

石油储罐关键液位确定及液位灾害防护系统优化研究

刘庆

东营中科智源气体有限公司

摘要：本文研究了石油储罐关键液位的确定方法，分析了报警响应时间的影响因素及确定流程，提出基于物料危险性、储罐自动化程度和操作人员熟练度的响应时间矩阵优化方法。探讨了立式储罐关键高低液位设定原则，并优化液位灾害防护系统，包括物料核算、液位变送器校准、报警优化及 ESD 系统可靠性改进。研究表明，优化后液位测量误差降低，报警准确率提升，紧急响应更稳定，提高了储罐及输油管道的安全性和可靠性。

关键词：石油储罐；液位管理；报警响应；安全防护

本文围绕石油储罐关键液位的设定，分析报警响应时间的影响因素及优化策略，探讨高低液位阈值的确定方法，并提出液位灾害防护系统的优化措施。通过物料核算、液位测量比对及 ESD 触发机制改进，提高系统的测量精度和响应可靠性^[1]。

1 石油储罐关键液位确定方法

1.1 报警响应时间确定方法

1.1.1 影响因素

物料的物理化学特性直接影响储罐液位报警响应时间。易燃、易爆、有毒或腐蚀性强的物料，其液位超限可能引发严重事故，因此需要更快的响应速度。如轻质油品的蒸发性强，泄漏易导致爆炸，而高黏度原油则相对稳定，但溢流会污染环境。需依据物料危险等级、泄漏扩散特性及可能的事故影响，合理设定报警触发时间^[2]。

储罐结构、进出料管道、液位测量及控制系统等配置影响报警响应时间。自动化程度高、连锁系统完善的储罐，可通过自动关闭阀门或泵机调

节流量，降低事故风险，响应时间可适当放宽。若仅依赖人工操作，则需留出足够时间进行干预。储罐进出料流速、罐区安全距离、紧急排放能力等因素也决定了应急处置的可行性，影响响应时间设定。

1.1.2 确定流程

1) 评估影响因素等级。响应时间受物料物性、储罐配置及操作人员熟练度影响，可通过分级评估确定其等级。物料按照危险程度划分，例如剧毒、易燃物料需设定较短响应时间；储罐配置分为高、中、低自动化等级，自动化程度高的储罐可适当延长响应时间；操作人员熟练度分为高、中、低，经验丰富的人员可在短时间内完成应对措施^[3]。

2) 确定响应时间矩阵。根据影响因素等级，建立三维响应时间矩阵，以匹配不同工况下的合理响应时间。矩阵以物料危险性、储罐自动化程度和操作人员熟练度为维度，每个组合对应一个初步响应时间。例如高危险物料、低自动化程度、低熟练度的组合，需设定最短响应时间；而低危险物料、

高自动化程度、高熟练度的组合，可适当延长响应时间。

3) 结合企业规程确定具体数值。企业需结合自身储罐管理制度及操作规程，对响应时间矩阵进行优化调整。参考行业标准和法规，确保设定符合安全要求；结合企业历史运行数据，修正矩阵中的时间值，使其更贴合实际情况；在日常运行和应急演练中持续验证和优化设定，确保既能有效防范事故，又能保障正常生产效率。

1.2 立式储罐关键液位确定方法

1.2.1 关键高液位确定

储罐关键液位示意如图 1 所示，临界液位 (CH) 是储罐可存储的最高液位，一旦超过该高度，物料可能发生溢流，导致泄漏、环境污染甚至火灾爆炸等事故。CH 由储罐结构和安全余量决定，通常以储罐总高度减去罐顶有效厚度及内部附件限额计算。确保物料液位不超过 CH 是储罐安全管理的基本要求，可通过液位传感器、溢流报警等装置实时监测并采取必要的防护措施，以防止重大安全事故发生。

高液位连锁触发液位 (HH) 是为了保护泵机和管道系统而设定的液位阈值。HH 确保储罐在液位接近临界液位 (CH) 前, 仍有足够的时间进行连锁控制, 如自动停泵或切换输送管道, 以防止泵机因扬程不足或超压导致损坏。HH 通过计算 CH 减去一定的安全余量 (通常为 0.5m) 得到, 并结合泵机特性、输送管路水头损失等因素进行优化调整, 以确保设备安全运行。

高液位报警液位 (LAH) 是操作员进行手动干预的关键点, 通常设定在 HH 之下, 以便在物料液位进一步升高前采取必要措施, 如调整进料速度或起倒罐操作。LAH 的计算需考虑储罐的最大进料流量、操作员响应时间以及自动化控制水平, 确保在达到 HH 之前, 有充足的时间进行人工干预。合理设定 LAH 可有效降低高液位溢流事故的风险, 增强储罐运行的安全性和可控性。

