

引用格式: 宋江文, 杨轶, 刘鑫, 等. 压缩空气储能电站输气管道流致噪声特性 [J]. 南方能源建设, 2025, 12(6): 24-32. SONG Jiangwen, YANG Yi, LIU Xin, et al. Flow-Induced noise characteristics of gas pipeline in compressed air energy storage power station [J]. Southern energy construction, 2025, 12(6): 24-32. DOI: 10.16516/j.ceeec.2024-434.

压缩空气储能电站输气管道流致噪声特性

宋江文¹, 杨轶¹, 刘鑫¹, 翁羽², 王海涛^{3,✉}

(1. 中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司, 陕西 西安 710075;

2. 西安石油大学 石油工程学院, 陕西 西安 710065;

3. 西安交通大学 机械学院, 陕西 西安 710049)

摘要: [目的]随着压缩空气储能技术的发展, 压缩空气输送管道将在更高的压力和更大的流量下运行, 气动噪声问题日益突出。某 300 MW 压缩空气储能电站示范工程中的一级压缩机排气输送管道在设计阶段发现存在高流致噪声的风险, 有必要开展预测研究, 明确噪声量级并探索降噪途径。[方法]研究采用计算流体动力学方法, 使用大涡模拟 (LES) 对湍流引发的宽频压力脉动进行模拟。建立管道流致噪声分析的数学模型, 研究管道内部的流动特性与噪声产生机理, 明确运行工况下噪声频谱的分布特征, 并从管道局部结构角度提出降噪方案。[结果]获得了一级压缩机排气输送管道的流场分布, 发现管道中弯头、变径、三通等几何突变位置存在明显流动扰动, 构成潜在噪声源。获得了基于频域的噪声和管壁压力功率谱密度, 确定了由管道结构变化所产生的流体压力脉动主要存在于 10 Hz 以下的低频区域, 且随着频率的升高而压力脉动能量呈指数降低。[结论]优化分析表明, 在管道三通连接处增加斜切倒角有助于降低噪声, 且倒角尺寸越大, 降噪效果越明显, 最大可使最高声压级降低约 4.99%。

关键词: 压缩空气储能电站; 输气管道; 流致噪声; 大涡模拟; 降噪优化

DOI: 10.16516/j.ceeec.2024-434

文章编号: 2095-8676(2025)06-0024-09

CSTR: 32391.14.j.ceeec.2024-434

中图分类号: TK02; TH41



论文二维码

Flow-Induced Noise Characteristics of Gas Pipeline in Compressed Air Energy Storage Power Station

SONG Jiangwen¹, YANG Yi¹, LIU Xin¹, WENG Yu², WANG Haitao^{3,✉}

(1. Northwest Electric Power Design Institute Co., Ltd., Xi'an 710075, Shaanxi, China;

2. College of Petroleum Engineering, Xi'an Shiyong University, Xi'an 710065, Shaanxi, China;

3. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China)

Abstract: [Objective] With the development of compressed air energy storage (CAES) technology, compressed air transmission pipelines are expected to operate under higher pressures and larger flow rates, making the issue of aerodynamic noise increasingly prominent. During the design phase of a 300 MW CAES power station demonstration project, the first-stage compressor exhaust pipeline was identified as having a risk of high flow-induced noise. Therefore, it is necessary to conduct a predictive study to quantify the noise level and explore potential noise reduction measures. [Method] The computational fluid dynamics (CFD) method was employed, using large eddy simulation (LES) to simulate the broadband pressure fluctuations induced by turbulence. A mathematical model for analyzing flow-induced noise in pipelines was established to investigate the internal flow characteristics and noise generation mechanisms. The noise spectrum distribution during pipeline operation was determined, and noise mitigation strategies were proposed based on local structural

收稿日期: 2024-12-22 修回日期: 2025-03-13 网络首发日期: 2025-08-11

基金项目: 中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司科技项目“压缩空气储能电站输气管道流致振动分析及优化研究”(HQ-2024-P-TS-075)

modifications. [Result] The flow field distribution of the exhaust transmission pipeline of the first-stage compressor was obtained, and it was found that there was a large flow field disturbance in the section where the flow channel changed drastically, such as the elbow, reducer, and tee, which became a potential noise source. The spectral density of noise and pipe wall pressure based on frequency domain was obtained, and it was determined that the fluid pressure ripple caused by the change of pipe structure mainly existed in the low-frequency region below 10 Hz, and the pressure pulsation energy decreased exponentially with the increase of frequency. [Conclusion] Optimization analysis showed that adding beveled chamfers to the tee connections of the pipeline can effectively reduce noise. The noise reduction effect improves with increasing chamfer size, with the maximum sound pressure level reduced by approximately 4.99%.

