

离心压缩机仪表测量误差对防喘振控制稳定性的影响及补偿策略研究

谢毅 王明 郝思源

国家管网集团北京管道有限公司 北京 100020

摘要: 本文聚焦天然气站场离心压缩机防喘振控制, 研究仪表测量误差对其稳定性的影响及补偿策略。先阐述防喘振控制理论基础, 包括喘振机理、控制方法及仪表测量系统作用。接着分析测量误差建模、对控制的影响机理并进行仿真。最后提出基于数据驱动、模型修正及混合补偿策略, 经实验验证, 混合策略能显著提升补偿精度与鲁棒性, 为压缩机稳定运行提供保障。

关键词: 离心压缩机; 仪表测量; 防喘振控制稳定性; 补偿策略

引言

在天然气管道系统中, 离心压缩机是关键设备, 其稳定运行至关重要。然而, 喘振现象作为离心压缩机在小流量工况下的典型不稳定运行问题, 严重影响着压缩机的性能与安全。仪表测量系统作为防喘振控制的“感知器官”, 其测量误差会干扰控制策略的准确性。深入研究仪表测量误差对防喘振控制稳定性的影响, 并探寻有效的补偿策略, 对于保障站场离心压缩机的安全运行具有重大意义。

一、离心压缩机防喘振控制理论基础

(一) 喘振机理与特性分析

离心压缩机喘振是其在小流量工况下极易出现的一种典型不稳定运行现象, 其产生的根源在于压缩机排气压力与管网阻力之间无法实现有效匹配。当压缩机实际运行时的流量低于临界流量这一关键值时, 气流在叶轮和扩压器内部会出现严重的分离状况, 导致排气压力产生周期性的波动。当喘振发生时, 压缩机的一系列运行参数会发生急剧变化^[1]。出口压力呈现出压力骤降后迅速回升的周期性脉冲特征; 入口流量不仅数值大幅波动, 还会伴随反向气流的出现; 机组振动频率多集中在低频段, 且幅值显著增大, 同时还会产生异常噪声。喘振的特性并非一成不变, 它受到压缩机结构、转速、介质性质以及管网特性等多种因素的综合影响。通过绘制不同工况下压缩机的性能曲线与喘振边界线, 能够清晰、直观地界定出稳定运行区域与喘振风险区域, 为后续实施有效的防喘振控制提供坚实可靠的基础依据。

(二) 防喘振控制方法

离心压缩机的防喘振控制方法主要可划分为固定极限流量控制、可变极限流量控制以及智能控制这三大类别。固定极限流量控制作为最为基础的一种方法, 其原理是通过预先设定一个固定的最小流量阈值。在压缩机运行过程中, 当实际测量得到的流量低于这个设定的阈值时, 系统会自动打开回流阀或者放散阀, 以此增加压缩机的流量, 防止喘振的发生。这种方法具有控制逻辑简单、可靠性高的显著优点, 然而在变转速工况下, 它会造成较大的能量浪费, 因为即便在不需要那么大流量的情况下, 也会为了达到固定阈值而额外增加流量。可变极限流量控制则更为先进, 它根据压缩机的转速、入口压力、入口温度等实际工况参数, 实时计算当前工况下的喘振临界流量, 使得控制阈值能够随着工况的变化而动态调整。与固定阈值控制相比, 这种方法极大地提升了能量的利用率。常见的实现方式包括基于性能曲线的计算法和基于经验公式的预估法。智能控制方法则融合了现代控制理论与人工智能技术, 例如模糊控制能够巧妙地处理参数模糊性问题, 神经网络可以通过学习大量的历史数据来优化控制策略, 模型预测控制能够提前预判工况的变化并制定出相应的控制方案, 这类方法在适应复杂工况方面能力更强, 控制精度也更高^[2]。

(三) 仪表测量系统在防喘振控制中的作用

仪表测量系统堪称离心压缩机防喘振控制的“感知器官”, 其测量数据的准确性和及时性直接决定了控制策略的准确性与可靠性。其中, 入口流量是判断压缩机是否接近喘振边界的关键参数, 必须采用高精度的流量计

对其进行实时监测，一旦流量接近临界值，就要及时采取控制措施。出口压力数据对于分析管网阻力的变化情况至关重要，能够为调整流量控制阈值提供有力的依据；入口温度和介质组分数据可用于修正密度参数，从而确保临界流量计算的精度；转速信号在可变极限流量控制中是判断工况的重要依据之一；而振动监测则能够辅助判断喘振的发生趋势，提前做好防范准备。测量系统由传感器、变送器、信号传输线路以及数据采集模块等部分组成，系统的稳定性将直接影响到防喘振控制效果，因此它需要具备良好的抗干扰能力、温度适应性以及长期运行稳定性。

