

# 巴拉水电站水轮机筒形阀全数字集成式 电液控制系统方案对比研究

周卫, 王超凡, 杨书

(四川足木足河流域水电开发有限公司, 四川 成都 610041)

**摘要:**巴拉水电站水轮发电机组具有单机容量大、运行水头高、河道水流中泥沙含量高等特点。由于蝶阀的性能限制(如受流体压力影响较大、阀门尺寸较大等),综合考虑各种相关因素,该电站选择筒形阀为电站主控阀。通过对比研究,以全数字集成式电液控制系统为基础研究开发筒形阀控制系统,通过离合器和链条传动实现筒形阀机械液压联动功能。该方案在各种工作条件下的性能,包括启闭时间、密封性能、阀门稳定性都优于其他方案。本研究为未来水电站的筒形阀控制系统选择提供了重要的参考资料,具有一定借鉴意义。

**关键词:**巴拉水电站;水轮机;筒形阀;控制方案

**中图分类号:**[TM622];[TV734.1];TV732.7

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-2184(2023)05-0116-05

## Comparative Research of the Fully Digital Integrated Electrohydraulic Control System for the Barrel Valve of the Water Turbine at Bala Hydropower Station

ZHOU Wei, WANG Chaofan, YANG Shu

(Sichuan Zumuzu River Basin Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610041)

**Abstract:** The turbine units of Bala Hydropower Station have the characteristics of large single unit capacity, high operating head and high sediment content in the river flow. Due to the performance limitations of butterfly valves and butterfly valves (such as being greatly affected by fluid pressure and valve size), and taking into account various relevant factors, the barrel valve is selected as the main control valve of the Bala hydropower station. This article conducts comparative research and develops a barrel valve control system based on a fully digital integrated electrohydraulic control system. The mechanical hydraulic linkage function of the barrel valve is achieved through clutch and chain transmission. The performance of this scheme under various working conditions, including opening and closing time, sealing performance, and valve stability, is superior to other schemes. This study provides important reference for the selection of barrel valve control systems in the future hydropower stations, and has certain reference significance.

**Key words:** Bala Hydropower Station; Water turbine; Barrel valve; Control plan

## 0 引言

水电站是以水力发电为主要目标的重要设施,其设计和运行对于能源生产和地区电网的稳定性至关重要。传统水电站通常采用蝶阀和球阀作为主要的控制阀,这两类阀在各自的适用范围内都向高压、大尺寸方向发展,但由于蝶阀的一些性能限制(比如受流体压力影响较大、阀门尺寸较大等),其在一些特定应用中可能并不是最佳选择。而对于多泥沙河流、蜗壳进口直径超过 6.0 m、最大水头超过 250.0 m 的大容量水轮机,可以

优先使用筒形阀作为水电站的主控阀。

水轮机筒形阀是一个安装于活动导叶和固定导叶之间的薄壁筒形结构部件。其主要功能是保护混流式水轮机的导水机构,消除导叶关闭位置因导叶漏水而造成的间隙空蚀损坏和磨损,能在紧急工况下,快速、可靠、安全地切断水轮机进水,保护水轮发电机组。随着技术的发展和需求的变化,水轮机筒形阀由于其具有自关闭能力、水力损失基本为零、能有效地保护导水机构、防止机组飞逸,且不需专门布设位置,从而具有不占用厂房空间、投资小等诸多优势,被国内、外许多电站选择

收稿日期:2023-08-28

使用<sup>[1]</sup>。

## 1 项目概况

巴拉水电站位于四川省阿坝藏族羌族自治州马尔康市日部乡境内,系大渡河干流水电规划“3库28级”中的主源——脚木足河河段自上而下的第2梯级水电站,上接下尔呷“龙头”水库电站,下衔接维梯级水电站。坝址位于日部吊桥上上游约10 km,厂址距下游日部吊桥约3.9 km,坝址多年平均流量 $188\text{ m}^3/\text{s}$ ,最大风速 $22\text{ m/s}$ 。水库正常蓄水位 $2\,920.00\text{ m}$ ,日调节消落水位 $2\,918.00\text{ m}$ ,死水位 $2\,915.00\text{ m}$ ,调节库容 $1\,627\text{ 万 m}^3$ ,具日调节能力。

电站装有3台240 MW水轮发电机组,水轮机为立轴混流式,水轮发电机组为半伞式,另有1台26 MW生态机组,总装机容量746 MW,多年平均发电量 $25.528/29.914\text{ 亿 kW}\cdot\text{h}$ (单独/联合)。电站采用混合式开发,主要任务为发电,同时兼顾下游生态环境用水要求,此外,无其他综合用水要求。电站建成后为四川电网供电。