Key words: compressed air energy storage power station; gas pipeline; flow-induced noise; large eddy simulation; noise control optimization

2095-8676 © 2025 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

“双碳”战略背景下,我国以风电、光伏为代表的新能源发展迅猛,但其固有的间歇性和不稳定性导致并网消纳困难。此外,我国电网负荷峰谷差逐年增大,对电网的安全运行造成了极大的影响^[1-2]。大规模储能技术是解决弃风弃光、实现电网削峰填谷最有效和最经济的手段之一,也是构建新型电力系统、支撑能源结构转型升级、实现“双碳”目标的关键技术^[3-6]。作为一种极具发展潜力的大规模物理储能技术,压缩空气储能(Compressed Air Energy Storage, CAES)具有装机容量大、储能时间长、建设周期短、使用寿命长、绿色环保等优点,可以广泛应用于智能电网削峰填谷、大规模可再生能源发电等方面^[7-10]。CAES还可用于提供电网调频、调相、旋转备用、黑启动等辅助技术服务,具有广阔的应用前景^[11-14]。而随着商业化CAES系统规模的提升,压缩空气输送管道将承担更高的压力和更大的空气流速,气动噪声问题随之而产生^[15-16]。

气动噪声本质上是可压缩流体在高速流动过程中产生的一系列压力波动的宏观表征,而对此类压力波动以及压力波/声波的传播也被学者所关注。研究者探索并采用了2种独特的方法,以识别和定位声源的位置^[17-19]。首先,单独使用CFD(Computational Fluid Dynamics)软件通过FW-H法进行计算和分析;其次,结合了CFD软件与声学软件,采用BEM法进行仿真计算。通过这两种方法,成功建立了气动噪声模型,并深入研究了气动噪声的产生、传播和衰减规律。研究结果显示,流场中的压力脉动和速度脉动是导致输气管道中气动噪声产生

的根本因素。在气体传输管道中,阀门的噪声产生主要源自偶极子声源和四极子声源这两种类型的声源。特别是在气体流速较低(低马赫数)时,偶极子声源成为主要的噪声来源。这些偶极子声源主要集中在阀门表面上,而四极子声源则广泛分布在整个流场之中。在比较2种处理输气管道气动噪声产生、传播和衰减问题的方法时,发现两者均具备有效性。FW-H法因其操作简便性而受欢迎,但在计算精度上有所不足,主要适用于声场“远场”的模拟。相对而言,BEM法则在计算效率和精度上都展现出显著的优势,能够精确计算声场中任意点的声学参数。这2种方法为更好地理解和控制输气管道中的气动噪声问题,提供了有力的工具^[20]。

当前虽然国内外均有大量规划和在建的压缩空气储能项目,但投入使用的仍然很少,缺乏对输气管道噪声的研究。而在全球首座300 MW级压缩空气储能示范工程-湖北应城300 MW项目中,就发现了系统噪声问题突出,对人员和运行产生了不利影响。刘昱佳等^[21]针对该问题进行了测量和分析,并采取了相应的降噪措施。但对详细的噪声产生机理,尤其是管道中噪声的分布尚未开展相关工作。

本文以某300 MW压缩空气储能电站示范工程为背景,由于其一级压缩机排气输送管道具有大直径、多弯头、高流量等设计特点,其流致噪声存在较大的不确定性。本文采用计算流体力学方法求解流场控制方程,采用大涡模拟方法模拟流体瞬态脉动,建立了管道流致噪声分析模型,研究管道流动特性和噪声产生机理,确定管道运行时的噪声频谱分布特征,并从管道结构角度研究了降噪途径。

1 研究方法

1.1 数值计算方法

对于压缩空气储能电站输气管道流致噪声特性分析, 本文使用计算流体动力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 方法进行求解, 模拟管道内在湍流作用下的流体脉动规律和噪声规律, 分析基于大涡模拟的 Navier-Stokes 控制方程, 大涡模拟 (Large Eddy Simulation, LES) 方法中在大的尺度上直接求解 Navier-Stokes 方程从而获得其湍流动态分布, 在小尺度上仍然通过均化模型来求解^[22]。在此通过求解网格的尺寸来确定是否直接求解湍流方程, 因此该方法通常要求所使用的网格分辨率足以描述所需的涡的尺度。其控制方程可表示为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

式中:

u_i ——速度矢量 (m/s);

τ_{ij} ——模型分辨率范围外的应力 (Pa)。

$$\tau_{ij} = \rho \bar{u}_i \bar{u}_j - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (3)$$

对于大涡模拟, 求解大尺度涡以内湍流量的关键是选择亚网格模型。当前常用的亚网格模型为司马格林斯基模型^[23], 该模型与上文所述的雷诺时均模型类似, 其表达式为:

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} = -2\mu_t \bar{S}_{ij} \quad (4)$$

式中:

μ_t ——湍流粘度 (m^2/s);

δ_{ij} ——克罗内克符号, 当 $i=j$ 时, $\delta_{ij}=1$; 当 $i \neq j$ 时, $\delta_{ij}=0$;

$\bar{S}_{ij}$ ——湍流应变率。

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

而湍流涡粘系数的表达式为:

$$\mu_t = \rho L_s^2 |\bar{S}| \quad (6)$$

式中:

L_s ——亚网格尺度的混合长度 (m), $L_s = \min(kd, C_s V^{\frac{1}{3}})$, $k=0.42$;

d ——网格距边界的长度 (m);

C_s ——常数;

V ——控制体所占空间 (m^3)。

$$|\bar{S}| = \sqrt{2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}} \quad (7)$$

研究采用 SIMPLE 方法^[24-25] 求解压力-速度场, 控制方程差分采用 Second Order Upwind 格式^[26]。计算时间步长为 $1 \mu\text{s}$, 计算至流场脉动稳定后方可采集流场脉动和噪声数据。对于流体介质压缩空气, 采用美国国家标准与技术研究院 (National Institute of Standards and Technology, NIST) 提供的气体物性数据库^[27], 并采用相应的真实气体状态方程^[28], 以真实反映高温高压气体的动态流动规律。

