

石油钻机电力设备可靠性分析与评估方法

杨华¹ 范飞² 刘瑞睿³

1.杭州瑞网源技术有限公司；2.中国石油集团川庆钻探工程有限公司长庆钻井总公司；

3.川庆钻探工程有限公司长庆钻井总公司第四工程项目部

DOI:10.12238/jpm.v6i6.8092

[摘要] 石油钻机作为石油勘探开发的核心装备，其电力设备的可靠性直接关系到钻井作业的效率、安全与成本。本文围绕石油钻机电力设备可靠性展开研究，首先阐述设备可靠性对石油钻井的重要意义，分析影响可靠性的内外部因素。接着详细介绍多种可靠性分析方法，如故障模式与影响分析（FMEA）、故障树分析（FTA）、马尔可夫模型等，并对比各方法优缺点与适用场景。在评估方法上，提出基于层次分析法（AHP）与模糊综合评价法相结合的综合评估体系，结合实际案例说明评估流程。最后，针对提升设备可靠性提出优化建议，为保障石油钻机电力设备稳定运行提供理论支持与实践指导。

[关键词] 石油钻机电力设备；可靠性分析；评估方法

Reliability analysis and evaluation method of power equipment of oil drilling rig

Yang Hua¹ Fan Fei² Liu Ruirui³

1. Hangzhou Ruiwangyuan Technology Co., Ltd

2. China National Petroleum Group Chuanqing Drilling Engineering Co., Ltd. Changqing Drilling Corporation

3. The Fourth Engineering Project Department of Changqing Drilling Corporation,
Chuanqing Drilling Engineering Co., Ltd.

[Abstract] As the core equipment of petroleum exploration and development, the reliability of oil drilling rig power equipment is directly related to the efficiency, safety and cost of drilling operations. This paper focuses on the reliability of power equipment of oil drilling rigs, firstly expounds the importance of equipment reliability to oil drilling, and analyzes the internal and external factors that affect reliability. Then, a variety of reliability analysis methods, such as Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), Fault Tree Analysis (FTA), Markov Model, etc., are introduced in detail, and the advantages and disadvantages of each method and applicable scenarios are compared. In terms of evaluation methods, a comprehensive evaluation system based on the combination of analytic hierarchy process (AHP) and fuzzy comprehensive evaluation method is proposed, and the evaluation process is illustrated with actual cases. Finally, some optimization suggestions are put forward to improve the reliability of the equipment, so as to provide theoretical support and practical guidance for ensuring the stable operation of the power equipment of oil drilling rigs.

[Key words] oil rig power equipment; reliability analysis; Assessment Methods

一、引言

石油是现代工业的“血液”，石油勘探开发对于国家能源安全与经济发展至关重要。石油钻机作为石油钻井作业的关键设备，在复杂地质条件下完成钻进、取芯、测井等任务，其运行稳定性直接影响钻井进度与质量。电力设备作为石油钻机的动力源泉与控制核心，负责为钻机各系统提供电能并实现精确控制。一旦电力设备出现故障，可能导致钻机停机，造成钻井作业中断、设备损坏甚至人员伤亡，带来巨大经济损失与安全风险。因此，深入研究石油钻机电力设备可靠性分析与评估方法，准确掌握设备运行状态，提前发现潜在故障隐患，制定有

效维护策略，对保障石油钻井作业高效、安全进行具有重大现实意义。

二、石油钻机电力设备可靠性概述

（一）可靠性的定义与内涵

可靠性是指产品在规定条件下和规定时间内，完成规定功能的能力。对于石油钻机电力设备而言，规定条件涵盖运行环境（如温度、湿度、海拔、振动等）、负载情况、操作方式等；规定时间根据设备类型与使用要求确定，可能为数小时、数天或数年；规定功能则是设备在设计时所赋予的基本性能，如发电机稳定输出电压与电流、变压器实现电压变换与电气隔离、