## 2 筒形阀的优缺点

### 2.1 筒形阀的优点

(1)对运行水头高,机组尺寸大,压力钢管直径较大,长度很长的大中型机组,不宜布置蝶阀和球阀。如果导水机构发生意外故障需停机,只能投入事故快速闸门,在关闭闸门的过程中仍有高压水,且压力钢管直径较大,长度很长,有可能使事故扩大,而采用筒形阀后,由于动作灵活,所以能更好地保护机组。

(2)厂房控制尺寸小,不单独设阀室及阀门专用起吊设备,节省了土建工程量。配置筒形阀对水轮机外形尺寸增大十分有限。

(3)筒形阀过流部件基本上没有水力损失。机组正常运行时,筒形阀的筒体缩入座环与顶盖的空腔内,下端与顶盖过流面齐平,不会阻碍水流。筒形阀动水关闭时,水流的扰动程度没有蝶阀和球阀那么严重,水轮机的固定和转动部件所承受的动载荷都较小。

(4)阀体可以分瓣,基本不受运输条件的限制,尺寸可以做得比较大。

(5)重量相对轻。因为筒形阀的阀腔依托于座环与顶盖,由于结构的需要,座环、顶盖等尺寸有些变化,导致水轮机重量略有增加,但也增

加了顶盖与座环的结构刚度,有利于大型机组的稳定性。

(6)筒形阀关闭时,自关闭和油压装置提供的压力使筒形阀压紧座环与顶盖上的密封橡胶条,保证了密封的可靠性,漏水量极少,从而减少导水叶的漏水量,减少库容的流失。特别是中高水头,泥沙含量大的水电站,活动导叶关闭时,漏水量较大、水流射速高,极易造成导叶的泥沙磨损与间隙气蚀,设置了筒形阀可以有效地保护水导叶。

(7)提高了电站运行的灵活性。筒形阀的投入比事故快速闸门的投入要迅速,也比蝶阀和球阀的投入要简单。筒形阀可以直接开启,不需要象球阀、蝶阀那样要先经过旁通阀平压,所以启动速度快,一般筒阀启、闭时间均不超过 $60\text{ s}$ <sup>[2]</sup>。

### 2.2 筒形阀的缺点

(1)生产厂家的制造难度加大,目前有些零部件尚需进口,水轮机的造价也相应增加,筒形阀的价格约占水轮机造价的10%;安装单位的安装难度加大,水轮机的安装时间相应延长。

(2)筒形阀只能当事故闸门用,不能当作检修闸门,只适用于单管单机的电站。

(3)由于筒体靠近活动导叶,所以当有较长异物(如钢筋、长形木条)卡住活动导叶时,筒体下落关闭时亦容易卡住筒体,使之不能关闭,从而不能很好地保护机组。

(4)机组装置筒形阀后,流道进口是否安装快速闸门,仍处于探讨中,不少水机专家认为安装筒形阀后,已达到保护机组的目的,剩下流道的保护问题,由水工专业来考虑,所以是否安装快速闸门这个问题应由水工决定。若不安装快速闸门,则设事故检修闸门是必要的。

(5)目前,国家尚无筒形阀的设计、制造和安装等方面的标准规范。制造、设计及安装的经验较少<sup>[2]</sup>。

## 3 筒形阀全数字集成式电液控制系统方案

为了充分发挥筒形阀在水电站中的性能优势,我们需要一种精细的控制系统来确保其正确和高效的操作。对此,我们提出了三种不同的控制方案,并对其进行了深入的研究和比较。

### 3.1 方案一:筒形阀全数字集成式电液控制系统

筒形阀全数字集成式电液控制系统代表着东方电机厂筒形阀控制技术的先进水平,具有以下

显著优点:

(1) 数字缸将原来复杂的速度控制和位置控制,变成了简单的数字脉冲控制,简化了控制系统,提高了响应速度、控制精度与同步水平,实现了控制原理简单化、数字化。

(2) 所有元件装在接力器内部,抗干扰能力强,大幅提高了系统的安全性和可靠性,实现了集成化。

(3) 数字缸的量化系数是由设计保证的,他与零部件加工和装配无关。也就是说,数字缸提升杆移动位移的精度、误差由设计决定的,与零部件加工、装配无关;同时在提升杆移动过程中,没有累计误差,实现了液压数字化。

