

自动控制在天然气压缩机组运行优化中的应用

郭贤超

四川科宏石油天然气工程有限公司，四川 成都 610000

摘要: 本文针对天然气压缩机组运行中存在的回流量控制效率低、能耗高等问题，以某典型压气站为研究对象，提出基于相似性原理与模糊控制理论的自动控制优化方案。通过建立压缩机性能曲线转换模型，结合现场实测数据验证了参数转换方法的有效性，其拟合精度达 98% 以上。研究创新性地设计了以入口流量偏差及变化率为输入的模糊控制算法，成功实现回流阀的智能调节，使回流阀平均开度降低 50%，回流量减少 11%，年节约电能 5.88 万~51.9 万元，并显著降低设备维护成本。结果表明，自动控制技术可有效提升压缩机组运行安全性与经济性，为天然气管网智能化管理提供重要参考。

关键词: 自动控制；天然气压缩机；模糊控制；节能优化

中图分类号

天然气压缩机组是油气输送系统的核心设备，其高效稳定运行对能源安全至关重要。然而，传统回流控制依赖人工经验，存在响应滞后、调节精度低等问题，导致回流量过高、能耗显著增加。某典型压气站数据显示，其回流量占比高达 26.3%，主电机负载增大、燃气轮机驱动能量浪费等问题突出，严重制约系统能效提升^[1]。为突破这一技术瓶颈，本研究以相似性原理为基础，重构压缩机实际运行条件下的性能曲线，解决出厂测试与现场工况差异问题；同时，结合模糊控制理论，开发回流阀智能调节系统，实现流量偏差的动态预测与阀门开度的精准控制。研究旨在通过自动控制技术优化压缩机组运行，降低能耗、提升安全性，为天然气管网智能化升级提供理论支撑与实践路径。

1 压气站压缩机组回流量运行现状分析

以某典型压气站为具体研究对象，该站区现配备有两台 RF36 型离心式压缩机机组，采用并联运行模式。每台压缩机组均配套安装一台 RB211 型双轴燃气轮机作为核心驱动装置，

系统总装机容量达到 20 兆瓦（MW），其防喘振控制系统流程详见图 1 所示。在现有运行模式下，回流阀的防喘振保护控制策略具体如下：当操作人员通过监控系统发现压缩机工况点与防喘振控制线之间的安全裕度降至 10% 时，即手动开启回流阀，每次阀门开度调整幅度控制在 5%~8% 的范围内；若监测到工况点已逼近防喘振控制线且入口流量显著降低时，操作人员将大幅提高回流阀开度至 30%~50%，具体开度数值的设定主要依赖于现场操作人员的实际经验判断和技术积累。

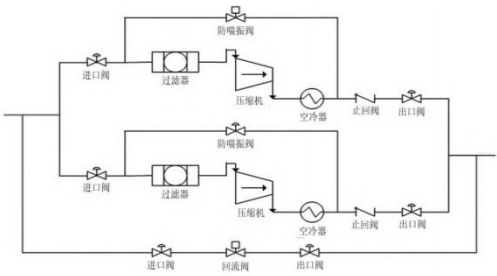


图 1 压气站防喘振流程

通过对 2023 年 1 月 15 日至 3 月 15 日期间的运行数据进行统计，重点监测了压缩机组的入口流量、回流量以及回流量占比情况，具体统计结果如图 2 所示。数据分析表明，该时

段内压缩机组的回流量波动范围较大，介于168~1475 m³/h 之间。同时，回流量占入口流量的比例最高达到 26.3%，最低仅为 4.6%。从运行数据来看，回流量的占比整体偏高，这种运行状态会带来一系列负面影响，包括主电动机因负载增加而出现大电流运行、压缩机出口温度升高等问题。此外，过高的回流量还会导致燃料轮机的驱动能量被大量浪费，降低整体系统的运行效率^[2]。

