

# 水轮机接力器串油原因分析及应对措施探索

邵飞燕, 方戊强, 陈世程

(四川省紫坪铺开发有限责任公司, 四川 成都 610039)

**摘要:** 接力器是水轮机调节系统的执行动力部件, 在机组开、关及实时调节机组负荷方面发挥着重要作用, 接力器的工作可靠性直接影响整个水轮发电机组的安全、稳定运行。从接力器开腔与关腔串油现象分析导致接力器串油的本质原因, 从而研究应对措施, 解决接力器活塞与缸体间密封不严的问题, 提高接力器的工作可靠性, 为整个水轮发电机组安全、可靠运行奠定基础。

**关键词:** 水轮发电机组; 接力器活塞; 串油; 组合密封

**中图分类号:** TK73

**文献标志码:** B

**文章编号:** 1001-2184(2024)06-0109-04

## Analysis on the Causes of Oil Leakage in Hydraulic Turbine Servomotor and Exploration of Countermeasures

SHAO Feiyan, FANG Wuqiang, CHEN Shicheng

(Sichuan Province Zipingpu Development Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610039)

**Abstract:** The servomotor is the executive power component of the turbine regulation system, it plays an important role in turning on and off the units and real-time adjustment of the unit load. The reliability of the servomotor directly affects the safe and stable operation of the entire hydroelectric generator units. The essential causes of oil leakage in servomotors is analyzed from the opening and closing of chambers to study countermeasures and solve the problem of untight sealing between the servomotor piston and cylinder body, improve the working reliability of the servomotor and lay the foundation for the safe and reliable operation of the hydraulic turbine generator units.

**Key words:** Hydraulic turbine generator unit; Servomotor piston; Oil leakage; Combined sealing

### 1 概述

某电厂近年运行过程中, 4 台机组均出现油压装置油泵频繁启动的问题。在此背景下, 为寻找原因并研究解决方案, 随即组织开展研究、分析及试验。结合油压系统工作原理及调速系统结构, 探索油压装置泄露的因素, 逐个分析、论证, 最终确定导致油压装置泄露的原因, 制定相应的措施, 解决油压系统泄露问题, 从而使油压装置油泵工作恢复正常。

某电厂总装机容量为 760 MW, 安装 4 台单机容量为 190 MW 的混流式水轮发电机组, 水轮机装有 2 台直缸式液压接力器, 接力器布置在机坑里衬内, 一个接力器带液压锁锭装置, 一个不带液压锁锭装置, 接力器活塞直径 650 mm, 额定操作油压为 4.0 MPa。接力器推拉杆与活塞依靠大

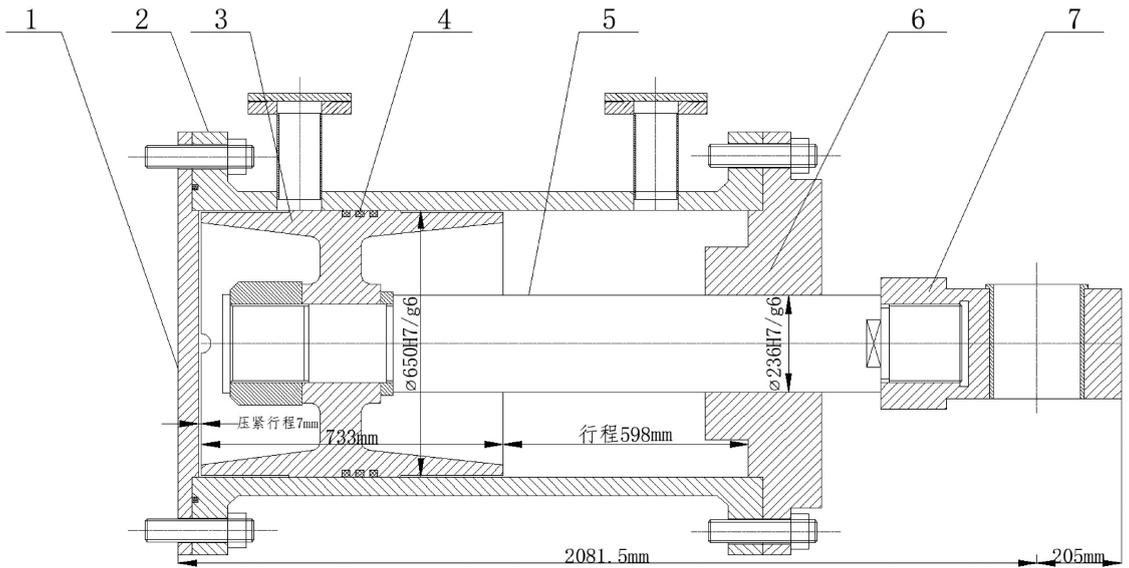
螺母固定, 推拉杆与控制环通过圆柱销连接。接力器通过 TSA-46 透平油推动活塞的前进、后退实现直线往复运动, 接力器活塞前进、后退推动活动导叶实现开启与关闭, 从而完成对机组负荷的调节。

