

基于故障树分析法的石油钻井绞车故障诊断研究

单东文

(江苏省建湖县科技成果转化服务中心 江苏 盐城 224700)

摘要: 石油钻井绞车作为现代石油钻井工程中的重要装备, 主要承担钻井时送进钻具、起放井架、起下钻、下套管等作业任务。但在实际使用中, 由于石油钻井工程工作量大、任务难度高, 绞车常会出现动力系统故障、传动系统故障等问题, 影响钻井效率。基于此, 本文提出基于故障树分析法的石油钻井绞车故障诊断策略, 结合绞车工作原理与故障树原理, 建立石油钻井绞车故障树, 以完成对各类故障的自诊断, 提高绞车故障诊断效率, 保障绞车稳定运行。

关键词: 故障树分析法; 石油钻井绞车; 故障诊断

0 引言

石油钻井绞车作为保证钻井作业顺利进行的核心装备之一, 常在极端的环境条件下(如高温、高压、高腐蚀等)进行作业, 导致面临多种故障风险, 影响石油钻井作业的有序开展。故障树分析法作为一种用于安全性和可靠性分析的图形演绎方法, 可通过逻辑图来识别和分析导致某一不希望事件(如系统故障)发生的多个因素^[1], 再利用拓扑结构进行全面的、层次化的研究, 识别出故障的基础原因和可能的故障路径, 从而为故障预防和故障应对策略提供科学依据。因此, 本文旨在将故障树分析法应用于石油钻井绞车的故障诊断中, 通过构建石油钻井绞车的故障树模型, 以实现对各类故障的自诊断。这样既有助于提高绞车故障诊断的效率和准确性, 又能进一步维持绞车系统的稳定运行, 从而保障石油钻井作业的高效与安全。

1 石油钻井绞车工作原理与故障树建立

1.1 石油钻井绞车工作原理

石油钻井绞车是一种高度复杂和集成的机械系统, 通常由动力系统、传动系统、气控系统、润滑系统及辅助设备等多个子系统组成^[2]。其中, 动力系统一般由高效柴油发动机或电动机构成, 负责提供绞车操作所需的全部动力。而传动系统通常包括多组齿轮传动、联轴器和动力分配装置, 这些组件共同实现力量的转换和传递^[3]。以某 DC-450 型石油钻井绞车为例, 该绞车的气控系统由气源处理单元、

气动阀、气动执行器、压力传感器和控制器等核心组件组成。气源处理单元负责从压缩空气源接收和处理空气, 通过减压阀和滤波器确保气体质量和压力稳定。气动阀则负责控制气体流向和流量, 从而控制气动执行器的动作。控制器接收来自压力传感器和其他检测设备的信号, 通过算法进行数据处理和分析, 最终生成控制指令传送给气动阀^[3]。基于此, DC-450 型绞车实现了高度精准和响应迅速的控制, 操作灵活性和系统稳定性得以提升。具体气控原理图如图 1 所示。

1.2 石油钻井绞车故障树构建

对绞车的系统结构与 DC-450 型号绞车的结构原理进行分析, 发现绞车中现有的故障主要包括动力系统故障、传统系统故障、气控系统故障及润滑系统故障四种类型。现基于以上故障建立故障树, 如图 2 所示。

在图 2 中, T 代表绞车运行不正常, A1 代表动力系统故障, A2 代表传动系统故障, A3 代表润滑系统故障, A4 代表气控系统故障。其余代号及其对应含义见表 1。

基于上述石油钻井绞车故障树, 可通过分析得出各故障全部最小割集, 列出各种故障产生的原因组合, 以此清晰地反映出故障产生的原因和绞车故障部位, 进而选择对应的排除方法。其各故障全部最小割集如下:

