

文章编号: 1671-6612 (2026) 02-226-07

基于通风网络的 输水管道检修期通风运行模式研究

韩远伟 毕海权 周远龙 王宏林 冯凌巍

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

【摘要】 地下深埋长距离输水管道检修期不当通风易引发气流短路和污染物滞留、威胁检修人员的安全。研究输水管道检修期多风机联合运行的通风网络模型及运行模式,对优化检修期通风系统运行具有重要意义。研究以实际输水管道为研究对象,基于通风网络理论,采用牛顿迭代法构建了检修期通风网络模型,通风网络模型与实测数据平均相对误差为9.89%,验证了模型准确性。在此基础上,研究了单管段(压入式、抽出式、混合式)及多管段检修通风运行模式。研究结果表明:通风网络模型可准确且快速地预测管道内气流分布,混合式通风模式下断面风速最高,可达到1.29m/s,且流场最稳定、断面风速最均匀且污染物排出效率最优;多管段检修可采用“单元化隔离”通风设计并可在通风单元两端增加送排风井数量可进一步加速污染物排出,研究成果可为输水管道检修通风方案制定提供参考。

【关键词】 输水管道;现场测试;通风网络;通风运行模式

中图分类号 TV554+.9/X169 文献标志码 A

Research on the Ventilation Operation Mode during the Maintenance Period of Water Conveyance Pipelines Based on the Ventilation Network

Han Yuanwei Bi Haiquan Zhou Yuanlong Wang Honglin Feng Lingwei

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

【Abstract】 Improper ventilation during the maintenance period of deeply buried long-distance water conveyance pipelines can lead to airflow short circuits and pollutant accumulation, posing a threat to the safety of maintenance personnel. Investigating ventilation network models and operation modes for the joint operation of multiple fans during maintenance is therefore of great significance for optimizing ventilation system operation. In this study, an actual water conveyance pipeline was taken as the research object. Based on ventilation network theory, a maintenance-period ventilation network model was established using the Newton-Raphson method, and its accuracy was validated against on-site measurement data, with an average relative error of 9.89%. On this basis, ventilation operation modes for single pipeline segments (press-in, exhaust, and hybrid modes) and multiple segments under maintenance were investigated. The results show that the ventilation network model can accurately and efficiently predict airflow distribution within the pipeline. Under the hybrid ventilation mode, the cross-sectional air velocity reaches a maximum of 1.29 m/s, exhibiting the most stable flow field, the most uniform velocity distribution, and the highest pollutant removal efficiency. For multi-segment maintenance, a “unitized isolation” ventilation design is recommended, and increasing the number of supply and

基金项目: 珠江三角洲水资源配置工程地下深埋长距离输水管道检修期通风系统性能研究项目
(编号: CD88-JS04-2023-0060)

作者简介: 韩远伟 (2001.07-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: hywsjtu@foxmail.com

通讯作者: 毕海权 (1974.12-), 男, 博士, 教授, E-mail: bhquan@163.com

收稿日期: 2025-10-31

exhaust shafts at both ends of each ventilation unit can further accelerate pollutant removal. The findings provide a reference for the formulation and optimization of ventilation schemes during water conveyance pipeline maintenance.

【Keywords】 Water conveyance pipelines; On-site tests; Ventilation networks; Ventilation operation modes

0 引言

地下深埋长距离输水管道沿线设有多座工作井, 工作井内设置风机。运行期间, 工作井内阀门关闭, 形成密闭有压输水系统。检修期间, 人员经人孔进入管道作业, 工作井风机构建的通风系统运行模式根据现场情况进行调整, 但是不当的通风系统运行模式会出现通风短路和污染物难以排出现象, 影响作业人员安全。因此, 有必要通过 CFD 数值模拟和现场实测对输水管道检修期通风系统的运行模式展开研究, 建立通风网络模型, 进而快速、精确地根据现场检修情况制定合理的通风系统运行模式, 保障作业人员安全。

