

天然气管道工程中的仪表自动化控制技术分析

冯明忠

凯特智能控制技术有限公司 山东 潍坊 261000

摘要: 天然气作为一种清洁、高效的化石能源,在全球能源结构转型和“双碳”目标背景下,其战略地位日益凸显。作为连接生产、储运与消费的关键纽带,天然气管道网络的安全、稳定、高效运行至关重要。仪表自动化控制技术是保障现代大型天然气管道系统智能化运营的核心支柱。本文旨在系统性地剖析天然气管道工程中仪表自动化控制技术的体系架构、核心组成部分、关键技术原理及其综合应用价值。文章首先阐述了以数据采集与监视控制系统(SCADA)为核心的总体架构,并深入探讨了压力、流量、温度等关键现场仪表的技术选型与功能;其次,详细解析了站控系统(SCS)、远程终端单元(RTU)以及通信网络在系统中的角色与协同机制;再次,论述了自动化控制策略在管道运行调度、安全联锁保护及泄漏检测等方面的具体实现,为未来智慧管道的建设与发展提供理论参考和技术路径。

关键词: 天然气管道;仪表自动化;SCADA系统;现场仪表

引言

在全球能源清洁低碳转型背景下,天然气作为高热值、低排放的过渡能源,正迎来快速发展期。我国“十四五”规划明确提出构建清洁低碳、安全高效的现代能源体系,推动全国天然气骨干管网和城市配气网络加速建设。然而,天然气管道具有距离长、环境复杂、介质易燃易爆等特点,传统人工巡检模式已难以保障其安全高效运行。为此,基于计算机、通信与自动控制技术的仪表自动化控制系统成为现代管道工程的“神经中枢”。该系统通过部署传感器与执行机构,实时采集压力、流量、温度等关键参数,实现远程监控、自动调节与智能预警,有效防范泄漏、超压、水合物堵塞等风险。深入研究该技术对提升我国能源基础设施现代化水平、保障国家能源安全具有重大现实与战略意义。

1 仪表自动化控制系统的总体架构

现代天然气管道的仪表自动化控制系统是一个高度集成、层次分明的分布式体系,其核心架构通常遵循“集中管理、分散控制”的原则,主要由三个层级构成:位于顶层的调度控制中心(SCADA主站)、分布于各工艺站点的站控系统(SCS)或远程终端单元(RTU),以及连接它们的数据通信网络。

1.1 调度控制中心(SCADA主站)

调度控制中心是整个自动化系统的“大脑”和指挥中枢。它通常设在管道公司的总部或区域管理中心,配备有高性能的服务器集群、冗余的操作员工作站、工程师站以及大屏幕显示系统。其核心软件平台即为SCADA(Supervisory Control and Data Acquisition,数据采集与

监视控制)系统。SCADA系统的主要功能包括:(1)数据采集与处理:通过通信网络,实时接收来自全线所有RTU/SCS上传的海量工艺数据,并进行滤波、校验、单位转换、工程量计算(如标准状态下的流量补偿)等预处理^[1]。(2)人机交互(HMI):以图形化的方式(如管道拓扑图、工艺流程图P&ID)直观地展示全网的运行状态。操作人员可以通过HMI界面监视各项参数、下达控制指令、查询历史数据和报警信息。(3)数据库管理:建立实时数据库和历史数据库,用于存储和管理瞬时数据、事件记录、操作日志等,为后续的数据分析、报表生成和事故追溯提供数据支撑。(4)高级应用:集成管道仿真(Transient Simulation)、泄漏检测与定位(LDL)、优化调度、设备健康管理等高级应用软件,实现对管道运行的智能化管理和决策支持。

1.2 站控系统(SCS)与远程终端单元(RTU)

这一层级位于系统的中间,是连接现场仪表与控制中心的桥梁。根据站点的重要性和复杂程度,可采用不同配置:(1)站控系统(SCS):通常应用于大型枢纽站场,如首站、末站、压气站、分输站等。SCS本身就是一个功能完备的小型自动化系统,其核心是可编程逻辑控制器(PLC)或工业控制计算机(IPC)。它不仅完成本地数据的采集和设备的控制,还能执行复杂的顺序控制、联锁保护逻辑,并具备一定的数据处理和存储能力。SCS与SCADA主站之间进行双向通信,既上送数据,也接收并执行主站的调度指令。(2)远程终端单元(RTU):多用于阀室、阴极保护站、小型计量站等无人值守或功能相对简单的站点。RTU是一种坚固耐用的

