

天然气长输管道压力调节系统配置探讨

梁 洪 (国家石油天然气管网集团有限公司华南分公司 (广东省管网公司), 广东 广州 510000)

摘 要: 天然气长输管道压力调节系统是保障管网安全、稳定运行的关键组成部分。本文首先阐述了压力调节系统的设计原则与目标, 即保障供气连续性、下游用户安全和环境保护。随后, 详细介绍了国内长输管道压力调节系统的主要配置方式, 在此基础上, 深入探讨了调节阀的选型原则与计算方法, 重点关注轴流式调节阀在长输管道中的应用优势。最后, 详细阐述了压力调节系统与站控系统 (SCS) 的集成, 讨论了压力调节系统成橇的必要性、设计要点及工厂测试要求。

关键词: 长输管道; 压力调节系统; 调节阀; 站控系统; 配置方式; 安全切断阀; 系统集成

中图分类号: TE978 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2025) 022-0067-03

Discussion on the Configuration of Pressure Regulation Systems for Long-Distance Natural Gas Pipelines

Liang Hong (South China Branch (Guangdong Provincial Pipeline Company) of China Oil & Gas Pipeline Network Corporation, Guangzhou Guangdong 510000, China)

Abstract: The pressure regulation system in long-distance natural gas pipelines is a crucial component for ensuring the safe and stable operation of the pipeline network. This paper first elucidates the design principles and objectives of the pressure regulation system, namely, ensuring the continuity of gas supply, the safety of downstream users, and environmental protection. Subsequently, it provides a detailed introduction to the main configuration methods of pressure regulation systems in domestic long-distance pipelines. Based on this, the selection principles and calculation methods of control valves are discussed in depth, with a focus on the advantages of using axial flow control valves in long-distance pipelines. Finally, the integration of the pressure regulation system with the station control system (SCS) is elaborated upon, discussing the necessity of skid-mounted pressure regulation systems, key design points, and factory acceptance testing requirements.

Keywords: Long-distance pipeline; Pressure regulation system; Control valve; Station control system (SCS); Configuration method; Shut-off valve; System integration

天然气作为一种清洁、高效的能源, 在我国能源结构中占据着越来越重要的地位。长输管道是天然气输送的主要方式, 其安全、稳定运行直接关系到国民经济发展和人民生活。压力调节系统作为长输管道的核心组成部分, 承担着稳定下游气体压力、调节输气量、保护下游管线和设备安全的重要任务。典型的长输管道压力调节系统通常安装在分输站场, 通过精确控制气体压力, 确保向下游用户提供符合其需求的稳定气源。

压力调节系统不仅要具备基本的调压功能, 还应具备限流、超压保护、主备切换等多种功能, 以应对各种工况和突发情况。由于长输管道的特殊性, 其压力调节系统通常采用橇装形式, 由专用的压力控制器或站控系统进行控制, 具有高稳定性、高安全性、功能多样等特点。

1 设计原则

根据《输气管道工程设计规范》(GB50251-2015), 天然气长输管道压力调节系统设计以安全、稳定、高效为核心。设计须遵循: 供气连续性, 采用双/多路

并联冗余设计(8.4.3条); 下游安全, 设置独立调压系统, 具备调压和流量控制功能(6.2.2条), 并采取安全截断或调压/泄放组合等超压保护措施(8.4.6条); 环境保护, 控制噪音、振动、泄漏; 流量控制, 限制单用户流量(6.2.2条); 系统集成, 接入站控系统。最终实现压力调节、安全保护、流量限制功能, 确保管网安全稳定运行。

2 压力调节系统配置方式

2.1 电动调节阀(PV) + 自力式调节阀(PCV) + 自力式安全切断阀(SSV)

国内长输管道压力调节系统广泛采用电动调节阀(PV) + 自力式调节阀(PCV) + 自力式安全切断阀(SSV)的组合, 如西气东输等工程。该配置以电动调节阀(PV)为核心, 通常选用轴流式, 如Fisher GX, 口径DN50-DN300。PV根据下游压力或流量设定值(通过4-20mA信号)调节开度, 实现精确控制(精度 $\pm 0.5\%$)。这意味着PV可以根据控制系统发出的指令, 精确地控制阀门的开度, 从而精确地调节通过阀门的天然气流量, 最终达到稳定下游压力的目的。

