

核电厂 CFI 水闸门泄漏分析及应对策略研究

Research on Leakage Analysis and Response Strategy of CFI Water Gate in Nuclear Power Plants

李亚兴

Yaxing Li

阳江核电有限公司 中国·广东 阳江 529900

Yangjiang Nuclear Power Co., Ltd., Yangjiang, Guangdong, 529900, China

摘要: 论文分析了核电厂海水过滤系统（简称 CFI 系统）水闸门的结构原理、泄漏量超标的影响及原因，提出了泄漏的判定方法和应对水闸门泄漏超标的策略，并得到了实践的验证，对同行同类设备泄漏量超标有一定的借鉴作用。

Abstract: This paper analyzes the influence and causes of excessive leakage of sluice gate of seawater filtration system (CFI system) in nuclear power plant, puts forward the judgment method of leakage and the strategy of excessive leakage of sluice gate, which has been verified by practice, and can be used as a reference for similar equipment in the same industry.

关键词: 水闸门; 泄漏; 分析; 策略

Keywords: sluice gate; leakage; analysis; strategy

DOI: 10.12346/peti.v6i1.9072

1 引言

CFI 海水过滤系统保证对机组所使用的全部海水进行过滤。CFI 系统水闸门用于 PX 泵站循环冷却水的进口，是机组大小修期间隔离海水进入循环冷却水系统的屏障，其隔离密封的可靠性对核电厂的检修安全性和经济性影响较大，故从根本上避免水闸门泄漏量超标以及快速排查水闸门泄漏原因并制定应对策略显得尤为重要。

核电厂大小修期间，曾发生多起由于 CFI 系统隔离设备水闸门泄漏量超标导致下游鼓网涵道无法按预期排空的事件，一方面潜在威胁下游设备的隔离检修和人员作业安全；另一方面导致下游涵道排水时间过长甚至无法排空，重新起吊水闸门排查原因和下水闸门进行涵道排水，特别在短大修期间，容易造成检修关键路径延误，延长大修工期，给核电厂造成一定经济损失。笔者结合自身核电从业经验，通过深入分析研究，总结了避免水闸门泄漏量超标的措施、水闸门泄漏判定的方法、泄漏原因和应对策略。

2 系统和设备简介

2.1 CFI 海水过滤系统

CFI 海水过滤系统包括粗格栅、加氯框（和水闸门共用一个流道）、细格栅、清污机、鼓网等设备组成，保证对机组所使用的全部海水进行过滤。

2.2 水闸门设备

水闸门主要由闸门本体和导槽组成，置于水室墙壁内，水闸门用于 PX 泵房渠道检修时隔离进水使用。

水闸门是用碳素结构钢板和型钢焊接成的结构件。将预制成 L 型的柔性氯丁橡胶（止水橡胶）用压板和紧固件压紧在闸门四周，成型的密封条只在水下承受水压力时起密封作用^[1]。在水闸门提升前，用所提供的起吊梁在起吊上升运行前初始阶段打开水闸门上的平衡阀，使水闸门前后两面水位平衡。

每个水闸门有两个平衡阀，由平衡阀连接杆、阀盖、阀瓣密封件、阀瓣压盖和阀座部件组成^[2]。

【作者简介】李亚兴（1989-），男，中国山西介休人，本科，工程师，从事核电冷源设备研究。

3 水闸门泄流量超标的判定

当大小修期间 CFI 系统涵道未按预期排空或排水速率缓慢时，需优先考虑海水潮位的影响，当 CFI 涵道抽水期间恰逢海水高潮位时，则排空涵道所需的时间较长。

当涵道超预期无法排空，则需要继续排查下游用户一重要厂用水系统（简称 SEC 系统）联通阀是否有效关闭。根据电厂系统分析，CFI 系统分为 A、B 两列，其下游用户 SEC 系统在 A、B 列之间设计有联通阀。当该联通阀开关状态设置错误时将导致 CFI 系统下游 A、B 列涵道相通，从而出现涵道无法排空的现象。

下游用户二 CRF 循环水系统碎石过滤器反冲洗排污阀未有效关闭，叠加高潮位时，在虹吸作用下，冷凝器水室出口管道内海水通过碎石过滤器反冲洗排污管线反向向冷凝器入口管道补水，将导致整个涵道无法排空。