嵌入式设备,主要负责采集现场有限的几个关键点(如上下游压力、阀门状态)的数据,并能接收主站指令执行简单的开关操作(如远程开关阀门)。其功能相对SCS较为基础,但成本更低,维护更简便。无论是SCS还是RTU,其首要任务都是确保本地控制回路的独立性和可靠性。即使在与主站通信中断的情况下,也能依靠预设的逻辑程序维持站点的基本安全运行。

1.3 数据通信网络

通信网络是整个自动化系统的“血管”,负责在控制中心与各远程站点之间高速、可靠、安全地传输数据。其设计需充分考虑管道线路长、地理环境复杂、部分区域公网信号覆盖差等特点。常见的通信方式包括:

(1) 光纤通信:沿管道同沟敷设光缆,提供带宽大、速率高、抗干扰能力强的主干通信链路,是长输干线的首选方案。(2) 微波通信:适用于地形起伏较大、难以敷设光缆的山区或跨越障碍物(如河流、峡谷)的场景。(3) 卫星通信:作为偏远地区或应急备份的通信手段,确保在任何情况下都能维持基本的监控能力。(4) 公网通信(GPRS/4G/5G):在城市配气管网或公网覆盖良好的区域,可利用运营商的无线网络作为补充或主要通信方式,具有部署灵活、成本较低的优势^[2]。一个健壮的通信网络通常采用多种技术相结合的混合组网模式,并配置冗余路由,以最大限度地保障数据传输的连续性和安全性。

2 关键现场仪表技术分析

现场仪表是自动化系统的“感官末梢”,其性能直接决定了整个系统感知能力的上限。在天然气管道工程中,以下几类仪表扮演着至关重要的角色。

2.1 压力测量仪表

压力是反映管道运行状态最核心的参数之一。异常的压力波动往往是泄漏、堵塞或设备故障的首要征兆。压力变送器是应用最广泛的高精度压力测量设备。它利用压阻、电容或谐振等传感原理,将被测压力转换为标准的4-20mA电流信号或数字信号(如HART、Foundation Fieldbus)。现代智能压力变送器具备自诊断、温度补偿、量程迁移等功能,精度可达 $\pm 0.025\%FS$,且能在极端温度和恶劣环境下长期稳定工作。在关键节点(如压缩机进出口、调压阀前后)通常会配置冗余的压力变送器,以提高测量的可靠性。

2.2 流量测量仪表

精确的流量计量对于贸易交接、能耗核算和运行调度至关重要。由于天然气是可压缩流体,其体积流量受压力和温度影响极大,因此必须进行温压补偿才能得

到准确的标准体积流量。涡轮流量计利用气体流过叶轮时产生的转速与流速成正比的原理进行测量。其优点是精度高、重复性好、量程比宽,广泛应用于门站和工业用户的贸易计量。超声波流量计通过测量超声波在顺流和逆流方向上的传播时间差来计算流速。其最大优势是无任何插入件,无压力损失,且不受流体密度、粘度影响,特别适合大管径、高压的长输干线。孔板流量计基于伯努利方程,通过测量节流装置前后的差压来推算流量。虽然结构简单、成本低廉,但压力损失大、量程比窄,正逐渐被更先进的流量计所取代。

2.3 温度测量仪表

温度参数主要用于流量的温压补偿,同时也是监测管道是否发生水合物堵塞(低温是形成条件之一)的重要依据。(1) 热电阻(RTD):如Pt100,利用铂电阻随温度变化的特性进行测量,精度高、稳定性好,是工业标准。(2) 热电偶:利用两种不同金属连接处的热电效应测温,响应速度快,但精度略低于RTD。

2.4 其他关键仪表

(1) 可燃气体探测器:安装在站场的关键区域(如压缩机房、阀组区),用于实时监测空气中天然气的浓度,一旦超过安全阈值即触发报警和联锁,是保障站场安全的第一道防线。(2) 色谱分析仪:用于在线分析天然气的组分(甲烷、乙烷、氮气等含量),从而精确计算其热值和压缩因子,这对于高精度的能量计量和气质管理至关重要。

3 自动化控制策略与功能实现

仪表自动化系统远非一个被动的数据记录和显示终端,其真正的价值在于通过预设的、复杂的控制逻辑和策略,主动地调控管道的运行状态,使之始终处于安全、高效、经济的最佳区间。