真实气体模型的比焓可表示为理想气体的比焓与偏差函数之和, 其表达式如下所示:

$$h_m = h_{mr} + h_m^{\text{ig}} \quad (8)$$

$$h_{mr} = \frac{P}{\rho} - RT + \int_0^P \left[P - T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_\rho \right] \frac{d\rho}{\rho^2} \quad (9)$$

$$h_m^{\text{ig}} = \sum_a y_a h_a^{\text{ig}} \quad (10)$$

式中:

h_m ——实际气体的比焓 (J/kg);

h_m^{ig} ——理想气体的比焓;

h_a^{ig} ——组分 a 的理想气体比焓;

y_a ——组分 a 的质量分数。

定压比热可表示为如下形式:

$$C_{pm} = C_{vm} + \frac{T}{\rho^2} \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)^2 \quad (11)$$

$$C_{vm} = C_{vm}^{\text{ig}} - T \int_0^P \left(\frac{\partial^2 P}{\partial T^2} \right) \frac{d\rho}{\rho^2} \quad (12)$$

$$C_{vm}^{\text{ig}} = \sum_a y_a C_{va}^{\text{ig}} \quad (13)$$

式中:

C_{pm} ——实际气体的定压比热容 ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$);

C_{vm} ——实际气体的定容比热容;

C_{vm}^{ig} ——理想气体的定容比热容;

C_{va}^{ig} ——组分 a 的理想气体定容比热容。

数值计算模型选取如表 1 所示。

1.2 分析模型构建

本研究依托某 300 MW 压缩空气储能电站示范工程中的一级压缩机排气输送管道, 该管道连接一级压缩机和高温换热器, 主管道规格为 $\Phi 1829 \times 20 \text{ mm}$, 材质为 Q345, 管道结构如图 1 所示。

根据所研究输气管道的结构建立三维 CFD 分析模型, 分别使用不同网格尺寸对结构部件和流动

表 1 数值计算模型选取
Tab. 1 Model setting of numerical calculation

模型类型	模型选取
湍流模型	LES model
数值算法	SIMPLE
控制方程差分格式	Second order upwind
入口边界	质量流量边界
出口边界	静背压边界
壁面边界	无滑移边界

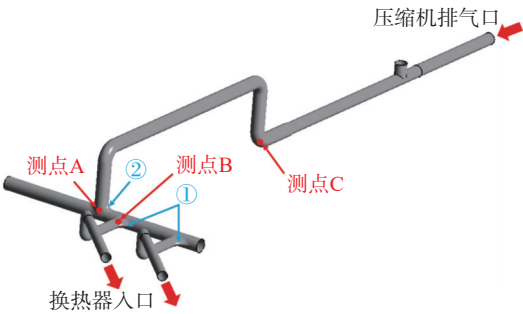


图 1 输气管道结构示意图
Fig. 1 Structure diagram of gas pipeline

区域进行网格划分。为便于后续研究中加入阀门、换热器等结构不规则部件, 网格选用以非结构四面体为主的拓扑形式。为保证近壁面流场求解精度, 需保证紧邻壁面的网格的节点应位于边界层以内。此外, 对于主流区进行网格无关性分析, 分别构建 4 套网格模型: 网格 A、网格 B、网格 C、网格 D。图 2 所示为该段输气管道的沿程压降。可以得到, 网格 A 的结果与其他模型间差异较大, 而网格 B、C、D 之间的差异很小, 尤其是网格 C 与网格 D 之间的差异不超过 1%。因此, 选取网格 C 作为后续分析的计算网格模型, 网格模型如图 3 所示。其中第一次网格厚度为 17~130 μm 、边界层网格为

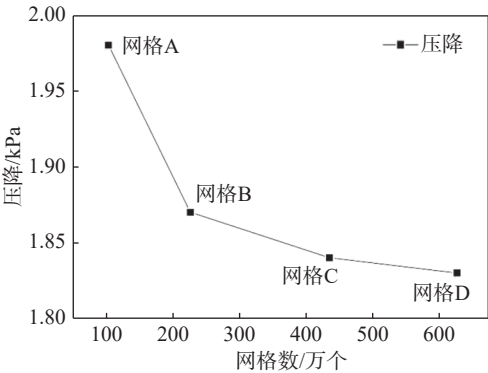


图 2 网格无关性分析
Fig. 2 Grid independence analysis

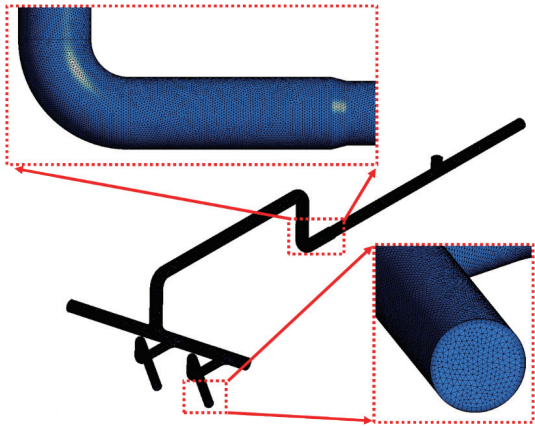


图 3 输气管道网格划分图
Fig. 3 Meshing diagram of gas pipeline

5~8 层、边界层网格增长率为 1.2~3。为了验证本研究所采用分析方法的准确性, 参考 Mori 等^[29] 对 T 型风管开展的空气流动噪声实验, 以其实验段结构和实验条件为输入建立数值分析模型。采用与本研究相同的分析方法计算获得管道流场分布和实验测点部位的噪声信号如图 4 所示, 经过比较得到 3 个不同管道流速下计算值与实验值间平均偏差不超过 $\pm 8\%$, 从而验证了本研究所采用方法具有一定的模拟精度。

