

危化品装卸作业“人-机-环-管”智慧联动管控模型构建与应用——以综合供能站卸油全流程为例

张臻 胡喆捷 欧浩 张明强^(通讯作者) 丁波 陈郑

浙江高速能源发展有限公司, 浙江杭州, 310000;

摘要: 传统危化品装卸作业的安全管理高度依赖工作人员主观意识, 制度要求与现场执行之间存在一定的落差。本文基于安全系统工程“人-机-环-管”分析框架, 以综合供能站卸油全流程为研究对象, 构建了一套以卸油流程控制器为中枢的智慧联动管控模型。该模型将人员资质核验、车辆停靠辨识、静电接地检测、环境风险监测等感知信号转化为不可逾越的联锁逻辑, 实现“仅当前置安全条件满足, 后续操作许可方可执行”的刚性约束。在此基础上, 本文进一步阐述当前模型的局限性并提出改进建议, 为危化品装卸作业的本质安全水平提升提供理论参考。

关键词: 智慧卸油; 人-机-环-管; 联动管控; 本质安全; 综合供能站

DOI: 10.69979/3041-0673.26.02.119

引言

卸油作业涉及易燃易爆介质的的大流量传输, 是综合供能站重点监管作业, 也是综合供能站运营中风险较为集中的环节。尽管企业普遍制定了详尽的操作规程, 但由于卸油作业管控节点繁多、作业环境复杂, 作业人员仍难免出现习惯性违章。深入分析这些违章行为可以发现, 其背后往往是人员、设备、环境、管理等要素的系统性失配, 而非单纯的个体疏忽。这一现象与安全系统工程中的“人-机-环-管”模型相契合, 该模型强调事故是人员、设备、环境、管理四要素失配的结果^[1]。然而, 传统应用中该模型多用于事后归因分析, 较少被用于事前的主动控制设计。本文尝试将该模型从“分析框架”提升为“控制框架”: 以卸油流程控制器为逻辑中枢, 通过多源感知技术采集四要素的实时状态信息, 并将其转化为可编程的联锁规则, 构建一套“环环相扣、不可跳步”的智慧联动管控模型。

1 卸油作业传统管控缺陷分析

1.1 人员管控的滞后性

传统模式下, 驾驶员与押运员资质核验依赖纸质证件查阅。站里不具备实时验证证件真伪的技术手段, 对借用证件上岗、证件过期等情况难以有效甄别。作业过程中的吸烟、接打电话等违规行为, 仅能通过人工巡检发现, 监管盲区客观存在。更关键的是, 资质核验结果与后续作业许可之间没有技术性关联——假若工作人员疏忽放行, 后续设备也照常可用。

1.2 设备与环境信号的孤立

传统静电接地夹配备有声光报警功能, 当接地电阻超标时发出提示, 但这种报警仅作用于感官层面——它“告知”有问题, 却不“阻止”作业继续。可燃气体报警器亦是独立运行系统, 即使环境浓度超标, 它也仅发出警报, 并不向作业控制系统传递任何联锁信号。感知系统与控制系统“两层皮”的架构, 使得从风险发现到阻断之间存在一个由人的反应速度决定的延迟。

1.3 制度与执行的断裂

这是深层结构性矛盾。操作规程明确规定“停稳熄火→放置轮挡→连接静电接地→稳油 5 分钟→连接管路”等步骤^[2], 但作业人员可能因经验主义或时间压力而跳步操作。传统的“手指口述”确认容易异化为流于形式的勾选动作。制度的正确执行路径有详细规定, 但错误执行路径却未被封锁。

2 智慧联动管控模型的构建

2.1 模型总体架构

本模型以卸油流程控制器为物理核心和逻辑中枢, 向上接收感知信号, 向下发出联动指令。整体架构自下而上划分为感知层、联动层和应用层, 各层职责明确、接口清晰。

感知层负责采集“人、机、环”全要素状态数据, 由多种异构传感器协同构成: AI 摄像机用于车牌识别、人脸抓拍、行为分析和灭火器检测; 人脸识别终端核验作业人员身份; 陀螺仪传感器内置于智能挡轮器、人孔井监测器和手动阀门监测器中, 感知机械动作状态; 静电接地检测模块实时测量接地电阻; RFID 读写器读取

钥匙电子标签信息；液位传感器连续监测储罐液位。

联动层是模型核心，以卸油流程控制器为硬件载体，内置联动规则引擎。该引擎将人员资质核验、停靠到位判定、钥匙信息比对、接地电阻判定和稳油计时控制等逻辑编码为可执行模块，通过状态变量共享形成不可分割的连锁链条。