国内外学者在公路隧道、地铁隧道、室内建筑等场所对通风网络模型(多区域网络)进行了大量研究。国外学者 Feustel 等^[1]调研了包括 COMIS^[2,3]、CONTAM^[4]等在内的 50 个模型。Chen^[5]利用该模型研究了实验室通风优化问题。Tan^[6,7]开发了 MMPN 模型, 指出将大空间划分为多个区域可提升计算精度。Musser^[8]和 Yuan^[9]通过将 CFD 与多区域模型结合, 解决了 CFD 模拟中边界条件设定的难题。国内学者曾艳华^[10]将其应用于铁路隧道通风模拟。王天明^[11]则验证了节点法在矿井通风中的可行性与通用性。

由研究现状可知, 国内外学者对地铁隧道、公路隧道等施工期区域通风网络模型进行了大量研究, 但与地下深埋长距离输水管道检修期多风机联合运行的通风网络模型及其通风运行模式直接相关的研究较少。因此, 本文基于实际输水管道结构及通风系统设计参数, 通过通风网络理论, 将输水管道检修期通风系统物理模型转化为输水管道检修期通风网络模型, 并分别通过三维 CFD 计算以及现场测试的方法对该模型预测结果的准确性进行验证, 最后基于该一维通风网络模型对深埋输水管道检修期通风运行模式进行研究。

1 通风网络模型

1.1 基本定律

输水管道通风网络解算算法基于回路法模型:

基于图论, 识别通风网络中的复杂回路, 进行网络拓扑分析。该模型满足风量平衡定律, 回路压力平衡定律以及通风阻力定律^[10]。

(1) 风量平衡方程

风量平衡方程即连续性方程, 设网络图的节点数目为 m , 则对于节点 $i(i=1\sim m)$, 则有:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} M_j = 0 \quad (1)$$

式中: a_{ij} 为网络图的关联矩阵 A 中的元素; M_j 为分支 j 的质量流量, $j=1\sim n$, kg/s。

(2) 回路压力平衡方程

通风网络回路压力平衡方程遵循能量守恒定律, 表示在通风网络的任意回路中, 气流沿回路方向流动的动力与阻力的代数和为零。

$$\sum_{j=1}^n b_{ij} \times (\Delta P_z - P_d) = 0 \quad (2)$$

式中: b_{ij} 为网络图的独立回路矩阵 B_f 中的元素; ΔP_z 为分支 j 的流动阻力, Pa; P_d 为分支 j 的通风动力, Pa。

(3) 流动阻力

气流的流动阻力是流动过程中所受的沿程阻力及局部阻力之和, 可表示为:

$$\Delta P = \Delta P_{yc} + \Delta P_{jb} = \lambda \frac{l}{d_e} \frac{\rho v^2}{2} + \sum \zeta \frac{\rho v^2}{2} \quad (3)$$

式中: λ 为沿程摩擦阻力系数; l 为分支长度, m; $\sum \zeta$ 为分支的局部阻力系数之和; d_e 为分支对应流动通道的当量直径, m; ρ 为分支的空气平均密度, kg/m³; v 为断面平均流速, m/s。

1.2 网络解算算法

根据文献[12], 设一个通风网络模型的分支数为 B , 节点数为 $N+1$, 则该方程组有 B 个分支风量未知数, 而只有 N 个方程式, 其系数矩阵为网络图的关联矩阵。

基本回路矩阵 B_f :

$$B_f = (-A_T^{-1} A_L)^T I_{B-N} \quad (4)$$

式中: A_T 为树枝矩阵; A_L 为余枝矩阵; I_{B-N} 为 $B-N$ 阶单位矩阵。

根据通风网络的拓扑性质,任意基本回路压力平衡方程可写为:

$$\begin{cases} \mathbf{AG} = \mathbf{Q} \\ \mathbf{B}_f \Delta \mathbf{H} = 0 \\ \Delta \mathbf{H} = \mathbf{S} |\mathbf{G}| \mathbf{G} + \mathbf{Z} - \mathbf{DH} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\Delta \mathbf{H}=(\Delta H_1, \Delta H_2, \dots, \Delta H_B)^T$, 为分支两节点压降列向量 (B 维); $\mathbf{Z}=(Z_1, Z_2, \dots, Z_B)^T$, 为各分支中两节点的位能差列向量 (B 维); $\mathbf{DH}=(DH_1, DH_2, \dots, DH_B)^T$, 为分支中机械通风风机动力列向量 (B 维); \mathbf{S} 为 $B \times B$ 阶的对角矩阵, S_j 为各分支的阻抗; $|\mathbf{G}|$ 为 $B \times B$ 阶的对角矩阵, $|G_j|$ 为各分支流量的绝对值。