最大工作液位 (MaxW) 是储罐在正常生产过程中允许的最高液位, 通常设定在 LAH 之下, 以确保储罐在工艺运行中不会轻易触发报警。MaxW 受储罐类型、物料特性、工艺要求及安全裕度等因素影响, 锥顶罐的 MaxW 通常为 CH 的 80% ~ 90%。合理确定 MaxW, 可提高储罐的利用率, 确保物料存储的稳定性, 防止因液位变化导致安全隐患和操作波动。

1.2.2 关键低液位确定

不同类型储罐支撑高度范围, 见

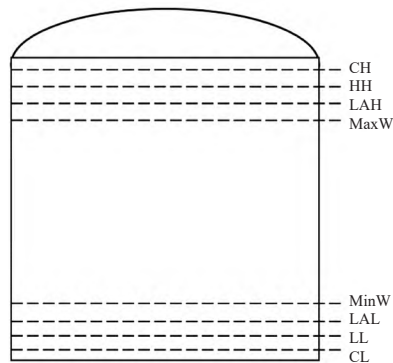


图 1 储罐关键液位示意图

表 1。最低液位 (CL) 是储罐在物料转出过程中必须保持的最低安全液位, 以防止浮顶塌陷、设备损坏或储罐结构受损。对于浮顶罐, CL 需确保浮顶支撑在安全高度, 防止浮盘脱离液面形成危险的油气空间; 对于固定顶罐, CL 则需考虑人孔高度及排料口位置, 保证正常出料而不影响罐底设备运行。CL 依据储罐类型及设计标准确定, 通常取浮顶支撑高度或人孔顶部以上一定安全裕度。

表 1 不同类型储罐支撑高度范围

储罐类型	支撑高度 H_i/m
内浮顶罐	1.8 ~ 2.0
外浮顶罐	1.05
拱顶罐	1.05
球罐	1.05

低液位连锁触发液位 (LL) 用于防止泵机因入口压力过低而发生汽蚀现象, 导致泵体损坏或输送中断。LL 设定需考虑泵机的净正吸入压头 (NPSH)、管道水头损失及物料特性, 以确保泵机在该液位下仍能正常工作。通常, LL 设定在 CL 之上一个安全高度, 以便在液位继续下降前触发连锁保护, 使泵机自动停机或切换至备用输送方案, 避免因汽蚀引发设备故障。

低液位报警液位 (LAL) 是操作员进行手动干预的关键点, 设定在 LL 之上, 确保在触发低液位连锁前有足够的时间进行应对。LAL 的计算需综合考虑储罐出料速率、操作员响应时间及应急措施的执行效率, 以确保在低液位灾害发生前采取必要措施, 如调整出料流量或切换物料来源。合理设定 LAL, 有助于降低储罐过低液位运行的风险, 避免泵机空转或储罐气相空间扩大导致的安全隐患^[4]。

最低工作液位 (MinW) 是储罐在正常生产过程中允许的最低液位, 通常设定在 LAL 之上, 以保证设备的稳定运行和经济性。MinW 设定需综合考虑泵机运行效率、输送系统稳定性以

及储罐液位对泵功耗的影响。在实际应用中, MinW 可通过试验数据或设备制造商建议值确定, 通常为储罐临界液位 (CH) 的 10% ~ 20%。合理控制 MinW, 可降低泵机能耗, 减少管道气蚀风险, 并提高储罐的运行寿命。

2 石油储罐液位灾害防护系统优化技术

2.1 物料核算优化

传统物料核算方法主要基于总转运时间与理论计算时间的对比, 难以实现实时监测, 且易受流量均值误差影响。优化后的物料核算采用实时流量数据, 将转运体积转换为液位高度, 提供更精确的液位估算。通过流量计测得转运体积, 结合储罐几何参数计算液位变化, 提高对异常情况的识别能力。该优化方法不仅可用于日常液位监测, 还能在极端环境 (如低温冻堵) 下提供液位参考, 提高系统的稳定性与可靠性。

2.2 储罐液位变送器校准

单一液位变送器易受环境、沉淀物干扰, 影响液位测量准确性。优化方案通过物料核算计算的液位值与液位变送器测量值对比, 设定允许误差范围 (如 15%), 超出阈值时进行二次测量, 并检查设备状态。若误差持续异常, 则触发故障报警并进行人工检查。该方法无需额外增加液位计, 降低成本, 同时提升 SCADA 系统显示数据的准确性, 减少误报警, 提高操作员对液位报警的信任度^[5]。

2.3 储罐液位报警校准

液位报警的精准性是防止溢流或抽空事故的关键。优化方案在液位达到报警值 (LAH/LAL) 时, 计算储罐实际转运体积, 并与物料核算数据对比, 若误差超出设定范围, 则重新测量并检查系统。此方法可有效识别误报警, 减少因虚假高/低液位报警导致的干扰, 确保报警触发时储罐液位真