电动机驱动钻机部件正常运转等。

(二) 可靠性对石油钻井的重要意义

提高钻井效率：可靠的电力设备能持续稳定供电，确保钻机各系统正常运行，减少因设备故障导致的停机时间，提高钻井作业效率，缩短钻井周期，降低钻井成本。

保障作业安全：电力设备故障可能引发电气火灾、触电等安全事故，威胁现场人员生命安全。可靠设备可降低故障发生率，减少安全隐患，为钻井作业创造安全环境。

延长设备寿命：通过对电力设备可靠性分析与评估，制定科学维护计划，提前发现并处理潜在问题，避免设备过度磨损与损坏，延长设备使用寿命，降低设备更新成本。

三、影响石油钻机电力设备可靠性的因素

(一) 内部因素

设备质量：设备制造工艺、材料选用、零部件质量等直接影响设备可靠性。优质材料与精湛工艺可提高设备抗疲劳、耐磨损、耐腐蚀等性能，降低故障风险。

设计缺陷：设计不合理，如电气参数匹配不当、散热设计不足、防护等级不够等，易导致设备在运行过程中出现故障。例如，变压器设计容量过小，无法满足钻机负载需求，可能导致过热损坏。

老化磨损：随着设备运行时间增加，零部件出现老化、磨损、疲劳等现象，性能逐渐下降，可靠性降低。如电动机绕组绝缘老化，可能引发短路故障。

(二) 外部因素

运行环境：石油钻井作业环境恶劣，电力设备常面临高温、高湿、高粉尘、强振动等不利条件。高温会导致设备散热困难，影响电气性能；高湿度易引发绝缘受潮、短路等问题；粉尘可能进入设备内部，造成机械卡涩与电气故障；强振动会加速设备零部件松动与损坏。

操作维护：操作人员操作不当，如违规启动、停机，超负荷运行等，会对设备造成损害。维护保养不及时、不彻底，如未定期清洁设备、更换润滑油、紧固螺栓等，也会降低设备可靠性。

电网质量：电网电压波动、频率偏差、谐波干扰等会影响电力设备正常运行。电压波动过大可能导致设备过压或欠压运行，损坏电气元件；谐波干扰可能引发设备误动作、发热增加等问题。

四、石油钻机电力设备可靠性分析方法

(一) 故障模式与影响分析 (FMEA)

原理与步骤：FMEA 是一种自下而上的归纳分析方法，通过对设备各组成部分可能出现的故障模式进行识别、分析，评估故障模式对设备功能及系统性能的影响，确定故障模式的严重度 (S)、发生频度 (O) 和探测度 (D)，并计算风险优先数 ($RPN=S \times O \times D$)，根据 RPN 值大小确定故障模式优先级，为制定改进措施提供依据。具体步骤包括组建分析团队、明确分析对象、绘制功能框图、识别故障模式、分析故障影响、确定 S、O、D 值、计算 RPN 值、制定改进措施等。

应用实例：以石油钻机发电机为例，其可能出现的故障模

式包括绕组短路、断路、绝缘损坏等。绕组短路会导致发电机输出电压异常、电流增大，可能引发绕组过热烧毁，严重影响发电机正常运行，严重度较高；若发电机维护保养不当，绕组短路故障发生频度可能较高；通过定期检测绝缘电阻、温度监测等手段可较容易探测到绕组短路故障，探测度相对较低。根据 S、O、D 值计算 RPN 值，对 RPN 值较高的故障模式优先采取改进措施，如优化绕组绝缘结构、加强维护保养等。

优缺点与适用场景：FMEA 优点在于能全面识别设备潜在故障模式，深入分析故障影响，提前制定预防措施；缺点是分析过程较为繁琐，对分析人员专业知识要求较高，且 RPN 值计算存在一定主观性。适用于设备设计阶段、维护策略制定及故障诊断与预防。

(二) 故障树分析 (FTA)

原理与步骤：FTA 是一种自上而下的演绎分析方法，以设备不希望发生的事件 (顶事件) 为分析目标，逐步分析导致顶事件发生的直接原因 (中间事件) 与基本原因 (底事件)，用逻辑门 (如与门、或门、非门等) 将各事件连接起来，形成故障树图形模型。通过对故障树进行定性分析与定量分析，找出导致顶事件发生的所有可能路径 (最小割集) 与关键因素，评估系统可靠性。定性分析主要确定最小割集，定量分析则计算顶事件发生概率、底事件重要度等指标。