应用牛顿迭代法求解式 (5) 的迭代公式为:

$$\begin{aligned} \mathbf{G}^{k+1} &= \mathbf{G}^k - \left(\frac{\partial F(\mathbf{G})}{\partial \mathbf{G}} \right)_{\mathbf{G}=\mathbf{G}^k}^{-1} F(\mathbf{G}^k) \\ &= \mathbf{G}^k - \nabla F(\mathbf{G}^k)^{-1} F(\mathbf{G}^k) \end{aligned} \quad (6)$$

基于已知通风网络,牛顿法求风量的步骤如图 1 所示。

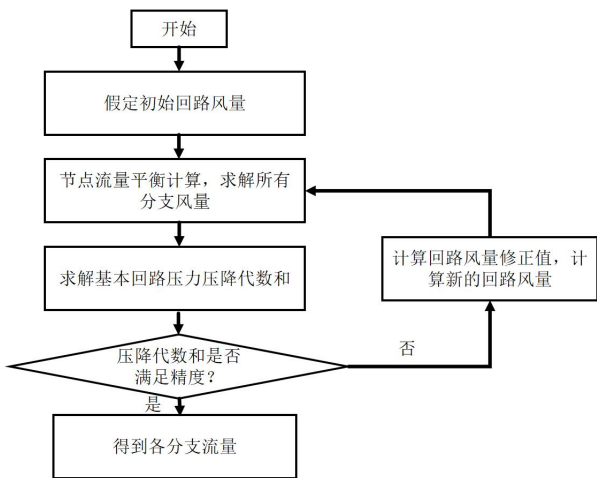


图 1 牛顿法求解通风网络风量流程图

Fig.1 Flowchart of newton's method for solving ventilation network air volume

1.3 输水管道通风网络模型

以国内某段输水管道为研究对象,管道几何模型如图2所示。管道断面为内径6.4m的盾构隧洞,送风口为四个直径1.4m的圆形风口,进入孔直径为1.4m,管段为实际工程1:1建模。该管道模型共设置10个通风井在检修期通过风管进行送排风,从左

到右工作井编号为#1~#10,其中#1未设置风机。基于网络图论,对输水管道检修期通风系统进行研究时,将输水管道、工作井作为分支,输水管与进车孔、进人孔、风管交汇处作为节点,通过建立节点和分支之间的关联关系,最终形成输水管道检修期通风网络模型。为提升网络求解效率,将同一工作井内并联的四根风管依据其拓扑关系等效简化为一条分支,输水管道各结构通风网络转化示意图如图3所示。机械送风及机械排风(风机)的风量作为已知边界条件输入网络节点,基于风量平衡方程通过牛顿迭代法求解管道各节点风量分布。风机的动力以压头增量表示,在回路压力平衡方程中体现。

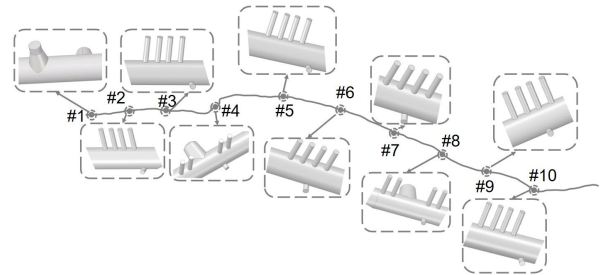


图 2 输水管道几何模型

Fig.2 Hydraulic pipeline geometric model

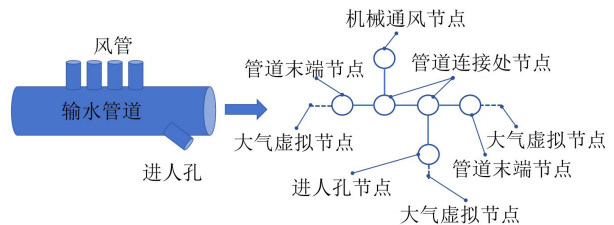


图 3 输水管道通风网络模型转化示意图

Fig.3 Schematic diagram of the transformation of the ventilation network model for water supply pipelines

