

试析 LNG 接收站扩建工程低压泵国产化应用管理

田翔宇（国家管网集团深圳天然气有限公司，广东 深圳 518120）

摘要：为解决 LNG 接收站建设中工期长、投资高等问题，本文以某 LNG 接收站扩建工程为例，对国产低压泵的应用管理措施进行研究，分析实际应用中泵体振动方面存在的不足，并提出重新加工转子、更换轴套的解决措施。同时，从加工制造、施工安装、性能检测等方面着手，加强国产低压泵的施工技术、质量与安全管理力度，以期对相关工程提供参考。

关键词：LNG 接收站；扩建工程；低压泵；应用管理

1 工程概况

以某 LNG 接收站扩建工程为例，共计引入 3 台 16 万 m³ LNG 储罐，为每台配备 LNG 低压泵，严格实施二开一备。泵转子包括电机、叶轮、轴、滚动轴承等部件构成，转子转动的支撑部件除两个滚动轴承之外，还在临近叶轮、诱导轮的位置，设置 3 个滑动轴承。泵轴总长度为 1648mm，三个滑动轴承与下轴承间的距离分别为 775mm、563mm 和 324mm。与普通泵相比，低压泵在加工、安装阶段均在常温下开展，但在 -169~-125℃ 的 LNG 工况下，泵体轴承、叶轮与口环在壳体上收缩到紧固状态，对泵体结构、材料性能、精密度等方面提出严格要求，其性能参数如下表 1 所示。该项目泵井深度约 55m，且泵套底部设置阀门，便于故障检修，还可将低温介质隔离，在吹扫结束后便可提升或者下放泵体，借助泵提升和重力作用可实现开闭操作。与国外底阀相比，国内的阀门结构形式有所区别，在稳定性、可操作性方面均受泵体运行状态影响，需要加强应用管理，才能使其始终保持稳定高效运行。

表 1 LNG 低压泵性能参数表

设计流 (m ³ /h)	扬程 (m)	功率 (kW)	介质 LNG	型号
460	245	250	-165	RC450-150×2-G

2 LNG 低压泵调试运行与优化方案

2.1 准备工作

在扩建工程 LNG 泵国产化期间，应确保新泵与原本其他进口泵相匹配，特别是关键工艺参数，如气蚀余量、扬程等。在气蚀余量方面，LNG 泵对该项指标要求严格，要求诱导轮应拥有较高的抗气蚀性能，确保在多种运行条件下，泵吸入口均无气蚀情况产生，使国产低压泵的参数与进口泵体相同或相似，充分符合紧急启动下的最低液位要求。在扬程方面，制造商

为了达到交货标准，通常将泵体实际扬程设计超过标准值，在扩建工程开展中，LNG 泵扬程根据原本数值进行设计时，其实际扬程可能会低于进口，在国产和进口泵体一同运行时效果受到影响，如因扬程不符难以同步运行等，这就需要更换泵体吸入口的叶轮，或者替换配套电机，使成本增加。对此，在准备阶段应重点关注扬程指标，可吊出进口泵，测量叶轮真实尺寸，为扬程设定提供参考，也可结合低压泵实际运行参数，使扬程、叶轮尺寸和类型等得以明确^[1]。待储罐内 LNG 填充液的数量符合低压泵调试运行要求时，可开展运行调试工作。因正式预冷前联锁信号屏蔽，仪表部门需要先检查联锁状态，电气部门应检验相序是否存在异常。开启低压泵前，还要保证泵体 kickback 管线调节阀完全开启，出口主管路阀门关闭，由现象各专业经过全面细致检查，均确定具备泵启动条件的情况下，告知中控室准备启动。

2.2 调试过程

2.2.1 自动模式

由中控室开启低压泵后，在自动运行模式下，生成泵体特性曲线，通过调整回流管线调节阀开合度，使泵体稳定在额定流量下，运行至少 1hr。在调节阀开度调控中，先开启 100%，再逐渐缩小直至 50%，逐渐开大到额定流量下的开度，观察泵体运行状态与效果。

2.2.2 手动模式

泵体首次运行多采取就地模式，由中控室开启低压泵后，密切观察泵出口位置的流量、压力指标波动情况，合理调节 kickback 管线调节阀的开度，明确泵体出口关键指标变化特征。待正式启动后，在额定流量范围内持续运行 1600s 后停泵，再将管线调节阀关闭。结合液位变化特点，在正式启泵之前，可适当缩短泵筒 vent 管线上的开关阀闭合时间，将其缩短到

120s (各接收站有所不同), 待调试结束后再恢复初始值。

2.3 运行问题与解决措施

2.3.1 问题提出

在调试期间, 该泵瞬间振动达到 6mm/s, 经过后续多天持续监测, 发现仍处于 6.5mm/s 左右, 与标准值相比较, 且振动幅度多变, 有恶化趋势, 振动频谱显示 1X 频超过标准值的幅度最大, 如若继续运行则泵体拥有较大的故障风险。