总结 CFI 系统涵道未按预期排空或排水速率缓慢判定逻辑如图 1 所示。

当水闸门下游鼓网涵道水位仍处于淹没水闸门的早期排水阶段，一般不易及时发现水闸门泄漏，通常结合海水潮位的高低，通过抽水泵（流量 120m³/h）的抽水时间（通常 14h 左右）和鼓网涵道水位以及下降速率等经验综合判断，或借助流速测量仪和投放漂浮物在常见泄漏位置进行辅助判断是否存在水闸门泄漏。

当涵道水位抽吸下降至水闸门裸露后可直观看到水闸门是否发生了泄漏。水闸门泄漏一般常见于平衡阀位置和水闸门四周，呈现喷射状或缓慢渗漏状。

通常水闸门允许一定程度的泄漏，泄流量要求：小于 0.05L/s·m（10% 偏差），即闸门完全淹没时为 64.4L/min（10% 偏差）。通过放置于鼓网底部集水坑的抽水泵（流量 120m³/h）抽吸降低鼓网底部水位来判断泄漏是否超标。

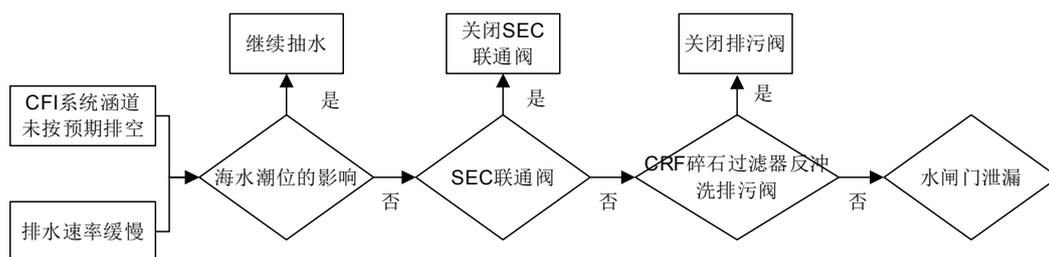


图 1 判定逻辑

4 水闸门泄流量超标原因分析

4.1 流道金属密封面清洁度不足

当出现水闸门四周泄漏时，需要考虑水闸门密封胶条和流道基础金属密封面之间的密封失效。

大小修开始前，需率先安排潜水员将流道金属密封面以及导轨清理干净，保证水闸门下放至流道后其密封胶条和金属密封面贴合密封。在潜水作业过程中：一方面，可能由于未清理干净流道金属密封面局部附着的藤壶等凸起物质，导致密封失效；另一方面，可能由于水闸门下放流道较晚，导致新的海生物附着或流道底部淤泥、硬质的海生物壳体等物质在水流的扰动下，重新聚集在流道底部金属密封面上，从而导致密封失效。

4.2 水闸门密封胶条异常

水闸门密封胶条为氯丁橡胶材质，在储存或使用过程中出现热氧老化、机械划伤、破损或拼接处脱胶、安装尺寸不满足要求等异常，将导致密封胶条和流道金属密封面之间产生泄漏通道，直接影响水闸门的密封性。

4.3 水闸门平衡阀未有效密封

4.3.1 水闸门平衡阀密封橡胶垫异常

水闸门平衡阀密封垫材质为氯丁橡胶，在户外环境下容易热氧老化，或压痕变形回弹能力降低，将直接导致平衡

阀盖和阀座之间无法有效贴合，出现泄流量超标。

4.3.2 平衡阀无法下落关闭

水闸门平衡阀提升装置上钢丝绳吊环高度超过水闸门本体，在下降过程中与墙体发生干涉，导致平衡阀无法下落关闭。

4.3.3 水闸门平衡阀阀瓣压盖与阀座干涉

在水闸门历史泄漏案例中，平衡阀在下落过程中阀瓣压盖边缘与阀座发生干涉，阀瓣橡胶密封件未与阀座完全贴合导致泄漏。

针对 CFI 系统水闸门平衡阀阀瓣压盖与阀座干涉问题，笔者通过对水闸门建模进一步分析原因。

根据阀瓣密封件外径和阀座外径尺寸计算得出平衡阀阀瓣设计允许活动量为 19.5mm。

根据水闸门相关设计数据（如图 2 所示）模拟平衡阀动作过程，得出吊杆与导向孔偏转极限角度为 1.71°、极限活动量 13.42mm（偏转极限角度、极限活动量指吊杆在导向孔内偏转至极限位置时的角度、活动量），吊杆与平衡阀连接杆偏转极限角度为 1.9°、极限活动量 14.92mm，阀盖与连接杆偏转极限活动量为 1.5mm。上述 3 个极限活动量叠加后，平衡阀阀瓣设计极限活动量为 29.84mm，如图 3 所示。