为了保证系统的可靠性和安全性，配置中还设置了自力式调节阀（PCV）作为监控调压阀，常用型号为 Fisher EZH。PCV 的设定压力通常略高于 PV 的设定值（例如，PV 设定为 2.5MPa，PCV 则设定为 2.8MPa）。当 PV 发生故障或者由于其他原因无法正常工作，PCV 会自动接管调压任务，继续维持下游压力的稳定，防止出现欠压情况。

PCV 的这种“备用”功能，大大提高了整个压力调节系统的可靠性。此外，为进一步确保下游管网和设备的安全，系统中还集成了自力式安全切断阀（SSV），常用型号如 Fisher S200。

2.2 自力式调节阀（PCV）+ 电动调节阀（PV）+ 自力式安全切断阀（SSV）

此配置将自力式调节阀（PCV）作为主调压阀，电动调节阀（PV）作为监控阀。这种配置与 2.1 配置的主要区别在于，将调压的主要任务交给了 PCV，而 PV 则主要起到辅助调节和限流的作用。PCV 通常选用响应速度较快的型号，例如 Fisher V200，其响应时间小于 200ms，能够非常迅速地响应下游压力的变化，快速调节阀门开度，稳定压力。而且，这类 PCV 通常具有较宽的流量调节范围（Cv 值范围可能在 100–10000m³/h 之间），能够适应不同流量条件下的调压需求。

PV 则在 PCV 无法满足限流需求时介入。例如，当系统需要限制向下游输送的天然气流量时，PV 可以通过调节开度来限制流量，防止超过预设的流量上限。这种配置的优势在于其出色的响应速度和流量适应性，特别适用于下游用气负荷波动较大的场合。

2.3 双切断配置

此配置在工作调节阀（通常为电动调节阀）前串联两台性能相同的自力式安全切断阀（SSV），如 Tartarini MBN 系列，两阀均感测工作阀后压力。这种配置常见于欧洲标准（如 EN 14382），国内陕京管道等也有应用。其最大优势在于极高的安全系数，即使一台 SSV 失效，另一台仍能提供保护，避免下游超压。但其缺点也很明显：任何导致工作调节阀无法正常工作的故障（无论是导致超压）都会触发 SSV 动作，切断下游供气，影响供气连续性。由于大口径（DN400 以上）自力式调节阀技术尚不成熟，双切断配置常用于大口径调压管线。

2.4 其他配置

除上述主流配置外，还存在其他方案。例如，工作调节阀后串联安全切断阀和安全泄放设备，理论上提供更全面的超压保护，但实际工程中通常由工艺专业统一设计安全泄放系统，压力调节橇内一般不再单

独设置，以简化系统。对于大流量场合（如城市燃气门站，流量可达数十万 Nm³/h），可采用多路调压管路并联。为平衡各管路流量（偏差控制在 ±5% 以内），可在每条管路工作调节阀前增设压力变送器（如 ABB 266），利用压差和阀门节流参数（开度、Cv 值等）估算流量，并通过站控系统控制程序调节各阀开度。

3 调节阀的选型

调节阀是压力调节系统的核心，其选型对系统性能、可靠性和安全性至关重要。长输管道工况复杂，对调节阀要求极高：需具备高耐压等级（如 PN100 对应 6.3MPa 设计压力）；大流通能力及宽可调范围（适应 10,000–100,000Nm³/h 甚至更宽的流量变化）；优异的耐冲刷、抗振性能以确保长期稳定运行；低噪音（1m 处 <85 分贝）。

轴流式调节阀因其独特优势成为首选，其优点包括：高 Cv 值（流量系数），能以较小压降实现更大流量；对称流，有助于减少湍流和噪音，提高控制精度；抗冲刷，其流道设计和阀内件材质（通常为硬质合金）能有效抵抗高速流体冲刷；压力平衡阀芯，可减小操作力矩，降低对执行机构的要求，提高响应速度。