基于该段输水管道几何结构拓扑连接构建的通风网络节点图及编号如图 4 所示。图中短点线框出的节点表示该段输水管道不同工作井处的机械通风节点,虚线框出的节点表示管道内的进人孔节点,其余节点表示管道连接处和管道末端节点,同一工作井处的机械通风风管如图 3 所示做并联处理,并对管道的每个节点和分支依次进行了编号,基于该段输水管道建立的通风网络图是一个由 41 个节点,52 个分支组成的以分支阻抗为权值的有向网络赋权图,其中节点 41 作为大气虚拟节点,

实线表示实际分支, 虚线表示大气虚拟分支。

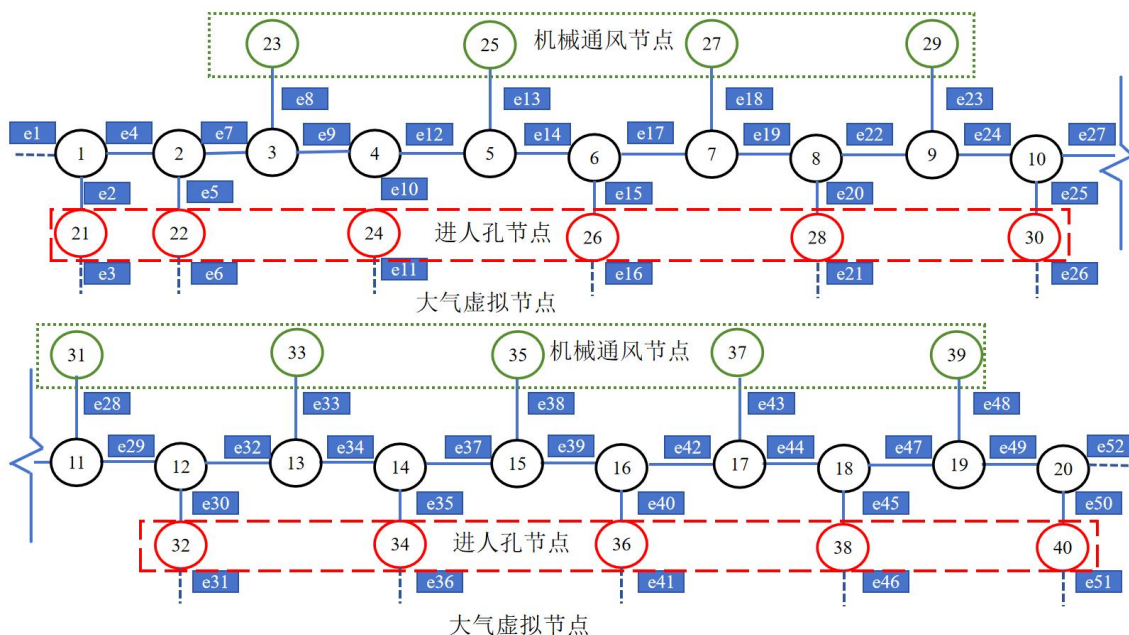


图 4 输水管道通风网络图

Fig.4 Water pipeline ventilation network diagram

2 阻力系数计算及模型验证

2.1 阻力系数计算

当流量采用体积流量单位 (m³/s) 时, 管段阻抗 S (kg/m⁷) 的计算式为:

$$S = \frac{8 \left(\lambda \frac{l}{d} + \sum \xi \right) \rho}{\pi^2 d^4} \quad (7)$$

式中: λ 为沿程阻力系数; l 为分支长度, m; d 为分支对应流动通道的当量直径, m; $\sum \xi$ 为分支的局部阻力系数之和; ρ 为分支的空气平均密度, kg/m³。