2.3.2 问题分析

2.3.2.1 1X 频振动分析

在低压泵运行中, 振动不平衡的成因较多, 1X 频振动可能因转子永久弯曲产生裂纹, 使挠度增加、滑动轴承间隙变大、轴系同轴度较差等等, 或受转子温度、润滑温度变化, 甚至电机电磁异常等, 均会导致故障问题产生, 泵转子出现动不平衡现象。根据频谱波形可知, 振动现象的成因还受操作人员经验、仪器准确性等因素影响, 尤其是精密配合的低温泵, 如若出现误操作, 不但故障问题未能良好解决, 还可能使振动扩大, 甚至整个转子瘫痪, 这就要求动平衡试验中严谨认真, 慎重操作。

2.3.2.2 叶轮口环与轴向力、径向力关系分析

该项目所用 LNG 泵体为 2 级, 采用垂直安装方式, 在常规运行模式下, 总轴向力由三个部分构成, 可用公式表示如下:

$$F = F_1 - F_2 + F_3$$

式中, F 代表的是总轴向力; F_1 代表的是平衡盘平衡力; F_2 代表的是不同叶轮压力差形成的总轴向力; F_3 代表的是转子自重。轴向力受叶轮密封环半径、叶轮轮毂半径的影响, 如若轴承松动、弯曲或者盖间隙增加, 均会导致口环磨损严重, 可见口环间隙与轴向力间具有正比关系。当泵体处于最佳工况下, 压出室中叶轮四周液体速度均匀, 当泵的实际流量低于或者高于最佳工况下的流量时, 压出室的液体流速将会发生较大改变, 逐渐脱离原本流道, 影响压出室中其他端面压力的稳定性, 此时在叶轮上便会形成径向力。在低压泵使用中, 径向力与口环间隙之间具有正相关关系, 当口环间隙增加时, 径向力也会随之扩大, 使轴因疲劳受损, 加剧口环合面磨损, 由此形成恶性循环。根据上述分析可知, 当泵体口环间隙增加时, 将导致轴向、径向力均随之提升, 在超过泵转子的承受力时, 便会出现碰撞、摩擦, 甚至引发更加严重的故障。

障。

2.3.2.3 上轴承轴套低温收缩量计算

该泵根据厂家资料, 明确相应材质的性能参数, 该项目所用上轴承座材料为 C93200, 上轴承外圈为 SUS440C, 衬套为 CAC702。将轴套安装到轴承座中, 在低温环境下计算收缩量, 公式如下:

$$\Delta l = 2\mu r_a = \frac{4pr_a r_c^2}{E_1(r_c^2 - r_a^2)}$$

式中, Δl 代表的是低温收缩量; r_a 代表的是轴套内径; r_c 代表的是轴承座配合面半径; E_1 代表的是额外收缩量; p 代表的是两个圆筒产生的应力值。

2.3.3 解决方案

将低压泵解体大修, 发现上轴承外圈和轴套间隙超过标准值, 可推测出泵体振动是受间隙超标影响, 重新加工转子, 并更换轴套。同时, 采用几何原理对其他易损配件的配合间隙进行校正, 将发现超标的配件统一换新。在大修期间配合间隙修订, 要求磨损环加工尺寸精度为 $201.71 \pm 0.01\text{mm}$, 铜套加工尺寸精度为 $50.18 \pm 0.01\text{mm}$, 上轴承衬套加工尺寸精度为 $120.14 \pm 0.01\text{mm}$, 叶轮定位盘加工尺寸精度为 $0.72 \pm 0.01\text{mm}$ 。该泵经过维修后再次开展测试, 发现各项性能良好, 振动始终处于 1.8~2.3mm/s 范围, 取得了良好的修理效果。

3 LNG 低压泵国产化的运行管理措施

3.1 生产制造阶段, 加强质量控制

因 LNG 低压泵在运行环境、结构等方面较为特殊, 在生产制造阶段应注重质量控制。国产低压泵多在工厂内加工完毕, 整体运输, 项目方应注重关键零部件的规格、性能检验, 在投入使用后仍要加强质量检验, 邀请第三方机构进场监督制造, 确保各个环节都能满足技术要求。将国产化应用重点放在零部件加工制造方面, 包括低温轴承、振动探头、电缆和潜夜电机等; 见证点包括泵零部件的水压、动平衡、工厂验收测试等方面, 并在低压泵正式发货前开展最终检验。因泵体处于超低温运行环境下, 工厂验收测试十分关键, 应采用低温介质开展各类试验, 如液氮、液化气等。此类试验流程众多, 对安全性要求较高, 工厂应配置专门的试验平台, 待验收检验后, 对比设计参数与预测性能曲线, 确保设计要求得到充分满足^[2]。

