

基于故障树分析的内燃叉车液压系统维护策略优化研究

于超

山东港口烟台港集团有限公司 山东 烟台 264000

摘要：工业生产中内燃叉车属于重要的机械设备，而内燃叉车液压系统维护作为重点工序，只有做好内燃叉车液压系统维护才能减少设备故障形成。文章以内燃叉车液压系统工况为例，分析了设备液压系统结构与故障现状，同时引入故障树分析（FTA）方法对内燃叉车液压系统进行分析，以掌握内燃叉车液压系统故障信息，为内燃叉车液压系统维护提供技术参考。

关键词：内燃叉车；液压系统；故障树分析（FTA）；维护策略；可靠性

引言

内燃叉车凭借动力强劲、承载能力强、适应复杂工况等优势，广泛应用于制造业、仓储物流、港口码头等场景。液压系统承担举升、倾斜、转向等关键动作的动力传递功能，其故障会直接导致设备停机，造成生产损失。当前，内燃叉车液压系统维护多采用“事后维修”或“定期预防性维修”模式：事后维修虽可降低日常维护成本，但故障突发率高，易引发安全事故；定期维修则存在“过度维护”或“维护不足”问题，难以适应设备动态运行需求。故障树分析（FTA）作为一种自上而下的可靠性分析方法，通过构建故障逻辑模型，可定量识别故障关键因素，为维护策略优化提供科学依据^[1]。

1 设备液压系统结构与故障现状

1.1 设备基本信息

本文选取的案例设备为2022年购入的CPCD30型内燃叉车（设备编号：FC-2022-08），主要用于仓库货物装卸与车间物料转运，日均作业时长8小时，累计运行时长12000小时。该叉车液压系统采用单泵双回路设计，主要由液压泵、多路阀、液压缸（举升缸、倾斜缸）、转向器、液压油箱、滤油器及管路附件组成，系统工作压力16-18MPa，液压油型号为L-HM46抗磨液压油。

1.2 故障现状统计

为明确设备液压系统故障特征，对FC-2022-08号叉车2023年1月-2023年12月的故障记录与维护数据进行统计分析。期间该设备共发生液压系统故障18次，故障类型主要包括举升无力、转向迟缓、液压渗漏、系统过热四类，具体故障频次与停机时长如表1所示。

作者简介：于超（1983.06-），男，汉，籍贯：山东威海，学历：本科，职称：高级工程师，研究方向：设备技术管理

表1 液压系统故障统计

故障类型	故障频次 (次)	占比 (%)	单次平均停 机时长(h)	总停机时 长(h)
举升无力	7	38.9	4.5	31.5
转向迟缓	5	27.8	3.8	19.0
液压渗漏	4	22.2	3.2	12.8
系统过热	2	11.1	5.0	10.0
合计	18	100.0	-	73.3

由表1可知，举升无力与转向迟缓是该设备液压系统的主要故障类型，合计占比达66.7%，且单次故障停机时长较长，是影响设备作业效率的核心问题。此外，液压渗漏虽频次较低，但易导致液压油浪费与环境污染，增加维护成本；系统过热虽发生率最低，但故障后果严重，可能引发液压元件永久损坏，需重点关注^[2]。

2 基于FTA的液压系统故障分析

2.1 故障树构建

以CPCD30型叉车液压系统“核心功能失效”为顶事件（T），结合设备故障现状与液压系统工作原理，通过现场调研、维修人员访谈及故障机理分析，识别出顶事件的直接原因（中间事件）与根本原因（底事件），构建故障树模型。其中，中间事件包括举升无力（M1）、转向迟缓（M2）、液压渗漏（M3）、系统过热（M4）；底事件共12项，涵盖液压元件失效、油液污染、操作不当等关键因素：①顶事件T：液压系统核心功能失效。②中间事件M1（举升无力）：由液压泵流量不足（X1）、多路阀阀芯卡滞（X2）、举升缸内漏（X3）、系统压力不足（X4）导致。③中间事件M2（转向迟缓）：由转向器失效（X5）、转向缸内漏（X6）、液压油黏度异常（X7）导致。④中间事件M3（液压渗漏）：由管路接头松动（X8）、密封件老化（X9）、液压缸缸壁划伤（X10）导致。⑤中间事件M4（系统过热）：由液压油不足（X11）、散热风扇故

障 (X12) 导致^[3]。

2.2 最小割集计算

最小割集是导致顶事件发生的最低限度底事件组合，通过布尔代数化简法对故障树进行逻辑运算，得到顶事件的最小割集共12个，分别为：{X1}、{X2}、{X3}、{X4}、{X5}、{X6}、{X7}、{X8}、{X9}、{X10}、{X11}、{X12}。这表明该液压系统的每个底事件均能单独导致顶事件发生，即单一元件失效或操作不当均可能引发系统功能故障，需针对每个底事件制定防控措施^[4]。