其中沿程阻力系数计算公式如式 (8) 所示:

$$\lambda = \frac{n^2 8g}{R^{1/3}} \quad (8)$$

式中: n 为管道糙率, 0.0015; R 为管道当量半径, m; g 为重力加速度, m/s²; λ 为管道沿程阻力系数。

长距离输水管道内局部结构主要包括四通以及三通, 如图 5 所示。局部阻力系数计算采用 CFD 模拟风速结合公式 (1) 以及公式 (2) 推导计算得出。计算得到两结构的局部阻力系数如表 1 及表 2

所示。

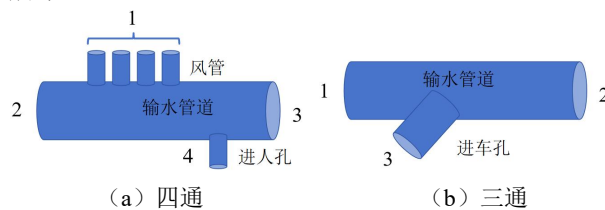


图 5 三通及四通几何示意图

Fig.5 Three-way and four-way geometric diagrams

表 1 三通局部阻力系数

Table 1 Three-way local resistance coefficient

	ζ_{12}	ζ_{13}
进风	0.1977	1.2317
排风	0.2062	1.1868

表 2 四通局部阻力系数

Table 2 Four-way local resistance coefficient

	ζ_{12}	ζ_{13}	ζ_{14}
机械送风	1.1098	1.1067	1.1163
机械排风	0.5839	0.5845	0.5840

2.2 模型验证

本节为验证通风网络模型的准确性, 通过现场通风实测数据与通风网络模型计算结果进行模型验证。

在实际测试的运行工况下,将其计算结果与现场实测数据进行了对比。本次测试采用的仪器为 Testo405i 热线风速仪,输水管道内各测量断面的测点布置如图 6 所示。测试时每个测点测量 90s,取每个测点 90s 内的平均值作为此测点的风速值。分别对各工作井风机进(排)风口处进行风速测量,通过风管面积计算得到风机的实际送风量或排风量。为减小测试误差,在风机稳定运行时,风机的两端管道不同位置的断面风速多次测试,取稳定运行阶段的平均值作为最终测试结果。

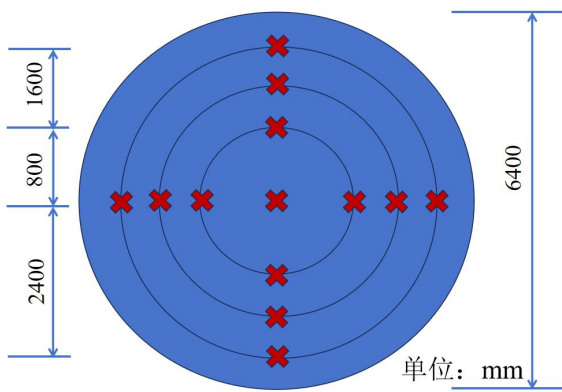


图 6 断面风速测点布置图

Fig.6 Section wind speed measurement point layout diagram

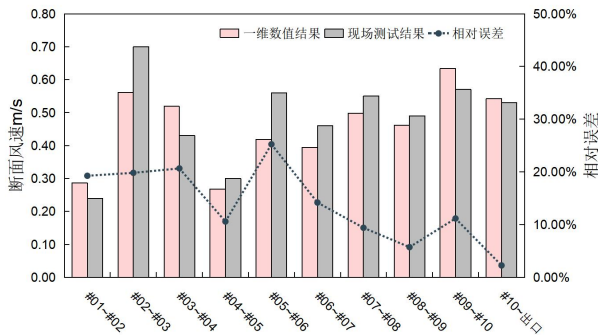


图 7 现场通风测试工况与通风网络模型断面风速计算对比图

Fig.7 Comparison chart of on-site ventilation test conditions and wind speed calculation of ventilation network model sections

将测试得到的实际输水管道检修期各工作井风机机械进风及机械排风风量作为通风网络模型中相应工作井风机风量输入条件,模拟得到工作井间管段的风速。现场通风测试与通风网络计算得到的各管段断面风速对比及误差如图 7 所示。由图 7