(4) 安装方便,每个接力器都可单独手动机械、电气调节,有利于安装、调试、维护,为安装调试和导向间隙的修磨提供了有力的帮助。

(5) 调试容易,几乎可以做到零调试。

(6) 维护简单,几乎免维护。

(7) 操作运行方便、简单,实现了操作和维护人性化。

(8) 即使系统压力油源消失,也可保持筒形阀位置长期锁定不变<sup>[3]</sup>。

全数字集成式电液控制系统于 2009 年 7 月首次在浙江滩坑电站成功投运,后面陆续在锦屏一级、溪洛渡右岸、苗尾、黄登等电站成功应用,得到用户高度赞扬和肯定。但是,全数字集成式电液控制系统满足不了与纯机械液压超速保护装置直接液压联动的需求。为确保该方案在考虑极端掉电情况下的可靠性,本方案拟采取如下方法实现保护:当机组发生飞逸时,纯机械超速保护装置动作,其动作的电气信号接入全数字集成式电液控制系统,启动筒形阀事故关闭功能,保证了筒形阀的可靠关闭。

为了保证全数字集成式电液控制系统在任何工况下的可靠运行,系统电源采用多重冗余结构。

(1) 柜内控制电源(DC24 V),采用双电源切换模块,其中一路直流电源来自全厂直流系统,经电源转换装置,形成第 1 路 DC24 V 电源;另一路交流电源来自柜体内部的 UPS 不间断电源,经另一个电源转换装置,形成第 2 路 DC24 V 电源。2 路 DC24 V 电源互为热备用,保证了控制电源的可靠性。

(2) 液压控制器电源(AC220 V),外部两路 AC220 V 电源通过交流双电源自动切换装置+柜内 UPS 不间断电源进行供电。其中一路电源来自全厂 UPS 电源,另一路来自厂用电系统。柜内 UPS 电源配置有蓄电池,蓄电池容量能保证筒形阀在外供 AC220 V 电源消失时可靠工作时间  $\geq 1$  h(连续开启、关闭筒形阀 10 次以上)。能够保证在任何情况下液压控制器电源的可靠性。

(3) 所有电源装置(包括蓄电池),均配置有状态监测,能实时对各路电源状态进行监视。当出现电源丢失或者故障时,能及时发出报警,提醒运维人员进行处理。

除了电源采用冗余配置以外,控制系统 CPU 也采用双重配置。正常运行时,两个 CPU 互为主备,实时同步运行。当其中一路发生异常或故障时,自动无扰地切换到另一个 CPU,避免单 CPU 发生故障影响筒形阀控制系统功能。因此,全数字集成式电液控制系统是安全、可靠的,能够保证各类状态下的正常工作,即使在异常状态下,筒形阀也可安全、可靠地关闭,如机组超速、全厂失电、单 CPU 故障,都能确保电站的安全运行<sup>[4]</sup>。

### 3.2 方案二:以全数字集成式电液控制系统为基础研究开发增加机械液压联动功能

在原全数字集成式筒形阀电液控制系统的基础上,增加切换阀组、同步马达组以及掉电关闭阀组等设备。当机械超速保护装置动作后,机械超速保护装置的机动阀输出油由压力油变为接通回油,经过掉电关闭阀组控制切换阀组换向,切换阀组将原数字缸输出的油路截断,同时将接力器的上腔接通压力油,接力器的下腔接通同步马达,通过同步马达回油。由于六个同步马达同轴机械串联在一起,转速相同,排量相同,可以使六个接力器下腔输出的油量相同,使接力器同步向下关闭运动<sup>[5]</sup>。

#### 3.2.1 控制联动逻辑

(1) 在机械超速保护动作且电源全部故障的情况下,只需应用油压装置压力油箱的液压油和阀组的自动切换,不需其余的控制命令即可启动关闭流程,在原系统的基础上增加了一道保护。

(2) 在机械超速保护动作后,掉电关闭阀组可以进行选择,有电源保证的情况下,仍然应用数字缸进行关闭,有同步精度保证,仅在机械过

速保护动作且电源全部故障的情况下才应用同步马达关闭。

(3)由于同步马达仅用于机械超速保护动作后才应用,每次应用前,六个接力器的位置精度有保证,不会因积累误差造成较大的偏差;(这个方案对于其他公司的同步马达式筒形阀控制系统在纯机械超速保护关闭时的精度要高,但不能保证偏差不超过极限值)

