

天然气长输管道分输压力控制系统技术研究

贺子夜

中石化石油工程设计有限公司成都分公司 四川 成都 610000

摘要：天然气长输管道分输压力控制系统对保障供气安全稳定至关重要。其核心构成包括执行、测量、控制三单元，采用传统PID与先进控制算法，并注重安全连锁与冗余设计。系统面临压力调节稳定性与快速性矛盾、多耦合变量协调控制、设备非线性与滞后性等技术挑战，需采用变参数PID、多变量解耦控制、非线性补偿等策略优化，以实现高精度调控。

关键词：天然气长输管道；分输站；压力控制系统技术研究

引言：天然气长输管道分输压力控制系统是保障天然气稳定供应与安全运行的核心装置，其性能直接影响下游用户的用气质量与管道运行安全。该系统需应对高压差、大流量、动态负荷波动等复杂工况，同时需兼顾压力调节的稳定性、快速性及多参数耦合下的协调控制。本文从系统的重要性与功能要求出发，深入剖析其核心构成、控制策略与技术应用，并针对压力调节矛盾、多变量耦合及设备非线性等挑战，提出优化方向，为系统的高效可靠运行提供理论支撑。

1 分输压力控制系统的重要性与功能要求

天然气长输管道分输压力控制系统作为保障下游供气安全与稳定运行的核心技术装置，其重要性贯穿于天然气输送的全生命周期管理。该系统通过多级压力调节与智能控制技术的深度融合，承担着三大核心功能：

(1) 作为压力转换的关键枢纽，系统需将上游干线输送的高压天然气通过高精度减压阀组逐级降至下游管网所需的运营压力，压力调节精度需严格控制在 $\pm 1.5\%$ 以内。同时，针对下游用气负荷的动态波动特性（如居民用气日峰谷差可达3:1、工业用户瞬时流量突变超 $5000\text{m}^3/\text{h}$ ），系统采用自适应PID控制算法与模糊控制策略，通过实时调节阀门开度实现压力的动态平衡，确保下游管网压力波动范围不超过设定值的 $\pm 5\%$ 。

(2) 系统构建了三级超压防护体系：第一级通过机械式安全阀实现基础保护，当压力超过设定值（通常为工作压力的1.1倍）时自动泄压；第二级采用电控紧急切断阀（ESD），在压力持续上升至1.2倍工作压力时，系统将在200ms内完成气源切断；第三级设置远程监控终端，当检测到异常工况时，可通过SCADA系统联动上游调压站进行压力调节。三重保护机制形成冗余设计，确保在任何单一部件失效时仍能保障系统安全。

(3) 系统通过物联网传感器网络与大数据分析平台，实现供气模式的智能化升级。实时

采集的压力、流量、温度等参数经边缘计算处理后，结合用户用气历史数据与气象预测信息，构建动态需求预测模型。系统据此自动调整运行参数，既能满足居民用户24小时连续供气的基本需求，又可应对工业用户计划性停产检修等突发工况，最终形成“压力精准调控-安全冗余防护-需求智能响应”的闭环控制系统，为天然气长输管道的安全高效运行提供技术支撑^[1]。

2 分输压力控制系统的核心构成

2.1 执行机构

分输压力控制系统的执行机构是压力调节的直接操作单元，其核心功能是通过机械动作改变气体流通截面积以实现压力控制。（1）该机构以调压阀为核心设备，其工作原理基于流体力学节流效应：当阀芯在驱动装置作用下相对阀座移动时，二者间形成的环形通道截面积发生变化，气体通过狭窄通道时因流速增加导致压力降低，从而实现降压功能。调压阀的阀芯通常采用锥形或球形结构，配合精密导向机构确保轴向运动的稳定性，阀座表面经硬化处理以提高耐磨性能。（2）驱动装置分为气动和电动两种类型：气动执行机构通过压缩空气推动活塞或薄膜产生直线位移，具有防爆性能好、响应速度快的特点；电动执行机构采用伺服电机驱动齿轮减速机构，将旋转运动转换为阀杆直线运动，具备控制精度高、信号传输便捷的优势。两类驱动装置均可接收来自控制系统的电信号或气信号，并将其转换为阀门的开度变化，最终完成压力调节动作。

2.2 测量单元

测量单元作为分输压力控制系统的关键数据采集模块，承担着实时获取工艺参数的重要职能。其核心设备包括压力变送器与流量计两类传感器：压力变送器采用高精度压阻式或电容式传感元件，通常成对安装于调压阀前后端，分别对进口高压与出口低压进行连续监测，