可知,各管道断面风速的计算值与实测值吻合良好,平均相对误差为 9.89%,且各管段误差均在工程允许范围内,验证了通风网络模型的可靠性。误差来源主要包括一维理论对三维空间内复杂流场的简化模型简化误差,以及测试过程中由于环境因素和测试人员引起的测试误差。

3 检修期通风运行模式研究

本节基于实际输水管道存在的检修期通风情况进行研究,包括单管段检修通风以及多管段甚至全线同时检修通风运行模式分析。为对不同通风运行方案进行综合评价,依据本工程检修期通风设计要求,将管道断面平均风速 0.2m/s 作为通风达标的最低限值;同时,结合检修作业期间人员活动、污染物稀释及通风稳定性需求,将断面平均风速 1.0m/s 作为通风运行效果良好的推荐评价价值。

3.1 单管段检修通风运行模式

单管段检修通风模式是指检修人员只在某相邻两工作井之间管段内作业,且全线只有该管段处于检修状态,管段两端工作井风机运行所形成的局部通风模式。单管段检修通风模式主要包括压入式,抽出式以及一送一排式,如图 8 所示。

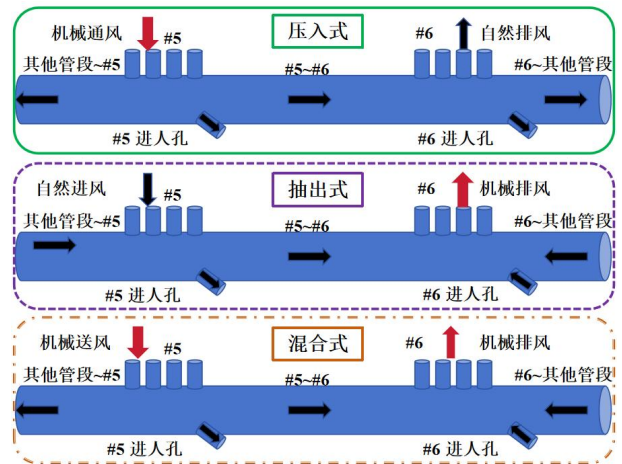


图 8 单管段通风模式示意图

Fig.8 Schematic diagram of single-pipe ventilation mode

选用输水管道#5-#6工作井之间管段为研究对象,采用搭建的一维通风网络模型进行压入式、抽出式、混合式(一送一排)模拟。其中机械送风及机械排风的风量为 240000m³/h。管段风速模拟结果如图 9 所示,可知#5-#6管段的不同通风模式的气流速度不同,其中压入式与抽出式风速接近,表明

该管路结构下两种单向通风的气流强度及阻力特性相近,其断面风速虽可满足检修期通风设计最低风速标准(0.2m/s),但整体通风效果有限;相比之下,一送一排的混合式通风优势显著,断面风速达 1.29m/s,达到了推荐运行风速水平,这是由于管路两端压入和抽出风机协同克服阻力,协同驱动,提升了气流穿透能力与整体运输效率,表明混合式通风在增强有限空间通风强度上效果更好。

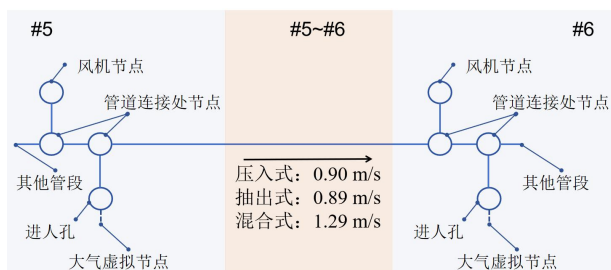


图 9 单管段不同通风模式下断面风速图

Fig.9 Wind speed distribution diagrams at different ventilation modes in single pipe sections