3.1 运行调度与优化控制

在顶层的SCADA系统中,集成了强大的运行调度与优化控制功能。该功能并非凭空而来,而是建立在对上游供气计划、下游用户合同需求以及管道自身复杂的水力、热力数学模型深刻理解的基础之上。系统能够综合这些多维度信息,自动生成全局最优的运行方案。例如,在长输管道中,压缩机是主要的能耗设备。自动化系统可以根据实时的管线压力分布和流量需求,智能地决定启动多少台压缩机组,并通过变频驱动技术精确调节每台机组的转速,从而以最小的总能耗将管道全线的压力维持在设定的安全且高效的范围内^[3]。同样,在分输站,系统通过接收来自下游用户的用气计划,并结合高精度流量计的实时反馈,自动调节电动调节阀的开度,

实现对各路用户的精确、按需分输。这种闭环控制方式彻底摒弃了传统的人工干预模式,消除了人为误差和响应滞后,极大地提升了供气的精准度和系统的整体运行效率。

3.2 安全联锁与保护

如果说优化控制是追求卓越,那么安全联锁与保护就是坚守底线。这是自动化系统最基本、也是最重要的使命,其设计目标是在任何可能危及人身、设备或环境安全的工况出现时,能够以最快的速度、最可靠的方式将系统带入安全状态。紧急关断系统(ESD)是这一理念的集中体现。当遍布全站的传感器网络,如压力变送器、可燃气体探测器、火焰探测器等,检测到严重超压、火灾、大规模可燃气体泄漏等灾难性信号时,预设的ESD逻辑会被瞬间激活。系统会毫不犹豫地自动关闭相关区域的进出站紧急切断阀,迅速切断气源,并同步启动放空火炬系统,将危险区域内的残余天然气安全燃烧掉,从而将事故的影响范围和危害程度降至最低。除此之外,针对单体设备也设有细致的保护联锁。例如,一台大型离心式压缩机,其运行状态受到润滑油压力、轴承温度、轴振动、轴位移等多个关键参数的严密监控。一旦其中任何一个参数超出安全限值,保护联锁逻辑便会立即动作,强制停机,以避免昂贵的核心设备因过载或润滑不良而遭受毁灭性损坏。

3.3 泄漏检测与定位(DDL)

对于动辄上千公里的长输天然气管道而言,及时发现并准确定位泄漏点是一项极具挑战性的任务。自动化系统为此配备了专门的泄漏检测与定位(DDL)高级应用。DDL系统的工作原理是多样的,但其核心思想都是利用管道首末端的流量、压力等实时数据,通过特定的算法模型来捕捉泄漏事件留下的独特“指纹”。例如,质量平衡法通过持续比较进入和离开管道的气体质量,

若出现无法解释的差额,则可能意味着存在泄漏。负压波法则更为灵敏,它能够捕捉到泄漏瞬间在管壁产生的、以声速向两端传播的压力波,并通过分析该波到达首末端传感器的时间差,精确计算出泄漏点的位置。更先进的基于实时仿真的DDL方法,则是建立一个与物理管道完全同步的数学模型,将实际测量数据不断输入模型进行校正,当模型预测值与实测值出现显著偏差时,即可判定为泄漏,并利用优化算法反推泄漏位置。一个高灵敏度、低误报率的DDL系统,可以将泄漏发现时间从数小时甚至数天缩短至几分钟,这对于减少经济损失、防止环境污染、保障公共安全具有不可估量的价值。

4 结语

综上所述,仪表自动化控制技术是现代天然气管道工程安全、高效、智能运行的基石。从底层的高精度现场仪表,到中层的站控系统,再到顶层的SCADA调度中心,共同构成了一个有机的整体。该系统不仅实现了对管道全线的实时监控和远程操作,更通过先进的控制策略和安全联锁机制,为管道的本质安全提供了坚实保障。面向未来,以人工智能、数字孪生、边缘计算为代表的新兴技术,正在与传统自动化技术深度融合,催生出新一代的智慧管道解决方案。持续推动仪表自动化控制技术的创新与应用,不仅是提升企业核心竞争力的内在要求,更是保障国家能源动脉安全畅通、服务国家“双碳”战略目标的必然选择。

参考文献

- [1]李海.天然气管道工程中的仪表自动化控制技术分析[J].集成电路应用,2023,40(11):60-61.
- [2]王天宇.天然气管道工程中电气仪表的自动化控制技术研究[J].造纸装备及材料,2022,51(07):123-125.
- [3]赵妍,王鑫,马克远.仪表自动化技术在天然气管道工程中的应用[J].化工管理,2025,(19):90-93.