

# 钻井平台电气设备完整性评价研究

刘晓林

(中海油田服务股份有限公司)

**摘要：**海洋石油钻井平台的建设与维护需要大量的资本和技术支持，投资风险比较大。在以往的海洋石油勘探开发过程中，由于电气设备因素引发的钻井平台事故时常发生，造成大量的经济损失和人身伤害。因此，针对海洋石油钻井平台电气设备完整性评价技术进行研究，通过对电气设备的风险分析进行预测性维护，以确保电气设备安全、完整、可靠。这对高效地完成海上石油安全钻井作业，进一步提高钻井平台的工作效率和安全生产具有重要意义。

**关键词：**钻井平台；电气设备；完整性评价；预测性维护

2024.03.DQGY  
54

## 0 引言

钻井平台电气设备的正常运行是海洋石油安全生产、可靠运行的重要保证。做好电气设备安全管理工作，首先要对电气设备进行完整性评价，确保平台设备具有安全性、完整性和可靠性，这是避免钻井平台事故发生、降低人员伤亡与财产损失的一项重要措施，是钻井平台工作的重点之一<sup>[1]</sup>。

在设备完整性评价与管理方面，现有的研究主要集中在机械设备或长输管道站场设备，针对钻井平台电气设备的研究尚少。针对石化装置静设备和长输管道站场电气设备的完整性评价技术在国内已经有了初步的研究进展，可为研究者和管理人员提供设备管理思路。在钻井平台设备管理方面，现有的研究普遍在海洋石油钻井平台设备安全管理方面进行研究<sup>[2]</sup>，而在钻井平台电气设备的完整性评价方面研究不够深入。钻井平台设备安全管理研究主要针对平台设备安

全管理中出现的問題提供管理的优化措施，并未解决由于电气设备安全可靠不足导致生产安全事故频发的根源性问题。因此，亟需针对钻井平台电气设备进行完整性评价技术的研究，从而保证电气设备安全、完整、可靠，为钻井平台的安全作业提供重要保障。

钻井平台电气设备的完整性评价是指在设备制造、安装、使用、维护的各个阶段，基于设备的基本参数信息，通过数据采集与处理分析，监测其运行状态，评估运行风险，分析故障或失效模式<sup>[3]</sup>，制定预测性维护策略，确保平台设备能够保持良好的性能，以高质量、高效地完成海洋石油开采各项工作任务。因此，海洋石油钻井平台电气设备的完整性评价已成为确保有效发展生产安全管理的支柱。

## 1 技术框架

钻井平台电气设备的完整性管理主要包括设备完

完整性评价数据源、设备完整性风险评估、设备完整性评价和设备预测性维护，如图 1 所示。以安全系统的监测控制器为例，获取监测控制器的原始数据，根据监测控制器安装位置、规格信息和功能参数等基本参数信息，结合监测控制器运行时间和历史检验维修信息，运用基于可靠性维护技术（RCM）、安全完整性等级评估技术（SIL）和风险检验技术（RBI）的风险评估方法对失效概率和失效风险进行分析，根据电气设备完整性评价制定对应的预测性维护方法，保证该监测控制器的失效风险处于合理的、可接受的范围内，保证电气设备与系统安全、平稳、可靠、长

周期运行，降低成本，提升企业效益。

### 1.1 电气设备完整性评价数据源

钻井平台电气设备由于处在海洋环境下，高湿度、盐雾、强风、大浪和恶劣天气条件，温差大、高盐度空气等独特的环境条件对电气设备的性能有着更高的要求，同时也意味着钻井平台电气设备完整性评价的数据来源需要考虑包含运行环境数据、性能缺陷数据在内的多源数据采集，从而保证对电气设备复杂多变的工况条件下的运行状态和运行风险的分析更加准确、全面、可靠。如图 2 所示为钻井平台电气设备完整性评价数据源。