测量精度可达 $\pm 0.1\%FS$ ，输出4-20mA标准信号或数字通信信号供控制系统分析。流量计则根据工况需求选用涡轮、超声或孔板式等不同原理的仪表，其中涡轮流量计适用于中低流量工况，超声流量计具备无压损优势，孔板式流量计则常用于高压大流量场景。所有测量设备均需通过防爆认证（Ex d/Ex ia）并配备温度补偿功能，确保在 $-40^{\circ}C$ 至 $+60^{\circ}C$ 环境温度下保持测量稳定性，其数据采集频率不低于10Hz，为控制系统提供实时、准确的工艺参数反馈^[2]。

2.3 控制系统

控制系统作为分输压力控制系统的核心决策模块，通常采用可编程逻辑控制器（PLC）或分布式控制系统（DCS）作为硬件平台。其工作原理基于闭环反馈控制机制：系统持续采集测量单元传输的压力信号（采样周期 $\leq 200ms$ ），通过高精度A/D转换模块将模拟量转换为数字量，并与预设压力值（可分时段设置多级压力目标）进行实时比对。当偏差超过允许范围时，内置的控制算法（如PID算法或模糊控制算法）根据偏差大小、变化速率等参数进行动态计算，生成相应的控制指令。该指令经D/A转换后输出至执行机构，驱动调压阀阀芯移动以调整开度，直至实际压力回归设定值。现代控制系统还具备自诊断功能，可实时监测硬件状态、通信质量及算法执行情况，并通过冗余设计（如双PLC热备）确保系统可靠性，其控制响应时间通常小于1秒，满足天然气长输管道的实时调控需求。

3 核心控制策略与技术分析

3.1 传统PID控制原理

比例-积分-微分（PID）控制作为工业过程控制领域最具代表性的经典算法，在天然气长输管道分输压力控制系统中发挥着基础性作用。其控制逻辑基于对压力偏差的实时运算：比例环节（P）通过比例系数 K_p 将当前压力偏差值转换为控制量，实现快速响应，其作用强度与偏差大小成正比，但单独使用时易产生稳态误差；积分环节（I）通过积分系数 K_i 对历史偏差进行累积运算，持续修正比例环节的残留误差，确保系统输出最终精确趋近设定值，但积分作用过强可能导致系统超调；微分环节（D）通过微分系数 K_d 对偏差变化率进行预测，提前调整控制量以抑制压力波动，增强系统动态稳定性，但对噪声信号敏感。PID控制的实施难点在于参数整定：需根据管道长度、调压阀特性、用气负荷波动频率等工艺参数，通过Ziegler-Nichols法或试凑法确定 K_p 、 K_i 、 K_d 的最优组合。现代系统多采用自适应PID算法，通过在线辨识工艺参数变化自动调整控制参数，在保持经典PID结构

的同时提升对非线性工况的适应性。

3.2 先进控制算法的应用

针对天然气长输管道分输压力控制系统中存在的非线性、时变性与大滞后特性，传统PID控制难以满足高精度调控需求，先进控制算法的应用成为提升系统性能的关键路径。模糊控制通过构建模糊规则库实现智能决策，其核心在于将压力偏差、偏差变化率等精确量转化为“正大”、“负小”等模糊语言变量，基于专家经验制定的IF-THEN规则进行推理运算，最终输出调压阀开度调整量的模糊集合，再经解模糊处理得到精确控制信号。该算法对于模型误差有着良好的抗干扰能力，即便在面对用气负荷突变、管道压力波动等复杂工况时，依然能够保持稳定可靠的控制效果。自适应控制则通过在线参数估计机制实现动态优化，其典型实现方式包括模型参考自适应控制（MRAC）与自校正控制（STC），前者通过比较系统实际输出与参考模型输出调整控制器参数，后者利用递推最小二乘法等算法实时辨识系统动态特性，自动修正PID参数或控制律系数，有效应对调压阀磨损、管道结垢等导致的系统特性漂移问题，确保控制精度长期稳定在 $\pm 0.5\%$ 以内^[3]。

3.3 安全联锁与冗余设计

在天然气长输管道分输压力控制系统中，安全联锁与冗余设计是保障系统安全可靠运行的双重防线。（1）安全联锁系统作为独立于基础控制层的保护机制，采用故障安全型设计理念，其核心监测单元实时采集出口压力、阀门状态等关键参数，当压力超过设定安全阈值（如高压联锁值设定为工作压力的1.2倍，低压联锁值为0.8倍）或检测到执行机构卡滞、气源中断等故障时，系统将在100ms内触发紧急切断动作，直接驱动电磁阀关闭监控调压阀或串联设置的紧急切断阀（ESD），同时向控制中心发送报警信号。（2）设备冗余设计则通过多重硬件配置提升系统容错能力：调压支路采用“工作-监控-备用”三阀组结构，工作阀承担日常调压任务，监控阀实时跟踪工作阀输出压力，当偏差超过2%时自动切换至备用阀；控制单元配置双PLC热备系统，主从控制器通过同步光纤实时交换数据，任一单元故障可实现无缝切换；电源系统采用UPS不间断电源与双路市电输入，确保供电中断时持续供电30分钟以上；通信网络部署工业以太网，支持自愈功能，单节点故障不影响数据传输。