调节阀口径选择是关键。需根据详细工艺参数（最大/最小流量、上/下游压力、气体密度、温度等）精确计算所需流通能力（Cv 值），参考制造商提供的 Cv 值和特性曲线（通常为等百分比或线性特性），选择合适口径，确保正常工况下阀门开度在 10%~85% 范围内。过小开度易致不稳定、振动和噪音，过大开度则降低调节精度。此外，还需考虑泄漏等级（≥ ANSI/FCI 70-2 IV 级）、出口流速（<40m/s）、阀内件材质（硬质合金、不锈钢等）和执行机构类型（通常选用电动执行机构，如 Rotork IQ 系列，特殊情况可考虑气动）。

4 系统集成

4.1 站控系统与压力控制系统集成

长输天然气管道项目采用基于 SCADA 的站控系统（SCS）与压力控制系统集成，实现自动化、安全保护和远程监控。SCS 由过程控制系统（PCS）和安全仪表系统（SIS）组成，两者独立又协作。压力调节系统是 SCS 的重要部分，接受 PCS 指令，与 SIS 协同，确保安全可靠供气。SCADA 系统硬件采用高性能服务器（双机热备）、工业级交换机、防火墙等；软件选用成熟平台（Wonderware、iFIX 等）并定制开发；通信采用光纤环网。

站控系统（SCS）中，PCS 用 PLC（Siemens S7-400、Rockwell ControlLogix 等）作主控，配冗余 CPU、电源、通信模块；SIS 用独立、安全认证 PLC（Siemens S7-400FH、HIMA HIQuad 等），安全完整

性等级 (SIL) \geq SIL2/SIL3。现场仪表选用高精度、高可靠性产品,如压力变送器(精度 $\pm 0.05\%$, 量程 0~4MPa、0~6MPa 等)、流量计(涡轮、超声波或科里奥利,精度 $\pm 0.2\%$ 、 $\pm 0.5\%$ 等)、温度变送器(精度 $\pm 0.1^\circ\text{C}$, 量程 -20°C ~ 100°C)、电动调节阀(高性能电动执行机构 AUMA、Rotork 等, 4~20mA 控制信号, 阀体材质 WCB、CF8M 等, 泄漏等级 \geq ANSI/FCI 70-2 Class IV) 和安全切断阀(气动/电动执行, 响应 $<1\text{s}$, 材质同调节阀)。PCS 和 SIS 与现场仪表间用 HART、Profibus DP 或基金会现场总线等协议通信; SCS 与 SCADA 系统间用 Modbus TCP/IP 或 OPC 等协议。

压力控制系统方面, PCS 实现常规调压 (PID 控制)、限流 (如 $\leq 120,000 \text{ Nm}^3/\text{h}$) 和主备切换 ($<10\text{s}$); SIS 紧急情况下 (如检测到下游压力 $>3.5\text{MPa}$) 触发安全切断阀关闭。控制参数包括压力设定值 (如 $2.5\text{MPa} \pm 0.02\text{MPa}$)、PID 参数、限流值和切换时间 (如 $<10\text{s}$)。

选型时, 需考虑 SCADA 系统可扩展性、兼容性、安全性, 选择支持开放协议和标准的平台; 确保 PCS 和 SIS 的 PLC 性能、可靠性, SIS 须安全认证; 据工艺参数、介质特性、精度要求选现场仪表, 并考虑防爆防腐; 选择稳定可靠通信协议; 关键设备冗余设计; 考虑网络和物理安全。

