

气压动态变化与恒流输出适配设计

任 静 罗荣海 陆佳成

浙江春晖智能控制股份有限公司 浙江 绍兴 312300

摘 要：针对工业气动系统气压漂移、突变及脉动扰动引发的恒流输出超调、响应滞后、精度下降等问题，本文剖析气压与恒流输出的耦合机理，建立动态耦合数学模型。设计气压前馈补偿与增量式PID反馈复合控制方案，引入参数自适应整定机制，搭建软硬件一体化自适应恒流控制系统。经仿真与实物试验验证，该系统可有效抑制多类型气压扰动，流量稳态精度、动态响应速度及抗干扰能力显著优于传统控制系统，满足工业现场高精度恒流输出应用需求。

关键词：气压动态变化；恒流输出；适配设计

引言：气动恒流控制系统广泛应用于工业自动化领域，而现场气压易受环境、气源及负载变动影响产生动态波动，导致传统纯反馈恒流控制存在响应滞后、抗扰性弱等缺陷，难以适配复杂工况稳定输出需求。为解决气压动态扰动与恒流输出的适配难题，本文系统分析气压波动特性与系统耦合规律，构建精准耦合模型，优化设计软硬件架构与复合控制算法。通过多工况仿真与实物试验验证方案可行性，旨在提升系统动态适配能力与恒流控制精度，为工业气动恒流设备优化提供技术支撑。

1 气压动态变化与恒流输出耦合机理分析

1.1 气压动态变化特性分析

(1) 气压动态波动类型主要划分为三类：稳态漂移（缓慢渐变的趋势性变化）、瞬时突变（阶跃或脉冲式跳变）以及周期性脉动（由压缩机往复运动或调节阀振荡引发的规则波动），三者可叠加共存。(2) 气压波动诱因可归为：环境干扰（温度变化、管道振动）、气源不稳定（供气压力波动、过滤器堵塞）、负载变化（用气设备启停或流量需求突变）三大类，其中负载变化是最主要的强扰动源。(3) 时域上提取波动幅值、变化速率及突变持续时间；频域上利用功率谱密度分析，辨识周期性脉动的基频及倍频成分，为后续耦合建模提供输入特征。

1.2 恒流输出系统工作原理与特性

(1) 恒流输出系统由四大模块组成：供气模块（气源及过滤稳压部件）、检测模块（流量、压力传感器）、控制模块（控制器及控制算法）、执行调节模块（比例调节阀或电气转换器），形成闭环控制回路。(2) 基本原理采用流量闭环控制，以设定流量为给定值，检测实际流量构成负反馈，经PID等算法调节执行机构，使输出流量在稳态下恒定于设定值，稳态精度取决于控制器的积分作用与系统增益。(3) 常规恒流系统的

固有缺陷在于：缺乏对气压变化的主动适配机制，当气源压力波动或负载突变时，仅依赖反馈调节被动响应，抗干扰能力有限，易出现超调或响应滞后现象^[1]。

1.3 气压-恒流耦合数学建模

(1) 静态耦合关系建模：根据节流孔流量方程： $Q = C_d A \sqrt{2(P - P_0)/\rho}$ ，推导稳态条件下压力与流量的关联方程，反映气压变化对稳态流量的影响规律。(2) 动态响应模型：在静态方程基础上引入气压扰动项，建立气压突变时流量瞬态响应的一阶惯性加纯延迟模型，刻画气压波动引发的流量动态偏移过程。(3) 通过阶跃响应实验数据进行参数辨识，采用最小二乘法估计模型参数，并对比模型输出与实测数据，验证模型在典型气压波动工况下的准确性与适用性，误差控制在合理范围内。

2 气压动态适配的恒流输出系统方案设计

2.1 系统整体设计目标与性能指标

(1) 核心设计目标：在供气压力发生稳态漂移、瞬时突变及周期性脉动等多类型动态扰动时，实现高精度、低脉动的恒流输出。系统通过气压前馈与流量反馈的协同控制，主动抑制气压波动对输出流量的影响，确保在宽范围气源变化条件下仍能稳定输出设定流量，整体目标定位为面向工业现场的实用化气压自适应恒流控制系统。(2) 关键性能指标明确为：流量稳态精度优于 $\pm 1\%$ 设定值；阶跃气压扰动下动态调节时间 $\leq 1.5s$ ，超调量 $\leq 10\%$ ；压力适配范围覆盖 $0.2\sim 0.8MPa$ （表压），且在 $20Hz$ 以内的周期性脉动干扰下，输出流量脉动幅值衰减率不低于 80% ；控制系统幅值裕度 $\geq 6dB$ 、相角裕度 $\geq 45^\circ$ ，保证全工况闭环稳定无振荡^[2]。(3) 系统设计约束条件包括：硬件层面优先选用工业级成熟器件以控制成本，控制板体积控制在 $100mm \times 80mm$ 以内适配紧凑安装，整机功耗不超过 $15W$ ；同时需适配典型气动系统的接口规格与安装方式，保证方案具有良好的工程可