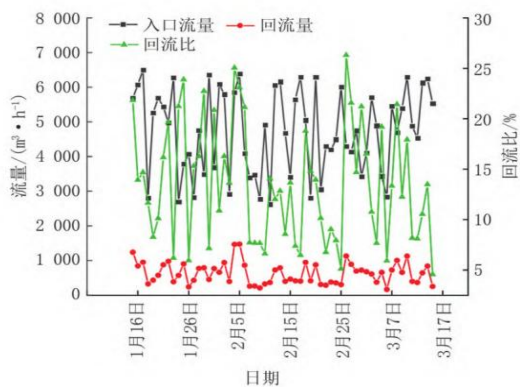


图 2 压缩机组动态回流情况

2 基于相似性原理的压缩机性能曲线转换方法研究

自动调节回流阀的关键在于精确定义运行点与防喘振控制界限之间的关系，后者需依据压缩机性能图谱来确立。在出厂阶段，厂商通常在标准化实验环境下（涵盖固定的入口压力、入口温度以及转速等因素），通过实验获取诸如压比、多变功和效率等性能指标随流量变化的数据，并将其汇总成技术指南。然而，

由于实际工作条件与实验室设定存在显著区别，初始性能图往往难以准确反映设备的真实操作特性^[3]。针对此问题，《轴流式、离心式压缩机及膨胀机》（API 617—2022）和《压缩机及鼓风机性能试验规程》（ANSI/ASME PTC10—2014）提出了两种根据相似原理推导出的性能图修正策略。考虑到实际介质与测试介质之间物理性质的差异，特别是绝热指数和马赫数的不同，本研究运用了第二类相似变换方法，对供应商手册中的分立工况点进行了系统的换算。

具体而言，在制造厂测试期间，该离心式压缩机利用纯甲烷作为工作介质，其摩尔质量为 16 g/mol，入口压力设为 3.9 MPa，温度保持在 45℃。而在实际操作环境中，气体成分包含 95.23%的甲烷，平均摩尔质量达到 17.02 g/mol，入口压力上升至 4.5 MPa，温度则下降到 6.5℃。为了评估所选转换方法的可靠性，本研究对比分析了 8,880 r/min 和 12,560 r/min 这两个典型转速下的结果。通过将实验工况转换结果与 SCADA 系统记录的实时监测数据进行对比（详见表 1），可以发现：原始实验工况参数与转换后的参数存在明显偏差，而经过相似原理转换得到的工况参数与实测值具有良好的一致性。结果充分证明基于相似原理的性能曲线转换方法的有效性，所获得的性能参数能够准确反映压缩机在实际运行条件下的真实特性。

表 1 实验工况、换算工况和实测值的对比结果

转速 /(r·min ⁻¹)	入口流量/(m ³ ·h - ¹)			压比			多变能量头/(kJ·kg - ¹)压比			压缩机组轴功率 /kW		
	实 验 工 况 值	换 算 工 况 值	实 测 值	实 验 工 况 值	换 算 工 况 值	实 测 值	实 验 工 况 值	换 算 工 况 值	实 测 值	实 验 工 况 值	换 算 工 况 值	实 测 值
12 560	3	3	3	2.6	3.2	3.2	15	164.	164.1	5 760	7	7
	700	729	728	5	4	8	5	15	5		246	246