3.2 多管段同时检修通风运行模式

在输水管道停水检修过程中,存在多个工作井管段之间同时施工的情况,研究多管段同时检修通风运行模式可为实际检修情况调整通风运行模式提供依据。

不相邻管段同时检修通风可看作各单管段单独通风,但是各管段通风又相互影响。以#2~#3, #5~#6, #8~#9 三管段同时检修通风为例,探究不相邻多管段同时检修时,压入式、抽出式、混合式不同通风运行模式对管段风速的影响。其中机械送风及机械排风的风量仍为 240000m³/h,通风系统运行模式示意如图 10 所示。

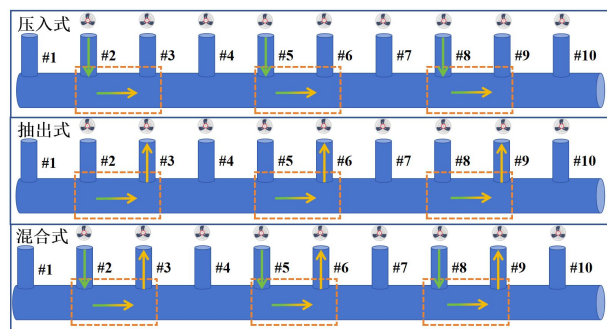


图 10 不相邻多管段通风模式示意图

Fig.10 Schematic diagram of ventilation mode for non-adjacent multi-segment pipes

通过一维通风网络模型模拟得到压入式、抽出式、混合式不同通风模式下不相邻各管段断面风速(见图 11)。图 11 对比分析了该输水管道中三个不相邻管段(#02~#03、#05~#06、#08~#09)在压入式、抽出式及混合式三种通风模式下的气流速度分布。不同管段在不同通风方式下其断面风速差异显著,这是管道结构、通风动力配置与管段阻力分布的综合作用。在压入式通风模式下#02~#03 管段流速约 0.4m/s,虽高于检修期通风设计要求最低限值 0.2m/s,但整体风速水平偏低;而抽出式通风下#08~#09 管段流速甚至约为 0.1m/s,低于设计要求,明显出现通风不足;可见,压入和抽出通风模式下,各管段风速相差较大,且管段断面风速不稳定,易不满足检修管段通风要求。混合通风模式下,各管段流速趋于接近,该方式通过管段两端协同压入与抽出的复合作用,将检修管段进行“单元化隔离”,不仅能够达到 1m/s 的推荐风速,而且提升了检修管段的通风稳定性和均匀性,体现出其在复杂管道通风中适应性与可靠性。所以当对输水管道相邻多管段或全线管段同时检修时,通风运行模式应采用混合式通风,并可对相邻多管段进行“单元化通风”。

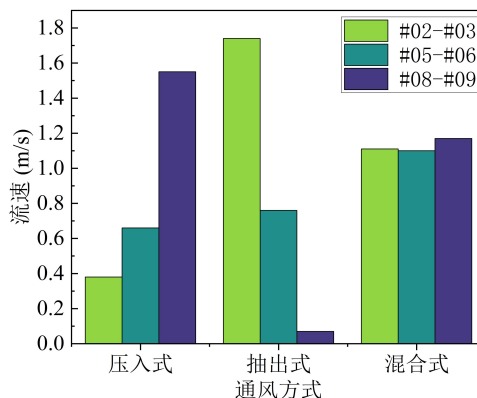


图 11 不同通风模式下不相邻各管段断面风速对比图

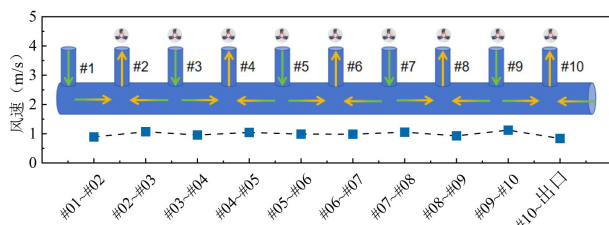
Fig.11 Comparison chart of wind speeds at cross-sections of non-adjacent pipe sections under different ventilation modes

基于该输水管道通风网络计算模型,计算全线各相邻工作井分别为一送一排、两送两排、三送三排的混合通风运行模式,研究不同混合通风运行模式下,管道内的通风性能及对管道内检修作业安全的影响。

