶段:预警阶段、报警阶段、排除阶段与恢复阶段。

将苏通管廊作为实际案例,以隧道最低点为界,将底部 SF<sub>6</sub> 排除系统分为南岸和北岸两个部分,以主通道的3台流风机与两岸4台 SF<sub>6</sub> 排风机作为排除措施,设置 SF<sub>6</sub> 浓度不同阶段监测阈值,预警阶段浓度阈值为 200 ppm,报警阶段浓度阈值为 500 ppm。以南岸发生大面积泄漏为例,对各阶段进行具体说明。

1) 预警阶段:当上腔某一点监测到 SF<sub>6</sub> 浓度达到 200 ppm 预警浓度时,打开主通道的两台流风机,若隧道内 SF<sub>6</sub> 浓度没有再上升,维持开启状态 1 h 后,将风机运行状态切换回预警前状态。

2) 报警阶段:当上腔某一点监测到 SF<sub>6</sub> 浓度达到 500 ppm 报警浓度时,打开主通道的3台流风机,同时开启两岸所有4台 SF<sub>6</sub> 排风机。接着,开启隧道最低处的一对风阀(断面1),同时开启与泄漏点间隔 100 m 后靠近最低点断面上的一对风阀(断面2)。

3) 排除阶段:当第一报警点浓度低于 500 ppm 后,关闭断面2的风阀,开启离断面1最近的断面上的风阀(断面3)。

4) 恢复阶段:当隧道 SF<sub>6</sub> 浓度均低于 200 ppm 后,关闭 SF<sub>6</sub> 排除系统风机与风阀。

## 2 SF<sub>6</sub> 气体泄漏特性及模型构建

### 2.1 SF<sub>6</sub> 气体泄漏时扩散的物理过程分析

SF<sub>6</sub> 作为一种典型的重气,密度为 6.16 kg/m<sup>3</sup>,约是空气的 5 倍,GIL 管道内每米 SF<sub>6</sub> 重约 21.12 kg,一个气室内的 SF<sub>6</sub> 总量约为 350 m<sup>3</sup>[24]。在扩散过程中受到重力的显著影响,下沉过程中随着与空气不断混合,这种重力影响逐渐减小。其次,由于 GIL 管道内的 SF<sub>6</sub> 气体维持常温高压状态,压强约为 4~5 MPa,是大气压强的 4~5 倍[28],泄漏过程一般经历气体从高压区向低压区扩散的过程,其中,泄漏速率将取决于泄漏口尺寸、压力差、管道结构等因素,由于压力的存在,在泄漏点处会形成一定的射流,该射流也会对 SF<sub>6</sub> 气体的扩散产生一定的影响。此外,由于 GIL 管廊设有完整的通风系统设施,泄漏过程中主通道通风系统会及时开启,SF<sub>6</sub> 气体则沿管道蔓延并逐渐扩散到周围环境中。

通过研究 SF<sub>6</sub> 气体特性和泄漏场景特点,可将 SF<sub>6</sub> 气体泄漏时扩散的物理过程细分为以下 4 个阶段[29-30],分别是起始喷射阶段、重力下沉阶段、空气稀释阶段和扩散分布阶段,过程示意如图 3 所示。

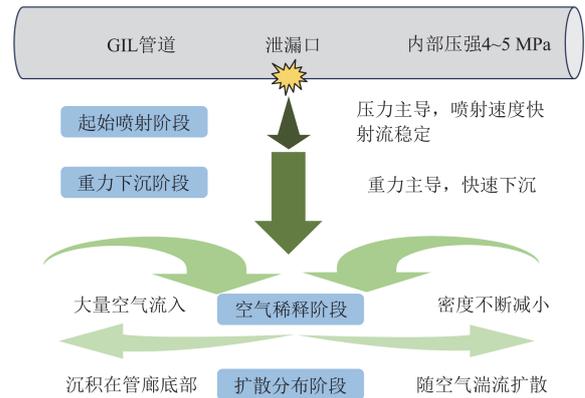


图 3 SF<sub>6</sub> 气体扩散的过程示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the SF<sub>6</sub> gas diffusion process

### 2.2 SF<sub>6</sub> 气体扩散过程模型构建

#### 2.2.1 数学原理

SF<sub>6</sub> 气体从 GIL 管道内泄漏扩散到管廊中与空气混合的过程涉及到气体扩散、混合和传输等物理过程,且不考虑 SF<sub>6</sub> 气体与空气发生化学反应,属于湍流流动过程,也是组分运输的过程。

重质气体扩散模型主要包括以下几种:唯象模型、工程模型和三维传递模型。其中,三维传递模型较前两种数学模型的准确性更高,该模型采用计算流体力学方法,模拟重气扩散的三维非定常态湍流流动过程,基于流体力学中的纳维-斯托克斯方程,建立了流体在各种复杂条件下的质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程和分量守恒方程。

在给予一定的初始条件和边界条件下,结合数值计算理论和方法,可以通过三维传递模型实现预测真实现场过程中各场的分布情况,实现对扩散过程的详细描述。三维传递模型具有普遍适用性,能详细地描述流体流动的变化过程,十分适合于本文所研究泄漏扩散问题。

该模型所需的数学模型包括连续性方程(质量守恒方程)、动量守恒方程、能量守恒方程、组分运输方程和湍流方程。数学方程与主要参数如下所示。

连续性方程,即流体力学中质量守恒定律表达方式,如式(1)所示。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

式中:  $\rho$  表示流体的密度;  $t$  表示时间;  $v$  表示流体移动方向的速度;  $x$  表示气体沿不同方向的位移。

动量方程的实质是满足牛顿第二定律,即外部施加在流体单元上的合力等于动量随时间的变化率,动量守恒方程如式(2)所示。

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial x} = \frac{\partial \rho}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \frac{\partial \rho}{\partial x} + \rho g \quad (2)$$

式中:  $\mu$  表示动力粘度;  $g$  表示重力加速度。

所有包含热交换的流体系统都须遵守能量守恒定律, 能量守恒方程如式(3)所示。

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(v\rho T) = \text{div} \left( \frac{k}{c_p} \text{grad}(T) \right) + S_T \quad (3)$$

式中:  $T$  表示绝对温度;  $\text{div}$  表示求散度;  $k$  表示导热系数;  $c_p$  表示混合气体的定压比热;  $\text{grad}$  表示求梯度;  $S_T$  表示粘性耗散。

组分输运方程如式(4)所示。

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \frac{\partial(v\rho\omega)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \rho D_1 \frac{\partial\omega}{\partial x} \right) \quad (4)$$

式中:  $\omega$  表示组分的质量分数;  $D_1$  表示扩散系数。

气体泄漏发生在廊道中, 泄漏点的喷射方式以及廊道内的通风大气流动皆为高雷诺数的湍流流动, 本文采用带有查逊数  $R_i$  (密度分层梯度) 的  $K-\varepsilon$  湍流模型(湍流场-稀物质传递场数学模型), 湍流方程如式(5)、式(6)所示。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} (\rho K) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho K u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_K} \right) \frac{\partial K}{\partial x_j} \right] + G_K + G_b - \rho \varepsilon - Y_m + S_K \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{K} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{K} (C_{3\varepsilon} G_b + G_b) + S_\varepsilon \quad (6)$$

