

LNG低温工况下自控仪表的选型与适应性研究

黄钦晨

上海五号沟液化天然气有限公司 上海 201209

摘要：在LNG低温工况下，自控仪表面临极端低温等诸多挑战。本文围绕自控仪表展开研究，先阐述低温工况对仪表的技术要求，包括低温适应性、抗干扰能力等方面；接着介绍不同类型仪表的选型要点；然后分析仪表在低温工况下的适应性；最后探讨选型的综合考量，涉及工艺需求匹配、经济性与可靠性平衡、标准化与兼容性统一等内容，为LNG低温工况下自控仪表选型提供参考。

关键词：LNG低温工况；自控仪表；仪表选型；适应性分析；综合考量

引言：LNG作为清洁能源，其生产、储存、运输等环节对安全性和稳定性要求极高。自控仪表在LNG系统中承担着温度、压力、液位等关键参数的测量与控制任务，是保障系统安全运行的核心设备。然而，LNG低温工况具有极端低温、介质物性复杂、环境干扰多等特点，对自控仪表的性能提出了严苛挑战。若仪表选型不当或适应性不足，可能导致测量误差增大、信号传输不稳定，甚至引发安全事故。因此，深入研究LNG低温工况下自控仪表的选型与适应性具有重要的现实意义。

1 LNG低温工况对自控仪表的技术要求

1.1 低温适应性

在LNG低温工况下，自控仪表面临极端低温挑战，耐低温材料选择至关重要。316L不锈钢因具有优异的低温韧性与抗腐蚀性能，成为低温仪表结构件常用材料，能在低温中保持稳定力学性能，避免因材料脆化引发结构失效^[1]。钛合金热导率极低且低温强度良好，在需快速响应温度变化的仪表部件中优势独特，可有效减少低温对测量精度的干扰。特种合金根据具体工况定制化开发，融合多种金属特性，能满足不同低温场景下对材料强度、韧性和抗腐蚀性的综合要求。低温密封技术是保障仪表可靠性的关键。全氟醚橡胶耐低温性能和化学稳定性出色，能在极低温度下保持良好弹性与密封性，防止LNG介质泄漏，稳定仪表内部工作环境。聚四氟乙烯密封件摩擦系数极低且耐腐蚀性优异，在低温动态密封场合表现卓越，能减少密封部位磨损，延长仪表使用寿命。低温电路优化是提升仪表低温适应性的重要举措。工业级低温芯片经特殊设计与工艺处理，能在-40℃至85℃的极低温度下保持稳定电气性能，确保仪表信号处理和传输准确。宽温电源模块工作温度范围达-55℃至125℃，可为仪表提供稳定电力支持，避免因电源波动导致仪表故障。

1.2 抗干扰能力

LNG低温工况中，潮湿凝露和雾霭环境会直接威胁仪表信号稳定运行。低温蒸汽遇冷极易在设备外壁凝结，破坏仪表原有电气工作状态，削弱信号传输质量；雾霭内悬浮微粒易吸附于传感器表层，进而干扰检测信号采集。对此，仪表需具备优异的抗干扰性能，依托改良传感器构造与信号处理逻辑，削弱外界环境带来的不良影响，稳定测量数据。同时LNG转运场景普遍存在机械振动与外力冲击，仪表需强化机械结构强度，搭配减震缓冲构件，抵御振动损耗，规避仪表突发失效问题。

1.3 测量精度与可靠性

LNG低温环境下，介质理化参数会随温度发生明显波动，直接制约仪表检测精准度。仪表需搭载智能补偿模块与动态校准机制，自主修正低温工况下的测量偏差。低温温差变化会使设备构件产生冷热伸缩应力，加速部件老化损耗。通过优选耐低温基材、优化加工工艺，可提升仪表耐久性能，减少故障频次，维持低温场景下长期连续运行的稳定状态。

2 LNG低温工况下自控仪表的分类选型

2.1 温度仪表

在LNG低温工况中，铂热电阻（PT100）是温度测量的常用仪表。PT100基于铂电阻随温度变化的特性实现温度测量，在低温环境下，铂金属的电阻值与温度呈近似线性关系，这种稳定的物理特性使其成为低温测量的可靠选择^[2]。由于LNG温度极低，为避免低温对变送器等电子元件造成损害，分体式安装方式被广泛应用。分体式安装将温度传感器与变送器分离，传感器直接接触低温介质，而变送器安装在温度相对较高的环境，通过延长导线连接，有效隔离了低温传导，保障了变送器的正常工作。此外，铠装结构的PT100进一步优化了机械性能。铠装层采用不锈钢等材料，不仅增强了传感器的抗冲击