应用实例：以石油钻机电力系统中某段母线失电为顶事件构建故障树。母线失电可能由上级电源故障 (或门)、母线保护装置误动作 (或门)、母线连接部位故障 (或门) 等原因导致。上级电源故障又可进一步分解为发电机故障、变压器故障、输电线路故障等；母线保护装置误动作可能与保护装置本身故障、定值设置不合理、外部干扰等因素有关；母线连接部位故障可能包括连接螺栓松动、接触不良、绝缘损坏等。通过分析故障树，找出导致母线失电的关键因素与最小割集，针对性采取改进措施，如加强设备巡检、优化保护装置定值、提高连接部位可靠性等。

优缺点与适用场景：FTA 优点在于逻辑清晰，能直观展示系统故障因果关系，便于找出系统薄弱环节；缺点是故障树构建复杂，对分析人员逻辑思维能力与专业知识要求高，且定量分析需要大量准确基础数据。适用于复杂系统可靠性分析、故障诊断与安全评估。

(三) 马尔可夫模型

原理与步骤：马尔可夫模型基于马尔可夫过程理论，假设系统状态转移只与当前状态有关，与系统过去状态无关。将电力设备运行状态划分为若干离散状态 (如正常状态、轻度故障状态、严重故障状态、失效状态等)，通过收集设备状态转移数据，确定状态转移概率矩阵，建立马尔可夫状态转移方程，计算设备在不同时刻处于各状态的概率，进而评估设备可靠性指标，如可靠性、可用度、平均无故障工作时间 (MTBF)、平均修复时间 (MTTR) 等。

应用实例：以石油钻机电动机为例，将其运行状态划分为正常状态 (S0)、绕组局部过热状态 (S1)、轴承磨损状态 (S2)、完全失效状态 (S3)。通过长期监测电动机运行参数，统计不

同状态之间的转移次数，计算状态转移概率。例如，从正常状态转移到绕组局部过热状态的概率为 p_{01} ，转移到轴承磨损状态的概率为 p_{02} ，保持在正常状态的概率为 p_{00} 等。根据状态转移概率矩阵建立马尔可夫状态转移方程，求解方程得到电动机在不同时刻处于各状态的概率，进而评估电动机可靠性。

优缺点与适用场景：马尔可夫模型优点在于能考虑设备状态转移过程，适用于多状态系统可靠性分析；缺点是状态划分与状态转移概率确定存在一定主观性与不确定性，需要大量长期监测数据支持。适用于设备状态监测与预测、维修策略优化等领域。

五、石油钻机电力设备可靠性评估方法

(一) 基于层次分析法 (AHP) 与模糊综合评价法相结合的综合评估体系

评估指标体系构建：结合石油钻机电力设备特点与可靠性影响因素，构建多层次评估指标体系。一级指标包括设备性能、运行环境、维护管理、人员素质等方面；二级指标在一级指标基础上进一步细化，如设备性能可细分为电气性能、机械性能、绝缘性能等；三级指标则是对二级指标的具体量化，如电气性能可包括电压稳定性、电流波动范围、功率因数等。

层次分析法确定指标权重：运用层次分析法确定各评估指标权重。首先构建判断矩阵，邀请专家对同一层次各指标相对于上一层级某指标的重要性进行两两比较，采用 1 - 9 标度法赋值，形成判断矩阵。然后计算判断矩阵特征向量与最大特征根，进行一致性检验，确保判断矩阵逻辑合理。最后根据特征向量确定各指标权重。

模糊综合评价法进行综合评估：采用模糊综合评价法对设备可靠性进行综合评估。确定评价因素集（即评估指标体系）、评语集（如优秀、良好、一般、较差、差等），通过专家打分或实际监测数据确定各指标对各评语的隶属度，构建模糊评价矩阵。将模糊评价矩阵与指标权重向量进行模糊合成运算，得到综合评价结果向量，根据最大隶属度原则或加权平均原则确定设备可靠性等级。