实超限,提高系统应急响应的可靠性,降低因报警失误造成的生产中断或事故风险。

2.4 储罐液位开关校准

液位开关通常用于ESD(紧急停车)系统,但其定点测量方式容易受误差影响。优化方法采用物料核算计算的液位数据与液位开关测量值比对,结合1oo2逻辑(液位开关与变送器数据匹配),确保ESD触发的准确性。若误差超限,系统将发出故障报警,并采用可靠的测量数据作为ESD触发依据。此优化降低误触发率,提高紧急停车系统的准确性,确保储罐液位控制的安全性和稳定性。

3 优化系统的可靠性验证

优化前,储罐液位灾害防护系统的主要失效模式包括:1)液位变送器测量偏差,由于浮子卡滞、传感器漂移或沉积物影响,导致液位数据误差,可能引发误报警或监测失效;2)液位报警误触发,由于液位计抖动、物料波动或温度影响,导致虚假高/低液位报警,影响操作员判断;3)ESD(紧急停车)系统误触发或失效,液位开关检测异常或信号延迟可能导致储罐进出料控制异常,甚至导致溢流或抽空事故。

优化后,系统通过物料核算优化+液位测量比对+1oo2逻辑冗余进行改进。物料核算实时计算液位,形成独立的液位数据来源,与液位变送器数据进行比对,设定误差阈值,确保测量准确性。通过设定报警校准机制,当液位达到高/低报警值时,与物料核算数据核验,减少误报警率。在ESD触发逻辑中,采用液位开关与变送器的1oo2表决机制,确保至少两个独立测量结果满足触发条件,降低误触发风险。

计算结果表明,优化后PFD(安全失效概率)和PFS(危险失效概率)

明显降低,液位测量误差减少,报警准确率提高,系统响应更稳定,提升了储罐液位灾害防护系统的安全性和可靠性。

4 输油管道高压报警阈值设定

4.1 高压报警响应时间确定

输油管道的高压报警响应时间取决于流体动力学特性、管道材质、运行压力及操作员反应速度。压力突升可能由泵站故障、阀门误操作或管道堵塞引起,需在设定时间内进行干预。响应时间的确定可通过事故压力变化率分析和操作时间矩阵进行评估。分析异常工况下的压力变化速率,计算安全干预时间;根据调度控制、远程监测和现场操作能力,确定操作员的响应时间等级。综合计算出合理的高压报警响应时间,确保在极限压力前采取有效措施,避免管道超压或泄漏事故。

4.2 进出站高压报警阈值计算

高压报警阈值设定需考虑最大允许操作压力(MAOP)和正常运行压力范围。进站压力受上游管道输送能力影响,而出站压力取决于泵机工况及下游管道阻力。计算方法包括:1)稳态分析:根据工艺设计,确定站间正常压力范围;2)瞬态分析:评估突发压力升高情况,如泵站突停、阀门关闭引起的水击效应。一般情况下,进站高压报警阈值设定为(0.9~0.95)MAOP,出站高压报警阈值设定为(0.85~0.9)MAOP,以确保在压力接近极限前能发出预警,留出操作调整时间。

4.3 进出站高压ESD触发阈值计算

ESD(紧急停车)系统的高压触发阈值设定需严格遵循超压保护策略,防止管道承压超限导致结构失效。计算原则包括:1)最大设计压力(MDP)限制,通常设定ESD触发压力不超过MDP的1.05倍;2)瞬态压力极限(TPmax)评估,即模拟紧急停车或快

速关闭阀门情况下的最大瞬态压力,确保ESD阈值低于TPmax;3)操作安全裕度,通常设定为(1.02~1.05)MAOP,以防误触发或系统延迟。ESD触发后,系统需快速关闭泵机或切换备用管线,确保管道安全运行。

5 结语

本文围绕石油储罐关键液位的确定方法,深入分析了报警响应时间、高低液位阈值及液位灾害防护系统的优化策略。通过建立基于物料危险性、储罐自动化程度和操作人员熟练度的响应时间矩阵,提高了报警系统的合理性。采用物料核算优化、液位测量比对及ESD触发校准等措施,有效降低了测量误差和误报警率,提升了系统的可靠性和应急响应能力。研究表明,优化后的储罐液位管理系统能够更准确地监测液位变化,减少溢流和抽空事故的发生。

参考文献:

- [1] 刘琼,王伟.柴油储罐改造为汽油储罐设计要点探讨[J].中国设备工程,2023(20):148-149.
- [2] 徐庆春,郭怡安.在役大型石油储罐安全仪表系统改造方案[J].中国仪器仪表,2022(02):17-21.
- [3] 蒿旭东,王少钦,王毅娟.倒锥底石油储罐及地基基础风载效应分析[J].北京建筑大学学报,2021,37(04):19-26.
- [4] 尚峰.雷达液位计在石油储罐液位计量中的应用[J].化工设计通讯,2020,46(11):79-80+93.
- [5] 梁晟林,潘建华,蔡文君,等.储液对大型石油储罐抗风稳定性能的影响分析[J].机械工程师,2020(07):38-40.