

# 智能制动系统在水电站卷扬式启闭机上的应用

盛国超 费会新 刘强

长沙三占惯性制动有限公司 长沙 410205

**摘要:**针对水电站事故快速闸门卷扬式启闭机性能特点及存在的问题,提出合理的解决方案,科学选型设计制动器、摩擦材料及电控系统与系统控制功能,还通过现场实际工况试验来验证设计,安全可靠地解决设备相关问题。

**Abstract:** In view of the performance characteristics and existing problems of the winch hoist for the emergency rapid operating gate of hydropower station, a reasonable solution is proposed, and the brakes and friction are scientifically selected and designed. The materials, electronic control system and system control function are also verified by actual on-site working condition tests to safely and reliably solve equipment-related problems.

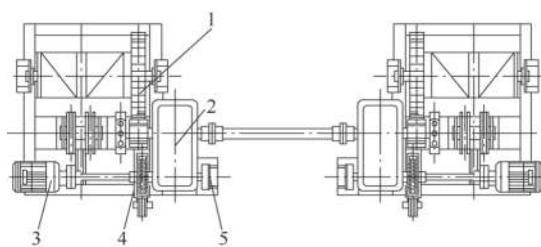
**关键词:** 卷扬式启闭机; 快速闸门; 断电; 制动系统

**Key words:** winch hoist; rapid operating gate; outage; braking system

中图分类号:TV664<sup>+</sup>.3 文献标识码:A 文章编号:1001-0785(2018)10-0104-04

## 0 引言

国内某水电站装有2台单机40 MW的立轴半伞式水轮发电机组,总装机容量80 MW。坝上装有4扇潜孔定轮式事故快速闸门,每两扇事故快速闸门截断一台水轮发电机组水流。闸门底坎高程80.16 m,孔口尺寸为6.4 m×10.8 m(宽×高),设计水头34.84 m(至底坎),在设计时为动闭静启,满足在事故情况下4扇门同时动水关闭。每扇事故快速闸门升降门操作由一台QPK-2×630/2×500型固定卷扬式双吊点启闭机控制,此类设备是我国中小型水电站和水利工程中广泛应用的带离心飞摆调速器的卷扬式快速闸门启闭机,其结构形式见图1。



1. 开式齿轮 2. 减速器 3. 电动机 4. 制动器  
5. 离心飞摆调速器

图1 结构形式

## 1 设备现况及问题

### 1.1 设备基本参数

闸门质量	50 t
闸门行程	11 m
流速	1.5 m/s
驱动电机功率	2×26 kW
减速器传动比	41.34
开式齿轮传动比	4.5
卷筒直径	603 mm
钢丝绳倍率	4倍/16绳
吊钩	2组
离心飞摆调速器	2台
鼓式制动器数量	2台
额定制动力矩	500 N·m
制动轮直径	300 mm

该水电站启闭机升降闸门的控制方式:

1) 事故快速闸门的正常升降由启闭机的电动机带动。

2) 事故状态下快速关闭快速闸门时,松开制动器后快速闸门以自由落体速度下降关门(驱动电机不工作),闸门下降的速度由传动轴上的离心飞摆调速器控制(靠飞摆离心力来减速刹车)。

## 1.2 存在的问题

1) 现有的制动器采用交流电磁鼓式制动器，在断电状态下无法保证制动器正常打开，一旦出现水轮发电机组事故导致电站失电状况，会导致快速降门功能失效，将引发不能预估的事故发生，存在着严重的安全隐患。

2) 快速降门速度靠离心飞摆调速器产生的摩擦阻尼力矩去平衡闸门自由落体时的地心引力，该平衡力会因调速器自身设计和速度原因产生变化，从而导致降门速度偏差较大和反复振荡。当降门速度较低时，会使得截流速度慢，水轮机组的紧急停车时间增长，可能造成机组损坏的飞逸事故；当降门速度过高时，启闭机超速运行，则容易砸坏闸门和底坎。

3) 离心飞摆调速器制动片的摩擦因数会随闸门下落急剧摩擦发热、温度升高而减小，导致摩擦阻尼力矩下降并引发平衡力矩下降，使得降门速度随闸门下降而急剧增大。

4) 离心飞摆调速器工作时的飞球质量和起动弹簧压力在实际工程运用中难以确定且调试麻烦。

5) 电控系统对事故状态下闸门快降全过程无任何监控，一旦闸门快降失速将导致闸门完全失控从而酿成重大事故。

## 2 系统总体设计

针对启闭机存在的相关问题研发一种断电可控落门智能制动系统，该制动系统包含4台制动器、1套电控系统和相关附件。每套电控系统控制2扇事故快速闸门卷扬式启闭机上的4台制动器。将原8台交流电磁制动器全部更换，鉴于启闭机上用的离心飞摆调速器存在隐患，因此取消离心飞摆调速器，仅由制动器来实现闸门升降和事故快降过程中的制动功能。