式中:  $K$  表示湍流脉动动能;  $u_i$  表示流动速度垂直于重力方向的分量;  $\mu_t$  表示流体湍动能粘度;  $\sigma_K$  表示  $K$  方程普朗特数;  $G_K$  和  $G_b$  分别表示层流速度梯度和浮力分别产生的湍流动能;  $\varepsilon$  表示湍流耗散率;  $Y_m$  表示可压缩湍流中波动膨胀对总耗散率的贡献;  $S_K$  表示自定义源项;  $\sigma_\varepsilon$  表示  $\varepsilon$  方程普朗特常数;  $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{1\varepsilon}$  和  $C_{3\varepsilon}$  均为常数;  $S_\varepsilon$  表示自定义源项。

气体扩散系数的数值大小与温度、浓度以及压强相关, 通常采用文献[30]提出的半经验公式进行计算, 如式(7)所示。

$$D = \frac{0.0101T^{1.75} \sqrt{\frac{1}{M_A} - \frac{1}{M_B}}}{p \left[ \left( \sum v_A \right)^{\frac{1}{3}} + \left( \sum v_B \right)^{\frac{1}{3}} \right]^2} \quad (7)$$

式中:  $D$  为气体扩散系数;  $M_A$ 、 $M_B$  分别为  $\text{SF}_6$

和空气的摩尔质量;  $p$  为气体的总压;  $v_A$ 、 $v_B$  分别为  $\text{SF}_6$  和空气的分子扩散体积。计算所用  $\text{SF}_6$  在空气中的扩散系数  $D$  为  $0.944 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

## 2.2.2 模型简化假设

本文为模拟 GIL 管道发生  $\text{SF}_6$  气体大面积泄漏的排除全过程, 综合考虑实际情况及计算量的限制, 作出如下计算假设。

1)  $\text{SF}_6$  气体与空气均为理想气体, 两者不发生化学反应。

2) 由于管廊下半部分与上半部分 GIL 腔体不连通, 对于廊道内泄漏气体的扩散分布无影响, 因此本文仅对管廊上半部分进行建模, 且不考虑管廊内其他结构的影响。

3) 取管廊内壁为模型壁面, 内径 10.5 m, 将 GIL 管道简化为等直径圆柱, 外径 0.9 m, 泄漏口设置在 GIL 表面易发生泄漏的位置即连接处。

4) 仿真中仅考虑管廊内部扩散情况, 不考虑 GIL 管道内部区域。

5) 实际隧道最低处的坡度仅 0.5%, 因此不考虑坡度的影响。

## 2.2.3 模型参数及边界条件

基于  $\text{SF}_6$  气体泄漏机理及泄漏排除方案得到以南岸发生泄漏为例, 事故泄漏考虑一个气室全部泄漏,  $Q_{\text{leak}}$  为单个气室单次泄漏的  $\text{SF}_6$  体积即  $350 \text{ m}^3$ 。  $L$  为建立的管廊模型总长度即 358 m, 管廊出口即为隧道最低点,  $x_{\text{leak}}$  为泄漏口与模型入口的距离即 25 m, 选取最上方的 GIL 管道正下方发生泄漏。设置 3 组位置不同的排风断面, 均位于管廊底部且垂直排列的三相 GIL 管道正下方, 断面形状为边长为 700 mm 的正方形, 三组断面保持 100 m 的间隔距离。  $x_1$  为一对断面 1 与模型出口的距离即 325 m,  $x_2$  为一对断面 2 与模型入口的距离即 125 m,  $x_3$  为一对断面 3 与模型入口的距离即 225 m。模型建立如图 4 所示。

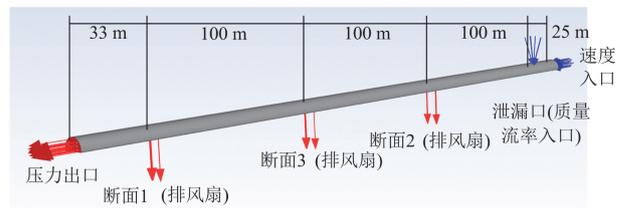


图 4 仿真模型及边界条件示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the simulated model with boundary conditions

结合本文研究内容和物理过程, 设置边界条件如下: 管廊一侧边界面为压力出口, 出口压强

$P_{out} = 0.1 \text{ MPa}$ ，用红色及箭头表示；设管廊另一侧边界为速度入口，用蓝色及箭头表示；设泄漏口为质量流率入口，用蓝色及箭头表示；其余壁面均为无滑移的静止壁面。

依据项目实际情况分析， $\text{SF}_6$  传感器在管廊内部为间隔 50 m 采用 S 形安装，因此假设泄漏发生在两个间隔 50 m 的传感器中间位置，可以使得传感器监测到异常情况的时间最长，观测到的变化更具显著性。 $x_{\text{sense}}$  为假设传感器与模型入口的距离为 50 m 处的管廊底部，位于垂直排列的三相 GIL 管道下方，设置一个监控点监控模拟过程中  $\text{SF}_6$  传感器对  $\text{SF}_6$  气体浓度的数值变化。

为了更准确地观察模拟结果及变化趋势，本文采用了 3 种不同方向截面的  $\text{SF}_6$  气体体积分数云图来观察扩散情况，分别是与底面平行的横断面截面、与底面垂直且与出入口垂直的纵断面截面和与底面

垂直且与出入口平行的泄漏口截面，以便从多个角度全面分析  $\text{SF}_6$  气体的扩散现象。

### 3 大面积泄漏时排除全过程模拟

图 5 为本文所构建的面向 GIL 管廊  $\text{SF}_6$  气体泄漏与排除的数字孪生系统虚实互动框架，依据真实空间中获取的管廊实体信息(如 GIL 管廊三维图纸、扩散气体参数、排风口及通风策略等)以及传感器部署位置信息，在虚拟空间中还原出管廊孪生体模型，为后续泄漏场景编排与全过程推演提供场景约束。在虚拟空间中，多场景下管廊气体泄漏全过程特征分析为系统提供数力资源支撑，同时结合动态实时监测数据，使得管廊孪生体可以对接大数据分析手段，其诊断、推演结果辅助实际管廊运行决策、优化，实现对管廊运行的闭环控制。

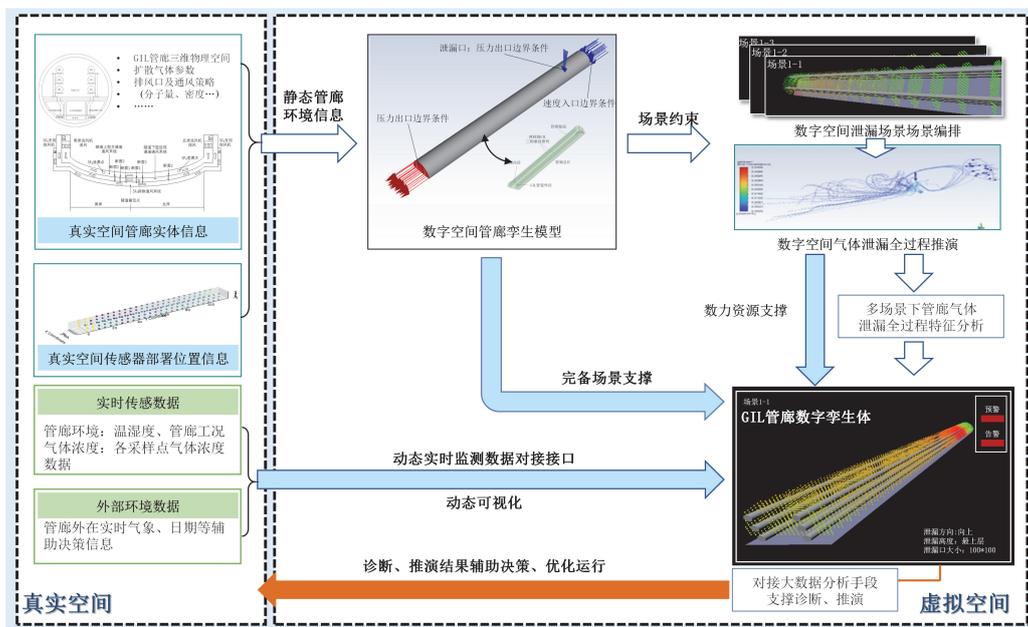


图 5 面向 GIL 管廊气体泄漏与排除的数字孪生系统虚实互动框架

Fig. 5 Digital twin system for gas leakage and elimination in GIL utility tunnels