$$T=A_1+A_2+A_3+A_4$$

$$A_1=X_1+X_2+X_3$$

$$A_2=B_1+B_2=X_4+X_5+X_6+X_7+X_8$$

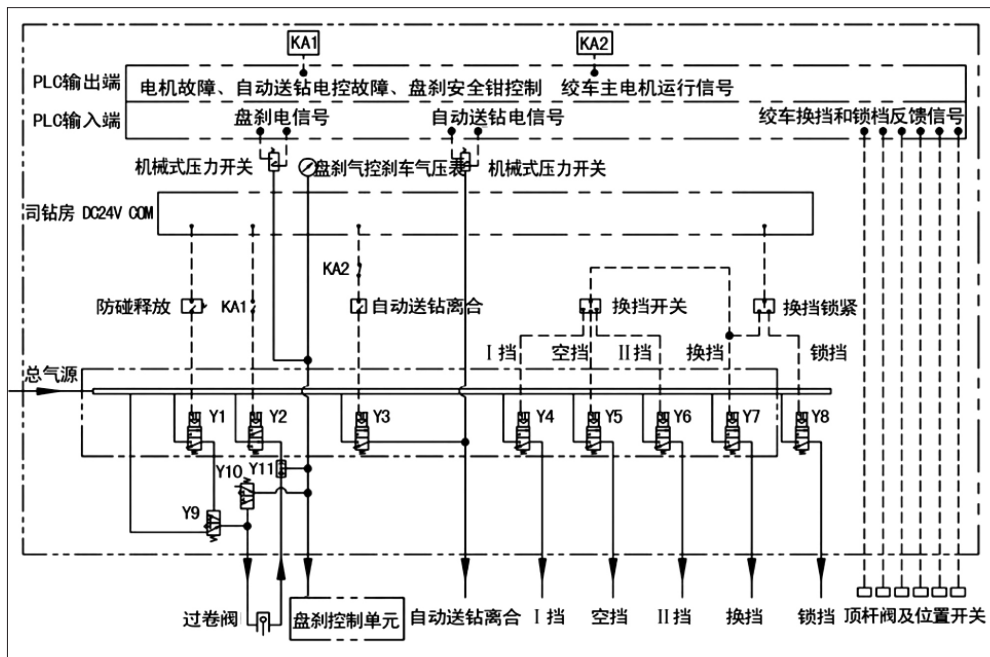


图1 石油钻井绞车气孔原理

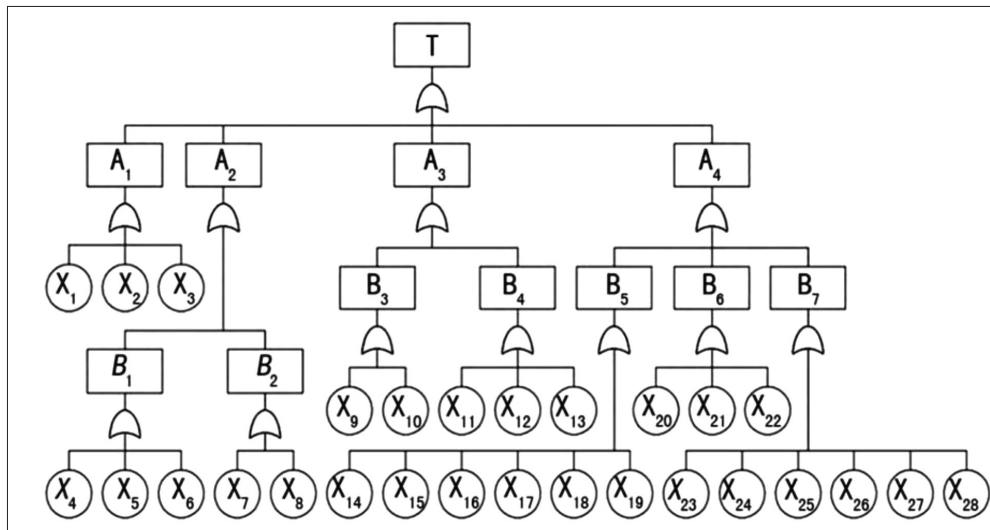


图2 绞车故障树图

$$A_3 = B_3 + B_4 = X_9 + X_{10} + X_{11} + X_{12} + X_{13}$$

$$A_4 = B_5 + B_6 + B_7 = X_{14} + X_{15} + X_{16} + X_{17} + X_{18} + X_{19} + X_{20} + X_{21} + X_{22} + X_{23} + X_{24} + X_{25} + X_{26} + X_{27} + X_{28}$$

当绞车出现 A₁ 故障时，根据故障树列表可找出对应的 X₁（主电动机无法启动）、X₂（风机无法启动）和 X₃（风压开关损坏）三种故障类型，技术人员对以上故障类型进行一一排除，判定出现 A₁ 故障的具体原因，再采取相应措施。

当绞车出现 A₂ 故障时，根据故障树及事件列表，可找出中间事件 B₁（齿轮箱内部有噪声）和 B₂（齿轮箱振动）。进一步分析，引起中间事件 B₁ 的底事

件为 X₄（轴承润滑不足）、X₅（传动齿轮齿面点蚀）和 X₆（轴承滚子失效）；引起中间事件 B₂ 的底事件为 X₇（轴承滚子失效）以及 X₈（电动机和齿轮箱轴不对中）。通过详细地排查这些底事件，技术人员能够确定导致 A₂ 故障的具体原因，并进一步制定相应的维修或更换方案。

当绞车出现 A₃ 故障时，根据故障树和事件列表，中间事件为 B₃（润滑油压过低）和 B₄（润滑油压过高）。针对这些中间事件，引起 B₃（润滑油压过低）的底事件包括 X₉（油泵损坏）和 X₁₀（吸入滤清器堵塞）。引起 B₄（润滑油压过高）的底事件为 X₁₁（喷油嘴堵塞）、X₁₂（排出滤清器堵塞）和 X₁₃（溢流阀损坏）。通过对这些底事件的一一排查和诊断，技术人员可准确地识别出导致 A₃ 故障的具体原因，并据此采取针对性的维修或更换措施。