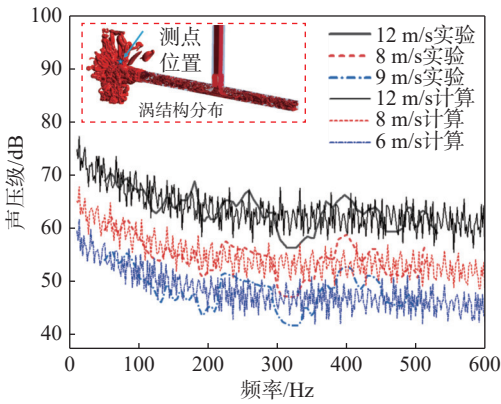


图 4 验证计算与实验值对比图
Fig. 4 Comparison of calculated and experimental values

2 结果及分析

2.1 流动特性分析

根据输气管道设计运行条件, 对流量为 746.35 t/h, 压缩机排气压力 1 MPa、温度 618 K 的条件进行分析计算。管道沿程压力分布如图 5 所示, 管道静压随流动方向逐渐降低, 在经过变径、弯头和三通等

结构突变后有明显的降低, 分别形成的管道沿程摩擦流动阻力和结构形变流动阻力。经过计算, 该管段总体流动压降为 1.84 kPa。根据如图 6 所示的壁

面温度云图, 由于该管道整体形状变化较小, 温度变化量也较小, 但管道表面仍出现了随机的小幅温度波动, 这可能是流体压力波动的瞬时表征。

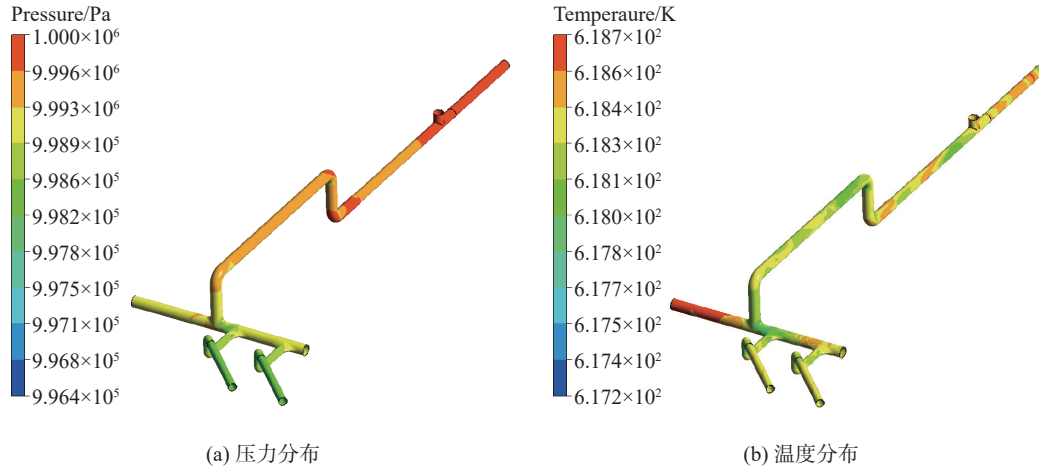


图 5 管道壁面流场分布云图

Fig. 5 Contour of flow field distribution on pipeline wall

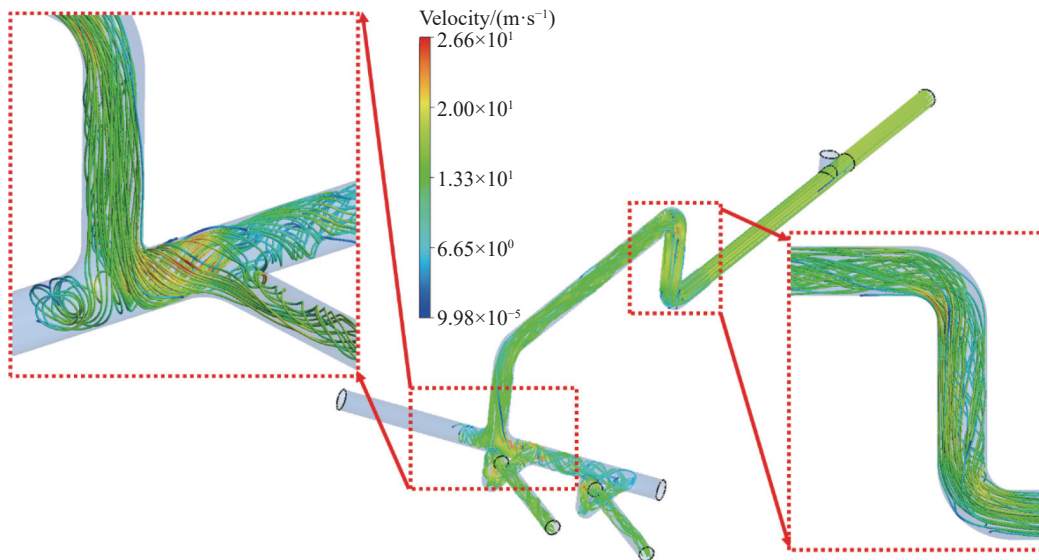


图 6 管内流线分布图

Fig. 6 Flow line distribution diagram inside the pipe

对照管道图 7 所示流线图可以发现, 在湍流随机脉动的作用下, 流线并非如常规雷诺平均方法模拟获得的完全平滑流线, 而是会产生随机的小幅波动。此外, 流线在弯头和三通等部位瞬时流动轨迹可发生较大的偏转, 尤其是主管进入分支管的三通, 由于其一侧分支管在正常运行时为盲管, 该处有明显的流动旋涡出现, 具有一定的漩涡脱落特征, 可

