

Analysis and Solution to the Frequent Start of the Water Supply Pump in the Camera Water Cooling System

Wei Ye Hairong Wang Genghe Zhang Liang Ma Jinming Cao

Qinghai Dehong Electric Power Technology Co., Ltd., Xining, Qinghai, 810000, China

Abstract

This article conducts systematic diagnosis and treatment of the frequent start-up problem of the water replenishment pump in the pure water cooling system of a 300Mvar large-scale synchronous phase-shifting camera group. After sorting out the phenomenon, monitoring the data, and analyzing the theory, the root cause was identified after ruling out the fault in the water replenishment circuit: there was a trace accumulation of gas in the main circulation circuit, causing pressure fluctuations in the system and triggering intermittent operation of the water replenishment pump. The article elaborates on the diagnostic logic from phenomenon to essence, creatively proposes the fault mechanism of “dynamic pressure imbalance in gas-liquid two-phase flow”, and formulates a plan with “refined exhaust” and “optimization of operating parameters” as the core. After implementation, the starting frequency of the water replenishment pump has been reduced from tens of times per hour to the normal range, eliminating equipment hazards, ensuring safe operation of the unit, and providing an analytical paradigm and practical guidance for the handling of hidden faults in similar closed-loop water cooling systems.

Keywords

phase-shifting camera; Water cooling system; Water replenishment pump; Frequent startup; Refined exhaust

一起调相机水冷系统补水泵频繁启动问题分析及处理方案

叶伟 王海蓉 张更贺 马亮 曹津铭

青海德泓电力科技有限公司，中国·青海 西宁 810000

摘要

本文针对某300Mvar 大型同步调相机组纯水冷却系统补水泵频繁启动问题，开展系统性诊断与治理。经现象梳理、数据监测及理论分析，排除补水回路故障后，定位根本原因：主循环回路存在微量气体析出积聚，致系统压力波动，触发补水泵间歇性工作。文中阐述从现象到本质的诊断逻辑，创造性提出“气液两相流动态压力失衡”故障机理，制定以“精细化排气”“运行参数优化”为核心的方案。实施后，补水泵启动频率从每小时数十次降至正常范围，消除设备隐患，保障机组安全运行，为同类闭式循环水冷系统隐性故障处理提供分析范式与实践指南。

关键词

调相机；水冷系统；补水泵；频繁启动；精细化排气

1 引言

大型同步调相机关键部件运行产热多，需靠封闭式循环水冷系统（以高纯度去离子水为介质）散热，系统稳定性关乎调相机绝缘寿命与运行效率。补水泵是该系统关键辅助设备，可自动补偿工质损失、维持系统压力，正常工况下启动频率低。某换流站调相机调试运行时，水冷系统补水泵异常频繁启动，虽未立即跳闸，但长期会加剧泵体磨损、导致电机过热、增加能耗，还潜藏系统压力崩溃风险。本文以此为研究对象，摒弃传统思路，用系统工程方法揭示深层机理并提出治本之策，对提升电力装备运维水平意义重大^[1]。

【作者简介】叶伟（1977—），男，中国青海西宁人，工程师，从事电力系统及其自动化研究。

2 系统概况与故障现象描述

2.1 调相机水冷系统简介

本工程调相机纯水冷却系统为一个典型的闭式循环系统，主要由以下部分组成：

主循环回路：包括主循环泵、调相机冷却绕组、空水冷却器、过滤器、阀门及管道。

补水定压回路：包括补水泵、补水罐、压力传感器、液位传感器、电动补水阀及安全阀。补水罐通过连通管与系统回水母管相连，起到缓冲压力波动和补充水量的作用。

控制系统：PLC 根据系统压力传感器的反馈信号，控制补水泵的启停。通常设定有低压启动值和高压停止值。

工作流程：主循环泵驱动去离子水在主回路中循环，带走调相机热量，然后在空水冷却器中将热量传递给环境空气。由于温度变化、管道形变或微量渗漏，系统压力会缓慢

变化。当压力低于 P_{low} 时，控制系统启动补水泵，从补水罐向系统注水，直至压力恢复至 P_{high} 时停泵。

2.2 故障现象描述

某调相机组投运一个月后，水冷系统现 4 项异常：一是补水泵频繁启停，24 小时启动超 400 次（平均约 17 次 / 小时，高峰 30 次 / 小时），单次运行仅 10-30 秒；二是系统压力随泵联动，在 P_{low} 与 P_{high} 间快速锯齿形振荡，非正常缓慢变化；三是无“液位低”“压力低”等高等级报警，补水罐液位缓慢下降但在正常范围；四是初步检查无