此模型框架下，孪生系统运行的核心为在数字空间中对大面积泄漏时排除全过程模拟推演，以及对推演过程中的数据行为进行分析解读。本文基于上文所提出的气体扩散模型与约束条件，构建如图 6 所示的管廊气体一般性大面积泄漏时排除全过程模拟流程，并且以苏通管廊为实际案例进行实际仿真分析。

#### 3.1 大面积泄漏时排除全过程模拟

##### 3.1.1 泄漏开始阶段(0~5 s)

泄漏开始阶段的边界条件设置为：模型入口处

的速度入口边界条件设置为 0 m/s，即假设此时主通道风机均处于关闭状态；三组断面均处于关闭状态；泄漏口的泄漏速度为  $6 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

由图 7 可知，在泄漏开始时，由于  $\text{SF}_6$  气体在 GIL 管道内处于加压状态，因而当管道破裂而发生大面积泄漏时，在受到压力的作用下，会发生喷射现象，符合  $\text{SF}_6$  扩散的起始喷射阶段。待喷射进入管廊内的  $\text{SF}_6$  气体的初始动能被消耗后， $\text{SF}_6$  重气的特性起到了主导  $\text{SF}_6$  气体扩散的作用，开始逐渐下沉，向底部沉积，该阶段属于重力下沉阶段。当  $\text{SF}_6$

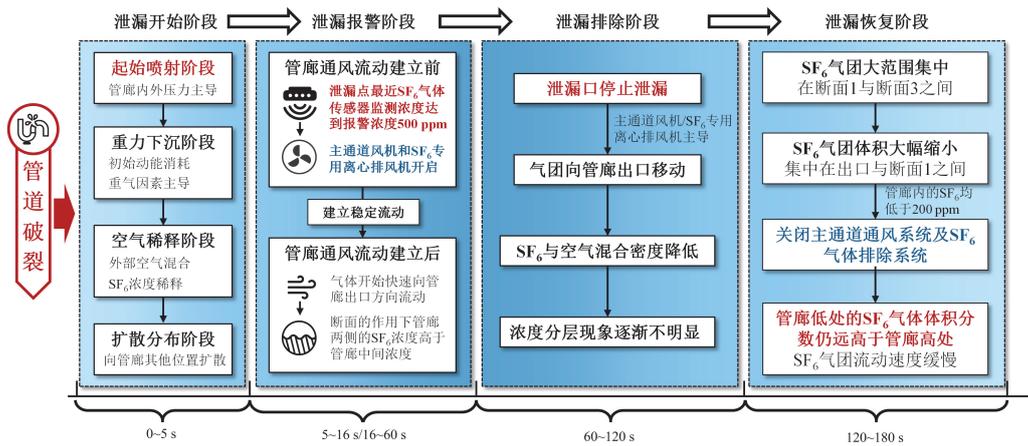
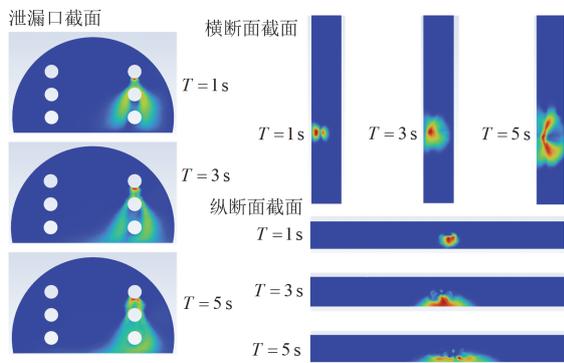


图6 大面积泄漏时排除全过程模拟流程图

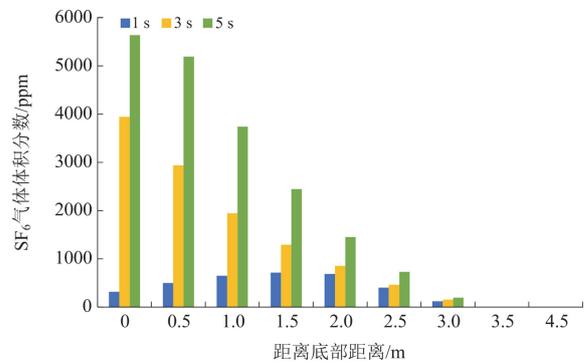
Fig. 6 Flowchart of the entire process simulation for handling large-scale leaks

图7 泄漏开始阶段不同时刻各截面 SF<sub>6</sub> 体积分数云图对比Fig. 7 Comparison of SF<sub>6</sub> volume fraction contours of each section at different times at the beginning stage of leakage

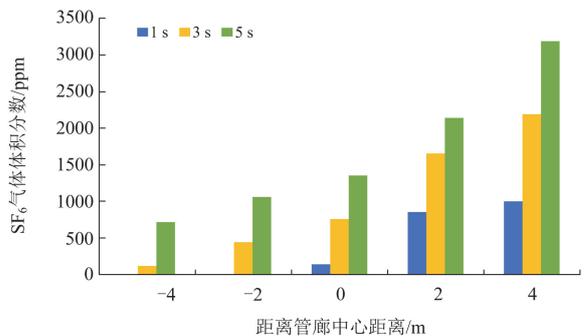
气体在下沉的过程中, 不断与外部空气发生混合, 逐渐稀释了 SF<sub>6</sub> 气体的浓度, 该阶段被称为空气稀释阶段。最后的扩散分布阶段即为下沉到管廊底部的 SF<sub>6</sub> 气体在受到泄漏口大量 SF<sub>6</sub> 气体持续喷射的作用下, 逐渐向管廊的其他位置扩散。

由管廊纵断面方向、横断面方向和泄漏口截面的 SF<sub>6</sub> 气体体积分数云图随时间变化对比图可以看出 SF<sub>6</sub> 气体泄漏扩散现象与理论基本一致。从泄漏口截面 SF<sub>6</sub> 气体体积分数云图可以看出, SF<sub>6</sub> 气体发生泄漏后, 由于压力的作用, 向管廊喷射出射流, 具有较大的初始动能; 在接触到中间的 GIL 管道后, 动能逐渐被消耗, 此时重力起到了主导作用, SF<sub>6</sub> 气体沿着 GIL 管道继续下沉直到管廊底部。从横断面和纵断面 SF<sub>6</sub> 气体体积分数云图中可以看出, 管廊内没有风机作用时, SF<sub>6</sub> 气体沿进出口方向的流动缓慢, 主要是由于气体在底部积聚, 导致管廊低处的 SF<sub>6</sub> 气体体积分数明显高于高处, 泄漏口一侧的体积分数也显著高于对侧。