2 基于故障树分析法的石油钻井绞车故障诊

断试验

2.1 试验目的

为进一步细化基于故障树分析法的石油钻井绞车故障诊断应用流程，仍以 DC-450 型号绞车为例，对该绞车进行动力系统故障、传统系统故障、气控系统故障及润滑系统故障四类故障模拟，验证本文提出的故障诊断方法的实际应用效果^[4]。

2.2 试验方法

故障模拟环境的构建采用高度控制的实验室设置，利用传感器和数据采集设备实时监测绞车各关键部件的运行状态^[5]。故障模拟采用软硬件相结合的

表1 故障树对应事件列表

代号	对应事件	代号	对应事件
B ₁	齿轮箱内部有噪声	X ₁₂	排出滤清器堵塞
B ₂	齿轮箱振动	X ₁₃	溢流阀损坏
B ₃	润滑油压过低	X ₁₄	过卷阀损坏
B ₄	润滑油压过高	X ₁₅	Y1电磁阀损坏
B ₅	盘刹控制气路不能正常通断	X ₁₆	Y2电磁阀损坏
B ₆	自动送钻离合器不挂合	X ₁₇	Y9气控阀损坏
B ₇	绞车换挡锁挡失灵	X ₁₈	Y11梭阀损坏
X ₁	主电动机无法启动	X ₁₉	KA1继电器损坏
X ₂	风机无法启动	X ₂₀	KA2继电器损坏
X ₃	风压开关损坏	X ₂₁	自动送钻离合器控制开关损坏
X ₄	轴承润滑不足	X ₂₂	Y3电磁阀损坏
X ₅	传动齿轮齿面点蚀	X ₂₃	Y4电磁阀损坏
X ₆	轴承滚子失效	X ₂₄	Y5电磁阀损坏
X ₇	轴承滚子失效	X ₂₅	Y6电磁阀损坏
X ₈	电动机和齿轮箱轴不对中	X ₂₆	换挡开关损坏
X ₉	油泵损坏	X ₂₇	锁挡开关损坏
X ₁₀	吸入滤清器堵塞	X ₂₈	Y8电磁阀损坏
X ₁₁	喷油嘴堵塞		

方法，即在不影响设备完整性的前提下，通过程序控制或物理干预来诱发故障。

2.3 试验流程与结果

2.3.1 动力系统故障模拟

故障情境设置：在动力系统方面，利用电源管理系统，限制主电动机的输入电压到50V，明显低于其正常运行电压，从而诱发主电动机无法启动（X₁）这一底事件。此外，风机启动程序被特意修改，将启动延迟设置为15s，远超正常启动周期，从而出现风机无法启动（X₂）的故障状态。

故障分析流程如下：

(1) 故障观测与数据记录。一旦观察到绞车主电动机或风机存在运行异常，立即通过数据采集设备记录相关参数。

(2) 初步故障判断。参考预先构建的故障树模型，将观测到的异常与故障树的底事件进行匹配，初步判断为A₁动力系统故障。

(3) 底事件确认。再次检查电动机和风机的实际运行参数，确认是否与预设的底事件（X₁或X₂）一致。

(4) 最终故障诊断与处理方案。一旦底事件得到

确认，继续沿着故障树向上层推进，最终准确诊断为A₁动力系统故障。对于这一故障类型，提出具体的处理方案，建议检查电动机电缆连接，必要时更换或修理电动机，并检查风机供电系统，重新配置或更换风机电路板。

2.3.2 传动系统故障模拟

故障情境设置：针对传动系统，设置油膜厚度为0.1mm，明显低于0.3mm的标准值，以模拟X₄轴承润滑不足。通过高频振动装置以300Hz的频率对齿轮箱进行振动，明显高于常规工作频率（50~60Hz），以模拟X₆轴承滚子失效。

故障分析流程如下：

(1) 故障观测与数据记录。观测到齿轮箱内部噪声或振动异常后，数据采集系统立即记录相关的振动频率和轴承油膜厚度。

(2) 初步故障判断。对照故障树模型，将观测到的异常与X₄和X₆底事件进行匹配，初步判断为A₂传动系统故障。

(3) 底事件确认。再次监测轴承的油膜厚度和齿轮箱的振动频率，与预设的底事件（X₄或X₆）进行比对。

(4) 最终故障诊断与处理方案。底事件一旦得到确认，根据故障树进一步分析，指出最终故障为A₂传动系统故障。建议进行轴承更换或修复，并执行齿轮箱动平衡测试。

2.3.3 润滑系统故障模拟

故障情境设置：油泵输出压力被调整至20kPa，明显低于标准的100kPa，以模拟X₉油泵损坏。同时，在滤清器入口放置物理障碍，使其流量降至0.2L/min，远低于正常的1.0L/min，以模拟X₁₀吸入滤清器堵塞。