图 1 钻井平台电气设备完整性评价技术框架

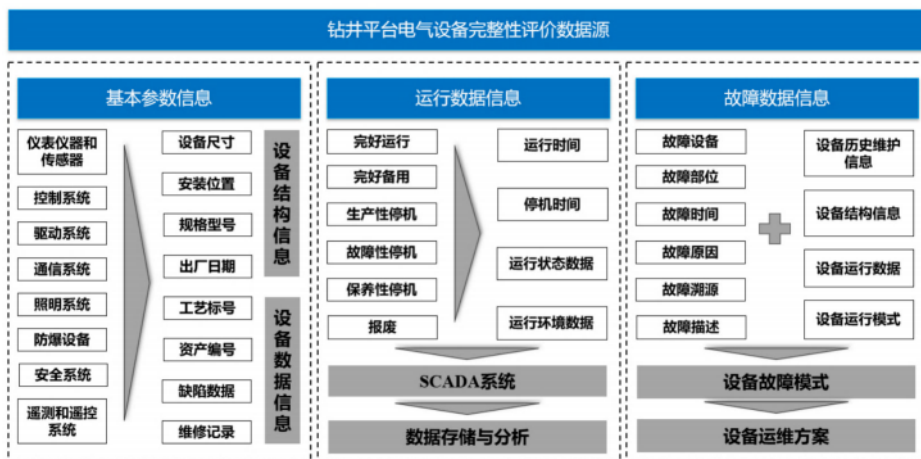


图 2 钻井平台电气设备完整性评价数据源

钻井平台上的电气设备一般分为仪表仪器和传感器、控制系统、驱动系统、通信系统、照明系统、防爆设备、安全系统和遥测、遥控系统几类。这些电气设备的结构信息，如设备尺寸、安装位置、规格型号和出厂日期等提供了设备的设计和制造细节，以及与设备的构造和性能相关的关键信息；电气设备数据信息，如工艺标号、资产编号、缺陷数据和维修记录等有助于唯一标识和跟踪每个电气设备和历史健康状况<sup>[4]</sup>；这两类数据构成了电气设备基本参数信息，是钻井平台电气设备完整性评价的重要数据源之一。

电气设备结构信息提供了设备的设计和制造规格，包括尺寸、材料、工程标准等，这有助于确定设备的设计寿命和性能期望，还可用于评估其安全特性，如是否具备防爆、防水、防腐蚀等特性以满足特定的海洋环境要求。电气设备数据信息中，工艺标号和资产编号有助于设备的定位和管理；缺陷数据和维修记录反映出设备曾经发生的缺陷、故障、故障模式、报警信息和维护操作、维修操作、更换部件、校准、调整和改进行操作的详细信息，这些数据可用于分析设备的可靠性和健康状况，识别重复性问题，确定维护质量和维护频率，改进维护策略，以及预测潜在问题。

电气设备的状态一般分为完好运行、完好备用、生产性停机、故障性停机、保养性停机和报废这几种。根据其运行的状态需要记录下电气设备的运行时间、停机时间、运行状态数据和运行环境数据，这些数据由钻井平台 SCADA 系统进行采集、存储和分析处理。电气设备运行时间记录包括设备在生产和非生产状态下的运行时间，而停机时间记录包括设备的停机、维护和维修时间，这些数据用于评估设备的使用频率和可用性，确定维护需求，以及制定维护计划。运行状态数据包括设备的运行参数、性能数据和运行状态，如电流、电压、温度、振动、压力等，

用于监测设备的实际运行状况，检测潜在问题，以及预测设备的性能和寿命。运行环境数据包括电气设备所处的环境条件，如温度、湿度、盐度、风速、浪高和海水温度，这些数据将有利于评估设备的环境暴露，确定腐蚀和腐蚀风险，以及评估环境对设备性能的影响。

钻井平台电气设备一旦出现故障，需要对其故障数据信息进行采集，这些故障数据信息包括确定故障设备、故障部位、故障时间、故障原因、故障溯源和故障描述等。在电气设备故障模式进行分析时，除了分析故障数据信息外还需要考虑设备历史维护信息、设备结构信息、设备历史运行数据和设备运行关联模式等因素，确定不同因素之间的相互关系以及它们对设备性能和寿命的影响，这可以帮助确定设备故障机制和模式，从而制定更有效的运维策略和方案。

### 1.2 电气设备完整性风险评估

钻井平台电气设备完整性风险评估是一种旨在识别、分析和评估电气设备在海洋环境下的运行、维护和环境因素对设备完整性的潜在影响的方法。这个过程包括评估设备的安全性、可用性、可维修性和性能，以确定可能对设备造成危险或损害的风险。钻井平台电气设备处于特殊的海洋环境，与陆地环境相比，存在一些特殊的风险源。海洋环境下，电气设备可能受到盐雾和腐蚀、恶劣天气条件和自然灾害等的影响，对电气设备造成损坏或破坏。除了环境风险源，还包括安全风险、生产风险和维护风险。在钻井平台作业时，常常伴随着易燃易爆气体从井口逸出，电气设备处于易燃易爆气体的环境中，有着爆炸的风险。电气设备还可能因短路、过载或其他故障而引发火灾，存在电击风险、火灾风险和高温过热风险。在生产当中，电气设备故障风险和动力、控制系统故障风险可能导致生产中断，影响钻井操作和油田生产。在维护电气设备时，维护操作风险和维护策略风险可能导致设