3.2 施工安装阶段, 重视技术管理

在扩建工程开展中, 储罐处于带液运行, 低压泵安装阶段的流程复杂, 包括隔离、吹扫、泵体干燥、

预冷、底阀开启等,技术难度较高,作业面风险类型众多,要求建设方、施工方、监理方等多个主体参与进来,加强人员、设备、材料、环境等全方位管理,贯彻落实泵体安装技术管理要求,使能源隔离、生产协调等目标顺利完成,管控要点如下。

3.2.1 准备阶段

根据生产运行现状,制定完善的泵体安装方案,并结合以往发生的、常见的安装问题,提前制定应急预案,并在正式安装前做好技术交底工作。为使安装工作持续进行,应尽量缩短安装时间,提前准备防爆工具,用绳子固定,以免工具落入泵井内;制定科学可行的施工方案,将泵井吹扫干净,做好能源隔离,并经常检查可燃气体状态;在周围设置隔离围栏,控制周围施工内容,禁止动火作业;对各专业协调生产,要求储罐低液位安装要求得到满足,通常不超过10m;泵体干燥度应符合要求,水露点应低于 -60°C ,以免进入LNG储罐内,出现堵塞问题。

3.2.2 泵体安装

在前悬臂吊安装时,将现有的非低温钢丝绳替换成低温缆绳,使其与LNG泵体相匹配,该项工作由专业人员完成,并由质检人员复核;因储罐中带有LNG,待泵体放入井下,受重力作用下降到与底阀上部一定距离后,将井法兰顶板回装,并加固。将LNG泵放入井内静置1h后,使其彻底处于冷却状态,才可将其放入底阀上,开启阀门,使LNG填充泵井。

3.2.3 底阀开启

针对底阀经常泄漏的问题,在安装阶段如若出现大量低温白气,应暂时停泵,待泵井中LNG气化完毕再继续放入,以免泵体骤冷影响装配质量;采用顶板提升机构,将泵体起吊,使其脱离底阀,并用吊秤检测泵体坐落底阀时缆绳拉力,确定每次降落深度,通常检测3次,如若每次的数值基本相同,便可将底阀彻底开启,使泵体彻底坐落在上方。

3.3 试生产与测试阶段,注重安全管理

该阶段的重点在于检验低压泵生产、制造、安装全程质量水平,判断是否符合设计要求,能否满足现场使用需求,这也是国产化泵体应用的关键所在。因试验所用介质为液化天然气,该气体带有易燃易爆特点,在性能测试中,应注重安全管理,最大限度降低测试和调试等环节对项目所在地、周围环境造成的不良影响。对此,项目方应从以下方面着手,加强人员与操作安全管理。

3.3.1 制定合理的调试方案

LNG泵需要在接收站开展调试工作,项目方应提前做好准备,制定切实可行的调试方案,综合考虑各个环节与专业,如运行人员、电气人员、仪表控制、安全管理等等,要求各专业各司其职,严格按照事先制定的规程操作,确保调试目标顺利完成;还要结合接收站实际运行情况,制定与之匹配的试运行方案,准确预测和辨识潜在的安全风险,制定完善的应急预案,并按照地方政府要求,做好相关备案手续。方案内容要包括新旧系统的界面管理、隔离要求,还要加强人员培训交底,开展预案演练等活动。

3.3.2 加强生产安全检查

在试生产安全检验之前,要求在组织机构、人员培训、设备工具等方面,加强相关管理力度,确保影响生产运行的全部尾项均以整改完毕,还要注重电气系统、控制系统保护设定值,强化联锁控制,在试生产之前,顺利完成联合调试工作。在性能检验方面,因涉及的内容众多,同样要注重安全检查与管理,包括检查电机启动运行情况,按照额定流程的60%、80%、100%和125%等,针对低压泵性能进行检验,包括功率、电流、扬程和振动等指标,观察是否符合性能曲线要求;在额定流量下,开展为期3d的试运行,全面检验泵体运行稳定度,判断各项参数是否与要求相符;与原本工艺系统一同开展并线测试,确定国产低压泵能够满足与原本进口泵体的并联运行要求,并保持长期安全稳定运行^[3]。

综上所述,在LNG接收站扩建工程中,因关键技术和设备逐渐成熟完善,现已具备低压泵国产化的技术条件。在实际施工中,项目方应提前开展调研活动,掌握国产LNG低压泵加工、安装和试生产等各阶段的技术要求与管理标准,通过全方位的管控,有效预防泵体振动等故障产生,降低对进口设备的依赖性,促进国内天然气行业的可持续发展。

参考文献:

- [1] 万学丽,等.国内首台LNG接收站用大型LNG高压外输泵的国产化工程应用[J].通用机械,2019(9):31-33.
- [2] 颜超,贾保印,黄金鑫,等.天然气与管道工程建设管理系统在中石油江苏LNG接收站扩建工程中的应用[J].山东化工,2021,50(15):44-46.
- [3] 谭秋月.从技术经济视角初探LNG接收站改扩建项目管理中的采购应用[J].经济管理研究,2020,2(1):46-47.