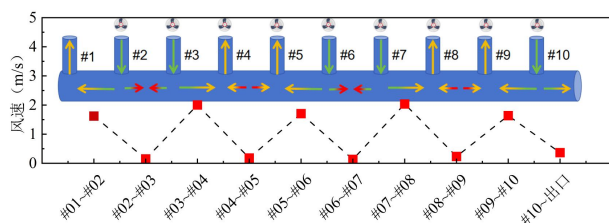
不同混合通风运行模式下的管道通风性能差异显著,如图 12 所示。当采用“一送一排”模式

时,管道内形成稳定的单向气流,各相邻管段断面风速分布较均匀,整体风速水平能够稳定满足检修期通风设计最低风速要求(0.2m/s),且多数管段断面风速接近或达到1.0m/s,能确保污染物沿明确路径高效排出,通风稳定性和污染物控制效果好。当采用“两送两排”模式时,各管段风速差异明显增大,部分送风井和送风井之间、排风井和排风井之间的管段气流相互干扰形成局部涡流低速区,局部管段断面风速不满足0.2m/s的最低通风设计要求,易造成气流短路,污染物滞留风险增加。进一步增加至“三送三排”模式后,管道内流场更加复杂,各管段断面风速分布不均问题进一步加剧,局部管段难以达到推荐通风风速(1m/s),多个送风射流相互叠加,使在送风井与送风井或排风井与排风井之间管段形成范围更大的低速区和通道气流短路,污染物更难以排出。可知增加连续的送排风点数量会破坏整体流场均匀稳定,使管道内气流混乱使污染物难以排出,影响检修安全。因此,对于深埋输水管道检修通风,“一送一排”模式在保证输水管道全局的流场稳定性和污染物控制效果方面均表现最优。

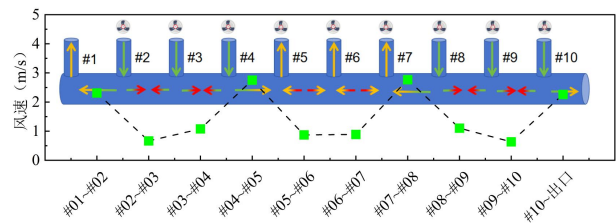
同时从图12还可以看出送、排风井之间管段断面风速随着连续的送风井或排风井数量增多而增大。由文献[13]可知断面风速越大,污染物越容易排出。因此在检修过程中如需加速排出管段有害气体时,在施工管段两端需保证“一送一排”通风模式,并可考虑增加该施工管段两端连续的送排风井数量。



(a) 一送一排



(b) 两送两排



(c) 三送三排

图12 不同混合通风模式下全线各管段断面风速对比图
Fig.12 Comparison chart of wind speed at each section of the entire line under different mixed ventilation modes

4 结论

本研究建立了输水管道通风网络模型,研究了长距离深埋输水管道检修期的通风运行模式对管道内流速的影响,主要结论如下:

(1)通过CFD模拟与现场实测数据联合校核建立的输水管道通风网络模型,能够快速准确地预测管道内气流分布状态,并具备良好的工况适应性,可为检修期通风运行方案调整提供支持。

(2)深埋输水管道检修通风中,在满足最低风速要求0.2m/s条件下,“一送一排”模式流场稳定、断面风速均匀,能高效排出污染物,在流场稳定性与污染物控制上表现最优。

(3)针对多管段同时检修的复杂工况,“单元化隔离”通风设计方法可保证各个通风单元风速达标,在通风单元两端增加送风井或排风井数量可加速污染物排出。

本文基于通风网络模型,针对输水管道检修期机械通风运行模式进行研究,可为输水管道检修期通风运行模式调整提供参考。但本文研究并未考虑由于风压和热压产生的自然通风对检修期通风的影响,这将在后续研究中考虑。

参考文献:

[1] Feustel H E, Dieris J. A survey of airflow models for multizone structures [J]. Energy and buildings, 1992, 18(2):79-100.
[2] Feustel H E. COMIS-an international multizone air-flow and contaminant transport model [J]. Energy and Buildings, 1999,30(1):3-18.

(下转第 239 页)