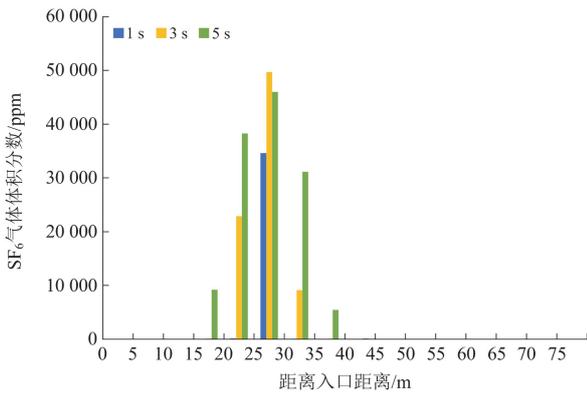
通过对比图片沿各方向 SF<sub>6</sub> 平均体积分数可以看出: 图 8(a)沿横断面方向, 发生泄漏 1 s 时的 SF<sub>6</sub> 体积分数最高的区域在距离底部 2 m 处, 发生泄漏 2 s 后的 SF<sub>6</sub> 体积分数随着高度的降低而逐渐增加, 这符合 SF<sub>6</sub> 气体的扩散过程和重气性质。图 8(b)沿纵断面方向, 3 个不同时间点的 SF<sub>6</sub> 气体体积分数均随着距离泄漏点的距离增加而逐渐降低, 且总体浓度随着时间的增加而增加。图 8(c)沿泄漏口截面方向, SF<sub>6</sub> 气体体积分数在泄漏口附近区域的浓度明显高于其他区域, 且随着时间的增加, 扩散范围越广, 浓



(a) 距管廊底部不同高度的横断面



(b) 距管廊中心不同距离的纵断面



(c) 距管廊入口不同距离的泄漏口截面

图 8 泄漏开始阶段不同时刻各方向截面 SF6 平均体积分数对比

Fig. 8 Comparison of the average volume fraction of SF6 in all directions at different times at the beginning of the leakage

度越高，均符合 SF6 扩散规律。

### 3.1.2 泄漏报警阶段(5~16 s、16~60 s)

#### 1) 管廊通风流动建立前

根据监测点的数据得到，在管廊发生 SF6 气体泄漏的 5 s 后，距离泄漏点最近的 SF6 气体传感器监测到 SF6 浓度达到 500 ppm 报警浓度。此时，主通道 3 台风机和 SF6 气体排除系统 4 台 SF6 专用离心排风机全部开启。根据文献[25]可知，风机开启延时需要 1 s，平稳运行的时间需要 10 s，因此可以计算得出从泄漏发生到管廊建立稳定流动总共所需 16 s 的时间。

从图 9 泄漏口截面 SF6 气体体积分数云图可以看出，在监测处报警到建立平稳流动的时间内，泄漏口截面的情况较稳定。从横断面 SF6 气体体积分数云图可以看出，在风机平稳运行前，SF6 气体沿进出口方向的流动较缓慢，在大量 SF6 气体泄漏进入管廊后，经过 10 s 后，SF6 气团的范围逐渐扩散到距离泄漏点前后约 20 m，直到风机平稳运行后 SF6 已经扩散到前后约 30 m，同时可以看出泄漏口一侧的 SF6 气体体积分数仍远高于对侧，到 16 s 时这种现象逐渐不明显。从纵断面 SF6 气体体积分数云图可以看出，管廊低处的 SF6 气体体积分数仍远高于管廊高处，且 SF6 气团流动速度缓慢。

通过对比图片沿各方向 SF6 平均体积分数可以看出：图 10(a)沿横断面方向，发生泄漏 5~16 s 后的 SF6 体积分数随着高度的降低而逐渐增加，这符合 SF6 的扩散过程和重气性质。图 10(b)沿纵断面方向，泄漏发生 5 s 后的 SF6 气体体积分数随着距离泄

漏点的距离增加而逐渐降低，然而在泄漏发生 10 s 以后，出现了两边浓度高而中间低的现象。图 10(c)沿泄漏口截面方向，SF6 气体体积分数在泄漏口附近区域的浓度明显高于其他区域，且随着时间的增加，扩散范围越广，浓度越高，均符合 SF6 的扩散规律。

#### 2) 管廊通风流动建立后

泄漏报警阶段的边界条件设置为：模型速度入口处的边界条件设置为 5 m/s，即 3 台主通道风机全

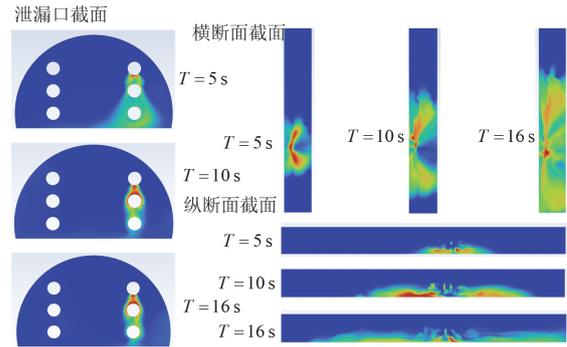
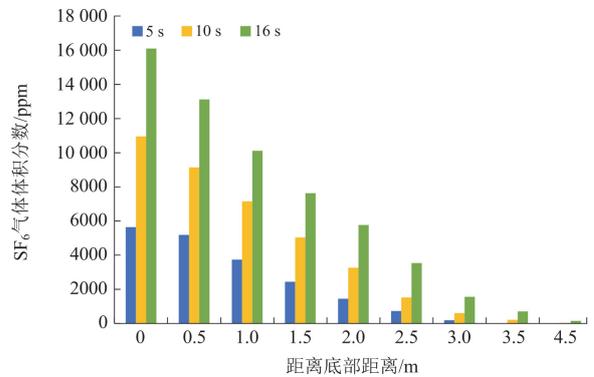
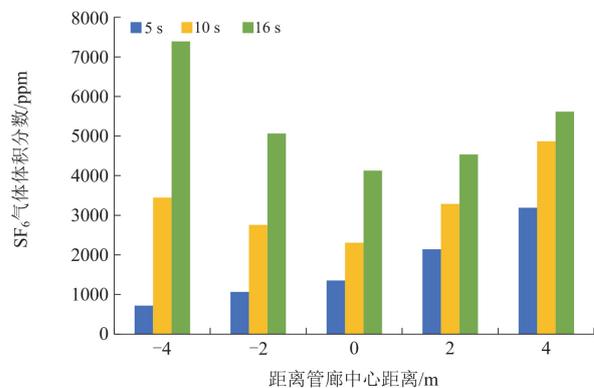


图 9 泄漏报警阶段不同时刻各截面 SF6 体积分数云图对比

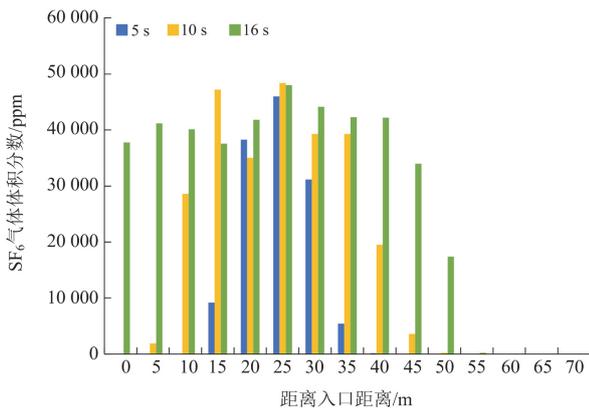
Fig. 9 Comparison of SF6 volume fraction contours of each section at different times at the alarm stage of leakage