该电厂接力器由东方电机股份有限公司设计、制造, 在接力器活塞上设置 3 道密封槽, 活塞与缸体间采用活塞铸铁环进行密封, 该接力器密封结构型式在上世纪 90 年代逐渐被淘汰, 属于一种传统接力器密封结构, 接力器活塞密封结构示意图 1。

### 2 接力器腔体间串油的表现形式及影响

该电厂自 2006 年 4 台机组全部投产发电, 前 15 年接力器运行平稳、动作灵活且可靠, 运行质量均良好。2020 年前后, 发现在机组带稳定负荷、接力器未频繁操作的情况下, 油压装置油泵启

收稿日期: 2023-08-29



1. 后端盖;2. 接力器缸体;3. 接力器活塞;4. 铸铁密封环;5. 活塞杆;6. 前端盖;7. 接力器杆头。

图1 接力器活塞密封结构示意图

泵间隔时间较之前出现明显缩短的情况。通过计算机监控系统查询,2020年之前机组带稳定负荷的情况下压力,油罐油泵启动时间间隔为8h左右,2020年之后机组带稳定负荷的情况下,油压装置油泵启动间隔缩短为6h左右。在此期间,对机组调速系统管路接口、油压装置阀组逐个排查,均未见明显的泄露点,证明压力油罐启泵时间缩短不是因为外部管路泄露所致。查阅调速器系统设计图纸,认真研究、分析,结合排查结果,推断是接力器活塞与缸体间密封存在渗漏,导致接力器开腔与关腔串油,机组带稳定负荷情况下开腔压力油不断泄露至关腔,进一步通过回油管到回油箱,使压力油罐油压不断降低,从而引起油泵启动间隔缩短<sup>[1-2]</sup>。2022年至2023年,2、4号机组A级检修期间,对机组接力器进行解体、检查,检查结果进一步证实了上述推断<sup>[3]</sup>。

### 2.1 2号机组接力器出现“拉缸”现象致使开关腔串油

2022年11月,2号机组A级检修期间,将接力器解体、检查后,发现水轮机2套接力器活塞缸与活塞接触面圆周方向均发生严重拉伤,不带锁锭侧接力器缸体和活塞拉伤最严重的地方深度在1mm以上,缸体拉伤最严重处长度约为1040mm,带锁锭侧接力器缸体和活塞拉伤最严重的地方深度在0.5mm左右,缸体拉伤最严

重处长度约为400mm。同时缸体内有较多颗粒杂质,接力器活塞、缸体拉伤照片见图2。接力器“拉缸”出现后,导致活塞与缸体间密封不严,从而引起接力器开腔与关腔串油。

### 2.2 4号机组接力器缸体呈现“鼓状”变形致使开关腔串油

2023年3月,4号机组在A级检修期间,将接力器解体、检查后,发现接力器缸体内壁磨损较大,缸体内壁直径实际测量尺寸较设计值变大,呈现“鼓状”变形(即中间大,两头小的形状),且缸体不同端面变形大小也不一样,活塞外径尺寸变化较小,4号机组接力器解体检查记录见表1。缸体与活塞配合间隙发生变化,密封间隙增大,开口铸铁环自身弹性不足以补偿磨损变形,从而使接力器开腔与关腔发生串油。

## 3 接力器腔体间窜油的原因分析

针对2号机组接力器“拉缸”及4号机组接力器缸体呈现“鼓状”变形的现象,从密封结构形式、密封原理以及工作环境出发,对形成上述现象的原因进行剖析。

该电厂接力器采用的活塞铸铁环密封结构属于传统的密封结构形式,主要借鉴了古老的蒸汽机、内燃机的气缸与活塞的传统密封原件<sup>[4-5]</sup>,该密封结构形式在上世纪80年代以前使用较多。方形截面的开口弹性铸铁环设置在活塞外圆密封