4 系统面临的技术挑战与优化方向

4.1 压力调节的稳定性与快速性矛盾

在天然气长输管道分输压力控制系统中，压力调节的稳定性与快速性矛盾是核心技术挑战之一。（1）下游

用气负荷的动态特性复杂,尤其是大型工业用户(如燃气电厂)的启停操作,可在数秒内引发出压力10%以上的阶跃变化,而居民用气峰谷差则导致压力呈现周期性缓慢波动。这种多尺度负荷扰动要求控制系统同时具备毫秒级快速响应能力与分钟级抗干扰稳定性。(2)传统PID控制因参数固定,在应对此类复合扰动时易出现超调振荡或调节滞后:增大比例系数可提升响应速度,但会降低系统阻尼比;强化积分作用虽能消除稳态误差,却会延长调节时间。(3)为此需采用变参数PID或复合控制策略,通过在线辨识负荷变化频率,动态调整控制参数,在压力突变时优先保证快速性,在稳态运行时侧重稳定性,同时引入前馈补偿环节提前抵消可预测扰动,实现调节品质的优化平衡。

4.2 多耦合变量下的协调控制

在天然气分输站压力控制系统中,多参数耦合特性显著增加了控制复杂度。压力与流量、温度等变量存在强动态关联:当下游用气量突增导致流量快速上升时,根据流体力学连续性方程,管道压力会因质量流量变化产生瞬态波动;而压力调节过程中,调节阀开度改变将引发流阻变化,进而反向影响流量分配。这种双向耦合效应在多路并联调压场景下更为突出——各支路调压阀动作相互影响,若缺乏协调控制,易出现某支路过载而其他支路未充分发挥调节能力的情况,即“抢气”现象,导致整体调节效率下降15%-20%。针对此问题,需采用多变量解耦控制策略,通过建立包含压力-流量动态关系的状态空间模型,设计前馈-反馈复合控制器,在压力调节同时补偿流量扰动;对于并联支路,引入负荷分配算法,根据各支路设备特性动态分配调节任务,确保系统整体调节平稳性与能效最优^[4]。

4.3 设备特性非线性与滞后性影响

在天然气分输压力控制系统中,执行机构的非线性特性与信号传递滞后性是影响控制精度的关键因素。调节阀普遍存在机械死区(通常为 $\pm 1\%$ 阀位行程)和回差(典型值0.5%-2%),导致相同控制信号下阀芯实际位

置存在偏差,尤其在低开度区域非线性加剧,直接影响压力调节的线性度。气动执行机构的气源压力波动、气缸摩擦力变化等因素进一步放大了这种非线性效应。同时,气动信号通过管路传输时存在明显滞后(典型延迟时间0.2-0.5秒),当压力波动频率超过0.5Hz时,控制信号与实际阀位响应出现相位差,导致系统动态性能恶化。针对这些问题,需在控制算法中引入非线性补偿模块:通过建立调压阀逆模型对控制信号进行预校正,消除死区和回差影响;采用史密斯预估器补偿气动传输滞后,提前计算未来时刻的压力控制量;结合自适应滤波技术动态调整补偿参数,确保在不同工况下均能实现 $\pm 0.5\%$ 以内的压力控制精度。

结束语

天然气长输管道分输压力控制系统作为保障能源输送安全与稳定的核心装置,其技术发展始终围绕“精准、安全、智能”三大核心目标。面对用气负荷动态波动、多参数强耦合、设备非线性滞后等复杂挑战,系统通过融合传统PID控制与先进智能算法,构建了多层次压力调节与安全防护体系。未来,随着物联网、大数据与人工智能技术的深度应用,系统将进一步向自适应优化、全流程数字化方向演进,通过实时需求预测与动态参数整定,实现压力控制精度与响应速度的双重提升,为天然气产业链的高效运行提供更可靠的技术支撑,推动能源输送系统向智能化、绿色化转型。

参考文献

- [1]熊雅琴.天然气集输系统计量输差原因与控制措施[J].化工管理,2020(18):7-8.
- [2]师小杰.天然气长输管道输差的成因与管控[J].广东化工,2020,44(19):99-101.
- [3]高生.天然气长输管道输差控制与分析[J].石化技术,2024,31(4):299-301.
- [4]牟科.浅谈天然气长输管道工程施工技术[J].建筑发展,2024,8(2):13-15.