造成潜在的低频流体脉动。

图 7 所示为使用 Q 准则来描述管道内涡的结构^[30]。可以得到, 在入口后的直通管段中以破碎的小尺度涡为主, 这些涡主要是稳定流动伴随的随机湍流脉动所致。而经过弯头后随即产生了大尺度的涡, 这些涡是有可压流体在通过变形流道时产生的结构涡, 为低频压力脉动提供主要能量。尤其在进

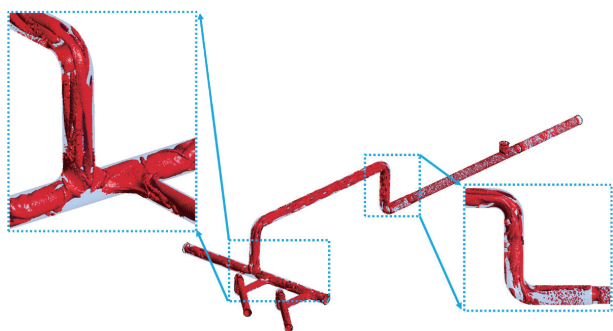


图7 管内涡结构分布

Fig. 7 Vortex distribution diagram inside the pipe

入主管三通后,大尺度的涡成为主导。据此推断,输气管道产生的压力脉动将以宽频的湍流脉动为基础,在个别低频点上存在高的压力脉动能量。

2.2 噪声特性及优化

在对被研究管道进行长时间瞬态计算的基础上,采集关键部位(位置如图1所示)的时程压力数据,并进行FFT(Fast Fourier Transform)变换将其由时域变为频域信息,便于直观了解其脉动特性。图8所示为三个不同位置处的压力功率谱密度随频率的变化情况。可以发现,主管三通处的压力脉动能量最高,而其他两个位置的频谱较为相似。从能量分布角度,压力脉动强度随频率的增加而减小,且呈指数递减,其关系与Kolmogorov分布律相近^[31],即湍流脉动随频率呈负的指数关系。在低频区间,10 Hz以内出现了多个能量尖峰,根据流场形态分析结论,可以证明这些尖峰是弯头、三通等结构突变所产生的漩涡脱落能量。换算压力脉动为声压级数据如图9所示,可见整体频域分布与压力谱一致,

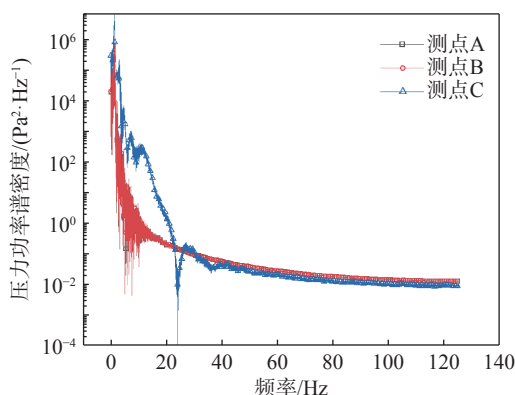


图8 不同频率下压力功率谱密度分布

Fig. 8 Distribution of pressure power spectral density at different frequencies

在低频区域最高可产生160 dB的噪声源,而高频区域的基础噪声不低于70 dB。

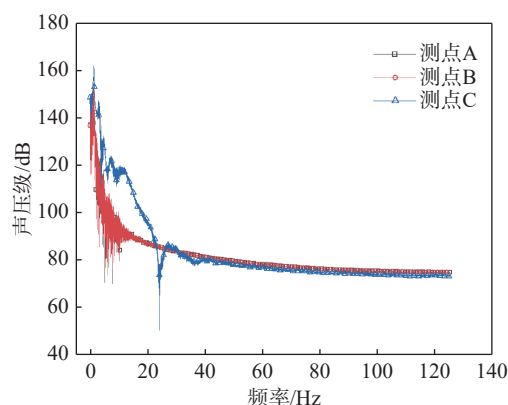


图9 不同频率下声压级分布

Fig. 9 Sound pressure level distribution at different frequencies

在获得输气管道噪声特点的基础上,发现产生低频噪声尖峰的主要原因是管道三通部位的流动不稳定,即局部旋涡脱落所致。考虑到高温高压管道在实际工程中难以设置导流片等整流装置,本研究尝试以增加斜肩式倒角的方式探索降低噪声的可能性。针对图1中的1和2两个位置分别设置1 m和1.85 m长的斜肩进行流场计算,最终获得的管壁时程积分声压级如图10和图11所示,将三通斜肩自1 m增大至1.85 m后流动阻力分别自1.84 kPa降为1.64 kPa和1.57 kPa,加权平均声压级分别自97.89 dB降为94.97 dB和93.01 dB。

通过计算发现,管道三通连接增加斜切倒角有利于降低噪声和流动阻力,且随着倒角尺寸的增大效果更佳。将三通斜肩自1 m增大至1.85 m可分别将管道阻力降低11.41%和14.67%,并降低噪声2.98%和4.99%。其中,主管三通(即位置2)的影响更为明显,这个部位是高强度噪声的主要源头。

3 结论

本研究以某300 MW压缩空气储能电站示范工程压缩空气输送管道为研究对象,采用计算流体力学和大涡模拟方法,分析了一级压缩机排气管道动态流体脉动特性和噪声特性,并探索了管道结构优化途径,为工程设计提供支持。获得的结论有:

1) 通过管道动态流动特性分析获得了各管段

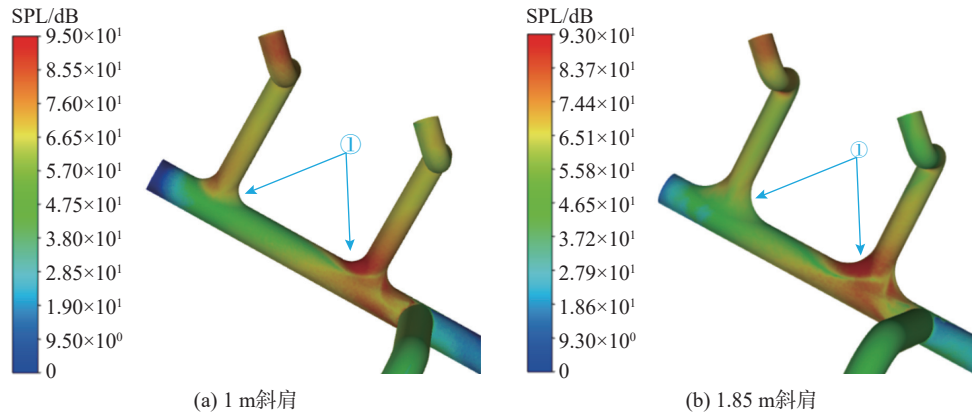


图 10 位置 1 处噪声优化结果分布

Fig. 10 Distribution of noise optimization results for position 1

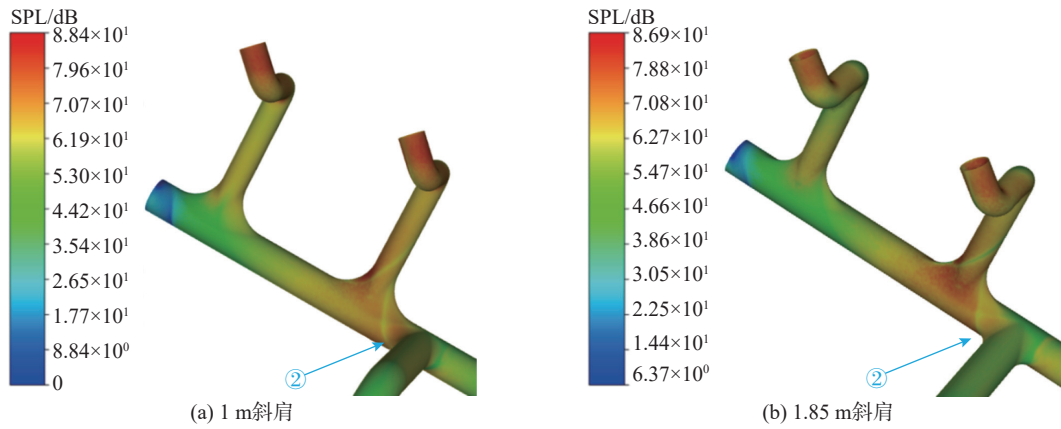


图 11 位置 2 处噪声优化结果分布

Fig. 11 Distribution of noise optimization results for position 2

的流场分布,得到了设计运行工况下管段的流动阻力为 1.84 kPa,发现了管道弯头、变径、三通等流道变化剧烈部位存在较大的流场扰动,这些部位可能为潜在的噪声源。

2) 通过管道瞬态大涡模拟方法分析管道动态流场特性,获得了基于频域的噪声和管壁压力功率谱密度,声压级平均值为 97.89 dB。确定了由管道结构变化所产生的流体压力脉动主要存在于 10 Hz 以下的低频区域,且随着频率的升高而压力脉动能量呈指数降低,这与典型的湍流致振动频域分布规律相符。

3) 对管道三通连接增加斜切倒角有利于降低噪声,且随着倒角尺寸的增大效果更佳,最大可使最高声压级降低约 4.99%,达到 93.01 dB。其中对主管三通的影响更为明显。

参考文献:

- [1] 和萍,刘鑫,宫智杰,等. 高比例可再生能源电力系统源荷储联合调峰分层优化运行 [J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(18): 112-122. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231378.
- HE P, LIU X, GONG Z J, et al. Hierarchical optimization operation model for joint peak-load regulation of source-load-storage in a high proportion of renewable energy power system [J]. Power system protection and control, 2024, 52(18): 112-122. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231378.
- [2] 程瑜,朱瑾,彭冬,等. 提升新能源消纳含风险度量的输-储优化规划 [J]. 太阳能学报, 2023, 44(10): 504-513. DOI: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.2022-0865.
- CHENG Y, ZHU J, PENG D, et al. Optimization planning of transmission line and energy storage for consumption capacity improvement of renewable energy with risk assessment [J]. Acta energiae solaris sinica, 2023, 44(10): 504-513. DOI: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.2022-0865.
- [3] 徐秋实,施通勤,井浩然,等. 面向新型电力系统的输电网与分布式变速抽水蓄能联合规划 [J]. 电力系统保护与控制, 2024,

