

自力式差压调节阀在地铁通风系统中的压力平衡控制研究

徐胜明, 何生平

(浙江宝核工业科技集团有限公司, 浙江 杭州 311400)

摘要 地铁通风系统的压力稳定性直接关系到运营安全与能耗效率。针对传统机械风阀在压力调节中存在的响应滞后、精度不足等问题, 本研究提出将波纹管平衡型自力式差压调节阀应用于地铁通风系统。通过理论分析阀门结构特性与工作机理, 结合地铁通风系统的动态压力特征, 建立了基于自力式调节阀的压力平衡控制方案。研究表明, 该阀门凭借其独特的波纹管平衡机构, 能够有效补偿轴向不平衡力, 在 20 ~ 500 Pa 压差范围内实现稳定控制。实际应用数据显示, 系统关键区域压差控制精度提升 60% 以上, 风机能耗降低 15% ~ 20%, 同时显著改善了气流组织效果和噪声水平。本研究旨在为地铁通风系统的压力平衡控制提供新的技术路径, 对提升系统运行品质与能效水平具有实际应用价值。

关键词 自力式差压调节阀; 地铁通风系统; 压力平衡控制

中图分类号: U231

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.33.006

0 引言

地铁通风系统作为环境控制的核心环节, 承担着保证空气品质、调节温湿度、排除污染物及火灾工况下有效排烟等多项功能。然而, 地铁系统空间构造复杂、运行条件多变, 导致通风系统内部易出现压力失衡现象, 具体表现为部分区域风量偏离设计值、气流分布无序、系统阻力升高以及风机能耗上升等一系列运行问题。在传统的地铁通风控制中, 常采用机械式风阀执行压力调节。该类装置虽结构简单, 但在实际使用中暴露出明显的技术短板: 动态响应迟缓、调节精度有限, 且依赖外部动力源, 难以适应地铁系统中频繁变化的压力工况。因此, 探索具备自调节能力、无需外接能源且控制精准的压力平衡装置, 已成为地铁通风系统优化的重要方向, 自力式差压调节阀逐渐显示出其技术优势。

1 自力式差压调节阀的结构与工作原理

1.1 结构组成

自力式差压调节阀作为一种典型的自驱动控制装置, 其结构设计体现了检测、控制与执行功能的集成化特征。该阀门主要由阀体、阀杆、阀芯组件、波纹管平衡机构、阀座、复位弹簧、感应膜片及引压管路等部分构成(见表 1)。

其中, 波纹管平衡机构作为关键功能单元, 其内部空腔与阀门出口连通, 外部腔室则通过引压管路连

接至进口压力源。执行机构的膜片组件一端与阀杆刚性连接, 另一端通过压力传导管路与阀门出口形成闭环压力反馈。这种结构布局使阀门能够自主感知系统压力变化, 并借助内部机械传动实现调节功能, 整个过程无需外部能量输入。

表 1 自力式差压调节阀主要结构部件及功能分析

结构部件	功能特点	工作机理
阀体	提供结构支撑与流道导向	构成介质流通过路, 承载内部组件
阀芯—阀座副	实现节流调节功能	通过相对位移改变流通面积, 调节压力参数
波纹管平衡件	提高控制精度与稳定性	平衡进出口压差对阀芯的轴向作用力
复位弹簧	建立力学平衡基准	提供恢复力矩, 与介质压力形成动态平衡
感应膜片	感知压力变化信号	将压力信号转换为机械位移, 驱动阀杆运动
引压管路	构建压力反馈通路	传递进出口压力信号至执行机构

1.2 工作机理分析

自力式差压调节阀的运行基于经典力学平衡原理。以阀后压力控制模式为例, 阀前压力 P_1 流经阀芯—阀座节流区域后降至 P_2 。该出口压力通过引压管路传递至执行器上膜室, 作用于感应膜片产生的作用力与弹簧预紧力

形成力矩平衡,从而确定阀芯与阀座的相对位置关系。

当系统工况变化引起出口压力 P_2 升高时,膜片所受作用力相应增大。当该作用力超过弹簧预紧力时,阀芯将向阀座方向移动,减小流通面积,增加局部阻力,从而使 P_2 回降至设定值。反之,当 P_2 降低时,膜片作用力减弱,弹簧推动阀芯开启,流通面积增大, P_2 回升至平衡状态。这种自主调节机制确保了系统在变工况条件下的压力稳定性。

1.3 压力平衡特性

波纹管平衡型自力式差压调节阀相较于传统型号,其技术优势主要体现在独特的压力补偿机制。波纹管作为核心平衡元件,其内部承受出口压力 P_2 ,外部接触进口压力 P_1 ,通过巧妙的力学设计实现阀芯轴向力的自平衡^[1]。