(二) 评估流程与案例分析

评估流程：首先收集设备相关资料，包括设备技术参数、运行记录、维护保养记录、故障历史等；然后根据评估指标体系对设备各指标进行量化评估，确定指标值；接着运用层次分析法计算指标权重；再采用模糊综合评价法进行综合评估，得出设备可靠性等级；最后根据评估结果提出针对性改进建议。

案例分析：以某油田一台石油钻机变压器为例，按照上述评估流程进行可靠性评估。收集变压器相关数据，确定各评估指标值，如电气性能指标中电压稳定性为 0.98（满分为 1），电流波动范围为 $\pm 2\%$ （标准范围为 $\pm 5\%$ ），功率因数为 0.95 等。运用层次分析法计算各指标权重，如电气性能权重为 0.4，机械性能权重为 0.3，绝缘性能权重为 0.2，运行环境权重为 0.1。采用模糊综合评价法，邀请专家对各指标进行打分，构建模糊评价矩阵，进行模糊合成运算，得出综合评价结果向量为 (0.3, 0.4, 0.2, 0.1, 0)，根据最大隶属度原则，该变压器可靠性等级为良好。评估发现变压器运行环境指标得分较

低，主要原因是现场粉尘较大，影响变压器散热与绝缘性能。针对此问题，提出加强现场通风除尘、定期清理变压器表面灰尘等改进措施。

六、提升石油钻机电力设备可靠性的优化建议

(一) 设备选型与采购

在设备选型阶段，充分考虑石油钻井作业环境与负载需求，选择质量可靠、性能优良、技术先进的电力设备。严格把控设备采购环节，对供应商资质、信誉、产品质量进行全面考察，确保采购设备符合相关标准与规范。

(二) 优化设备设计与制造

设备制造商应加强研发创新，优化设备设计，提高设备抗恶劣环境能力。例如，采用高性能绝缘材料、优化散热结构、提高设备防护等级等。加强制造工艺管理，严格质量控制，确保设备零部件加工精度与装配质量。

(三) 加强运行环境管理

改善石油钻井作业现场环境，采取有效防尘、防潮、降温、减振等措施。安装通风除尘设备，保持现场空气清洁；搭建遮阳棚、安装空调等设备，降低环境温度；采用减振垫、减振器等装置，减少振动对设备影响。

(四) 规范操作维护流程

制定科学合理的设备操作规程与维护保养计划，加强对操作人员与维护人员培训，提高其专业技能与责任意识。要求操作人员严格按照操作规程操作设备，避免违规操作；维护人员定期对设备进行清洁、检查、紧固、润滑、调试等维护保养工作，及时发现并处理设备隐患。

(五) 完善监测与诊断系统

建立先进的电力设备状态监测与故障诊断系统，实时监测设备运行参数（如电压、电流、温度、振动等），运用数据分析与挖掘技术，及时发现设备异常状态，提前预警故障。采用在线监测与离线检测相结合方式，提高故障诊断准确性与及时性。

结语

石油钻机电力设备可靠性分析与评估是保障石油钻井作业高效、安全进行的关键环节。本文通过对影响设备可靠性因素分析，介绍了多种可靠性分析方法与评估方法，提出基于层次分析法与模糊综合评价法相结合的综合评估体系，并结合实际案例说明评估流程。针对提升设备可靠性，从设备选型、设计制造、运行环境、操作维护、监测诊断等方面提出优化建议。未来，随着科技不断发展，应进一步探索应用新技术（如物联网、大数据、人工智能等）提升设备可靠性分析与评估水平，为石油钻井行业可持续发展提供有力支持。

参考文献

- [1] 液压同步回路的主要类型及优缺点[J]. 邹建华. 现代商贸工业, 2016 (14)
- [2] 同步液压绞车研究[J]. 杨德强. 中国高新技术企业, 2015 (08)
- [3] 超越负载的液压平衡方法[J]. 李鄂民. 机床与液压, 2005 (12)