

小其培水电厂水轮机喷嘴装置操作功及串水渗油分析

张天荣

国家电投集团云南国际电力投资有限公司小其培发电分公司 云南 保山 腾冲 679100

【摘要】：缅甸小其培水电厂投产后，存在运行过程中喷嘴装置接力器存在操作功不足，串水渗油、反馈卡涩等缺陷，严重影响机组安全稳定运行。本文分析总结了喷嘴装置接力器操作功不足，串水渗油、反馈卡涩等的原因分析和处理。

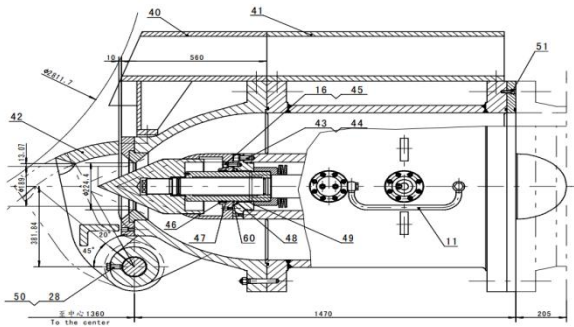
【关键词】：动态；静态开关机时间差异大；串水渗油；反馈卡涩分析处理

DOI:10.12417/2705-0998.26.12.040

1 概述

缅甸小其培水力发电厂位于缅甸克钦邦境内，电站为引水式，由其培河引水。取水坝位于恩梅开江左岸支流其培河上，电站装机容量为 99MW（33MW×3），额定水头 433 米，额定流量 8.89 m/s，水轮机为 CJA237-L-225/4×18 型水轮机立轴四喷嘴冲击式水轮机。机组于 2011 年先后投产发电，通过 110kV 线路送出向缅北提供清洁电力供应。

喷嘴装置组成及原理：



喷嘴装配为直流式内控型喷嘴，采用双向油压操作。喷嘴装配由喷嘴管、喷嘴盖、活塞装配、喷针、喷嘴、偏流器、法兰轴、回复杆装配及挡水板等组成组成。

喷嘴装配中的活塞左腔为喷针开启腔，右腔为关闭腔，其控制油来自调速器，由调速器来控制或切换喷针。喷针的开启和关闭时间均由调速器控制。偏流器通过法兰轴与控制部份中的接力器联接，并直接受其控制。

喷嘴装配用螺栓分别固定在配水环管的四个法兰上，喷嘴管进口直径为 $\phi 700$ ，喷针最大行程为 144mm，工作油压为 6.3MPa。压力水流进入喷嘴后，被逐渐加速，至喷嘴出口，将所有压力能转化为动能，形成一股自由射流，冲向转轮做功。喷针的结构设计考虑到当油压系统失压时，喷针在整个运行水头范围内和任何运行开度下均有自关闭趋势。在此情况下喷针

绝不会失控开启而只能缓慢关闭。这样就能保证机组和压力钢管的安全。另外喷针、喷嘴均采用优质不锈钢，并在其表面硬化处理，增加了零件的抗磨损和抗冲刷能力，提高了使用寿命。喷嘴装配具体动作原理如下：

喷针和偏流器是冲击式水轮机中两个主要调节元件。冲击式水轮机出力的调整就是靠改变射流直径的大小来实现的。喷针负责正常运行时的流量调节，而偏流器则是在当机组甩负荷时迅速改变射流方向，防止机组飞逸，并在负荷突变时起一定调节作用。如果喷针关闭很快，会使引水管内压力急剧增高，产生水锤，为了保证压力钢管内不致产生破坏钢管的水锤压力，喷针的关闭时间应整定较长。

喷针缓慢关闭将导致机组的暂态速率 β 上升过大，产生过速。所以要利用偏流器迅速地改变射流方向，偏流器关闭的时间应尽可能短 $T_{s2} \leq 2s$ 。关闭时，偏流器先动作，然后喷针才慢慢关闭，这样暂态速率上升 β 和水压上升 ζ 都能保证在允许的范围内。偏流器开启和关闭时间由调速器控制。喷针的开启和关闭动作如下：