和抗振动能力,还能防止介质对传感器的直接腐蚀,提高了仪表在恶劣工况下的可靠性和使用寿命。

2.2 压力仪表

分体式压力变送器在LNG低温工况中发挥着重要作用。为应对低温环境,该变送器采用特殊的低温保护机制。其变送器本体与压力传感器分离,传感器安装在低温区域,而变送器则置于温暖环境,二者通过导压管连接。导压管设计是压力测量的关键环节。导压管长度与走向需要保证气液的交界面在水平管段中,避免因为液柱高度变化造成测量结果偏移;通常做法导压管从取源口水平引出1米,后又垂直往上至少1.5米,再引至变送器。适当延长导压管长度,可使介质在管内充分气化,避免低温液体直接进入变送器,损坏膜片。一般来说,导压管长度可延长至3-8米。根部阀与膜片直接接触低温介质,因此需选用耐低温材质,如哈氏合金等,确保在低温下仍能保持良好的密封性和机械性能,防止介质泄漏。

2.3 液位仪表

差压法液位测量在LNG储罐等场合应用广泛。其原理是通过测量液位上下两点的压力差来计算液位高度。受低温环境影响,LNG介质密度会发生小幅波动,该类仪表可依托配套补偿算法完成参数校正,以此抵消温度变化带来的测量偏差,保障液位检测精度。导波雷达液位计采用窄波束设计,能量集中,抗干扰能力强。在LNG复杂工况中,能有效避免低温BOG气体等对测量信号的干扰,准确测量液位。磁浮子液位计通过磁耦合原理实现液位指示,为应对低温,采用真空夹套保温结构。真空夹套能有效减少冷量传递,防止浮子因低温结冰而卡涩,确保液位计的可靠运行。

2.4 流量仪表

孔板流量计无法直接测量LNG液体介质,在LNG接收站现场,该类仪表一般仅用于气态天然气的流量监测,整体造价偏低,但测量精度与适用范围存在局限。科里奥利质量流量计可直接采集介质质量流量,测量结果不受温度、密度变化干扰,测量精度优异,广泛应用于LNG液体精准计量场景,可满足生产管控与贸易计量的严苛要求。涡轮流量计也不适合低温液态LNG测量,主要布置在气化外输工艺段,测量稳定性较好,可作为常规计量设备使用,但在小流量区间误差明显,更适配稳定大流量的运行工况。结合现场工况合理选型,能够有效提升低温环境下流量测量的整体可靠性。

2.5 分析仪表

LNG组分分析对生产过程控制至关重要。连续取样技术能实时获取LNG样品,保证分析的及时性。气化技

术将低温液态样品转化为气态,便于分析仪器检测。电加热气化减压阀与深冷气化器需合理匹配。电加热气化减压阀通过加热使样品气化并调节压力,深冷气化器则利用低温环境实现样品的气化,二者协同工作,确保样品气化完全且压力稳定,为LNG组分分析提供可靠保障。

2.6 可燃气体探测器

在LNG接收站中,可燃气体探测器是保障厂区安全的关键设备,主要用于监测LNG泄漏产生的甲烷气体浓度,防范火灾与爆炸风险。该类探测器需具备良好的环境适应性,能在低温、潮湿的户外环境中稳定工作,避免因凝露、结霜影响检测精度。催化燃烧式探测器技术成熟、成本适中,可满足常规区域的气体监测需求;红外式探测器不受气体中毒影响,稳定性更强,更适合LNG接收站等高危场景。探测器需采用防爆设计,符合Ex防爆等级要求,同时配套声光报警装置,可在浓度超标时及时发出预警,为现场处置争取时间。

3 自控仪表在LNG低温工况中的适应性分析

3.1 结构适应性

在LNG低温工况下,自控仪表的结构适应性是保障其正常运行的基础。保温隔冷设计至关重要,隔热法兰的应用能有效阻断热量的传递。这种法兰采用特殊的隔热材料,在法兰连接处形成热阻屏障,减少低温介质与外界环境的热交换,维持仪表内部温度稳定。低密度聚氨酯填充也是常见的保温手段,将其填充在仪表外壳与内部元件之间,凭借良好的隔热性能和低密度特性,既能有效保温,又不会给仪表增加过多负担。防霜除霜策略同样不可或缺。在低温环境中,仪表表面容易凝结霜层,影响测量精度和信号传输。天线加热元件的引入可解决这一问题,通过对天线等关键部位加热,防止霜层形成^[1]。一般来说,加热元件的功率可根据实际需求在10-50W之间调整。同时,对仪表结构进行优化,减少霜层附着的面积和机会,例如采用光滑的表面设计,使霜层难以附着,确保仪表在低温下始终保持良好的工作状态。

3.2 信号传输适应性

信号传输的稳定性直接影响自控仪表的测量与控制效果。在LNG行业中,仪表信号传输目前主要依靠电缆实现,微波信号应用较少,无需针对低温蒸汽中的微波信号传输做特殊优化。屏蔽设计与抗静电干扰能力仍是信号传输适应性的关键。采用金属屏蔽层包裹仪表内部电路,可有效阻挡外界电磁干扰,金属屏蔽层的屏蔽效能可达60-80dB。同时,通过优化接地设计、完善静电释放路径,可及时消除静电积累带来的不良影响,保障仪表在LNG常规工况下的可靠运行。