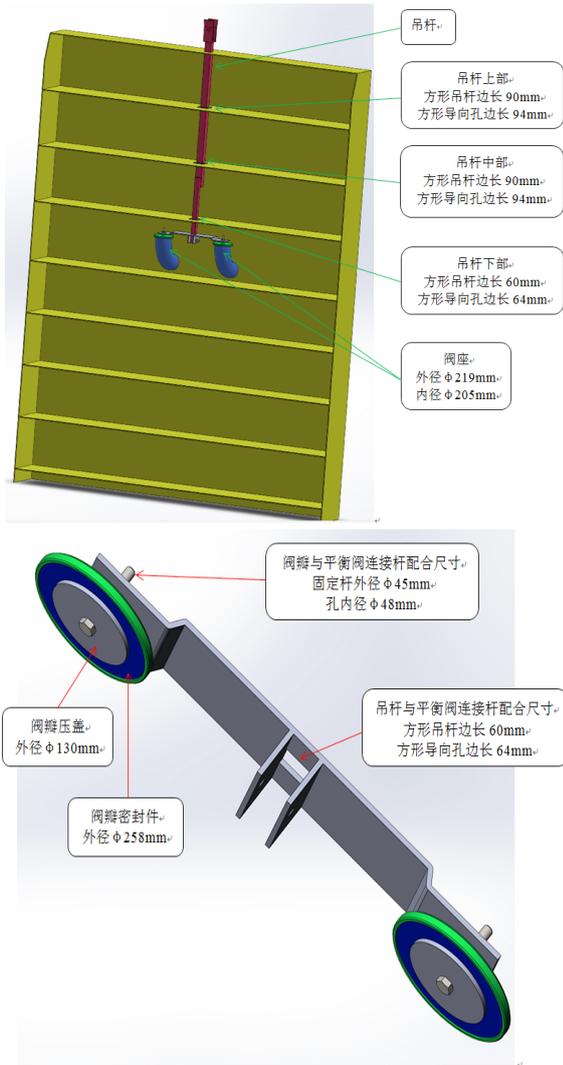


图2 平衡阀及吊杆配合设计尺寸

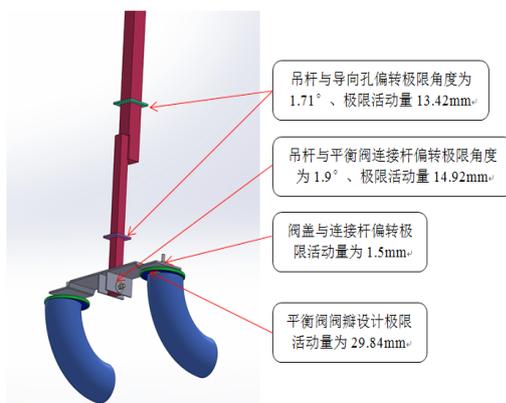


图3 平衡阀阀瓣设计极限位置

平衡阀阀瓣设计极限活动量 29.84mm，超过设计允许活动量 19.5mm。CFI 水闸门设计时未考虑到阀瓣与阀座在极限位置时的配合，在下插过程中受海水扰动影响，存在平衡阀阀瓣偏转至极限位置时阀瓣密封件与阀座无法完全密封的风险。

5 水闸门泄漏量超标应对策略

5.1 从根本上避免水闸门泄漏量超标

通过在日常和大小修期间对以下方面进行严格控制，尽可能从根本上避免水闸门泄漏量超标。

5.1.1 控制水闸门检修质量

根据核电厂水闸门维护大纲要求，每轮大小修前需要对水闸门进行全面检修。在检修过程中，水闸门密封胶条和平衡阀密封垫需要重点检查是否存在热氧老化、机械划伤、破损或胶条拼接处脱胶等异常，如有异常需要对密封胶条和垫片进行更换。

工程建设阶段，水闸门密封胶条和流道金属密封面之间采用透光试验验收^[3]，商运进水后不具备该验收条件，故更换或调整水闸门密封胶条需要严格按照文件尺寸要求执行，避免出现密封胶条和流道金属密封面无法有效贴合导致泄流量超标。