可见漏水点，手动启动补水泵，扬程、流量测试均正常^[2]。

3 故障诊断与根因分析

面对这一隐性故障，成立了分析小组，遵循“由简到繁、由外至内”的原则，构建了系统的诊断分析流程。

3.1 可能性分析与初步排查

首先，对导致补水泵频繁启动的所有可能原因进行罗列与初步筛查。

初步排查将焦点集中在了“系统内存在气体”这一可能性上。

表 1 补水泵频繁启动可能原因及初步排查

序号	可能原因	分析判断与排查方法	排查结论
1	系统存在明显泄漏点	对系统所有法兰、阀门、泵体密封等进行全面目视检查和无水乙醇擦拭检查，压力衰减试验（隔离系统后打压观测）。	排除
2	a) 补水泵逆止阀不严或损坏 b) 补水罐气体预充压力过低或囊袋破损	关闭补水阀，观察系统压力下降速度。若压力持续快速下降，则表明逆止阀内漏。本测试中压力稳定。 检查补水罐预充氮气压力，发现其压力值符合设计规定（通常为系统静压的 0.6-0.8 倍）。囊袋无破损迹象。	排除 a 排除 b
3	压力传感器测量不准或控制逻辑错误	使用标准精密压力表在现场与控制系统显示值进行比对，误差在允许范围内。检查 PLC 控制逻辑及设定值，未发现异常。	排除
4	系统内存在气体	此为高度怀疑对象。气体具有可压缩性，其在系统中的积聚和移动会导致压力剧烈波动。	待证实

3.2 深度分析与根本原因定位

尽管系统在投运前进行了排气，但某些情况下气体仍会残留或重新产生。为此，进行了以下深度分析：

初次注水排气不彻底：系统管路复杂，尤其在 U 形弯、局部高点等处，容易形成“气堵”。水中溶解空气析出：去离子水中溶解有一定量的空气。当系统运行时，局部压力降低或温度升高，会导致溶解空气析出，形成微小气泡。负压区进气：如果系统在停机或运行工况突变时，局部压力低于大气压，可能通过密封不严的部位吸入微量空气。

3.3 故障机理构建——“气液两相流动态压力失衡”：

本案例核心机理非大规模气堵，而是少量分散微气泡的动态“呼吸”效应。主循环泵运行时，管路与高点微气泡随流量、压力脉动被压缩或膨胀：气泡压缩使系统体积瞬减，压力升至 P_{high} 致补水泵停；气泡后续膨胀或移至低压区，系统体积瞬增，压力降至 P_{low} 触发补水泵启动。补水泵注水仅暂时压制气泡，未解决根本问题，最终形成“压力降→泵启动→压力升→泵停→气泡再膨胀→压力再降”的高频振荡恶性循环^[3]。

4 证据链验证

现象吻合度：该机理完美解释了补水泵“频繁、短时”工作的特征，以及压力快速锯齿波振荡的现象。排气验证性试验：为证实该判断，采取了一项关键操作：在系统运行的特定时段（如调相机轻载时），缓慢打开主回路最高点的排气阀。在排气初期，观察到有间断性的气水混合物排出，并

伴有“嘶嘶”声。随着排气进行，补水泵的启动频率开始显著下降。此试验直接证明了系统中确实存在游离气体，且是导致故障的直接原因。

表 2 故障根本原因归纳

类别	内容描述
直接原因	水冷系统主循环回路中存在游离 / 析出的气体。
作用机理	气体在系统压力脉动下发生周期性的压缩与膨胀，引发系统总体积和压力的高频、小幅振荡，欺骗了压力传感器和控制系统。
根本原因	1. 初始排气不彻底：系统投运前的排气操作不规范、不充分，未能将管路高点死角的气体完全排净。 2. 运行中气体析出：系统设计或运行工况（如温度、压力）为水中溶解空气的析出创造了条件。 3. 缺乏自动排气装置：系统仅在局部高点设置了手动排气阀，无法在运行中自动排除持续析出的微量气体。