(4)如果电源故障恢复,在关闭过程中,仍能切换回数字缸关闭模式。

### 3.2.2 相对于方案一的改动部分

(1)该方案需增加一套掉电保护阀组,六个同步马达,六套切换阀组,需要增加一定的成本。

(2)掉电保护阀组与同步马达装配在一起,布置在机坑壁内部(或外部),安装空间尺寸约为 $1\ 500\text{ mm}\times 500\text{ mm}\times 500\text{ mm}$ 。

(3)机坑内部预计需要增加三根 DN25 控制油管。

### 3.2.3 本方案潜在风险

(1)纯机械液压联动时,没有精调功能,在关闭的过程中可能发卡。

(2)纯机械液压联动时,如果其中一个数字缸退出失败,将导致该数字缸损坏。

(3)相对于全数字集成式电液控制系统,本方案增加阀组、同步马达及控制油管路,增加了系统发生故障的风险点。

(4)本方案需先进行研发,并在厂内验证后才能应用,需要研发和试验周期。

## 3.3 方案三:以全数字集成式电液控制系统为基础研究开发通过离合器和链条传动实现机械液压联动功能

运行整套控制方案的主要思路是:在原全数字集成式电液控制系统的基础上,在每个接力器的顶部加装一个链轮和链条,将数字液压缸旋转轴与链轮做同轴连接,六个接力器顶部链轮用链条串联起来,实现机构的同步。当机械超速保护动作时,通过液压马达作动力源,主动链轮  $CW_{07}$  带动六个链轮旋转,从而使六个数字缸旋转轴同步运行,驱动筒形阀关闭。为了保证在正常运行情况下,链轮链条机构不影响数字液压缸的工作状态,在数字缸旋转轴和链轮之间加装一个气压离合器。正常状态下,离合器分离;当超速保护动

作时,离合器吸合。

### 3.3.1 控制联动逻辑

(1)在机械超速保护动作的情况下,只需应用油压装置压力油罐内的液压油以及电站的低压气源,不需其余的控制命令即可启动筒形阀关闭流程,实现筒形阀控制系统与机械超速保护装置的液压联动功能。

(2)正常情况下,六个离合器均处于分离状态。离合器下端轴随液压缸旋转轴自由旋转,上端轴静止,链轮和链条静止,此时筒形阀的开启和关闭操作由 PLC 控制步进电机来实现。

(3)当机械超速保护装置动作时,首先通过超速保护装置的辅助触点切断六个步进电机的驱动电源;来自机械超速保护装置的液压油通过执行机构  $HA_{01}$  使机控阀  $MV_{01}$  换向,控制气源同时作用于六个气压离合器  $PC_{01}\sim PC_{06}$ ,使离合器处于可靠吸合状态,链轮  $CW_{01}\sim CW_{07}$  与液压缸旋转轴同步旋转。同时,来自机械超速保护装置的液压油持续驱动液压马达  $HM_{01}$  旋转,液压马达  $HM_{01}$  带动主动链轮  $CW_{07}$  从动链轮  $CW_{01}\sim CW_{06}$  同步旋转,从而使六个接力器同步关闭。

(4)当筒形阀到达全关位置后,若液压马达  $HM_{01}$  持续驱动链轮旋转可能导致液压缸内的机构损坏,造成损失。为了避免这种情况发生,在液压马达输出轴与链轮之间设置扭矩限制器  $TL_{01}$ ,液压回路设置电磁阀  $EV_{01}$ 。当筒形阀到达全关位置后,液压马达  $HM_{01}$  的输出扭矩变大,扭矩限制器  $TL_{01}$  的主动轴和从动轴脱扣,使动力无法传到主动链轮  $CW_{07}$  上,从而使筒形阀停止关闭运动;同时,扭矩限制器  $TL_{01}$  或者筒形阀接力器动作后的辅助位置反馈触点使电磁阀  $EV_{01}$  得电切换阀位,切断来自机械超速保护装置的液压油以及控制气源,从而实现保护功能。

(5)当筒形阀在上述紧急关闭过程中出现卡阻情况,液压马达输出轴的转矩同样会增大,扭矩限制器将脱扣,使筒形阀保持在原有位置不动,从而起到保护作用<sup>[6]</sup>。