针对水闸门平衡阀提升装置上钢丝绳吊环和墙体干涉问题，需将吊环所在吊杆旋转 180° 更换安装，实现吊环的换向，从而避免吊环和墙体干涉。

5.1.2 控制水闸门流道金属密封面和底部淤泥清理质量

在大小修期间，水闸门流道金属密封面潜水清理工作尤为重要，负责人务必独立验收清理结果，尤其密封面上不易清理的藤壶残留物、流道底部边角残留的海生物壳体要确保清理干净，底部淤泥清理范围要足够大，确保淤泥不会坍塌或迁移至密封面位置，对不确定的位置进行重新清理。

5.1.3 控制水闸门平衡阀蓝油试验

①日常期间水闸门检修后需对平衡阀进行蓝油试验，验证检修质量，在试验过程中需要模拟平衡阀盖在各种极限扭转情况下均能有效关闭，且蓝油保持完整连续。

②大小修使用水闸门前，需进一步对平衡阀进行蓝油试验验证，确保平衡阀在落座过程中不出现其他意外无法关闭的情况。

5.1.4 控制水闸门下放时间

水闸门密封面以及流道潜水清理完成后尽可能于当天完成水闸门的下放，避免因隔夜导致海生物再次附着于金属密封面，或淤泥迁移至底部密封面。

5.1.5 纠正水闸门设计制造偏差

针对因设计考虑不足和制造偏差导致的水闸门平衡阀阀瓣偏转至极限位置时阀瓣密封件与阀座无法完全密封的情况，可执行以下纠正措施：

①尽可能将超标的水闸门提升吊杆导向孔边长恢复原设计。

②在保证吊杆和导向孔活动灵活的前提下可适当减小导向孔边长，将吊杆和导向孔单边间隙由 2mm 优化至 1mm，从而减小偏转极限角度。

③减小水闸门吊杆与平衡阀连接杆之间间隙，消除偏转极限角度 1.9°。

④为了快捷有效解决平衡阀阀瓣压盖与阀座因设计考虑不足和制造偏差导致的干涉，可以将原水闸门上的平衡阀阀瓣压板更换为锥度压板，在平衡阀下落时起到导向作用。

5.2 水闸门泄漏量超标应对措施

当水闸门发生泄漏量超标，通过以下措施进行应对。

5.2.1 潜水封堵

当水闸门四周或平衡阀位置出现明显泄漏时，可以安排潜水员使用棉被等材料对泄漏位置进行封堵。

5.2.2 尝试对平衡阀反复启闭

在鼓网涵道抽水早期发现水闸门平衡阀位置出现明显泄漏时，可以尝试对平衡阀反复启闭消除水闸门漏水。

5.2.3 更换水闸门

当排查水闸门泄漏原因需要较长时间时，可以优先更换备用水闸门进行抽水，尽可能地减少对关键路径的影响。

5.2.4 重新对流道密封面和底部淤泥进行检查清理

当分析是由于流道金属密封面清洁度不足或淤泥导致的水闸门泄漏时，需要重新安排潜水员针对泄漏位置进行重点排查清理。

6 结语

CFI 水闸门是核电厂海水过滤系统重要的隔离设备，泄漏量超标直接威胁下游作业人员和设备的安全，影响核电厂的安全生产和经济效益。因此，必须高度重视 CFI 水闸门日常的维护管理和检修质量，密切关注大小修期间水闸门使用前的平衡阀蓝油验证和潜水清理流道金属密封面质量，控制水闸门下放流道时间，对平衡阀阀瓣压板改进，从根本上避免水闸门泄漏的隐患。

掌握泄漏判定技能，当出现泵站涵道无法按预期排空时，优先排查 SEC 重要厂用水系统联通阀关闭情况，然后根据水闸门泄漏现象和位置，逐项排查泄漏的可能原因，及时采取潜水封堵或重新提水闸门处理等一系列措施，快速干预水闸门泄漏问题的处理，为系统设备隔离争取时间，保障核电厂大小修检修活动顺利开展。

参考文献

- [1] GB50017—2003 钢结构设计规范[S].
- [2] GB/T14173—1993 平面钢闸门技术条件[S].
- [3] DL/T5018—2004 水利水电工程钢闸门制造安装及验收规范[S].