应用层针对不同的角色来提供人机交互界面。站区终端借助语音提示、指示灯来引导作业操作。手持移动终端负责推送作业信息、告警通知。后台管理平台能够为安全管理人员给予作业记录查询、违规统计、设备监控等功能，以此来支持基于数据驱动的管理决策。

2.2“人”要素的资质-流程联动

油罐车到站之后系统会自动抓取驾驶员、押运员、卸油员的人脸图像，进而与预先录入的资质信息库展开比对。其判定逻辑是由三重条件逻辑共同组成的：实际人员信息要和登记信息保持一致，作业人员资格证书都处于有效期内，三方人员都已经到达现场。只有三项条件同时达成的时候，系统才会给流程控制器发送“人员核验通过”的信号，从而释放后续设备的操作许可。要是有任何条件不符合，流程控制器会锁定 RFID 钥匙管理模块、静电接地模块、稳油计时模块，从物理方面和逻辑方面完全阻断作业启动的可能性。如此一来，人员资质就从“被检查项”转变成了“作业许可的先决条件”，人证不符的人员在系统面前连第一步都无法迈出。

2.3“机”要素的停靠-钥匙-接地三联锁

车辆停靠到位的辨识是后续各个环节能够顺利进行的基础条件。此项研究选用了借助陀螺仪传感技术的智能挡轮器，把它安装在停车位后部特定的位置上^[3]。当罐车的后轮碰到挡轮器的时候，挡板向下压会带动陀螺仪开始转动，系统会对两个挡轮器的转动角度进行实时监测。要判断车辆停靠到位需要同时满足这样两个条件：两个挡轮器的转动角度都超过了设定的阈值，并且

二者的数值相近，这样才能保证车辆的两个后轮都已经紧紧贴着挡轮器，车身也处于平直状态。在这之后，RFID 钥匙管控模块才会被激活，这时就允许驾驶员把写入电子标签的钥匙放在控制器的识别区域。只有当钥匙信息与系统内车辆信息比对后是一致的时候，静电接地夹的使用许可才会被释放。车辆停靠、钥匙、接地这三个方面形成了一条不能拆分的逻辑链——要是车辆停靠没有到位，钥匙就不可以提交，如果钥匙没有经过核验，接地夹就不能使用。

2.4“环”要素的接地-稳油计时联锁

静电接地夹与稳油计时之间的强制联锁属于防止静电事故的核心设计部分。流程控制器会实时对接地回路电阻值加以检测。只有在接地电阻达到标准的情况下，稳油计时程序才能够启动。中断机制比较关键：要是在计时期间接地出现异常或者夹子脱落，计时马上会中断并且复位清零，接地恢复之后，计时会从零开始重新计算，并非从断点接着开始。这种设计保证“稳油 5 分钟”一定是在连续、有效接地状态下的完整 5 分钟，任何中断都被看作无效。此逻辑把以往能够被敷衍的计时动作，转变为有设备状态作为硬约束的物理过程，避免了“接地虚接但计时依旧”的安全漏洞。

2.5 综合联动控制时序

把上述连锁环节依次串联起来，从而构成完整的作业控制时序。罐车到达站点之后，系统会给站长推送作业信息。只有人员资质核验通过了，才能够实施停车入位操作。双挡轮器检测到停靠处于到位状态后，才允许放入并识别钥匙。钥匙信息匹配成功后，才准许连接静电接地夹。接地状况良好并且灭火器配置到位以后，才启动 5 分钟的稳油计时。计时完整结束之时，才可以连接卸油管路。在整个序列里，只要任何前序步骤未完成或者状态信号消失了，后续步骤的许可就不会被释放。

表 1 综合供能站卸油全流程“人—机—环—管”智慧联动管控节点设计

管控维度	关键作业节点	感知与识别方式	联锁判定条件	联动控制结果	主要防控风险
人员要素	驾驶员、押运员、卸油员到场核验	人脸识别终端、资质信息库比对	人员身份一致、资格证在有效期内、三方人员全部到场	释放作业启动许可；任一条件不满足则锁定后续操作	人证不符、无证上岗、人员缺位作业
设备要素	车辆停靠与挡轮确认	智能挡轮器、陀螺仪角度检测	两侧挡轮器角度达到设定阈值且数值基本一致	激活 RFID 钥匙识别模块	车辆停靠不到位、溜车、车身偏斜
设备要素	车辆钥匙管控	RFID 读写器、车辆信息绑定	钥匙电子标签与车辆信息匹配	允许进入静电接地操作环节	车辆未受控、误卸、非授权车辆作业
环境要素	静电接地检测	静电接地电阻检	接地电阻满足安全阈值要求	启动稳油计时；异常时中	静电积聚、接地虚接、接