8 880	3 900	4 000	4 006	2.6 1	3.1 5	3.1 1	14 6	161. 62	161.6	6 024	7 615	7 601
	4 456	4 500	4 507	2.5 7	3.0 7	3.0 2	13 7	155. 85	155.8 1	6 408	8 095	8 099
	12 560	4 850	5 000	5 009	2.4 5	2.9 2	2. 96	128	147.5 2	147. 52	6 631	8 377
	5 321	5 510	5 509	2.2 9	2.6 9	2.6 5	11 2	135. 31	135.4 9	6 765	8 541	8 550
	5 800	6 000	6 017	2.0 5	2.4 2	2.4 5	10 5	119. 36	121.0 7	6 664	8 429	8 457
	6 300	6 500	6 512	1.8 6	2.1	2.1 2	10 7	98.8 5	99.64	6 337	8 055	8 078
	2 300	2 452	2 458	1.6 9	1.8 6	1.8 9	92	80.3 7	82.65	1 765	2 233	2 239
	2 450	2 550	2 557	1.6 5	1.8 4	1.8 7	85	79.6 5	78.15	1 860	2 355	2 367
	8 880	2 785	3 000	3 017	1.6	1.7 8	1. 77	78	73.69	71.5 5	2 025	2 557
	3 285	3 500	3 505	1.5 3	1.6 5	1.6 5	69	64.2 6	62.47	2 089	2 639	2 645
	3 820	4 000	4 024	1.4 3	1.5 2	1.5 2	57	52.6	51.89	2 037	2 597	2 551

基于相似性原理转换得到的性能参数均为离散数据点，为构建完整的压缩机特性曲线，需采用曲线拟合方法将这些离散点转化为连续函数表达式。具体实现过程分为两个步骤：首先运用最小二乘法对各个转速下的转换工况点进行一次拟合，建立流量与各性能参数（如压比、效率等）之间的数学关系式；随后，对各个转速条件下获得的一次拟合系数实施了二次多项式拟合处理，旨在构建一套能精确描绘离心式压缩机全工况特性的通用模型方程。以入口流量与压比之间的关系曲线为例，在 12,560 r/min 这一特定转速条件下，实验

对比分析了三种常用的函数类型（包括多项式函数、指数函数以及幂函数）的拟合效能（详见图 3）。通过对拟合误差和确定系数等评估指标的详细探讨，结果显示多项式函数在拟合精度方面明显超越了其余两种函数形式，其生成的拟合曲线能够更加贴切地反映实际运行数据点的分布特征^[4]。基于最优拟合结果推导得到的压缩机特性方程参数见表 2 所示。

表 2 特性曲线对应的特性方程

参数	特性方程
关系	转速 12 560 r/min 转速 8 880 r/min

压比 $Y=1.64+6.12\times10^{-4}Y=2.02-1.40\times10^{-4}$

(Y)- $Q-9.23\times10^{-8} Q^2 Q-3.93\times10^{-9} Q^2$

流量 $X=79.00+0.05 X=90.76+0.004$

多变 $Q-7.59\times10^{-6} Q^2 Q-3.78\times10^{-6} Q^2$

能量 $P=-3784.43+3.96 P=-148372+2.45$

头 $Q-3.73\times10^{-4} Q^2 Q-3.64\times10^{-4} Q^2$

(X)-

流量

轴功

率

(P)-

流量

注:Q 为入口流量, m³/h。

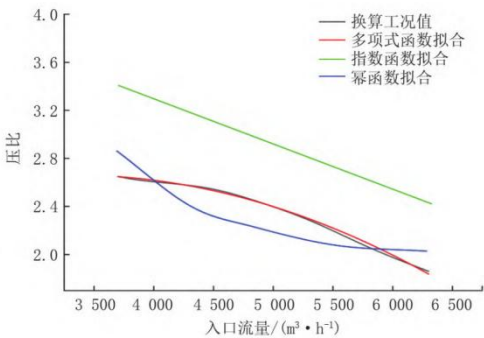


图 3 转速为 12 560 r/min 时不同函数的拟合结果

3 基于模糊控制理论的回流阀智能调节技术

在压缩机性能曲线拟合过程中,通过将曲线左侧边界点进行平滑连接,构建出完整的喘振边界特征曲线。为确保系统安全裕度,在该喘振边界线的基础上向右偏移 10%的安全距离,形成防喘振控制基准线,作为回流阀自动调节的重要参考依据。考虑到回流阀在实际运行中主要承担快速泄压功能,其控制精度要求相对较低,因此摒弃了传统的固定极限流量控制法和可变极限流量控制法,创新性地采用模糊控制理论来实现回流阀开度的智能化调节。该控制系统以压缩机入口实际流量与设定流量的偏差值(e)及其变化率(ec)作