备未能得到及时维护，增加了人员事故伤亡率。

电气设备完整性风险评估可以借助多种技术和方法，包括可靠性维护技术（RCM）、安全完整性等级评估技术（SIL）和基于风险检验技术（RBI）。这些方法可用于综合评估电气设备的完整性、可靠性、安全性和性能，以降低风险和提高设备的寿命<sup>[5]</sup>，如图3所示。RCM方法用于确定电气设备的关键性能特征，制定维护策略，以确保设备在安全和可靠的条件下运行。它强调维护决策的重要性，包括预防性维护、纠正性维护和条件维护。结合设备结构信息、历史失效信息和维护维修信息，RCM方法考虑了不同类型的故障对电气设备性能、生产过程和安全性的潜在影响，帮助识别电气设备可能遭遇的潜在故障模式，确定维护频率和维护任务的优化计划，以确保电气设备在最佳状态下运行，并减少未来故障的风险。

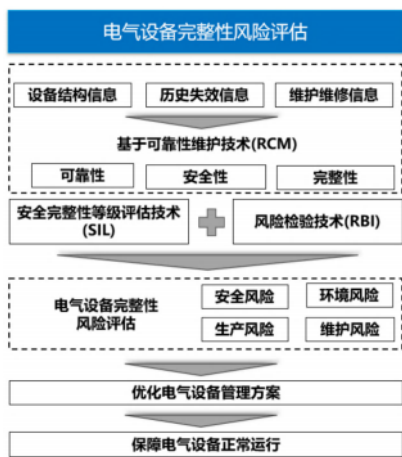


图3 钻井平台电气设备完整性风险评估

SIL方法在电气设备风险评估中发挥关键作用，主要用于评估和确保电气设备在特定安全应用中的可靠性和安全性。在安全性能方面，SIL方法将识别电气设备在特定系统中的安全功能，确定特定电气设备在特定安全应用中所需的安全性能水平；在安全级别方面，SIL方法根据评估电气设备潜在的危險源，确定了其SIL级别。在电气设备投入使用时，需选择适当的电气

设备和安全措施，SIL方法验证和确认这些设备的性能和功能以满足SIL级别要求。这为降低电气设备事故风险，提高电气设备的安全性起到了重要作用<sup>[6]</sup>。

RBI方法主要用于确定何时和如何进行检验、维护和修复电气设备，以提高电气设备利用率。RBI方法使用概率论和统计学来评估潜在的风险，包括考虑可能的故障、损坏和事故的概率。它侧重于风险的量化分析，以确定维护和检验的优先级。建立风险监测机制，以确保随着时间的推移对风险进行定期审查和更新，以持续改进电气设备的完整性和性能<sup>[7]</sup>。它与RCM和SIL方法的不同之处在于其专注于维护和检验方面的风险管理，而不同于设备设计和功能的评估。这三种方法综合运用于钻井平台电气设备完整性风险评估，可实现电气设备完整性管理方案的优化，保障电气设备正常运行。

### 1.3 电气设备完整性评价

基于电气设备数据采集分析和完整性风险评估，电气设备完整性评价需要对电气设备进行状态评估，以验证其完整性和性能，包括定期的检验、测试和非破坏性检测，以监测设备的状态。根据风险评估的结果和维护策略，制定和实施电气设备的监测和维护计划，以确保设备处于最佳状态。另外，建立起性能监控系统，用于跟踪电气设备的运行状况；定期审查和更新电气设备的风险评估，以反映设备的实际运行和维护情况，确保风险评估仍然准确，并根据需要调整维护策略。这些完整性评价工作的目标是确保电气设备在其整个寿命周期内能够安全、可靠地运行，减少生产中断、事故和环境风险，维护钻井平台的运行和生产<sup>[8]</sup>。