3.3 环境适应性

户外安装的自控仪表需具备良好的防雨防晒保护措施。特殊的防护涂层可涂覆在仪表外壳表面,既能抵御雨水的侵蚀,又能防止紫外线对仪表的损害。双层保温外壳能进一步提升仪表的隔热性能,内层采用高效隔热材料,外层采用坚固耐用的防护材料,二者协同作用,有效减少外界环境温度对仪表内部的影响,确保仪表在恶劣户外环境下稳定工作。

3.4 安装与维护适应性

垂直安装与波束方向校准要求是保证仪表测量准确性的重要环节。对于一些采用波束传输信号的仪表,垂直安装能确保波束传播方向准确,减少测量误差。一般来说,垂直安装的偏差角度应控制在 $\pm 1^\circ$ 以内。同时,在安装过程中需对波束方向进行精确校准,使其与测量目标对齐。柔性连接方式适用于移动设备上的仪表安装,它能有效隔离振动,减少振动对仪表测量精度的影响,延长仪表使用寿命,降低维护成本。柔性连接的可伸缩范围一般在10-50mm之间。

4 LNG 低温工况下自控仪表选型的综合考量

4.1 工艺需求匹配

在LNG低温工况中,自控仪表选型首要考虑与工艺需求的精准匹配。温度、压力、流量等参数的测量范围与精度要求是选型的关键依据。不同工艺环节对这些参数的测量需求差异较大,例如在LNG储存环节,对温度的测量需精确到极小范围,以保障储存安全,此时应选择测量精度高且量程合适的温度仪表;而在输送环节,压力测量范围可能较广,要选取能覆盖整个输送压力变化的压力仪表^[4]。介质物性对仪表类型选择也有着重要影响。LNG介质的密度、粘度、介电常数等特性各不相同,这些特性会改变介质在仪表中的流动状态和信号传输特性。密度较大的介质可能需要仪表具备更强的抗压能力;粘度较高的介质易在仪表内部附着,影响测量准确性,需选择具有自清洁功能或抗粘附设计的仪表;介电常数的差异会影响电容式仪表的测量效果,需根据具体情况进行选择。

4.2 经济性与可靠性平衡

选型过程中,经济性与可靠性的平衡至关重要。初始投资与长期维护成本需进行全面权衡。一些高端仪表虽然初始投资较高,但具有更长的使用寿命和更低的故

障率,长期来看维护成本较低;而一些低端仪表初始价格低,但可能频繁出现故障,导致维修费用增加,甚至影响整个系统的正常运行。仪表寿命与故障率对系统运行的影响不容忽视。寿命长的仪表能减少更换频率,降低停机风险,保障系统稳定运行;故障率低的仪表可减少维修次数,提高生产效率。因此,在选型时不能仅关注价格,要综合考虑仪表的可靠性和经济性,选择性价比高的产品。

4.3 标准化与兼容性

统一仪表系列与生产厂家有助于降低管理成本。不同厂家生产的仪表在规格、性能、操作方式等方面可能存在差异,统一系列和厂家可简化管理流程,减少备件库存,提高维护效率。接口标准与通信协议的兼容性要求也是选型的重要考量因素。在LNG低温工况的自动化控制系统中,各种仪表需要相互连接并进行数据传输。如果仪表的接口标准和通信协议不兼容,将导致数据传输不畅,影响系统的整体性能。因此,选型时要确保所选仪表的接口标准和通信协议与系统中的其他设备相匹配,实现数据的准确、快速传输。

结束语

LNG低温工况下自控仪表的选型与适应性是一个复杂且关键的问题。通过全面分析低温工况对仪表的技术要求,明确不同类型仪表的选型要点,深入探讨仪表在低温环境中的适应性,以及综合考量工艺需求、经济性、可靠性、标准化等多方面因素,能够为LNG行业自控仪表的合理选型提供科学依据。只有选择合适的仪表并确保其具备良好的适应性,才能保障LNG系统在低温工况下的安全、稳定、高效运行,推动LNG产业的持续发展。

参考文献

- [1]皮宇,侯长江,李本江.浅析低温仪表开关阀的特殊要求[J].石油化工自动化,2024,60(4):32-35,70.
- [2]张如林.LNG项目中低温仪表的安装与使用要点[J].化工管理,2021(22):124-125.
- [3]齐炳男.浅谈液化天然气接收站中仪表低温控制阀选型设计[J].山东化工,2025,54(14):166-168.
- [4]梁安坤,余剑.超低温环境下仪表测量的研究与应用[J].天津化工,2025,39(2):116-118.