图 2 接力器活塞、缸体拉伤照片

表 1 4 号机组接力器解体检查记录表

名称	不带锁锭侧		带锁锭侧	
	设计值 /mm	实测值 /mm	设计值 /mm	实测值 /mm
缸体内径	$\phi 650_{0}^{+0.080}$	$\phi 651_{+0.070}^{+0.250}$	$\phi 650_{0}^{+0.080}$	$\phi 651_{0}^{+0.300}$
活塞外径	$\phi 650_{-0.074}^{-0.024}$	$\phi 650_{-0.110}^{-0.070}$	$\phi 650_{-0.074}^{-0.024}$	$\phi 650_{-0.150}^{-0.100}$

槽内,每个活塞铸铁环的开口均要求错位安装。活塞与缸体间的密封主要依靠活塞环自身的弹性以及液压透平油产生的径向压力作用于方形铸铁环,使铸铁环紧贴缸内壁,从而实现密封效果。铸铁环材质本身具有较强硬度,接力器工作时铸铁环与缸体始终保持紧密贴合的状态,在长期往复运动的过程中,在摩擦力的作用下铸铁环和缸体就出现了磨损,磨损经历量变达到质变的过程,最终导致缸体呈现“鼓状”变形,从而引起开腔与关腔串油。另外,铸铁环与缸体紧密贴合的工作过程要求工作油质必须优良,如果透平油中出现铁屑等硬质杂质,一旦进入到铸铁环与缸体壁的贴合面间,往复运动的过程就会导致缸体壁被拉毛,一旦“毛刺”在缸体内壁形成,随着接力器的继续工作,毛刺会越积越大,最终呈现“拉缸”现象<sup>[6]</sup>。

综上所述,出现接力器“拉缸”及缸体“鼓状”变形均是因活塞铸铁环密封结构不合理所致,要解决串油问题应从密封结构入手。

## 4 应对措施探索

### 4.1 密封结构现状分析

活塞铸铁环密封结构在实际应用中,存在漏油量大、制造工艺复杂、制作难度大和废品率高

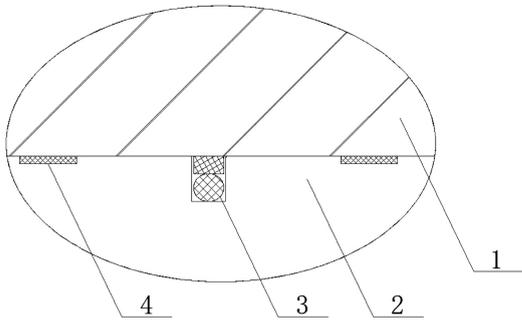
40%以上等缺点,且新建电厂接力器已不再使用该密封结构,表明活塞铸铁环密封结构已不再适用。目前活塞与缸体间往复运动的动密封结构形式主要有<sup>[7-10]</sup>:O型密封圈密封、Y型密封圈密封和组合式密封。

O型圈密封是一种挤压型密封,主要依靠密封件的弹性变形,在密封接触面上形成接触力,从而实现密封效果,密封原理简单;但活塞与缸体往复运动时,液压油很容易进入到O型密封圈与缸体内壁的接触面,发生黏附及泄漏。Y型密封圈依靠张开的唇边贴于密封耦合面,无压工作时依靠唇尖产生的变形形成很小的接触力实现密封;有压工作时,受内压作用,Y型密封圈底部受到轴向压缩,唇部受到周向压缩,唇与密封面接触变宽,接触压力变大,从而更好地实现密封效果。Y型密封圈对偏心荷载的适应性较弱,同时对接触面的加工粗糙度以及液压油质要求较高,很容易造成损伤从而发生泄漏。组合密封一般由两个导向环、两个挡圈、一个弹性橡胶圈组成。导向环起定位与导向的作用,挡圈起支撑的作用,弹性橡胶圈起提供预紧力和补偿磨损的作用,组合密封具有双向密封的特点。

### 4.2 密封结构优化设计

针对上述活塞与缸体间动密封的结构形式、密封特点分析,结合组合密封的优点,同时翻阅西欧近年来工程液压产品设计资料,发现其在传统的组合密封基础上进行了适当改进,采用工程塑料方形滑动环和弹性O形橡胶圈构成组合密封,组合密封结构见图3,以适用低速度、大直径工作环境下的接力器活塞密封。O形橡胶圈受压变形