- 52(10): 128-137. DOI: [10.19783/j.cnki.pspc.231044](https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.231044).
- XU Q S, SHI T Q, JING H R, et al. Joint planning of a transmission network and distributed variable speed pumped storage for a new power system [J]. *Power system protection and control*, 2024, 52(10): 128-137. DOI: [10.19783/j.cnki.pspc.231044](https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.231044).
- [4] 李佳佳, 李兴朔, 魏凡超, 等. 耦合火电机组的新型压缩空气储能系统技术经济性评估研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(23): 9171-9182. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.222819](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.222819).
- LI J J, LI X S, WEI F C, et al. Research on techno-economic evaluation of new type compressed air energy storage coupled with thermal power unit [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(23): 9171-9182. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.222819](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.222819).
- [5] 王放放, 杨鹏威, 赵光金, 等. 新型电力系统下火电机组灵活性运行技术发展及挑战 [J]. *发电技术*, 2024, 45(2): 189-198. DOI: [10.12096/j.2096-4528.pgt.23079](https://doi.org/10.12096/j.2096-4528.pgt.23079).
- WANG F F, YANG P W, ZHAO G J, et al. Development and challenge of flexible operation technology of thermal power units under new power system [J]. *Power generation technology*, 2024, 45(2): 189-198. DOI: [10.12096/j.2096-4528.pgt.23079](https://doi.org/10.12096/j.2096-4528.pgt.23079).
- [6] 杨勇平, 陈衡, 郝俊红, 等. “双碳”目标下我国燃煤发电转型升级发展路径 [J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(17): 6900-6909. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.242041](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.242041).
- YANG Y P, CHEN H, HAO J H, et al. Development pathways for the transformation and upgrading of China's coal-fired power generation under the goals of carbon peak and carbon neutrality [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(17): 6900-6909. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.242041](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.242041).
- [7] 韩雪茹, 杨德昌, DEHGHANIAN Payman, 等. 考虑 AA-CAES 季节效率优化的建筑微网群多能协同优化策略 [J]. *电力建设*, 2023, 44(9): 94-107. DOI: [10.12204/j.issn.1000-7229.2023.09.009](https://doi.org/10.12204/j.issn.1000-7229.2023.09.009).
- HAN X R, YANG D C, DEHGHANIAN P, et al. Multi-energycooperative scheduling of building microgrid group considering AA-CAES seasonal efficiency optimization [J]. *Electric power construction*, 2023, 44(9): 94-107. DOI: [10.12204/j.issn.1000-7229.2023.09.009](https://doi.org/10.12204/j.issn.1000-7229.2023.09.009).
- [8] 袁照威, 杨易凡. 压缩空气储能技术研究现状及发展趋势 [J]. *南方能源建设*, 2024, 11(2): 146-153. DOI: [10.16516/j.ceec.2024.2.14](https://doi.org/10.16516/j.ceec.2024.2.14).
- YUAN Z W, YANG Y F. Research status and development trend of compressed air energy storage technology [J]. *Southern energy construction*, 2024, 11(2): 146-153. DOI: [10.16516/j.ceec.2024.2.14](https://doi.org/10.16516/j.ceec.2024.2.14).
- [9] 万明忠, 杨易凡, 袁照威, 等. 大容量压缩空气储能关键技术 [J]. *南方能源建设*, 2023, 10(6): 26-33. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.06.003](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.06.003).
- WAN M Z, YANG Y F, YUAN Z W, et al. Key technologies of large-scale compressed air energy storage [J]. *Southern energy construction*, 2023, 10(6): 26-33. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.06.003](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.06.003).
- [10] 姜小峰, 李季, 陆云, 等. 大规模压缩空气储能电站主厂房设计优化分析 [J]. *南方能源建设*, 2023, 10(2): 32-38. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.02.005](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.02.005).
- JIANG X F, LI J, LU Y, et al. Optimization analysis of main power house design of a large-scale compressed air energy storage power station [J]. *Southern energy construction*, 2023, 10(2): 32-38. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.02.005](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.02.005).
- [11] VENKATARAMANI G, PARANKUSAM P, RAMALINGAM V, et al. A review on compressed air energy storage – a pathway for smart grid and polygeneration [J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2016, 62: 895-907. DOI: [10.1016/j.rser.2016.05.002](https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.002).
- [12] YUCEKAYA A. The operational economics of compressed air energy storage systems under uncertainty [J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2013, 22: 298-305. DOI: [10.1016/j.rser.2013.01.047](https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.047).
- [13] BASKARAN K, SRINIVASAN K. Effects of upstream pipe length on pipe-cavity jet noise [J]. *Physics of fluids*, 2019, 31(10): 106103. DOI: [10.1063/1.5120460](https://doi.org/10.1063/1.5120460).
- [14] 郑开云, 池捷成, 张学锋. 耦合抽水蓄能的压缩空气储能电站概念研究 [J]. *南方能源建设*, 2023, 10(2): 18-25. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.02.003](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.02.003).
- ZHENG K Y, CHI J C, ZHANG X F. Concept research of compressed air energy storage power plant coupled with pumped hydro storage [J]. *Southern energy construction*, 2023, 10(2): 18-25. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.02.003](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.02.003).
- [15] JOTHI T J S, SRINIVASAN K. Role of initial conditions on noise from underexpanded pipe jets [J]. *Physics of fluids*, 2009, 21(6): 066103. DOI: [10.1063/1.3153909](https://doi.org/10.1063/1.3153909).
- [16] 白俊强, 余培汛, 郭博志, 等. 用 CFD/FW-H 混合方法计算圆柱/翼型的气动噪声 [J]. *西北工业大学学报*, 2012, 30(6): 847-851. DOI: [10.3969/j.issn.1000-2758.2012.06.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-2758.2012.06.009).
- BAI J Q, YU P X, GUO B Z, et al. An effective numerical simulation approach to noise induced by flow around rod-airfoil using the hybrid method with solutions of des and FW-H integration [J]. *Journal of northwestern polytechnical university*, 2012, 30(6): 847-851. DOI: [10.3969/j.issn.1000-2758.2012.06.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-2758.2012.06.009).
- [17] 王丹, 白俊强, 黄江涛, 等. 基于转捩/尺度适应模型与 FW-H 声学方程的气动噪声数值模拟研究 [J]. *计算力学学报*, 2013, 30(5): 704-711. DOI: [10.7511/jslx201305019](https://doi.org/10.7511/jslx201305019).
- WANG D, BAI J Q, HUANG J T, et al. Research of the aeroacoustic noise simulation based on transition/scale-adapt model and FW-H equation [J]. *Chinese Journal of computational mechanics*, 2013, 30(5): 704-711. DOI: [10.7511/jslx201305019](https://doi.org/10.7511/jslx201305019).
- [18] 宋永兴, 王均宇, 刘正杨, 等. 电子膨胀阀的两相流致噪声特性及降噪技术研究 [J]. *机电工程技术*, 2024, 53(1): 1-4+47. DOI: [10.3969/j.issn.1009-9492.2024.01.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-9492.2024.01.001).
- SONG Y X, WANG J Y, LIU Z Y, et al. Research on the