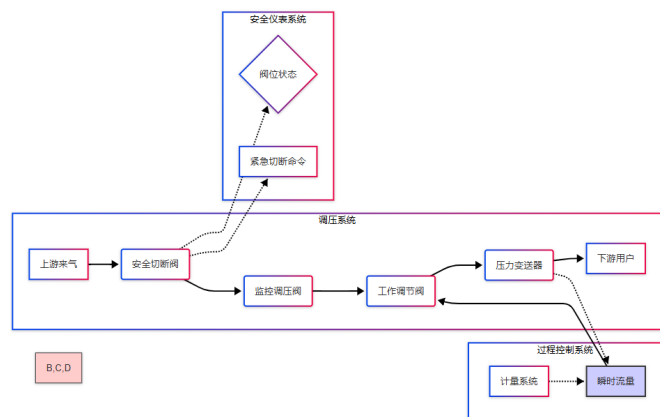


图1 压力调节系统与站控系统信号交互

4.2 压力调节系统成橇

为提高压力调节系统性能、可靠性及简化安装, 常采用成橇供货模式, 即将调节阀、安全切断阀、过滤器、管线、仪表等集成于预制钢结构框架内, 实现工厂预制、整体测试及快速安装。橇体结构采用 Q345B 型钢焊接, 支撑点位于阀门/法兰处, 考虑设备重量 (如 DN200 调压橇 $>5\text{t}$) 及动态载荷, 底部预留 M24 安装螺栓孔, 并提供配套螺栓等, 支架高度依现场工艺管线定制。设备配置方面: 低噪音调节阀, 阀体材质据介质特性选 (WCB、CF8M 等), 泄漏等

级 \geq ANSI/FCI 70-2 Class IV, 口径依流量定 (DN100、DN150 等); 安全切断阀采用气动/电动执行, 响应 $<1\text{s}$, 材质、口径同调节阀; 若气体杂质多, 可加高精度过滤器 ($5\mu\text{m}$, 304/316 不锈钢); 管线材质据介质选 (A106 Gr.B、304SS 等), 壁厚依设计压力定 (Sch40、Sch80 等); 仪表包括压力表、压力/温度变送器等, 精度、量程依工艺定; 控制元件有电磁阀、气源三联件、定位器等。寒冷地区需配电伴热系统 ($10\sim 30\text{W}/\text{m}$ 电伴热带, 岩棉/聚氨酯保温, 厚度 50mm/100mm 等)。

选型时, 确保橇体结构强度、稳定性, 考虑设备重量、动态载荷, 并防腐; 据工艺参数、介质特性及性能要求选设备, 并考虑防爆、防腐、低温等; 依设计压力、流量选管径、壁厚, 并考虑热胀冷缩; 降噪可采用低噪音调节阀、加厚管壁或隔音罩。寒冷地区须保温、电伴热防冻。成橇后须严格工厂测试, 依 GB 50251-2015, 单接管件气压试验为设计压力 1.1~1.25 倍, 水压试验 1.5 倍, 稳压 $\geq 4\text{h}$; 气密性试验为设计压力, 严密性试验稳压 24h。应进行整橇气密性试验。投产前, 须吹扫清管, 确保管线内无杂物, 并进行控制系统现场调试。

5 结语

综上所述, 天然气长输管道压力调节系统作为保障管网安全、稳定、高效运行的关键环节, 其设计、配置、选型及集成均需遵循严格的技术规范和工程实践。本文详细探讨了压力调节系统的设计原则、主流配置方式 (如电动调节阀 + 自力式调节阀 + 自力式安全切断阀的组合、双切断配置等) 的特点与适用场景, 深入分析了调节阀选型 (特别是轴流式调节阀) 的关键技术参数和计算方法, 并阐述了压力调节系统与站控系统 (包括 PCS 和 SIS) 的集成方式及成橇设计的要点。

随着天然气工业的持续发展和技术的不断进步, 未来的压力调节系统将朝着更智能化、更可靠、更环保的方向发展, 例如采用更先进的控制算法、更智能的调节阀、更完善的远程监控以及更低噪音的设计, 为我国能源安全和清洁能源利用提供更坚实的技术保障。

参考文献:

- [1] 李传涛, 章阳. LNG 接收站增设天然气门站功能的建站方案 [J]. 上海煤气, 2024(02):6-9+31.
- [2] 曹智. 天然气发动机圈式燃气压力调节阀的开发 [D]. 山东大学, 2021.
- [3] 唐启桓, 罗皓, 白龙. 天然气长输管道分输压力控制系统分析 [J]. 化工管理, 2017(33):215.