产生弹力,迫使滑动环紧贴缸体内壁,从而实现密封。活塞往复运动时,组合密封受压侧发生水平移动,高压液体进入密封槽内,使组合密封靠紧密封槽一侧,在液压的作用下滑动环贴紧缸体内壁的程度加剧,密封效果更好。往复运动过程中,方形滑动环可始终保持在密封槽内,保证密封的可靠性;且滑动环材料为工程塑料,与缸体内壁摩擦也不会造成缸体磨损,O形弹性橡胶条随时可对滑动环磨损进行补偿,提高组合密封使用寿命;组合密封可以实现长寿命、零泄露。



1.缸体;2.活塞;3.组合密封;4.导向环。

图3 组合密封结构图

#### 4.3 组合密封的实践应用

查阅近年来国内在建水轮发电机组设计图纸,该组合式密封已经在国内多个电厂投入实践应用,如乌东德、白鹤滩等电厂接力器均采用组合式密封结构,运行过程中密封效果优良,接力器工作可靠、稳定。该电厂于2023年A级检修期间,将4号机组接力器返厂进行活塞密封优化改造,采用组合密封结构。将原“鼓状”变形缸体重新进行机加工,技术要求包含:缸体内壁同轴度不大于0.05 mm,内壁粗糙度不大于 $0.8\ \mu\text{m}$ ,活塞更换为与加工后的缸体尺寸相适应的新活塞,并在新活塞上加工组合密封需要的密封槽;整体组装后进行压力试验及动作试验,活塞动作灵活,压力试验检查漏油量为零,密封优良,各项技术指标均符合规范要求。自2023年5月投运至今,改造后的接力器运行可靠,油压装置油泵启动时间间隔恢复至8 h左右,解决了接力器串油的问题。鉴于组合式密封优良的工作性能以及4号机组成功的改造经验,后续利用机组A级检修的机会,对1、2、3号机组接力器密封结构进行逐台优化升级,从而彻底解决接力器串油的难题。

## 5 结 语

笔者从油压装置油泵启动频繁的表象入手,深入分析、研究后得出接力器缸体与活塞间存在串油的结论。对原接力器缸体与活塞密封结构形式分析、论证,认为该设计结构存在不合理性。随着技术的迭代更新,充分研究当前接力器活塞密封技术,分析并论证O型密封、Y型密封及组合式密封密封机理以及各自存在的优缺点,结合现场实际最终选择了组合式密封,通过水轮机组A级检修进行了实践应用,解决了接力器缸体与活塞间的串油问题。对新技术需要勇于探索与实践应用,不断完善水轮发电机组机电设备,提高设备的安全、可靠性,为整个水电厂的安全、可靠运行奠定基础。

#### 参考文献:

- [1] 徐有为. 调速器油泵频繁启动分析及处理方案[J]. 云南水力发电, 2022, 38(增刊1): 38-39, 65.
- [2] 王新乐, 荣红. 水电机组调速系统油压装置频繁启泵问题分析处理[J]. 云南水力发电, 2013(4): 141-144.
- [3] 田维坤, 李军, 周玉安, 等. 大型水电站接力器现场解体操作法[J]. 云南水力发电, 2020, 36(8): 204-207.
- [4] 颜丽红. 水轮机接力器活塞密封型式的选择分析[J]. 黑龙江信息科技, 2007(19): 6.
- [5] 刘清勇, 帅秀莲, 王春雷. 高效节能的水轮机接力器活塞密封结构的技术分析[J]. 黑龙江电力, 2010, 32(4): 278-280, 283.
- [6] 马加娇, 丁文华, 王选凡, 等. 糯扎渡电厂调速器接力器活塞杆损伤的处理与分析[J]. 云南水力发电, 2018, 34(6): 153-155.
- [7] 叶定奇. 组合密封在活塞密封中的应用[J]. 机械管理开发, 2013, 2(2): 91-92.
- [8] 但唐强, 顾进. 水轮机接力器活塞缸组合密封更换[J]. 机械与电子, 2013, 22(2): 183-184.
- [9] 付鹏. 往复泵活塞导向环的设计[J]. 中国新技术新产品, 2016(18): 36-36, 37.
- [10] 刘观华. 液压缸的密封结构[J]. 液压气动与密封, 2008, 28(2): 9-12.

#### 作者简介:

- 邵飞燕(1988-),男,四川达州人,工程师,工学学士,从事水轮发电机组检修与维护研究工作;  
方戊强(1990-),男,河南开封人,工程师,工学学士,从事水轮发电机组检修与维护研究工作;  
陈世程(1984-),男,四川成都人,工程师,本科,从事水轮发电机组检修与维护研究工作。

(编辑:吴永红)