2.3 底事件重要度分析

为明确各底事件对顶事件的影响程度，采用结构重要度与概率重要度相结合的方法进行定量分析。其中，结构重要度基于故障树逻辑结构计算，反映底事件在故障模型中的“位置重要性”；概率重要度基于底事件发生概率计算，反映实际运行中底事件的“风险重要性”。通过统计FC-2022-08号叉车2023年故障数据，得到各底事件的年度发生概率（即该底事件导致故障的次数与总故障次数的比值），结合结构重要度计算公式，最终得到各底事件的综合重要度排序，结果如表2所示。

表2 液压系统底事件重要度排序

底事件编号	底事件名称	年度发生概率 (%)	结构重要度	概率重要度	综合重要度	重要度排序
X1	液压泵流量不足	22.2	0.083	0.222	0.305	1
X3	举升缸内漏	16.7	0.083	0.167	0.250	2
X5	转向器失效	13.9	0.083	0.139	0.222	3
X2	多路阀阀芯卡滞	11.1	0.083	0.111	0.194	4
X7	液压油黏度异常	8.3	0.083	0.083	0.166	5
X8	管路接头松动	8.3	0.083	0.083	0.166	6
X9	密封件老化	6.7	0.083	0.067	0.150	7
X4	系统压力不足	5.6	0.083	0.056	0.139	8
X6	转向缸内漏	5.6	0.083	0.056	0.139	9
X10	液压缸缸壁划伤	2.8	0.083	0.028	0.111	10
X11	液压油不足	2.8	0.083	0.028	0.111	11
X12	散热风扇故障	2.8	0.083	0.028	0.111	12

由表2可知，液压泵流量不足 (X1)、举升缸内漏 (X3)、转向器失效 (X5) 是影响该叉车液压系统可靠性的三大关键因素，综合重要度均超过0.2，需作为维护优化的核心对象。

3 基于 FTA 的维护策略优化

针对FC-2022-08号叉车液压系统故障树分析结果，结合传统维护模式的不足，从“预防维护-故障诊断-修复优化”三个维度构建优化维护策略，重点针对重要度排名前5的底事件制定差异化措施。

3.1 预防维护优化

预防维护的核心是降低底事件发生概率，基于各底事件的重要度与故障机理，制定分级预防维护计划：第一，一级预防（针对X1、X3、X5）：每150小时对液压泵进行流量检测（正常范围：25-30L/min），每300小时拆解检查举升缸密封件磨损情况，每450小时对转向器进行空载转向阻力测试（正常范围： $\leq 50N$ ）；第二，二级预防（针对X2、X7）：每200小时清洗多路阀阀芯，每250小时检测液压油黏度（正常范围：40°C时41-50mm²/s），每500小时更换液压油与滤油器；第三，三

级预防（针对X8、X9及其他）：每100小时检查管路接头紧固情况，每350小时更换液压缸密封件，每周检查液压油液位与散热风扇运行状态^[5]。

3.2 故障诊断优化

基于前文构建的液压系统故障树 (FTA) 分析结果，本文通过梳理“顶事件-中间事件-底事件”的逻辑映射关系，构建“故障现象-中间事件-底事件”的层级化诊断逻辑树。第一，当设备出现“举升无力”（中间事件M1）时，依据FTA中M1与X1、X4的强关联特性（综合重要度排名前4），优先通过流量测试仪检测液压泵实际流量（正常阈值25-30L/min）、液压压力表检测系统工作压力（正常阈值16-18MPa）；若流量低于25L/min或压力低于16MPa，则直接定位底事件X1（液压泵流量不足）或X4（系统压力不足）；若流量与压力均处于正常范围，再基于故障树逻辑拆解检查举升缸（排查X3：举升缸内漏）与多路阀（排查X2：多路阀阀芯卡滞）。第二，当设备出现“转向迟缓”（中间事件M2）时，结合FTA中X7（液压油黏度异常）的基础影响作用，先通过油液分析仪检测液压油40°C时运动黏度（正常范围41-50mm²/s）；

若黏度超出阈值则定位X7，若正常则通过转向阻力测试仪检测转向器空载转向阻力（正常阈值 $\leqslant 50\text{N}$ ），排查X5（转向器失效）；最终拆解检查转向缸密封状态，定位X6（转向缸内漏）。