开启时，在调速器的命令和操作下，压力油进入喷嘴开启腔，喷针在油压力、喷针尖水推力的作用下，克服喷针头平衡腔的水作用力向开启方向移动，同时通过回复杆装配将喷针行程传递至接力器与反馈装置。接力器与反馈装置中的传感器将位移量转换成电信号反馈到调速器。此时，喷嘴关闭腔为回油腔。关闭时，在调速器的命令和操作下，压力油进入喷嘴关闭腔，喷针在油压力、喷针头部平衡腔的水作用下克服喷针尖的水推力向关闭方向移动，同时通过回复杆装配将喷针行程传递至接力器与反馈装置。此时，喷嘴开启腔为回油腔。正常运行时，机组在稳定负荷下运行时，喷针能稳定在与负荷相适应的开度不动，这是因为调速器能够控制压力油，使喷嘴开启、关闭腔的油压刚好与喷针所受的力相平衡。故喷针能稳定在这一与外界负荷相适应的平衡位置上。

2 喷嘴装置存在问题

2.1 动态、静态开关机时间差异大

喷嘴装置的油压由调速器油压装置提供，额定压力6.3Mpa，在机组安装调试过程中，发现喷嘴装置在喷针全关时，喷针不能正常关闭到位。设备安装期，发现三台机组喷针在额定压力下不能全关，经厂家技术人员到现场检查后，将21片蝶簧中的2片去除后，喷针可全关。但在实际运行中发现喷针静水开关时间与动水开关时间相差很大，后通过技术公司试验进一步确定喷针静水开、关机时间和动水开、关机时间存在很大差异。即喷针在有水和无水状态下的受力状态发生了较大的改变，导致喷针静水开、关机时间和动水开、关机时间相差较大，不能维持其动静水情况下平衡关系，如下图所示。为保证喷针在运行工况开关时间的精准性，目前采用带负荷大扰动动水调节复核喷针开关时间，但此为非正常调节喷针开关时间方式，影响电网稳定运行。且动水调整时在不同油压下的开关时间变化明显。

表1 喷针静态、动态调试对比

项目	喷针	1#	2#	3#	4#
静水	开机时间 (s)	29.5	22.4	25.5	29.5
	关机时间 (s)	154.9	141.8	143.7	163.0
	备注	机械柜单喷针手动开关，静水开机时间已无法调整			
动水	开机时间 (s)	114.9	135.5	111.5	117.7
	关机时间 (s)	70.8	69.0	70.4	70.0
	备注	1、机组带负荷下扰动频率，双喷针随动 2、取20%喷针行程*5为全行程时间，1#和3#为一组，2#和4#为一组			

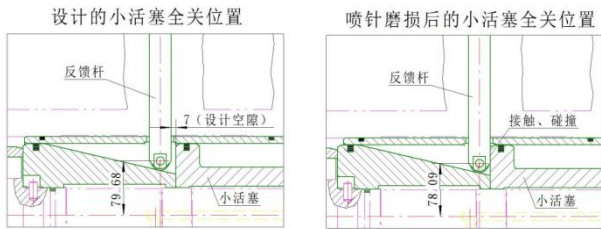
2.2 串油漏水、反馈卡涩

在机组运行过程中，发现调速器回油箱内油位抬高，液压油出现乳化现象。喷嘴装置串油漏水经现场对喷嘴装置分解检查，判断为一方面在检修过程中工艺方法不当、检修质量控制不严等导致密封件受损；另一方面，近年来电站大坝来水泥沙含量较大，导致机组过流部件腐蚀严重，喷嘴装置喷针头、喷嘴口表面为普通氮化处理，抗磨蚀能力差，喷针头、喷嘴口磨蚀严重，导致喷嘴装置关闭行程增大。在喷嘴装置拆解检查时，

实测喷针全关后回复杆至小活塞端面尺寸约7-8mm。将磨损后换下的喷针重新回装测量喷针全开-全关运动行程，喷针未磨损时行程为139mm，磨损后的行程为154mm，喷针设计最大行程为144mm，磨损后的行程超过设计最大行程10mm，从反馈杆安装孔观察磨损喷针全关后小活塞端面已超过反馈杆安装位置约8mm左右，试验测量数据表明喷针过度磨损后将导致反馈杆与小活塞碰撞，进而使密封槽变形、密封损坏导致漏水串水，严重时导致拉伤活塞套、使回复杆动作不灵活以及出现回复杆、定位杆变形、密封滑脱等问题。