为模糊控制器的双输入变量,以阀门开度调节量(u)作为系统的输出变量。根据该压缩机站实际运行数据,入口流量工作区间为 2 600~6 500 m³/h,综合历史运行记录和操作人员经验,确定各变量的取值范围为: $e\in[0,500]\text{m}^3/\text{h}$ 、 $ec\in[-50,50]\%$ 、 $u\in[0,0.4]$ 。为便于模糊化处理,将 e、ec、u 的论域分别归一化为[0, 12]、[-6, 6]、[0, 12],通过计算得到各变量的比例因子分别为 $K_e=0.024$ 、 $K_{ec}=0.12$ 、 $K_u=0.033$ 。

在模糊控制系统中,将三个变量的模糊子集统一划分为七个等级: {负大(NB),负中(NM),负小(NS),零(ZO),正小(PS),正中(PM),正大(PB)}。通过比例因子转换后,各变量在不同模糊子集上的隶属度分布呈现出梯形或三角形特征。以阀门开度 u 为例,当经比例因子转换后的论域值为 12 时,其对应“正中”子集的隶属度为 0,而“正大”子集的隶属度达到 1,此时控制系统将自动将回流阀开度调节至最大值 0.4,以确保系统安全^[5]。

基于现场运行数据和专家经验知识库,建立了完善的模糊控制规则表(表 3)。其主要控制策略可概括为:当检测到入口流量接近防喘振控制线时,控制系统根据偏差程度自动调节回流阀开度,偏差越小则开度越大;当流量偏差较大时,则通过监测偏差变化率来预判工况发展趋势,实现超前调节。选取典型控制规则进行分析:1)当 $e=NB$ 且 $ec=NB$ 时,表明入口流量已接近临界值且正快速逼近喘振线,系统立即全开阀门;2)当 $e=NB$ 且 $ec=ZO$ 时,虽然流量暂时稳定,但因接近危险区域,仍需保持最大开度;3)当 $e=PB$ 且 $ec=PB$ 时,反映系统远离喘振风险,阀门可保持最小开度。以此提升系统的响应速度和安全性能。

表 3 回流阀开度(u)的模糊控制规则

u 的模糊子集	
ec 的模糊子集	e 的模糊子集
	负大 负中 负小 零 正小 正中 正大

负大	正大	正大	正大	正大	正中	正小	正小
负中	正大	正大	正大	正中	正小	正小	零
负小	正大	正大	正中	正小	正小	零	零
零	正大	正中	正小	零	零	零	负小
正小	正中	正小	零	零	负小	负小	负中
正中	正中	正小	零	负小	负小	负中	负中
正大	正小	零	负小	负大	负大	负大	负大

最后，通过开发智能控制算法程序，将表 3 中定义的模糊控制规则进行解模糊化处理，结合预设的比例因子参数，最终输出精确的回流阀开度控制指令。该控制系统通过实时计算和处理流量偏差及其变化率，动态调整回流阀的开度状态，从而有效预防压缩机喘振现象的发生。在现场实际应用中，设计并部署了完整的回流阀自动控制系统（系统架构如图 4 所示）。

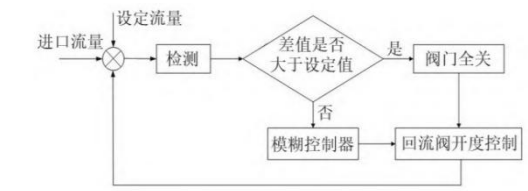


图 4 回流阀自动控制系统流程

4 节能效果综合评价与分析

为全面评估回流阀防喘振自动控制系统的运行效能，本研究选取 2023 年 5 月 20 日 8:00 至 22:00 期间共计 14 个小时的连续运行数据作为分析样本，通过每 10 分钟定时采集的方式，共获取 85 组有效工况数据。基于这些实测数据，研究团队首先将手动控制模式下的运行参数输入仿真系统进行模拟计算，进而开发出优化的自动控制方案。通过对比两种控制模式下回流阀的开度变化曲线（如图 5 所示）