实施性与现场适配性。

2.2 系统硬件架构设计

(1) 气压检测模块选用扩散硅压阻式压力传感器(量程0~1.0MPa, 精度 $\pm 0.25\%$ FS), 前端采用仪表放大器实现差分信号放大, 配合二阶有源低通滤波器(截止频率100Hz)滤除高频噪声干扰; 电路设计中增加零点校准与温度补偿电阻网络, 减小环境温度变化引起的测量漂移。(2) 流量检测与调节模块中, 流量传感器选用热式质量流量计(量程0~50L/min, 响应时间 $\leq 50\text{ms}$, 精度 $\pm 1\%$ FS), 安装于调节阀下游以保证测量稳定性; 执行机构采用高速比例电磁阀(响应时间 $\leq 30\text{ms}$, 线性度 $\leq \pm 2\%$), 并在传感器与调节阀之间增设气容以平抑局部脉动, 实现流量信号的平稳采集与精准调节。(3) 主控模块选用STM32F4系列MCU, 内置浮点运算单元满足控制算法实时计算需求; 驱动模块采用压控恒流源驱动比例电磁阀, 具备过流保护功能; 电路设计中实现模拟地与数字地单点隔离, 供电采用隔离型DC-DC模块, 有效抑制功率级对信号级的电磁干扰, 保障系统长期稳定运行。

2.3 气压自适应恒流控制算法设计

(1) 传统PID恒流控制算法仅依赖流量偏差进行反馈调节, 气压扰动须经“扰动→流量变化→传感器检出→控制器响应”的串行链路, 本质属于滞后纠正模式。对于快速突变型扰动, 反馈动作滞后明显, 易产生超调与长调节时间; 对于周期性脉动干扰, 单纯反馈控制幅值衰减能力有限, 难以满足高动态性能要求, 常规控制策略对气压动态扰动的适配存在根本性局限。(2) 为此设计气压前馈补偿+闭环反馈复合控制策略: 前馈通道实时采集供气压力信号, 依据已辨识的气压-流量耦合模型在线计算前馈补偿量, 提前叠加至控制输出端, 实现对气压扰动的超前主动补偿, 显著降低扰动传递增益; 反馈通道采用增量式PID对前馈补偿后的残余偏差及未建模扰动进行精细调节, 两者协同工作, 兼顾快速响应与稳态精度^[3]。(3) 为实现不同变化速率与幅值气压扰动下的稳定控制, 引入参数自适应整定机制: 通过实时辨识气压波动速率与幅值特征, 依据预设规则动态调整前馈补偿系数及PID增益参数, 使系统在缓慢漂移、快速突变及周期性脉动等多种气压工况下均能保持优良的控制品质与鲁棒性。

2.4 系统软件程序设计

(1) 主程序流程设计为: 系统上电后首先完成时钟、GPIO、ADC、DAC及通信接口初始化, 随后执行传感器自检与零点校准; 进入主循环后按固定采样周期

触发数据采集、数字滤波、控制算法解算、DA输出更新及状态刷新, 形成“采集→滤波→运算→输出”的确定性时序闭环, 确保实时性满足控制系统需求。(2) 气压动态监测与故障诊断子程序设计中, 对供气压力进行连续采样并计算滑动窗口内的变化速率与峰值超限判断; 当识别到压力突变速率超过安全阈值或压力值超出允许范围时, 立即执行保护动作(闭锁调节输出、发送报警标志), 同时记录故障时刻与特征数据, 便于事后分析与系统自恢复^[4]。(3) 恒流输出调节子程序负责协调前馈补偿量与PID反馈修正量的计算与叠加, 包含数字PID运算、前馈查表与输出限幅平滑处理; 数据通信子程序采用ModbusRTU协议, 按设定周期上传流量设定值/实际值、供气压力、控制输出量等关键运行参数, 并接收上位机下发指令, 支持远程监控、参数在线整定与固件升级功能。

3 系统仿真与试验性能验证

3.1 系统仿真模型搭建

(1) 基于MATLAB/Simulink搭建气压自适应恒流控制系统仿真平台, 包含三大核心模块: 气压扰动模块(采用信号发生器组合模拟稳态斜坡、阶跃突变及正弦脉动, 叠加白噪声模拟随机干扰)、复合控制模块(前馈补偿+增量式PID)、流量输出模块(含比例阀传递函数、气容气阻环节及传感器反馈滞后模型)。模型采样时间设为1ms, 采用变步长求解器以保证动态仿真精度。

(2) 仿真工况设置覆盖三类典型场景: 稳态漂移(供气压力以0.02MPa/s的速率从0.4MPa线性变化至0.6MPa)、瞬时突变(在 $t = 2\text{s}$ 时施加0.2MPa的阶跃扰动, 上升时间 $\leq 10\text{ms}$)、连续变化(0.3~0.7MPa范围内叠加幅值0.05MPa、频率5Hz的正弦脉动)。每种工况持续10s, 重复仿真3次取平均结果。(3) 设定核心评价指标: 流量稳态精度(计算后5s内实测均值与设定值的相对误差)、动态响应速度(阶跃扰动后流量首次进入 $\pm 2\%$ 误差带的时间)、稳态误差绝对值(波动幅值)。同时记录超调量和波动系数, 作为辅助评价依据。