- characteristics and noise reduction techniques of two-phase flow induced noise in electronic expansion valve [J]. *Mechanical & electrical engineering technology*, 2024, 53(1): 1-4+47. DOI: 10.3969/j.issn.1009-9492.2024.01.001.
- [19] 郑拯宇, 李人宪. 高速列车表面气动噪声偶极子声源分布数值分析 [J]. *西南交通大学学报*, 2011, 46(6): 996-1002. DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.2011.06.018.
- ZHENG Z Y, LI R X. Numerical analysis of aerodynamic dipole source on high-speed train surface [J]. *Journal of southwest jiaotong university*, 2011, 46(6): 996-1002. DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.2011.06.018.
- [20] 刘昱佳, 李峻, 刘璟, 等. 湖北应城 300 MW 级压缩空气储能电站噪声控制研究 [J]. *造纸装备及材料*, 2023, 52(8): 148-150. DOI: 10.3969/j.issn.1672-3066.2023.08.049.
- LIU Y J, LI J, LIU J, et al. Noise control study of 300 MW class compressed air energy storage power plant in Yingcheng, Hubei [J]. *Papermaking equipment & materials*, 2023, 52(8): 148-150. DOI: 10.3969/j.issn.1672-3066.2023.08.049.
- [21] TABOR G R, BABA-AHMADI M H. Inlet conditions for large eddy simulation: a review [J]. *Computers & fluids*, 2010, 39(4): 553-567. DOI: 10.1016/j.compfluid.2009.10.007.
- [22] HINZE J O, UBEROI M S. Turbulence [J]. *Journal of applied mechanics*, 1960, 27(3): 601. DOI: 10.1115/1.3644063.
- [23] CHORIN A J. Numerical Solution of the Navier-Stokes Equations [J]. *American mathematical society*, 1968, 22: 745-762. DOI: 10.1090/S0025-5718-1968-0242392-2.
- [24] ISSA R I, AHMADI-BEFRUI B, BESHAY K R, et al. Solution of the implicitly discretised reacting flow equations by operator-splitting [J]. *Journal of computational physics*, 1991, 93(2): 388-410. DOI: 10.1016/0021-9991(91)90191-m.
- [25] BARTH T, JESPERSEN D. The design and application of upwind schemes on unstructured meshes [C]//AIAA. Proceedings of the 27th Aerospace Sciences Meeting, Reston, USA, January 9, 1989-January12, 1989. Reno: AIAA, 1989: 366. DOI: 10.2514/6.1989-366.
- [26] RHODERICK G C, CARNEY J, GUENTHER F R. NIST gravimetrically prepared atmospheric level methane in dry air standards suite [J]. *Analytical chemistry*, 2012, 84(8): 3802-3810. DOI: 10.1021/ac300526v.
- [27] DUTTA T, SINHAMAHAPATRA K P, BANDYOPADHYAY S. Numerical investigation of gas species and energy separation in the Ranque-Hilsch vortex tube using real gas model [J]. *International journal of refrigeration*, 2011, 34(8): 2118-2128. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2011.06.004.
- [28] MORI M, MASUMOTO T, ISHIHARA K. Study on acoustic, vibration and flow induced noise characteristics of T-shaped pipe with a square cross-section [J]. *Applied acoustics*, 2017, 120: 137-147. DOI: 10.1016/j.apacoust.2017.01.022.
- [29] JEONG J, HUSSAIN F. On the identification of a vortex [J]. *Journal of fluid mechanics*, 1995, 285: 69-94. DOI: 10.1017/S0022112095000462.
- [30] FRIEDLANDER S K, TOPPER L. Turbulence. classic papers on statistical theory [M]. New York: Interscience Publishers Inc., 1961.
- [31] TINDALE J V. Flow-induced vibration design guidelines [J]. *International journal of heat and fluid flow*, 1982, 3(4): 170. DOI: 10.1016/0142-727x(82)90014-5.

作者简介:



宋江文

宋江文 (第一作者)

1971-, 男, 正高级工程师, 主要从事火电、新型储能等电力工程设计工作 (e-mail) songjw@nwepdi.com。



王海涛

王海涛 (通信作者)

1981-, 男, 高级工程师, 主要从事电厂热能动力、新型储能技术研究工作 (e-mail) wanghaitao@xjtu.edu.cn。

(编辑 徐嘉铨)