### 1.4 电气设备预测性维护

电气设备预测性维护通常是电气设备完整性评价工作的一个重要组成部分，通常是一个和完整性评价工作并行的步骤，它涉及实时监测设备的运行数据，

以识别潜在的故障迹象，并制定和更新相应的预测性维护方案。由于平台上的仪表通常具有高度的准确性和可靠性，可以提供可信赖的数据，这对于预测性维护至关重要，因为准确的数据是准确的故障诊断和维护决策的基础。仪表提供的准确、实时的数据，包括温度、振动、电流、电压、压力等，这些数据对于监测电气设备的性能和状态至关重要，电气设备的异常温度、电流波动等迹象也可通过仪表传感器感知<sup>[9]</sup>。另外，仪表系统的数据记录和分析功能，可以存储历史数据，并对数据进行分析以识别趋势和模式，可进一步预测设备性能的未来趋势，并确定维护时机。因此基于仪表的预测性维护是钻井平台电气设备维护的一项关键实践技术，可显著降低电气设备的故障率和停机时间。

针对钻井平台复杂多样的电气设备，监测数据的来源往往呈现出多源参数融合的特征。而仪表通常在只针对单一系统的电气设备监测数据进行分析时起到作用，面对多源异构数据信息时则无法有效进行预测维护。因此，本文提出基于多参数和数字孪生的预测性维护方法，如图4所示。针对大量离线和在线监测数据源，基于数字孪生模型优化数据选择策略，建立多源异构信息融合模型及融合评价，实现对电气设备的预测性维护。具体实现为，数字孪生模型对设备检测点的各类传感器所采集到的数据进行实时感知，并通过嵌入式系统和通信网络输入到虚拟模型。在虚拟模型中通过对实时数据和历史数据进行算法分析，针对多参数数据融合构建多源异构信息融合模型，利用监测信息的冗余性及互补性，消除监测数据的不确定性、不完备性、不准确性；以融合评价为依据，采用知识和客观评价的融合评估方法，优化融合算法及模型<sup>[10]</sup>。工程师可根据评价的结果在虚拟模型中进行维护，预测其下一次发生故障的时间，监控维护后输出的结果。若故障问题没有得到解决，则将评价结果反

馈给故障类型知识库重新进行分析，以找到故障发生的根本原因。在故障解决后，再对物理实体进行预防性维护，实现预测性维护。

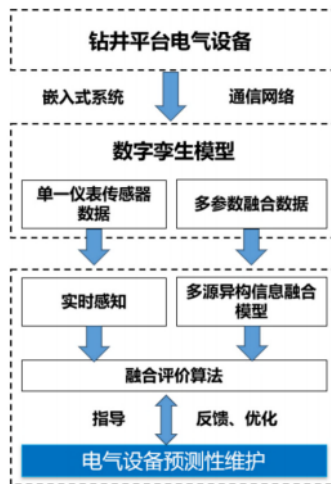


图4 基于多参数和数字孪生的预测性维护

## 2 典型应用

### 2.1 钻井平台电气设备安全管理

钻井平台电气设备完整性评价技术在钻井平台电气设备安全管理方面扮演至关重要的角色。这项技术的主要任务是评估和确保电气设备的可靠性、性能和安全性，以降低事故风险，确保生产运营的可持续性，并遵守相关法规和标准。通过定期的检查和测试，它有助于提前发现潜在问题，防止设备故障对钻井作业产生不利影响。此外，完整性评价技术生成的数据和报告可用于决策制定，帮助管理团队规划维护工作、制定预算和优化资产管理。重要的是，它增强了钻井平台上的安全文化，加强了员工和管理层对设备安全的关注，从而提高了整体安全水平，确保员工的生命安全，降低环境风险，并保护企业声誉。因此，电气设备完整性评价技术在钻井平台电气设备安全管理方面是一项不可或缺的工具。

### 2.2 石化装置静设备完整性管理

静设备是石油化工生产装置的主要设备，有效

管理静设备对于装置长周期安全稳定运行非常重要。RBI方法在静设备完整性管理中以设备失效而导致的介质泄漏为分析对象；通过对生产装置中每个设备单元固有的或潜在的失效模式而导致的危险及其后果进行定性或定量地分析、评估来量化风险的大小，确定设备的风险等级并进行排序<sup>[11]</sup>；对风险等级较高的设备单元给予重点关注，并施以有针对性的检验为主要手段的风险评估和管理过程。而在钻井平台电气设备完整性评价技术中，RBI对于明确电气设备故障模式与故障机理诊断，实现电气设备分级管理，制定有针对性的检验策略，指导电气设备预知性维修，对于电气设备长周期运行具有重要意义。