(a) 距管廊底部不同高度的横断面



(b) 距管廊中心不同距离的纵断面



(c) 距管廊入口不同距离的泄漏口截面

图 10 泄漏报警阶段不同时刻各方向截面 SF<sub>6</sub> 平均体积分数对比

Fig. 10 Comparison of the average volume fraction of SF<sub>6</sub> in all directions at different times at the alarm stage of the leakage

开达到的最大风量；断面 1 和断面 2 开启，风量为 4000 m<sup>3</sup>/h，断面 3 保持关闭状态，泄漏口速度保持不变。

由图 11 可知，泄漏报警阶段的 SF<sub>6</sub> 扩散主要受到主通道风机开启和底部 SF<sub>6</sub> 排除通风系统开启的影响。在泄漏开始到风机平稳运行前，SF<sub>6</sub> 气体沿管廊方向的扩散程度基本一致，当风机平稳运行后，SF<sub>6</sub> 气体开始快速向管廊出口方向流动，同时，由于一对断面的作用，使得管廊两侧的 SF<sub>6</sub> 浓度高于管廊中间的 SF<sub>6</sub> 浓度。

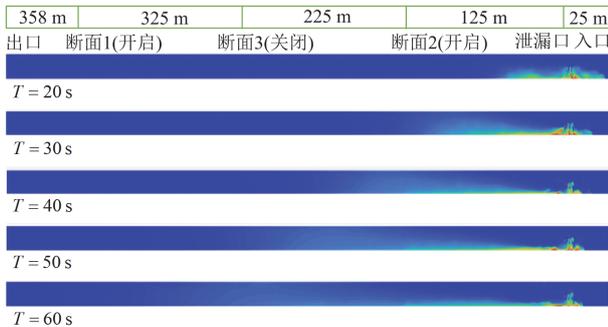


图 11 泄漏报警阶段不同时刻纵断面 SF<sub>6</sub> 体积分数云图对比  
Fig. 11 Comparison of SF<sub>6</sub> volume fraction contours in the longitudinal section at different times at the alarm stage of leakage

从图 11 的纵断面 SF<sub>6</sub> 气体体积分数变化图可以看出，在重力作用下，管廊低处的 SF<sub>6</sub> 浓度高于高处。随着时间的增加，SF<sub>6</sub> 与空气混合，浓度分层逐渐不明显，尤其在断面 2 之后的区域。泄漏 20 s 后，风机平稳运行 4 s，SF<sub>6</sub> 积聚在泄漏口前后约 30 m 范围内；30 s 后，SF<sub>6</sub> 向出口方向扩散约

50 m，达到断面 2 位置；60 s 后，SF<sub>6</sub> 到达距入口 275 m 的位置，距断面 1 约 50 m。

从图 12 的横断面 SF<sub>6</sub> 气体体积分数变化图可以看出，在排除系统作用下，SF<sub>6</sub> 以 5 m/s 速度向出口扩散，管廊两侧浓度高于中心，泄漏侧浓度高于对侧，但 60 s 后这种现象逐渐减弱。

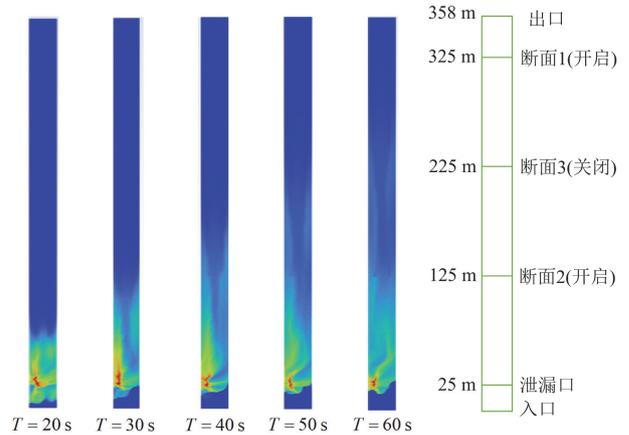


图 12 泄漏报警阶段不同时刻横断面 SF<sub>6</sub> 体积分数云图对比  
Fig. 12 Comparison of SF<sub>6</sub> volume fraction contours in the cross section at different times at the alarm stage of leakage

由图 13 管廊内不同时刻泄漏口截面 SF<sub>6</sub> 气体平均体积分数对比图可以看出，在管廊通风流动建立后，管廊内 SF<sub>6</sub> 气体体积分数高区位置随时间的增长逐渐向出口方向移动。在泄漏发生 20 s 后，在距离入口 125 m 以上的区域内的 SF<sub>6</sub> 气体浓度低于 200 ppm 预警浓度，即此时的安全距离最少为 100 m，且以 5 m/s 的速度向出口方向扩散，到 SF<sub>6</sub> 全部泄漏完毕即 60 s，泄漏口往出口方向区域内的

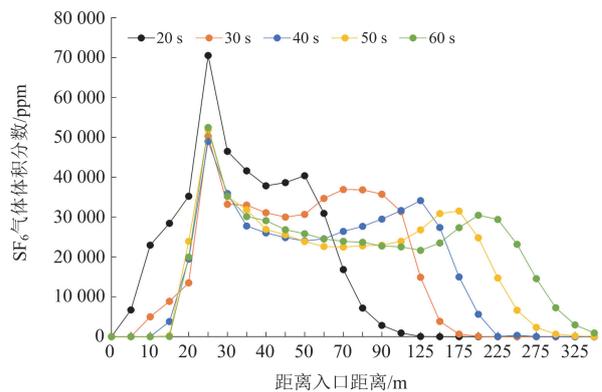


图 13 泄漏报警阶段不同时刻泄漏口截面 SF<sub>6</sub> 平均体积分数对比

Fig. 13 Comparison of the average volume fraction of SF<sub>6</sub> in the leak mouth cross-section at different times at the alarm stage of the leakage

SF<sub>6</sub> 气体浓度均高于 500 ppm 报警浓度，不满足人员进入条件，反之往入口方向距离泄漏口 10 m 以内的区域内 SF<sub>6</sub> 气体浓度均低于 200 ppm 预警浓度，满足人员进入条件，此时若有工作人员处于管廊内，应向迎风方向进行撤离。

### 3.1.3 泄漏排除阶段(60~120 s)

根据泄漏口的泄漏速度计算出一个气室的 SF<sub>6</sub> 气体全部泄漏所需时间为 60 s，此后进入泄漏排除阶段。此时的边界条件设置为：模型入口处的速度保持不变；3 组断面的开启状态保持不变；泄漏口的速度为 0 m/s，即 1 个气室的 SF<sub>6</sub> 气体已经全部泄漏。

由图 14 管廊纵断面方向 SF<sub>6</sub> 气体体积分数云图随时间变化对比图可以看出，在泄漏口停止泄漏 SF<sub>6</sub> 气体后，管廊内的 SF<sub>6</sub> 气体扩散分布情况主要受到主通道风机和 SF<sub>6</sub> 专用离心排风机的影响。在泄漏发生 70 s，即停止泄漏 10 s 后，SF<sub>6</sub> 气团明显向管廊出口处移动，逐渐远离管廊入口，移动速度大约是 5 m/s，与主通道风机速度基本一致。并且，管廊低处的 SF<sub>6</sub> 气体浓度依然高于管廊高处的 SF<sub>6</sub> 气体浓度，但随着泄漏时间的增加，SF<sub>6</sub> 气体与空气混合后密度降低，管廊高低处的浓度分层现象逐渐不明显，并且越靠近管廊出口处的分层现象越不明显。