故障分析流程如下：

(1) 故障观测与数据记录。润滑系统的压力和流量异常被数据采集系统即时记录。

(2) 初步故障判断。对照预构建的故障树，与X₉和X₁₀底事件进行匹配，初步诊断为A₃润滑系统故障。

(3) 底事件确认。进一步监测油泵输出压力和滤清器流量，确认与预设底事件（X₉或X₁₀）一致。

(4) 最终故障诊断与处理方案。确认底事件后，根据故障树进一步分析，确认最终故障为A₃润滑系统故障。建议更换或修复油泵，并清除滤清器的物

理障碍。

2.3.4 气控系统故障模拟

故障情境设置：气控阀的电磁阀电流被限制在0.2A,远低于标准值1A,以模拟 X_{17} (Y9气控阀损坏)底事件。同时,梭阀的电流也被限制在0.2A,以模拟 X_{18} (Y11梭阀损坏)底事件。

故障分析流程如下:

(1) 故障观测与数据记录。当电磁阀和梭阀工作异常时,数据采集系统会即时记录电流和压力。

(2) 初步故障判断。根据预设的故障树模型,与 X_{17} 和 X_{18} 底事件进行匹配,初步诊断为 A_4 气控系统故障。

(3) 底事件确认。再次测量电磁阀和梭阀的电流和压力,确认与预设底事件(X_{17} 或 X_{18})一致。

(4) 最终故障诊断与处理方案。底事件一旦得到确认,根据故障树进一步分析,确认最终故障为 A_4 气控系统故障。建议更换或修复电磁阀和梭阀。

2.4 试验结论

本试验将基于故障树分析法的石油钻井绞车故障诊断策略,具体应用在DC-450型号绞车上。试验结果表明,基于故障树分析法的绞车故障诊断策略在实际应用中展现了优异的准确性和效率。对于 A_2 传动系统故障,通过设置异常的油膜厚度(0.1mm)和齿轮箱振动频率(300Hz),成功模拟了轴承润滑不足和轴承滚子失效的底事件,从而验证了 A_2 故障的诊断精确性。在润滑系统方面,试验通过调整油泵输出压力至20kPa以及设置物理障碍来减少滤清器流量至0.2L/min,成功地模拟了油泵损坏和吸入滤清器堵塞的底事件,准确地诊断出 A_3 润滑系统故障。在气控系统模拟试验中,通过限制电磁阀和梭阀的电流至0.2A,成功模拟了Y9气控阀损坏和Y11梭阀损坏的底事件,进一步确认了 A_4 气控系统故障。

由此可见,该方法不仅能在短时间内准确诊断故障类型,还能提供针对性的、科学依据充分的故障处理方案,为绞车系统的高效运行与维护提供了有

力支持。

3 结语

综上所述,针对石油钻井绞车在高负荷、高难度的石油钻井工程中易发生的动力系统故障、传动系统故障等问题,本文提出并验证了一种基于故障树分析法的综合故障诊断策略。通过深入研究DC-450型号绞车的各个子系统与组件,成功构建了石油钻井绞车的故障树模型,将复杂的故障现象分解为更易管理和诊断的底事件。在试验环节,严格控制各故障模拟试验的参数,确保了研究的科学性和真实性。试验结果显示,该故障诊断方法在准确性和效率方面表现优异,能够快速准确地定位故障原因,并提出相应的故障处理方案。因此,该方法不仅提高了石油钻井绞车故障诊断的可靠性和效率,同时也为机械工程领域内其他复杂设备的故障诊断提供了有力的理论支持和试验依据。

参考文献:

- [1] 杨宝平. 5712XD绞车面板常见故障及维修测试方法探究[J]. 化工管理, 2022(31):147-151.
- [2] 朱本温, 刘雅静, 魏双会, 等. 石油钻机双绞车钻井钢丝绳关键技术研究[J]. 机械研究与应用, 2022, 35(05):56-60+64.
- [3] 贾登, 骆学理, 王施权, 等. 钻井泵和绞车在线监测和故障诊断系统研究[J]. 石油化工自动化, 2022, 58(05):25-28+42.
- [4] 李欣一, 张立聪, 刘贺, 等. 波浪补偿绞车故障树分析及安全措施[J]. 机电设备, 2022, 39(03):50-53.
- [5] 韩青海. 矿井调度绞车钢丝绳运输及故障处理的分析与预防之论[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2020, 40(06):117-118.

作者简介: 单东文(1991.01-), 男, 汉族, 江苏盐城人, 本科, 工程师, 研究方向: 机械设计制造及其自动化。