二、仪表测量误差对防喘振控制稳定性的影响分析

(一) 测量误差建模

仪表测量误差建模是量化分析误差影响的基础，需结合测量系统特性与工况条件构建精准模型。测量误差按来源可分为系统误差、随机误差和粗大误差，系统误差由仪表校准偏差、安装位置不当、环境温度漂移及信号传输损耗等固定因素引起，建模时可通过回归分析建立误差与影响因素的函数关系，如温度漂移引起的流量测量误差可表示为温度偏差的线性函数。随机误差由传感器噪声、电网波动及介质流速脉动等随机因素导致，通常采用正态分布模型描述，通过统计方法确定误差均值、方差等特征参数。粗大误差由仪表故障、信号干扰突变等异常因素引起，建模时需先通过格拉布斯准则等方法识别并剔除^[3]。综合误差模型通过叠加系统误差、随机误差分量构建，同时需考虑各参数间的耦合关系，如入口压力变化不仅影响压力测量误差，还会通过密度变化间接影响流量测量误差，使模型更贴合实际运行场景。

(二) 误差对防喘振控制的影响机理

仪表测量误差通过扭曲工况判断结果影响防喘振控制稳定性，不同参数误差的影响路径存在差异。入口流量测量正误差会使控制器误判当前流量高于实际值，当实际流量已接近喘振临界值时，控制器仍未触发防喘振动作，导致喘振风险大幅提升；负误差则会使控制器提前开启回流或放散阀，造成能源过度浪费，同时频繁动作会加剧阀门磨损，降低控制系统使用寿命。出口压力测量误差会干扰管网阻力判断，若压力测量值偏高，控制器会误判管网阻力增大，进而提高临界流量控制阈值，导致正常工况下出现不必要的防喘振动作；压力测量值偏低则可能忽视管网阻力的实际增长，使系统运行逼近

喘振边界。入口温度和密度测量误差会导致临界流量计算偏差，温度测量偏高会使计算的临界流量偏小，控制器误判安全余量充足，实际已处于风险区域；转速测量误差会影响可变极限流量曲线的匹配精度，使动态阈值偏离真实临界值，降低变工况下的控制可靠性。

(三) 仿真分析

基于MATLAB/Simulink搭建离心压缩机防喘振控制仿真平台，结合国家管网集团某输气站场实际参数设定仿真模型参数，设计年输气量300亿立方米，管径1219mm，设计压力12MPa。压缩机型号为PCL804电驱离心压缩机，叶轮直径0.8m、设计转速4800r/min、设计流量 $85 \times 10^4 \text{Nm}^3/\text{h}$ 。管网阻力系数按实际管网特性曲线设定。仿真场景涵盖额定工况、变转速工况及管网阻力突变工况，分别引入不同幅值的流量、压力、温度测量误差，监测控制器输出、回流阀开度、机组流量及压力变化曲线^[4]。额定工况下，当流量测量引入5%正误差时，仿真结果显示系统在实际流量降至临界值后仍未触发防喘振动作，3秒后出现压力骤降、流量反向的喘振现象；引入5%负误差时，回流阀开度维持在15%左右，比无误差工况增加10%，能耗提升约8%。变转速工况下，转速测量2%误差导致临界流量计算偏差3%，控制器响应延迟0.5秒，阀门动作频繁度增加20%。管网阻力突变工况下，压力测量误差使控制器对阻力变化的识别滞后1秒，系统超调量增加15%。

三、仪表测量误差补偿策略研究

(一) 基于数据驱动的误差补偿方法

采用基于数据驱动的误差补偿方法，无需构建复杂的物理模型。在实际操作中，首先需全面采集压缩机在不同工况下的仪表测量数据，这些数据涵盖流量、压力、温度、转速等关键参数。借助高精度标准仪表同步获取对应参数的真实值，以此构建一个包含10万组样本的庞大补偿数据集。该数据集的样本全面覆盖了额定工况、变转速工况、变负荷工况等全工况范围，确保数据的广泛性和代表性。为降低模型计算复杂度，采用PCA分析对数据集进行降维处理^[5]。经过分析，提取出入温度、出口压力、转速等5个主要影响因子，这些因子能够高度概括数据的主要特征。随后，构建BP神经网络补偿模型，其输入层为原始测量值及工况影响因子，输出层为误差补偿量。隐含层设置为3层，节点数分别为12、8、4，采用梯度下降法对网络权重进行优化。在模型训练过程中，将数据集按照70%用于训练、20%用于验证、