可以发现：在传统手动控制工况下，回流阀开度呈现明显的阶梯式变化特征，其开度范围在 10%-32%之间波动，且每个开度档位通常需要维持较长时间（约 30-60 分钟）；而在自动控制模式下，系统通过实时计算将回流阀最大开度优化控制在 25%以内，并可根据实际工况需求在部分时段（约占总运行时间的 15%）完全关闭阀门，这充分证明自动控制系统能够实现压缩机组入口流量的动态精准调节。

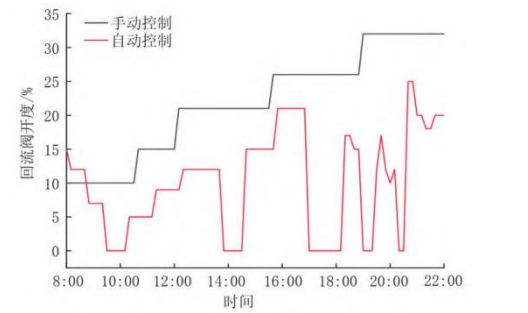


图 5 手动控制和自动控制下的回流阀开度对比

进一步的量化分析显示：在监测时段内，手动控制模式下的回流阀平均开度为 21%，而自动控制系统将这一指标显著降低至 10%，实现回流量减少达 11 个百分点（相对降幅超过 50%），节能效益十分突出。具体而言，该压气站的实测回流量区间为 168-1475 m³/h，按照 11%的节流比例计算，自动控制系统可使每小时回流量减少 18.5-162.3 m³。基于燃气轮机与压缩机组的联合运行效率参数（每立方米天然气压缩耗电 0.5 kWh），经测算可得每小时可节约电能 9.2-81.1 kWh。参照当前工业用电价格（0.8 元/kWh）进行经济性评估，该系统每小时可产生 7.36-64.88 元的直接电费节约。若以压缩机组年运行 8000 小时为基准进行全生命周期成本分析，则自动控制系统每年可创造 5.88-51.9 万元的电能节约效益。并且，该系统通过有效预防喘振现象，使得机组维护频次大幅降低，经统计每年可减少约 50 万元的设备维护费用。综合计算表明，该自动

控制系统不仅具有显著的节能效果,还能大幅提升设备运行的可靠性和经济性。

结语

综上,通过对某典型压气站中天然气压缩机组的回流量控制进行深入研究,成功开发并应用基于相似性原理与模糊控制理论的自动控制系统。该系统不仅可以显著提升回流阀控制的精准度,使得回流阀平均开度降低 50%,

还有效地减少 11%的回流量,实现可观的节能效果。此外,年节约电能可达 5.88 万至 51.9 万元人民币,并大幅降低设备维护成本。该成果证明,自动控制技术的应用可以极大地提高压缩机组的运行效率和安全性,为天然气管网的智能化升级提供有力保障。未来的研究将进一步探索如何将此类技术更广泛地应用于其他类似设备和场景中,以促进整个行业的可持续发展。

参考文献

- [1]张志刚,张玮韬.压缩机放空天然气回收节能措施及经济分析[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(19):123-125.
- [2]闫新,缙雅洁,苗润金,等.RTY1250 型天然气压缩机组高温停机处理[J].机电工程技术,2024,53(09):312-316.
- [3]古自强,韩刚,李华,等.天然气管道压缩机组故障预测与健康管理研究[J].油气田地面工程,2024,43(09):58-62.
- [4]杨帆.西气东输三线天然气管道压缩机组远程控制技术应用研究[J].油气田地面工程,2024,43(05):12-16.
- [5]林焕明,邓立,李清亮,等.天然气压缩机组防喘振与负荷分配控制技术研究[J].石油和化工设备,2021,24(12):5-7.