小活塞与反馈杆碰撞



3 改进方向及经验反馈

(1) 提升喷针、喷嘴设备抗磨蚀能力。开展喷针喷针、喷嘴设备研究，对其表面硬化喷涂，选择一台机组#1、#3喷嘴、喷针采用超音速火焰喷涂NiCr金属陶瓷；#2、#4喷嘴、喷针采用超音速火焰喷涂碳化钨涂层。通过采用超音速火焰喷涂方法硬化防护后的喷针、喷嘴试验，得出采用碳化钨硬化效果显著。鉴于此次运行试验结果，电站采购超音速火焰喷涂碳化钨涂层工艺的喷针、喷嘴，延长设备使用寿命，解决喷针过度磨损后导致的问题。

(2) 喷嘴装置结构整体优化。针对喷嘴装置开关机时间在静水和动水状态下，时间相关较大问题，电站对喷嘴装置的问题进行攻关，经分析研究，喷嘴装配的主要流道尺寸、外部连接尺寸、喷针行程、喷嘴口直径、喷针角度不变，改变活塞面积，选配标准的高精度碟簧，优化喷针力特性，使喷针操作力更为合理。在不改变喷嘴管、喷嘴盖、偏流器、喷针、喷嘴等主要零件，以及操作油压、反馈方式的前提下，通过改变活塞面积（活塞直径增大10mm，开/关腔容积增大），选配标准的高精度碟簧，优化喷针力特性，使喷针操作力更为合理，达到缩小喷针静态与动态关闭时间差值的目的。同时，在活塞轴后端，设置磁致伸高精度、高可靠性、两路输出的传感器，到达喷针行程1:1行程反馈，满足控制和监测喷针行程的需求。

具体如下：

碟簧规格从原来的 $\phi 200 \times \phi 112 \times 7.6 \times 13$ 更改为 $\phi 225 \times \phi 112 \times 8 \times 14.5$ ，数量进行调整，喷嘴静态关闭力增大，关闭合力亦同时增大；碟簧套结构进行局部调整，原匹配的碟簧直径为 200mm 更改后调整为 225mm；活塞套外径尺寸不变，内径由 160mm 更改为 150mm；活塞轴不调整，小活塞外径由 160mm 更必为 150mm；反馈锥套与活塞套匹配，外径由 200mm 更改为 210mm。

表 2 改造前、后结构及力特性对比图

序号	内容	改造前	改造后	备注
1	总体形式	直流内控	不变	
2	喷针控制方式	双向油操作	不变	
3	操作介质和等级	6.3MPa 油压	不变	
4	行程和射流直径	S=144 do= $\phi 180$	不变	
5	喷针反馈方式	锥套和回复杆， 外置传感器	1:1 行程反馈， 内置	精度和可靠性提高
6	活塞直径（mm）	$\phi 200$	$\phi 210$	
7	开/关腔容积（升）	1.63/2.31	2.77/2.447	
8	最大碟簧力（kN）	59.84	59.5	

9	静态关闭时所需油压（MPa）	5.29	3.51	减少 33.6%
10	静态关闭（kN） （未计摩阻力）	71.25	106.88	提高 50%
11	喷针开启力余量	1.89	2.25	提高 19%
12	事故油压下关闭合力（kN）	93.67	118.27	提高 19%
13	预防喷针急速关闭措施	无	开启腔设置节流孔	安全性提高

经调试试验，改造后喷针可在 1MPa 油压下动作，4.4MPa 油压下喷针全关，喷针静态与动态开关时间基本一致，在静态情况下全关特性曲线和动态全关特性曲线线性度基本一致，效果明显。

在机械设备检修时，发现任何零部件有安装异性密封件的情况时，需认真分析设备结构、原理及密封件作用，确保安装方向正确，避免密封件安装错误的情况发生。

加强备品备件采购、质量验收管理，确保相关零部件的尺寸、强度、耐磨性等相关技术指标满足设计和技术标准要求。

4 结语

经过检修场地调整规范、检修质量控制、提高责任心、改进检修回装工艺方法，同时开展喷针、喷嘴硬化、喷嘴装置整体优化等措施后，喷嘴装置整体运行稳定，故障率显著减少，同时在缅甸电网故障跳闸甩 5-10MW 负荷，机组能及时调整稳定，机组稳定性和可靠性进一步提升。

参考文献：

[1] 钟利军,王志盛.冲击式水轮机喷嘴调整工艺优化[J].水电站机电技术,2016,39(S1):12-13.

[2] 邵飞燕,方戊强,陈世程.水轮机接力器串油原因分析及应对措施探索[J].四川水力发电,2024,43(6):109-112.

[3] 陈世程,邵飞燕,方戊强.紫坪铺水电厂水轮机组接力器锁锭装置技术改造[J].四川水力发电,2024,43(2):128-130+135.