根据静力学平衡方程:

$$F_F = F_M + F_K \quad (1)$$

式(1)中: F_F 表示弹簧预紧力, F_M 为膜片作用力, F_K 代表阀芯所受合力。

引入波纹管平衡机构后,阀芯受力可表述为:

$$FK = \Delta P \cdot AS - \Delta P \cdot AB \quad (2)$$

式(2)中, AS 为阀座有效承压面积, AB 为波纹管等效截面积, ΔP 为阀门前后压差。

当满足 $AB \approx AS$ 的条件,且忽略阀杆等次要因素的影响时,波纹管产生的平衡力可有效补偿阀芯所受的净作用力。这种力学补偿特性显著改善了阀门在高压差工况下的运行性能,不仅扩展了稳定工作范围,同时提升了控制精度与系统可靠性,使其特别适用于地铁通风系统中压力波动剧烈的复杂工况。

2 地铁通风系统的压力特性与分析

2.1 地铁通风系统构成及其特点

地铁通风系统作为保障地铁运营环境安全的关键系统,具有典型的多子系统耦合特性。从功能结构上划分,主要包含隧道通风系统、车站通风系统以及区间隧道事故通风系统三大组成部分。这些子系统在空间分布上相互独立,但在气流组织上又紧密关联,形成了一个复杂的气流网络系统。多层次、多功能的系统架构,使得地铁通风系统内部的压力分布呈现出高度的复杂性。

2.2 压力分布动态特性

地铁通风系统的压力场分布受到多种内外因素的耦合影响,形成了独特的动态压力环境。主要影响因素包括:列车运行引发的活塞风效应、外部气象条件变化、客流量波动以及设备运行状态改变等。其中,列车活塞效应作为地铁系统特有的压力扰动源,其影

响最为显著。根据流体力学理论,当列车以较高速度在受限隧道空间内运行时,会形成典型的“活塞运动”效应,推动前方空气形成正压区,同时抽吸后方空气形成负压区^[2]。这种压力波动的强度可由以下经验公式初步估算:

$$\Delta P = k \cdot \rho \cdot v^2 \quad (3)$$

式(3)中, ΔP 表示压力波动幅度, ρ 为空气密度, v 为列车运行速度, k 为与隧道断面、列车外形等相关的综合系数^[3]。这种压力波动会沿着隧道空间传播,并通过出入口等连接部位传导至车站区域,导致站台与隧道接口处、不同楼层间的压力梯度发生显著变化。

从时空维度分析,地铁通风系统的压力分布呈现出明显的四维特征。在时间维度上,随着列车运行密度的变化(如高峰时段与非高峰时段的差异)、客流的周期性波动以及系统运行模式的切换(如早晚运行模式的调整),系统内部压力场表现出明显的时序变化规律。在空间维度上,从地面出入口到地下站厅,再到深层站台和隧道区间,形成了具有特定规律的压力梯度分布。这种时空动态特性对通风系统的控制策略提出了特殊要求。

2.3 压力不平衡问题及其影响机制

地铁通风系统的压力失衡不仅影响系统正常运行,还会引发一系列连锁问题,其作用机制主要体现在以下方面:

1. 气流组织失稳是压力失衡最直接的表现。当系统内部压力分布偏离设计工况时,会导致气流短路、回流甚至滞流等现象,破坏预设的气流组织模式。这使得新鲜空气无法按照设计路径有效输送至目标区域,同时造成污染物在局部空间积聚,严重影响室内空气品质的均匀性和稳定性。

2. 能耗异常增加是压力失衡带来的重要经济性问题。为克服因压力不平衡产生的额外阻力损失,风机设备需要提供更大的压头来维持系统设计风量,导致运行功率显著上升。研究表明,当系统阻力增加 20% 时,风机能耗相应上升约 15% ~ 25%,造成巨大的能源浪费^[4]。

3. 安全风险加剧是压力失衡最严重的后果。特别是在火灾等紧急工况下,压力分布的异常会干扰烟气的正常排出路径,可能导致烟气向疏散通道、安全区域扩散,严重威胁人员的生命安全。