10%用于测试的比例进行划分。经过500次迭代训练后,模型成功收敛。经补偿后,流量测量误差由原来的 $\pm 5\%$ 大幅降至 $\pm 0.8\%$,压力测量误差也由 $\pm 3\%$ 降至 $\pm 0.5\%$ 。为进一步提升模型适应性,引入在线学习机制,实时采集新工况数据并更新模型参数,确保在介质组分变化等特殊工况下,模型仍能保持较高的补偿精度^[6]。

(二) 基于模型修正的动态补偿策略

基于模型修正的动态补偿策略以压缩机机理模型为核心,通过实时调整模型参数抵消测量误差。首先,构建热力学模型与误差模型:前者采用欧拉方程结合多变过程方程,精确描述压缩机流量、压力与转速、入口参数的关系;后者基于仪表校准数据,涵盖零点漂移、量程偏差等系统误差及随机误差。以入口流量、出口压力为关键观测变量,通过扩展卡尔曼滤波算法实时估计模型参数,动态修正误差模型中的零点、增益参数,最小化模型输出与真实值的偏差。设计前馈-反馈复合补偿结构:前馈通道根据工况变化提前计算补偿量,反馈通道通过对比模型预测值与标准测量值动态调整补偿系数^[7]。变负荷测试中,负荷从100%降至60%时,流量测量误差稳定在 $\pm 1\%$ 以内,较无补偿方案降低70%;温度波动工况下,压力测量误差波动幅度控制在 $\pm 0.6\%$,有效抑制环境干扰,确保测量精度与稳定性。

(三) 混合补偿策略设计

混合补偿策略巧妙融合了数据驱动方法的适应性与模型修正方法的机理可靠性,通过动态权重分配实现不同工况下的最优补偿。数据驱动模块采用随机森林算法构建误差预测模型,利用多特征输入的方式,显著提升复杂工况下的误差预测精度,能够更好地应对各种复杂多变的工况。模型修正模块基于改进粒子群优化算法修正机理模型参数,加快参数收敛速度,使模型能够更快地适应实际情况的变化。权重分配模块采用模糊控制逻辑,以工况复杂度、数据质量及模型偏差为输入变量,动态计算两个补偿模块的权重系数。在额定工况下,由于数据质量高且模型偏差小,分配模型修正模块权重0.7、数据驱动模块权重0.3;在变转速、变介质等复杂工况下,数据驱动模块权重提升至0.6-0.8,充分利用其强适应性保证补偿效果^[8]。实验验证表明,该策略在额定

工况下流量补偿误差为 $\pm 0.7\%$,在变介质工况下误差为 $\pm 1.2\%$,在仪表轻微故障导致数据失真时,能通过权重调整将误差控制在 $\pm 2\%$ 以内。相比单一补偿方法,综合补偿精度提升20%-30%,鲁棒性显著增强,为压缩机测量误差补偿提供了更为可靠、高效的解决方案。

结束语

本文围绕输天然气管道离心压缩机,深入探讨了仪表测量误差对防喘振控制稳定性的影响,并针对性地提出了多种补偿策略。通过理论分析、仿真模拟与实验验证,证实了混合补偿策略在提升补偿精度与增强鲁棒性方面的显著优势。未来,可进一步优化补偿算法,提高其在实际复杂工况下的适应性,为离心压缩机防喘振控制提供更完善的技术支持,确保输天然气管道系统的安全平稳运行。

参考文献

- [1]张宏宇,李建明,王磊.离心压缩机流量测量误差对防喘振控制的影响及修正[J].化工学报,2024,75(5):2011-2020.
- [2]刘芳,陈志强,吴伟.基于卡尔曼滤波的离心压缩机压力测量误差补偿方法[J].机械工程学报,2023,59(8):165-174.
- [3]赵军,孙晓娜,周健.离心压缩机防喘振控制中多仪表误差耦合机理及解耦补偿[J].动力工程学报,2022,42(11):923-931.
- [4]黄志远,林梅,张伟.磁悬浮离心压缩机振动干扰下的仪表误差抑制与补偿[J].制冷学报,2023,44(3):89-97.
- [5]牛聪.离心压缩机机械振动故障分析[J].中国设备工程,2025(12):194-196.
- [6]周卫,李家兵,李庭建,等.离心压缩机故障分析及处理[J].化工生产与技术,2023,29(5):33-35.
- [7]陈学强,李帅,熊荣.大型离心压缩机轴系故障分析及对策[J].合成纤维,2025,54(7):38-40.
- [8]肖军,舒悦,刘晓明,等.离心压缩机喘振特性及喷射扩稳研究[J].流体机械,2021,49(01):67-72.