5 处理方案与实施过程

基于上述根因分析，制定了“短期应急处理”与“长期根本治理”相结合的综合方案。

5.1 短期应急处理——精细化人工排气操作

制定系统化排气流程：绘制系统管路图，标识出所有可能的“气堵点”，包括 U 形管顶部、换热器顶部、高于主管路的支管末端等。2. 分步分区排气：在调相机停机或低负荷时进行。按照从高到低、从远到近的原则，逐个打开排气阀。关键操作：排气阀不宜大开，应采用“间歇、微开”的方式，让气体缓慢随少量水流带出，避免大量排水导致系

统压力骤降和工质浪费。每个排气点持续至流出连续、平稳的水流并无气泡为止。

3. 动态运行排气：在排气过程中，可间歇性启动主循环泵，利用水流将死角处的气体“携带”至排气点。同时观察控制界面上的压力曲线和补水泵状态，作为排气效果的实时反馈。

5.2 长期根本治理方案

加装自动排气装置：在系统识别出的主要气体积聚点，加装自动微泡排气阀。该阀内部浮球机构能在气体积聚时自动打开排气，气体排尽后自动关闭，可有效在线处理运行中不断析出的微量气体。

优化系统运行参数：调整压力控制死区：与厂家协商，

适当扩大补水泵的启停压力差，例如从原来的0.2bar(0.8~1.0)调整为0.3ba。这增强了系统对小幅压力波动的耐受性，避免了因气泡“呼吸”引起的误动作。

增设启停延时：在PLC控制逻辑中，为补水泵的启动和停止指令增加一个时间延时。只有当压力信号持续低于P_low或高于P_high超过延时设定时，才执行动作，以此过滤掉短暂的压力波动干扰。

完善运维规程：将“水冷系统精细化排气”作为调相机大修、临修后的标准作业流程，并纳入运行规程。

定期巡检时：将补水泵启动频率作为水冷系统健康状态的关键监测指标(KPI)，建立预警机制。

表3 综合处理方案一览表

方案类型	具体措施	目的与效果
短期应急	1. 制定系统化排气图 2. 执行分步分区、间歇微开式人工排气 3. 结合动态运行进行验证	快速消除系统中已存在的气体，立即缓解故障现象，恢复系统正常运行。
长期治理	1. 在关键高点加装自动微泡排气阀 2. 优化控制参数：扩大压力死区、增加启停延时 3. 将精细化排气纳入标准运维规程	实现运行中气体的自动在线排除，从根本上解决气体积聚问题。 提高控制系统的抗干扰能力，避免对高频小幅压力波动产生误响应。 规范作业，防止问题复发，提升系统长期稳定性。

6 效果验证与效益分析

实施精细化人工排气后，系统运行显著改善：补水泵启动频率从每小时超20次骤降至不足5次，系统压力曲线高频锯齿波消失、稳定性提升。经24小时监测，频率进一步稳定在1-2次/小时，显效长效。后续检修加装自动排气阀并优化控制参数，问题彻底解决且无复发。效益上，安全层面消除水冷系统失压致调相机停运隐患；经济层面减少设备维修更换、降低能耗、延长寿命；管理层面形成隐性故障处理方法论，提升运维团队能力。

7 结语

本次调相机水冷系统补水泵频繁启动故障的处理，是一次成功的基于机理分析的深度运维实践。主要结论如下：

1. 对于闭式循环水冷系统，补水泵的异常工作模式是系统状

态的重要指示。频繁启停往往不是补水回路自身的问题，而是主循环回路状态异常的间接反映。

2. 微量气体的“气液两相流动动态压力失衡”机理，是导致此类隐性高频压力波动和补水泵误动作的根本原因。诊断过程需结合理论分析与验证性试验。

3. 采用“精细化人工排气”结合“加装自动排气装置”与“优化控制策略”的综合治理方案，能够有效且彻底地解决问题。

参考文献

- [1] 耿曼. 高压直流输电调相机水冷系统关键技术研究. 广东省, 广州高澜节能技术股份有限公司, 2021-01-06.
- [2] 颜景博. 双水内冷同步调相机水路堵塞时定子发热问题研究[D]. 哈尔滨理工大学, 2020. DOI:10.27063/d.cnki. ghlgu.2020.000281.
- [3] 徐大坤,甘露. 高温缺水地区调相机外冷却系统研究 [J]. 制冷与空调(四川), 2019, 33 (06): 609-612.