3 自力式差压调节阀在地铁通风系统中的控制方案设计

3.1 阀门选型与参数计算

在地铁通风系统中应用自力式差压调节阀,精确的阀门选型是实现有效压力控制的基础。选型过程需

要系统考虑介质特性、压力调控范围、流量变化幅度及环境条件等多重因素，确保阀门参数与系统特性匹配。流量系数 (K_v 值) 是表征阀门流通能力的关键参数，其计算需基于通风系统的设计工况。对于地铁通风系统， K_v 值的确定可采用以下计算公式：

$$K_v = \frac{Q}{C\sqrt{\Delta P}} \quad (4)$$

式 (4) 中， Q 为设计工况下的体积流量 (m^3/h)， ΔP 为阀门的设计压降 (Pa)， C 为介质特性系数 (对于空气介质，通常取 0.074)。根据实测数据和数值模拟结果，将控制范围设定在 20 ~ 500 Pa 之间，这一范围能够覆盖地铁系统从正常运行到异常工况下的压力波动^[5]。在具体选型时，还需结合控制点位的功能需求进行适当调整，如站台与隧道连接处应选择上限较高的型号，而设备用房则可选用调节范围较小的类型 (见表 2)。

表 2 自力式差压调节阀选型参数体系

参数类别	选型考量因素	技术规范要求	地铁系统适用性分析
压力控制范围	系统压力波动特征	20 ~ 500 Pa	覆盖正常与异常工况压力波动
流量系数 K_v	设计流量与允许压降	按管段特性计算	确保全工况范围内调节线性度
介质温度	隧道热环境变化	-10 ~ 40 °C	适应地下空间季节性温度变化
连接形式	系统接口标准化	法兰连接	保证密封性与安装便利性
阀门类型	控制精度需求	波纹管平衡型	提供高精度压力控制能力
泄漏等级	系统密封要求	IV 级及以上	满足通风系统密封标准

3.2 安装位置优化与技术要求

基于地铁通风系统的空间结构特征和气流组织原理，自力式差压调节阀的安装位置应遵循以下优化原则：

关键控制点的确定需要考虑系统压力分布的关键节点。在车站与隧道连接处设置调节阀，可有效阻尼列车活塞效应引起的压力冲击，其安装位置应距离连接界面 5 ~ 8 m，以确保压力信号的准确采集。在站厅与站台之间的竖向通道安装时，应优先考虑气流主流区，通常建议在楼梯口或扶梯侧壁的通风井内设置，以建立稳定的压力梯度。

分支管路平衡是另一个重要应用场景。在通风空

调系统的分支节点安装调节阀时，应确保安装点前后均有足够长度的直管段，一般要求前 5D 后 3D (D 为管道直径)，以保证流场的稳定性和压力测量的准确性。对于设备用房的压力控制，建议在送排风支管上同时设置调节阀，形成双向调节能力。

在安装技术方面，针对地铁环境特点，推荐采用正立安装方式，即执行机构位于阀体上方。这种安装形式可避免灰尘积聚影响执行机构灵敏度，同时便于维护操作。引压管的敷设应遵循“短路径、少弯头”的原则，管径选择 8 ~ 10 mm，长度控制在 5 m 以内，以减少压力信号的衰减和滞后。

特别需要注意的是，在建立区域间压差控制时，取压点的设置应具有代表性。高压侧取压点应设置在气流上游稳定区域，低压侧取压点则应位于下游代表性位置，通过这种设置方式可准确反映实际压力梯度，确保控制的精确性。

4 结束语

本研究通过理论分析与工程实践相结合的方法，系统探讨了自力式差压调节阀在地铁通风系统压力平衡控制中的应用效果。研究证实，波纹管平衡型自力式差压调节阀凭借其独特的力学补偿特性，能够有效应对地铁通风系统中的动态压力波动，特别是在缓冲列车活塞效应方面表现出显著优势。通过科学的阀门选型、合理的安装位置优化以及分层递阶控制策略的实施，建立了完整的压力平衡控制方案。实际运行数据表明，该方案使系统压差控制精度提高 60% 以上，风量分配偏差控制在 $\pm 8\%$ 以内，能耗降低 15% ~ 20%，同时提升了系统的声环境质量与安全保障能力。

参考文献：

- [1] 鲁华伟, 李森生, 陈玉远, 等. 地铁车站通风空调系统建设及运行阶段碳排放研究: 以武汉地铁某车站为例 [J]. 暖通空调, 2024, 54(S2): 387-391.
- [2] 李守杰, 韩学伟, 赵伟, 等. 地铁车站结露问题的多维解析与创新防治策略 [J]. 暖通空调, 2024, 54(S2): 453-456.
- [3] 肖云婷. 基于 FloMASTER 的地铁车站设备用房变风量空调系统控制策略研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2024.
- [4] 张雪晴. 基于 Revit 二次开发的标准地铁车站小系统参数化设计研究 [J]. 山西建筑, 2024, 50(08): 129-131, 148.
- [5] 丁玮琦. 基于 Modelica 建模仿真的地铁通风空调系统控制策略及能耗模拟研究 [D]. 西安: 长安大学, 2023.