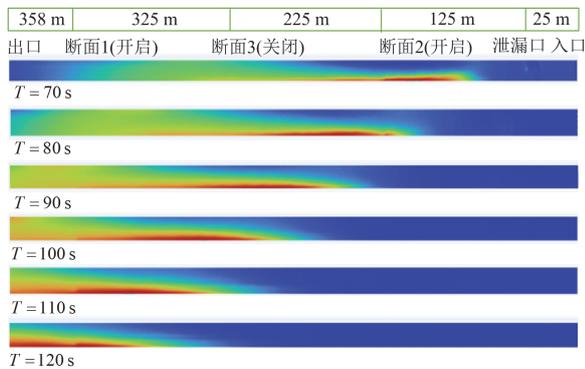


图 14 泄漏排除阶段不同时刻纵断面 SF<sub>6</sub> 气体体积分数云图对比  
Fig. 14 Comparison of SF<sub>6</sub> volume fraction contours in the longitudinal section at different times at the exclusion stage of leakage

由图 15 管廊横断面方向 SF<sub>6</sub> 气体体积分数云图随时间变化对比可以看出，在 SF<sub>6</sub> 气体排除系统的作用下，SF<sub>6</sub> 气体向管廊出口方向以 5 m/s 的速度扩散，管廊两侧的 SF<sub>6</sub> 气体浓度高于管廊中心的 SF<sub>6</sub> 气体浓度。同时，出现了在断面 1、2 附近的 SF<sub>6</sub> 气体体积分数较高的现象。

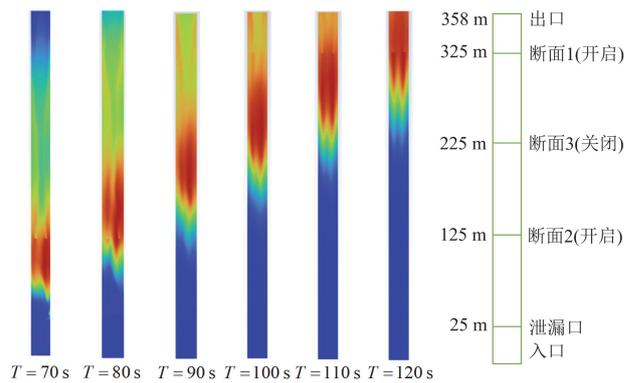


图 15 泄漏排除阶段不同时刻横断面 SF<sub>6</sub> 气体体积分数云图对比  
Fig. 15 Comparison of SF<sub>6</sub> volume fraction contours in the cross section at different times at the exclusion stage of leakage

由图 16 管廊内不同垂直截面 SF<sub>6</sub> 气体平均体积分数变化可以看出，在 SF<sub>6</sub> 气体全部泄漏后，主通道的风机和 SF<sub>6</sub> 专用离心排风机依旧起到主导作用，管廊内 SF<sub>6</sub> 气体体积分数高区位置随时间的增长逐渐向出口方向移动。在泄漏发生 70 s，即停止泄漏 10 s 后，管廊内各区域的 SF<sub>6</sub> 气体浓度仍均高于 500 ppm 报警浓度，不适宜人员进入。在泄漏发生 90 s，即停止泄漏 30 s 后，距离管廊入口 40 m 内的区域 SF<sub>6</sub> 气体浓度低于 500 ppm 报警浓度，10 m 内的区域低于 200 ppm 预警浓度。在泄漏发生 120 s，即停止泄漏 60 s 后，距离管廊入口 175 m 内的区域 SF<sub>6</sub> 气体浓度低于 500 ppm 报警浓度，80 m 内的区域低于 200 ppm 预警浓度。此时若有工作人员处于管廊内，仍应向迎风方向撤离。

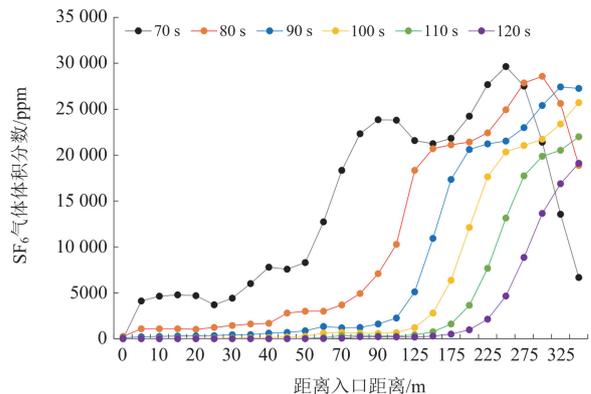


图 16 泄漏排除阶段不同时刻泄漏口截面 SF<sub>6</sub> 平均体积分数对比  
Fig. 16 Comparison of the average volume fraction of SF<sub>6</sub> in the leak mouth cross-section at different times at the exclusion stage of the leakage

### 3.1.4 泄漏恢复阶段(120~180 s)

根据监测数据, 泄漏口停止泄漏 60 s 后(即事故发生 120 s 后), 第一报警点的  $\text{SF}_6$  浓度低于 500 ppm, 进入泄漏恢复阶段。此时边界条件设置为: 入口速度保持不变; 断面 1 和断面 3 开启, 风量为  $4000 \text{ m}^3/\text{h}$ , 断面 2 关闭, 泄漏口速度为 0。

从图 17 的横断面图可见, 120 s 后,  $\text{SF}_6$  气团集中在断面 1 到断面 3 之间; 150 s 后,  $\text{SF}_6$  气团缩小并集中在出口到断面 1 之间; 180 s 后,  $\text{SF}_6$  浓度均低于 200 ppm 后关闭通风系统, 少量  $\text{SF}_6$  残留在出口附近。纵断面图显示, 管廊低处  $\text{SF}_6$  浓度仍远高于高处, 且流动缓慢。

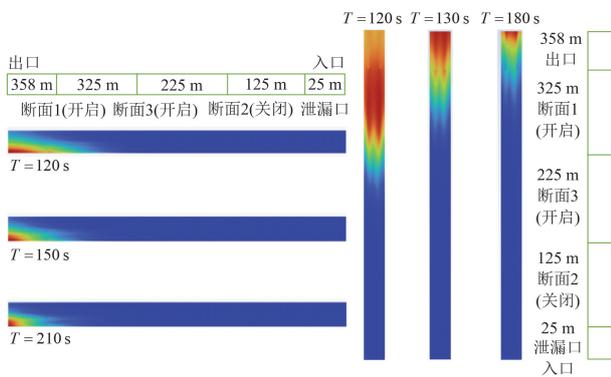


图 17 泄漏恢复阶段不同时刻纵、横断面  $\text{SF}_6$  体积分数云图对比

Fig. 17 Comparison of  $\text{SF}_6$  volume fraction contours in the cross and longitudinal sections at different times at the recovery stage of leakage

## 3.2 气体泄漏全过程风险评估

根据  $\text{SF}_6$  气体大面积泄漏时的排除全过程数值模拟, 可以分析得到如下结果。

1) 泄漏开始阶段: 此阶段由  $\text{SF}_6$  发生泄漏开始持续到第一个传感器监测的  $\text{SF}_6$  气体浓度达到 500 ppm 报警浓度结束, 持续时间约 5 s。  $\text{SF}_6$  气体扩散现象与理论扩散过程相符, 大部分泄漏气体集中分布在泄漏口前后 10 m 内, 且管廊底部  $\text{SF}_6$  气体浓度远高于顶部, GIL 管道泄漏口一侧  $\text{SF}_6$  气体浓度远高于对侧区域。