3.2 仿真结果与性能分析

(1) 开展常规恒流系统(纯PID反馈)与本文适配系统(前馈+反馈复合)的抗扰动对比仿真。在0.2MPa阶跃突变下, 常规系统超调量达18%、调节时间2.8s, 而适配系统超调降至6%、调节时间缩短至1.2s, 流量波动幅值由 $\pm 5\%$ 降至 $\pm 0.8\%$, 验证了前馈补偿对快速扰动的显著抑制效果。(2) 分析不同气压变化速率(0.005、0.02、0.1MPa/s)下的恒流输出稳定性。结果表明, 低速率漂移下两者性能接近; 高速率(0.1MPa/s)时常规系统稳

态误差攀升至3.2%，适配系统误差仅1.1%，且波动系数保持在0.5%以内，证明自适应整定机制能有效应对速率变化。（3）通过控制变量法分析算法参数对适配性能的影响：前馈系数 K_f 过大会引入超调，过小则补偿不足；PID积分系数 K_i 主导稳态误差消除速度。采用响应面法优化得到最优参数组合（ $K_f = 0.78$ ， $K_p = 2.5$ ， $K_i = 0.6$ ， $K_d = 0.12$ ），此时综合性能指标最优。

3.3 实物试验平台搭建与测试

（1）搭建试验硬件平台：气源经精密减压阀和储气罐后接入比例调节阀（SMC ITV2030），下游安装热式流量计（量程50L/min）和压力传感器（量程1.0MPa）；控制核心为STM32F407开发板，配AD7606采集模块和DA输出驱动板。完成气路连接、电气接线及传感器零点校准，所有仪器经标准压力源标定，确保测量误差在允许范围内。（2）试验方案设计：设定流量为20L/min，分别施加四种气压扰动工况——①缓慢升压（0.005MPa/s）、②快速升压（0.1MPa/s）、③阶跃降压（0.3MPa瞬间跌落至0.15MPa）、④正弦脉动（幅值0.06MPa，频率5Hz）。每项试验持续30s，重复5次，记录压力与流量时程数据。（3）数据采集与处理：采样频率1kHz，对流量信号采用移动平均滤波（窗口长度50点）抑制高频噪声；误差计算采用稳态段（剔除前3s过渡过程）的均值误差与标准差，并计算最大绝对偏差，确保数据处理规范可复现^[5]。

3.4 试验结果分析与系统优化

（1）实测恒流输出精度分析：在阶跃扰动下稳态误差 $\leq \pm 1.2\%$ ，脉动工况下波动幅值衰减率达82%，适应系统在各工况下均能将流量控制在设定值 $\pm 1.5\%$ 以内，优于常规系统（ $\pm 5\%$ ），有效验证了气压自适应方案的实际适配效果。（2）仿真与试验结果差异分析：试验测得的

调节时间较仿真偏长约0.3s，稳态误差偏大0.2%~0.5%。原因分析包括：比例阀存在死区与非线性摩擦、传感器响应延迟比模型预设稍长、以及气路管容未完全建模等。（3）针对系统短板提出优化方案：为改善动态响应滞后，在前馈通道中增加一阶微分环节以提升超前预测能力；针对小幅残余波动，在反馈回路嵌入自适应陷波滤波器（中心频率跟踪脉动基频）进一步抑制周期性干扰；同时优化阀控驱动电压斜率限制，避免积分饱和和引发的超调，综合提升系统在全工况下的动态品质与鲁棒性。

结束语

本文完成了气压动态变化下自适应恒流输出系统的机理分析、方案设计、仿真验证与实物测试，有效解决了传统恒流系统抗气压扰动能力差的核心问题。所设计的前馈反馈复合控制策略，可适配气压渐变、突变、周期性脉动等多类工况，大幅提升流量控制精度与动态响应性能。后续可进一步优化算法非线性补偿能力，完善气路非线性建模，强化系统极端工况适配性，推动该自适应恒流方案在各类工业气动场景的规模化落地应用。

参考文献

- [1]刘军,王浩伟.气压动态扰动下气体恒流输出自适应控制设计[J].液压与气动,2024,17(06):89-95.
- [2]张鑫,李瑞峰.变气压工况下气体恒流系统动态特性与参数优化[J].仪器仪表学报,2023,44(09):156-164.
- [3]陈明,赵阳.基于模糊PID的气压波动恒流输出稳定控制研究[J].控制工程,2023,30(04):721-727.
- [4]周亮,吴佳伟.气体压力动态响应特性及高精度恒流装置设计[J].机械设计与制造,2022,32(11):267-270.
- [5]杨思远.气压动态扰动抑制与恒流输出适配系统设计[J].自动化与仪表,2025,40(05):45-49.