### 2.3 管道站场设备完整性管理

在长输管道站场设备完整性风险评估工作中，RCM能够检测系统的功能是否失效，并帮助工作人员明确系统失效的不同后果，之后使用规范化逻辑决断手段制定出针对不同失效后果的预防处置策略。该方法可保障设备的安全性及完整性，以损失最小为构建目标实现系统维修策略的优化<sup>[12]</sup>。RCM可分析设备功能失效模式，其能够检测并分析系统各设备与部件的失效情况，结合相关设备与部件的维护维修数据以及设备失效数据得到可能出现的失效模式，协助技术人员分析出现失效的原因。RCM在钻井平台电气设备完整性评价工作中同样起到了重要的评估作用，它通过深入分析电气设备的功能、性能需求和潜在故障模式，帮助确定适当的维护策略，确定哪些设备需要进行定期维护，哪些可以进行条件监测，以及哪些需要采取更侧重于预防性维护的措施，实现优化维护计划，降低维护成本，减少停机时间，延长设备寿命，从而提高钻井平台电气设备的完整性管理效率。

### 3 总结与展望

电气设备完整性评价技术在海洋石油钻井平台上

的应用具有广泛的前景和深远的影响。它在确保设备可靠性、安全性和性能方面发挥着至关重要的作用，对于提高生产效率、降低风险以及推动可持续发展具有重要意义。电气设备完整性评价技术通过数据采集、监测、分析和维护策略的制定，可有效确保钻井平台上的电气设备在极端海洋环境下的可靠性和安全性。未来，随着技术的不断演进，电气设备完整性评价技术将迎来更多发展前景：

1) 智能化与自动化：随着物联网和人工智能技术的成熟，电气设备的监测和维护将更加智能化和自动化。设备将能够自主进行健康状态检测，并提出维护建议，减少人工干预。

2) 远程监控和维护：远程监控技术将继续发展，平台中控室可以随时随地远程监控设备的状态，从而提高效率和快速响应问题。

3) 环保和可持续性：电气设备的完整性评价将更多地关注环保和可持续性。技术将用于监测设备的环境影响，以确保符合法规和标准。

4) 数据安全：随着数据在电气设备完整性评价中的重要性增加，数据安全将成为一个关键问题，需要采取措施来保护数据免受潜在的威胁和攻击。

5) 跨行业应用：电气设备完整性评价技术将不仅在海洋石油钻井平台领域，还在其他工业领域得到应用，如制造业、能源产业和基础设施。

### 参考文献

- [1] 李刚. 海洋石油钻井平台设备安全管理[J]. 内燃机与配件, 2020(14): 162-163.
- [2] 吴小亮. 海洋石油钻井平台设备安全管理分析[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43(12): 75-77.

# PRODUCT AND TECHNIC

## || 产品与技术 ||

- [3] 李平. 海洋石油钻井平台设备安全管理研究 [J]. 船舶工程, 2015, 37 ( S1 ): 253-255.
- [4] 李佳林, 张贤明. 稠油集输站场静设备完整性检测评价技术探索与实践 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2020, 40 ( 15 ): 15-16, 19.
- [5] 刘侃, 周沙沙. 海上石油钻井平台关键设备故障在线监测安全设计分析 [J]. 化工安全与环境, 2022, 35 ( 18 ): 21-24.
- [6] 张伟, 郑仕轩, 江钰韬, 等. 变电站一次设备在线监测数据诊断及运维检修 [J]. 科技与创新, 2023 ( 11 ): 114-116.
- [7] 王文凯. 石化行业静设备技术完整性实施策略研究应用 [J]. 设备管理与维修, 2022 ( 22 ): 22-24.
- [8] 苏建峰, 张建军, 李智勇, 等. 基于状态评价的电气设备完整性管理 [J]. 油气储运, 2012, 31 ( 5 ): 397-399, 407.
- [9] 吕金祥. 储能电站电气设备运维与故障检修研究 [J]. 办公自动化, 2023, 28 ( 18 ): 1-4.
- [10] 王彦琦. 原油储库设备完整性智能评价模型及应用 [D]. 大庆: 东北石油大学, 2022.
- [11] 刘建军, 陈铭, 宋耀民, 等. 石化装置静设备完整性管理探究 [J]. 中国化工装备, 2023, 25 ( 1 ): 36-38.
- [12] 罗丹, 刘佳仑. 基于ERP系统的长输管道站场设备完整性管理 [J]. 大众标准化, 2022 ( 17 ): 127-129.

(收稿日期: 2023-11-05)