		测模块		断并复位	地脱落
环境要素	稳油计时与现场状态确认	流程控制器计时模块、AI 摄像机	连续有效接地满 5 分钟，灭火器配置到位	释放卸油管路连接许可	未稳油即操作、应急器材缺失
管理要素	作业记录与异常追溯	后台管理平台、移动终端、告警日志	作业步骤、时间节点、异常事件自动留痕	形成全过程闭环记录和违规统计	事后追溯困难、制度执行弱化、隐患整改不闭环

从表 1 能够看出，智慧联动管控模型并非只是单纯地增添监测设备，而是把卸油作业里的关键安全要求转变成为了能够识别、可以判断、能够联锁、能够追溯的控制节点。其中，“人”这一要素主要解决资质真实性、人员到场完整性方面的问题，“机”要素主要处理车辆停靠、钥匙受控、设备状态确认方面的问题，“环”要素着重解决静电接地、稳油计时、现场风险状态方面的问题，“管”要素借助数据记录、异常告警、责任追溯达成制度要求的数字化落地。这样的设计让卸油作业从依靠人工提醒的柔性管理，转变为由系统逻辑约束支撑的刚性控制，为后续综合联动控制时序的形成奠定了基础。

3 改进建议

本文所建立的“人 - 机 - 环 - 管”智慧联动管控模型，为卸油作业安全管理给予了可行的技术途径。不过，仍要在联动规则、覆盖范围、技术可靠性这三个方面持续加以完善。

3.1 联动规则的动态优化

现有的联动规则乃是依据专家经验预先设定而成，属于静态的“规则驱动型”逻辑模式，其阈值依靠人工进行标定，在面对不同工况时，很难达成最优设定。故而建议引入数据驱动的自适应机制，利用过往的运行数据，借助机器学习来剖析不同工况下参数的分布特征，进而自动推荐出最优阈值，达成从“静态预设”到“动态自优”的转变。还能够对关联规则挖掘等算法展开探索，从历史数据里寻觅那些尚未被专家经验所捕捉到的风险关联模式，不断丰富规则库。

3.2 覆盖范围的多维拓展

当下模型的覆盖范围存在着三个能够进行拓展的空间。其一，朝着作业阶段的两端延伸，把联动逻辑从卸油执行环节朝着“运 - 卸 - 储 - 加”的整个链条去拓展，以此建立起全生命周期安全管控的闭环。其二，向着多站点协同的方向拓展，搭建企业级的监管平台，收集各个站点的数据，对跨站点的安全趋势对比、最佳实践推广提供支撑。其三，朝着多场景兼容的方向发展，兼容如 LNG 卸液、氢能加注等新型能源接卸场景，进而形成统一的综合供能站安全管控平台。

3.3 技术可靠性的持续增强

技术可靠性属于安全生产关键系统的底线要求。可从三个方面进行增强。其一，关键判据环节引入双传感器冗余设计，防止单点故障引发误判漏判情况。其二，无线通信链路增添心跳检测与超时保护机制，通信中断超时时自动进入安全锁定状态。其三，参照 IEC 61508 等功能安全标准，对联动控制器进行安全完整性等级评估与认证，保证在硬件失效和软件故障时依旧维持安全状态。

4 结语

在本文所建立的“人-机-环-管”智慧联动管控模型之内，凭借把卸油操作规程予以转化为刚性联锁逻辑的方式，达成对关键违章行为的强制性阻断。其核心贡献之处在于，提出了一条从“制度约束型安全”朝着“机制锁定型安全”迈进的可行路径，就是把安全制度里的刚性要求编码成为机器无法违抗的逻辑锁链，在不依靠人的自主性的状况下保障安全底线。

在人工智能与物联网技术不断向前发展的情况下，同时在国家持续推进“互联网 +”智慧能源试点示范政策的引导作用下，这种管控范式有希望在更为广泛的危化品装卸场景当中得以应用，进而为行业本质安全水平的提高贡献一份力量。

参考文献

- [1] 金龙哲;汪澍. 安全工程理论与方法[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2019: 第 1 章“系统安全理论”相关论述
- [2] 中华人民共和国应急管理部. AQ 3010-2022 加油站作业安全规范[S]. 北京: 应急管理出版社, 2022: 第 5 章“卸油作业”相关条款.
- [3] 袁福江. 化工厂危化品装卸作业风险辨识与防控研究[J]. 中国化工贸易, 2026, 18(11): 133-135.
- [4] 刘伟. 危化品装卸作业安全控制技术研究[J]. 聚酯工业, 2026, 39(02): 166-168.
- [5] 章征祥. 危化品装卸作业中静电引发火灾防控技术研究[J]. 化工管理, 2026, (08): 79-82.