### 3.3.2 相对于方案一的改动部分

(1)该方案需增加一套链轮(含链条)机构,六个气动离合器,一个扭矩限制器,一个液压马达,一个电磁阀,一个机控阀和一个液压执行器。

(2)主动链轮安装在 3、4 号接力器之间,与其



他六个链轮处于同一水平面,液压马达、扭矩限制器和主动链轮同轴安装。该部分设备的大致安装空间尺寸为 800 mm×400 mm×400 mm。

(3)机坑内部需增加一根低压气源环管以及到六个气动离合器的分支气管。

(4)上述增加的设备导致每台机组需要增加一定的成本。

### 3.3.3 方案的潜在风险

(1)本方案需先进行研发,并在厂内试验验证后才能应用,需要研发和试验周期。

(2)增加的气动离合器、链轮链条机构、控制阀以及管路等设备将导致故障风险点增多。

(3)由于链轮链条的加工精度误差、链轮与链条的装配误差等因素,可能使接力器的同步关闭精度造成一定的偏差,导致筒形阀关闭一段行程后卡死而不能顺利完全关闭。

### 3.3.4 风险应对策略

(1)当过速保护装置动作后紧急关闭筒形阀时,若筒形阀出现卡阻情况,扭矩限制器会及时切断液压马达的输出动力,同时截断来自机械过速保护装置的壓力油,保护筒形阀系统。

(2)理论上链传动方案的同步精度相对于油马达方案要高,运行更加平稳。

## 4 筒形阀全数字集成式电液控制系统方案的试验与验证

为了验证设计方案正确性,在实验室和现场都进行了系列的试验。主要检测了筒形阀在各种工作条件下的性能,包括启闭时间、密封性能和阀门稳定性,并对三种控制方案的性能进行比较发现,虽然各种方案在某些方面存在一些问题,但总体上都能满足筒形阀在水电站中的运行要求。

## 5 结语

通过对筒形阀和其控制系统的深入研究,得出以下结论:(1)筒形阀确实有很多优点,比如结构紧凑、操作平稳、密封性好等,适合在特定应用中取代蝶阀;(2)虽然筒形阀的控制系统设计相对复杂,但我们提出的三种控制方案都能有效地解决这个问题;(3)试验结果也验证了设计方案的正确性,显示出筒形阀在水电站中的巨大潜力。

结合巴拉水电站的实际情况,巴拉水电站目前选用的第三个方案,以全数字集成式电液控制系统为基础研究开发,通过离合器和链条传动实现机械液压联动功能作为筒形阀的控制系统。这项研究为未来水电站的筒形阀控制系统的选择提供了重要的参考资料,但还需要在巴拉水电站投运后进一步验证和完善。

### 参考文献:

- [1] 刘功梅,曾镇岭.大型水轮机筒形阀近年来的应用浅析[J].水电站机电技术,2015,38(2):75-77.
- [2] 梁玉福.水轮机筒形阀[J].红水河,2003,(2):54-57.
- [3] 权君宗.筒形阀全数字集成式电液控制系统[R].四川德阳:东方电气集团东方电机有限公司,2010.
- [4] 权君宗.全数字集成式筒形阀电液同步控制系统[R].四川德阳:东方电气集团东方电机有限公司,2009.
- [5] 杨秀伟,毛羽波.新型筒形阀控制系统的设计方法[J].大电机技术,2013,(1):44-47.
- [6] 葛洪康,唐伯蓉.论筒形阀的操作控制方式[J].四川水力发电,2004,(4):63-65.
- [7] 张帅.双江口水电站水轮机筒形阀设置可行性研究[J].人民长江,2015,46(18):20-23.

### 作者简介:

- 周 卫(1969-),男,湖北武汉人,工程师,大专,从事水电站机电安装和水电站机组检修等工作;
- 王超凡(1997-),男,四川内江人,助理工程师,学士,从事水电站机组安装工作;
- 杨 书(1983-),男,成都都江堰人,高级工程师,学士,从事水电站机电安装、水电站机组检修等工作。

(责任编辑:卓政昌)

## 沙湾水电站设施修缮工程进展顺利

2023年10月8日,沙湾水电站设施修缮工程厂房外墙通过施工验收,整体形象焕然一新,沙湾水电站自建设投产运营以来,多数设施装饰老化陈旧,为保障电站机组设备正常运行,消除安全隐患,本次设施修缮工程自6月1日开工以来,严控全流程质量、安全监管,抓实墙面重点区域开裂、渗水、起层脱落等施工工艺,克服高空、高温、临河、临高压、机组设备防护等困难,严格专项方案审查,及时协调解决现场施工难题,确保各项施工顺利开展。下一步,公司将继续紧盯“大坝安全再提升”的年度目标,以更高标准、更严要求、更实举措,推动修缮工程高质量建设,为绿色清洁能源标杆电站转型升级提供有力支撑。

(摘自中电建水电开发集团有限公司官网)