3.3 修复优化

针对液压系统不同底事件的故障机理与失效特征，结合前文FTA分析中各底事件的重要度排序，从修复工艺升级与备件管理精细化两个维度，制定差异化优化方案，具体如下：第一，针对液压泵流量不足（X1）故障。通过故障原因拆解可知，该底事件主要由液压泵叶片磨损、泵体配合间隙过大两类问题引发。对此，采取分类修复策略：若故障源于叶片磨损，摒弃传统的普通钢叶片更换方案，选用高硬度合金叶片（洛氏硬度 $\geq HRC55$ ）进行替换，经实测该类叶片的抗磨损性能显著提升，使用寿命较普通叶片延长50%；若故障由泵体间隙过大导致（间隙值 $> 0.15\text{mm}$ ），则引入激光熔覆修复技术，以镍基合金粉末为熔覆材料，对泵体内腔磨损区域进行精准熔覆，修复后泵体间隙可控制在0.05-0.10mm的标准范围内，且修复成本较直接更换新泵体降低30%，兼顾经济性与修复效果。第二，针对举升缸内漏（X3）故障。该故障的核心诱因是举升缸密封件老化、密封性能下降，且传统采用的丁腈橡胶密封件存在耐温范围窄（-20°C-80°C）、易老化的缺陷，使用寿命仅约500小时。为彻底解决该问题，统一将密封件更换为进口聚氨酯材质密封件，该类密封件不仅耐温范围拓宽至-30°C-120°C，可适应复杂工况下的温度波动，且抗老化性能与弹性恢复能力显著增强，实际使用寿命可达800小时，较原丁腈橡胶密封件提升60%，有效减少密封件更换频次。第三，针对转向器失效（X5）故障。考虑到转向器作为关键液压元件，其失效后若缺乏备件支撑，将导致设备长时间停机。为此，一方面优化备件储备机制，建立转向器“1备1用”的专项备件库，即针对FC-2022-08号叉车及同型号设备，每台配备1件备用转向器，确保故障发生后可快速更换，避免因备件短缺延长停机时间；另一方面创新修复模式，与液压元件厂家合作建立转向器再生修复通道，对失效转向器进行拆解、清洗、磨损件更换与性能测试，再生修复后的转向器性能可达到新件的90%以上，而修复成本仅为采购新件的40%，大幅降低备件采购支出。

4 维护策略优化效果验证

为验证优化维护策略的有效性，对FC-2022-08号叉车实施优化后的维护方案，并统计2024年1月-2024年6月的故障数据与维护成本，与2023年同期（优化前）进行对比分析。

4.1 故障指标改善

优化后6个月内，该叉车液压系统故障次数由优化前同期的9次降至5次，故障停机率（故障停机时长/总作业时长）由3.2%降至1.8%，下降幅度达42.3%。其中，关键故障（X1、X3、X5导致的故障）由优化前的6次降至2次，占比由66.7%降至40%，表明核心故障得到有效控制。

4.2 维护成本降低

优化后维护成本主要包括预防性维护成本（检测、备件更换）与故障修复成本，6个月内总维护成本为4200元，较2023年同期（5880元）降低28.6%。其中，液压油与滤油器更换成本因延长更换周期降低35%，液压泵、转向器等关键部件的修复成本因工艺优化降低25%。

4.3 提升作业效率

优化后设备平均无故障工作时间（MTBF）由优化前的320小时提升至580小时，提升78.1%；日均作业量由优化前的45吨提升至62吨，提升37.8%，有效缓解了仓库物料转运压力。

5 结语

总之，本文通过对CPCD30型内燃叉车（FC-2022-08）液压系统的针对性研究，充分验证了故障树分析（FTA）在设备运维领域的实用价值。相较于传统“经验驱动”的维护模式，基于FTA的“分级预防-快速诊断-修复优化”策略，实现了从“被动应对故障”到“主动防控风险”的转变，它以定量分析为基础锁定关键故障源，以分级措施平衡维护成本与可靠性，以标准化诊断流程提升运维效率，最终为案例设备带来了故障停机率、维护成本的双重显著下降，同时推动作业效率大幅提升，为企业降低生产损失、保障物流作业连续性提供切实可行的解决方案。

参考文献

- [1]郭沁,赵结昂.内燃叉车故障诊断专家系统研究[J].特种设备安全技术,2020,(02):49-52.
- [2]刘水明,陈晨,周方云,等.辅助液压系统失效的高效故障诊断技术的应用研究[J].新技术新工艺,2022,(10):102-108.
- [3]金丹帅.故障树诊断法在工程机械故障排查中的应用分析[J].机电信息,2020,(11):43-44.
- [4]杨猛,刘伟,李浩,等.基于故障树的弯管机液压系统故障分析[J].液压气动与密封,2023,43(04):55-59.
- [5]刘若君,张幼振,姚克.基于T-S模糊故障树的煤矿坑道钻机液压动力系统故障诊断研究[J].煤田地质与勘探,2022,50(12):194-202.