2) 泄漏报警阶段: 此阶段由第一个传感器监测的  $\text{SF}_6$  气体浓度达到 500 ppm 报警浓度开始, 持续到一个气室的  $\text{SF}_6$  气体全部泄漏后结束, 持续时间约 55 s。其中由报警到管廊建立稳定持续的通风流动需要约 11 s。在管廊通风流动建立前,  $\text{SF}_6$  气体扩散到距离泄漏口前后约 25 m 内, 管廊底部  $\text{SF}_6$  气体浓度仍远高于顶部, 但逐渐出现管廊两侧  $\text{SF}_6$  气体浓度高于中间的现象; 在管廊通风流动建立后, 在

主通道风机和  $\text{SF}_6$  气体排除专用离心机的作用下,  $\text{SF}_6$  气体开始以 5 m/s 的速度快速向管廊出口处流动, 在 60 s 时部分  $\text{SF}_6$  气体已经距离泄漏口约 250 m。

3) 泄漏排除阶段: 此阶段由  $\text{SF}_6$  气体全部泄漏后开始持续到第一报警点的  $\text{SF}_6$  浓度降低到 200 ppm 后结束, 持续时间约 60 s。在主通道风机和  $\text{SF}_6$  气体排除专用离心机的作用下,  $\text{SF}_6$  气体继续以 5 m/s 的速度快速向管廊出口处流动, 部分  $\text{SF}_6$  气体由排风断面 1、断面 2 进入  $\text{SF}_6$  专用排风腔, 部分气体继续向管廊出口处流动, 不同方向的  $\text{SF}_6$  气体分布特点与前一阶段相似。

4) 泄漏恢复阶段: 此阶段由第一报警点的  $\text{SF}_6$  传感器浓度降低到 200 ppm 开始, 持续到管廊内部所有  $\text{SF}_6$  传感器浓度均降低到 200 ppm 后结束, 持续时间约 60 s。此时开启的断面为距离管廊最低点最近的断面 1 和断面 3, 只有极少的  $\text{SF}_6$  仍残留在出口附近即管廊最低处。

## 3.3 管廊气体泄漏下人员撤离建议

1) 当管廊发生  $\text{SF}_6$  气体泄漏事故时, 被困人员应向迎风处进行安全撤离。

2) 管廊内的被困人员应沿着管廊中线进行快速撤离, 尽量避免从管廊两侧区域撤离。

3) 管廊内的被困人员应尽量保持直立姿势撤离, 避免弯腰低头。

4) 在管廊发生  $\text{SF}_6$  泄漏事故后的 60 s 内, 禁止人员进入的危险区域范围为从泄漏口迎风方向 25 m 到顺风方向 300 m; 泄漏停止后, 危险区域将以 5 m/s 的速度向顺风方向移动。

## 4 结论

本文围绕苏通 GIL 综合管廊展开研究, 研究通过在虚拟空间中构建长距离 GIL 管廊的数字孪生体模型, 模拟  $\text{SF}_6$  气体泄漏扩散情况, 并推演泄漏排除系统的实施效果, 从而实现了对泄漏全过程的风险评估。结果显示, 所构建的数字孪生模型能够全面展示  $\text{SF}_6$  气体泄漏的扩散和排除过程, 并据此提出了人员安全撤离的指导方案。这种通过虚拟空间中的数字孪生体推演大型设施的非常态及潜在风险的方法, 可以在低成本、全场景、全流程的基础上有效指导现实工程建设与运行, 为未来风险评估与预警提供一种新的策略。

本文构建的数字孪生模型尽管在模拟  $\text{SF}_6$  气体泄漏扩散和排除过程中展现了全过程模拟的完备性, 但仍存在一些待改进点。首先, 模型所用的参数和环境设定存在理想化倾向, 未能完全模拟现实条件下的复杂变化。其次, 模型在不同气候和突发

事件下的可靠性和精度尚需进一步验证和提升。下一步研究将致力于以下几个方面：首先，进一步优化和校准数字孪生模型，引入更多的实测数据和先进算法，提高其准确性和可靠性。其次，在不同气候条件和突发事件下进行更多模拟实验，验证模型的普适性和响应能力。最后，在虚拟空间中反复推演，获取高覆盖面的多场景全过程样本数据，以对接后续的人工智能算法、高维统计等数据分析手段，推进管廊的状态检修能力与数字化转型。

### 参考文献

- [1] 刘墨, 孙庆凯, 许泽凯, 等. 能源互联网中的数字孪生技术体系、应用与挑战[J]. 中国电力, 2024, 57(1): 230-243.  
LIU Zhao, SUN Qingkai, XU Zekai, et al. System, applications and challenges of digital twin technology in energy internet[J]. Electric Power, 2024, 57(1): 230-243.
- [2] YAO Z, LI D, LI Z, et al. Relay protection mirror operation technology based on digital twin[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(4): 913-926.
- [3] 王翔宇, 陈武晖, 郭小龙, 等. 发电系统数字化研究综述[J]. 发电技术, 2024, 45(1): 120-141.  
WANG Xiangyu, CHEN Wuhui, GUO Xiaolong, et al. Review of research on the digitalization of power generation system[J]. Power Generation Technology, 2024, 45(1): 120-141.
- [4] 章耀耀, 侯勇, 叶海, 等. 继电保护数字孪生技术应用展望[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(12): 178-187.  
ZHANG Yaoyao, HOU Yong, YE Hai, et al. Application prospect for relay protection digital twin technology[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(12): 178-187.
- [5] 邓祥力, 廖玥琳, 朱宏业, 等. 基于数字孪生模型电流动态时间规整差异度的变压器早期故障辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(12): 156-167.  
DENG Xiangli, LIAO Yuelin, ZHU Hongye, et al. Early fault identification for a transformer based on current dynamic time warping difference of a digital twin model[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(12): 156-167.
- [6] 赵科, 王静君, 刘通, 等. 直流 GIL 绝缘设计及局部放电检测研究进展[J]. 电力工程技术, 2017, 36(5): 104-108.  
ZHAO Ke, WANG Jingjun, LIU Tong, et al. A review of insulation design and partial discharge detection of DC gas insulated line[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(5): 104-108.
- [7] 黎斌, 刘琳, 梁作栋, 等. 特高压直流 GIL 运行可靠性设计与研究[J]. 高压电器, 2024, 60(3): 69-79.  
LI Bin, LIU Lin, LIANG Zuodong, et al. Design and research on operation reliability of UHV DC GIL[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(3): 69-79.
- [8] 孙涛, 陈福广. 安全为计主动出击——南通海事全力保障苏通 GIL 管廊工程建设[J]. 中国海事, 2017(3): 68-69.  
SUN Tao, CHEN Fuguang. Take the initiative for safety purpose—Nantong MSA endeavor to secure the construction of Sutong GIL pipe rack project[J]. China Maritime Safety, 2017(3): 68-69.
- [9] 刘泽洪, 王承玉, 路书军, 等. 苏通综合管廊工程特高压 GIL 关键技术要求[J]. 电网技术, 2020, 44(6): 2377-2385.  
LIU Zehong, WANG Chengyu, LU Shujun, et al. Key technical parameters of UHV GIL in sutong utility tunnel project[J]. Power System Technology, 2020, 44(6): 2377-2385.
- [10] 董杰, 杨博, 伊国鑫, 等. 电力环保型混合绝缘气体配气方法优化[J]. 中国电力, 2024, 57(6): 102-109.  
DONG Jie, YANG Bo, YI Guoxin, et al. Distribution optimization method for power environment-friendly mixed insulation gas[J]. Electric Power, 2024, 57(6): 102-109.
- [11] BENATO B, MARIO C D, KOCH H. High capability applications of long gas-insulated lines in structures[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(1): 619-626.
- [12] 吴天京, 代攀, 闫晔, 等. 新一代智能输变电技术标准体系研究[J]. 供用电, 2020, 37(3): 16-21.  
WU Tianjing, DAI Pan, YAN Ye, et al. Research on new generation technical standard system of smart transmission and transformation[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(3): 16-21.
- [13] 贺毅, 张靖, 张英, 等. 基于流体力学的 SF6 电气设备中 SO2 和 H2S 气体扩散特性计算[J]. 电力大数据, 2021, 24(8): 50-58.  
HE Yi, ZHANG Jing, ZHANG Ying, et al. Calculation of SO2 and H2S gas diffusion characteristics in SF6 electrical equipment based on fluid mechanics study[J]. Power Systems and Big Data, 2021, 24(8): 50-58.
- [14] 林敏, 杨景刚, 贾勇勇, 等. 电气设备 SF6 气体检漏技术研究与应用[J]. 电力工程技术, 2014, 33(4): 27-29.  
LIN Min, YANG Jinggang, JIA Yongyong, et al. Research and application on detection technology of SF6 leak in electrical equipment[J]. Electric Power Engineering Technology, 2014, 33(4): 27-29.
- [15] 赵科, 丁然, 李洪涛, 等. 基于热特性差异的 GIL 故障辨识研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(4): 13-20.  
ZHAO Ke, DING Ran, LI Hongtao, et al. Research on GIL fault identification based on thermal characteristic difference[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(4): 13-20.

- [16] 王一鹏, 梁丁丁, 石磊, 等. 基于 CFD 的 SF<sub>6</sub> 气体绝缘设备泄漏模拟及防护措施[J]. 安防技术, 2017, 5(2): 15-21.  
WANG Yipeng, LIANG Dingding, SHI Lei, et al. Leakage simulation of SF<sub>6</sub> gas insulating equipment based on CFD and protective measure[J]. Journal of Security and Safety Technology, 2017, 5(2): 15-21.
- [17] 陈昱同, 郭建宏, 刘杨, 等. 220 kV 某 GIS 盆式绝缘子漏气原因分析及处理措施[J]. 高压电器, 2015, 51(12): 196-200.  
CHEN Yutong, GUO Jianhong, LIU Yang, et al. Leakage analysis and countermeasures for a type of 220 kV GIS disc insulators[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(12): 196-200.
- [18] 许加凯, 王健, 刘勇利, 等. 一起组合电器波纹管 SF<sub>6</sub> 漏气缺陷分析及处理[J]. 电气技术, 2016(3): 116-119.  
XU Jiakai, WANG Jian, LIU Yongli, et al. Defect analysis and treatment of SF<sub>6</sub> gas leakage in a gas-insulated switchgear bellows[J]. Electrical Engineering, 2016(3): 116-119.
- [19] 徐亮, 张高爽, 龙艳, 等. 特高压管廊 GIL 热特性的数值模拟[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(7): 177-184.  
XU Liang, ZHANG Gaoshuang, LONG Yan, et al. Numerical simulation of thermal characteristics of gas-insulated transmission lines in UHV pipe gallery[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(7): 177-184.
- [20] CHAVEZ M, HAJRA B, STATHOPOULOS T. Near-field pollutant dispersion in the built environment by CFD and wind tunnel simulations[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2011, 99(4): 330-339.
- [21] SANTOS J M, MAVROIDIS I, REIS N C, et al. Experimental investigation of outdoor and indoor mean concentrations and concentration fluctuations of pollutants[J]. Atmospheric Environment, 2011, 45(36): 6534-6545.
- [22] 关为民, 卞超, 谭婷月, 等. 苏通 GIL 综合管廊 SF<sub>6</sub> 气体泄漏分布特性数值模拟研究[J]. 高压电器, 2020, 56(11): 102-110.  
GUAN Weimin, BIAN Chao, TAN Tingyue, et al. Numerical simulation study on distribution characteristics of SF<sub>6</sub> gas leakage in Suzhou-Nantong GIL integrated gallery[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(11): 102-110.
- [23] 陈邦国, 李峰, 赵文彬. GIL 廊道内 SF<sub>6</sub> 气体泄漏扩散及风机安装优化研究[J]. 水电能源科学, 2020, 38(6): 177-180, 168.  
CHEN Bangguo, LI Feng, ZHAO Wenbin. Study on SF<sub>6</sub> gas leakage diffusion and fan installation optimization in GIL gallery[J]. Water Resources and Power, 2020, 38(6): 177-180, 168.
- [24] 孙岗, 李浩翥, 张鹏飞, 等. 苏通 GIL 综合管廊 SF<sub>6</sub> 气体排除方案研究[J]. 电力勘测设计, 2020(10): 66-70.  
SUN Gang, LI Haozhuo, ZHANG Pengfei, et al. Study on SF<sub>6</sub> gas exclusion scheme of Sutong GIL comprehensive pipe gallery[J]. Electric Power Survey and Design, 2020(10): 66-67.
- [25] 肖国锋, 何娜萍. 特高压盾构管廊 SF<sub>6</sub> 泄漏模拟与通风系统优化[J]. 广东电力, 2021, 34(3): 122-129.  
XIAO Guofeng, CHEN Naping. SF<sub>6</sub> leakage simulation and design optimization of ventilation system in UHV shield tunnel[J]. Guangdong Electric Power, 2021, 34(3): 122-129.
- [26] 丁慧心. 地下水电站出线竖井中 SF<sub>6</sub> 泄漏扩散的实验与数值模拟分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- [27] 卞超, 关为民, 王国良, 等. 特高压 GIL 管廊竖井中 SF<sub>6</sub> 泄漏特性的数值模拟研究[J]. 高压电器, 2021, 57(1): 33-40.  
BIAN Chao, GUAN Weimin, WANG Guoliang, et al. Numerical simulation study on SF<sub>6</sub> leakage characteristics in shaft of UHV GIL pipe[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(1): 33-40.
- [28] 孔凡珺, 马径坦, 谌珉灏, 等. SF<sub>6</sub> 压力对 GIS 典型缺陷局部放电检测灵敏度的影响[J]. 电力工程技术, 2023, 42(3): 233-241.  
KONG Fanjun, MA Jingtan, CHEN Minhao, et al. Effect of SF<sub>6</sub> pressure on the sensitivity of partial discharge detection of typical defects in GIS[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(3): 233-241.
- [29] OHBA R, KOUCHI A. Validation of heavy and light gas dispersion models for the safety analysis of LNG tank[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2004, 17(6): 325-337.
- [30] 魏利军. 重气扩散过程的数值模拟[D]. 北京: 北京化工大学, 2000.

收稿日期: 2024-05-23; 修回日期: 2024-08-25

作者简介:

徐长福(1970—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为输变电状态监测信息管理与状态监测新技术的研究开发和推广应用; E-mail: xuchangfu2000@126.com

贺兴(1986—), 男, 通信作者, 博士, 副研究员, 研究方向为电力时空大数据分析 & 能源系统数字孪生技术。E-mail: hexing\_hx@126.com

(编辑 张颖)