在正常升降闸门时制动器仅用于减速制动和闸门状态保持；在发生事故需要快速降门时，由电控系统根据设定速度要求自动改变制动器制动力矩大小，制动器受控预松闸促使快速闸门靠自身重力下滑降门，闸门依靠制动器与制动轮连续拖磨消耗下降势能来抑制下降速度，同时电控系统根据采样的闸门速度和高度自动调整制动力矩来限定下降速度，使闸门快降全过程按预设的速度与要求进行快速降门，确保水轮发电机组安全，预

防机组飞逸事故。

## 3 机械选型设计

### 3.1 制动器选型设计

考虑到事故状态下快速闸门下降速度要实现可控，需要通过改变制动器制动力矩来进行闸门下降速度调节控制，故选用一种常闭式变频变力制动器，其工作原理是通过变频来改变PED变频电力液压推动器内电机、油泵转速，来控制推动器内液压缸推力大小，从而实现制动器制动力矩任意调节功能。具体型号为YWK-300/50-BW，其额定制动力矩为530 N·m，略大于启闭机原有制动器制动力矩，完全满足最大制动力矩要求。

### 3.2 摩擦材料选型设计

由启闭机参数得知单张闸门总质量50 t，传动链由三级减速器、开式齿轮减速器和钢丝绳组成，闸门降落总行程11 m。根据制动功计算公式可计算出事故快速闸门在快速下降过程中制动器拖磨制动总制动功为4.5 MJ。考虑到极端状态下单台制动器也要满足闸门快速下降拖磨制动需求，故按每副摩擦材料能满足5 MJ的总制动功来设计。

由计算的总制动功可知在闸门快降连续拖磨过程中会产生对等的热能，将导致制动衬垫和制动轮温度急剧升高，因制动器常用的NAO摩擦材料的热稳定性、耐磨性等均不能满足该制动工况需求，故选用热稳定性好、抗热磨损、不伤对偶件的粉末冶金摩擦材料。此类摩擦材料热稳定性能达到连续热稳定温度600℃，短时热稳定温度900℃，可以满足实际制动工况需求。

## 4 电控系统设计

### 4.1 电源设计

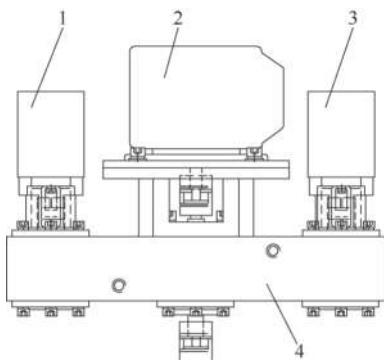
利用现场中控室已有1套直流后备电源，其蓄电池组容量为208 V, 300 AH，用电缆连接到坝顶作为本控制系统的后备电源。在控制系统内将中控室直流后备电源分成两路，一路接入到开关电源内，变换为24 V后作为系统控制电源；另一路进行单相隔离后接入到变频器直流母线上，在变频器交流输入断电后，直流母线将继续保持直流电压输入，从而能够实现断电运行功能。

目前市场上绝大部分单相变频器直流母线欠压阈值在230~240V,而实际中控室内直流后备电源额定电压只有208V远低于欠压阈值,因此,经多次对比分析后最终选定汇川MD280系列单相变频器,其母线阈值标称为200V,最低可调至150V。利用专用惯性试验台进行降压模拟测试发现,在变频器直流母线低至150V时,通过变频器力矩补偿后制动器输出力矩特性仅略有变化,可以满足变频变力制动器运行需求。

#### 4.2 速度及高度测量

原启闭机控制系统内的高度重量综合仪虽自带有编码器,但其仅用于高度测量,不能提供速度信号,且启闭机电控的PLC不具备信号扩展能力,因此本系统设计时为每扇闸门新增加一个具备DP通讯功能的绝对值编码器,来实时监测闸门速度与高度状态。同时为了提高系统可靠性和安全性,还给每扇闸门增加高度限制器一套,提供额外的闸门上极限、全开、全关和下极限信号,进一步增强系统安全冗余。

为了解决原有减速器输出轴仅能安装一个编码器的问题,还用同步带传动新设计一个速比为1:1的分动箱,将原编码器安装轴一分为三,分别安装上原有编码器、新增编码器和高度限制器,从而解决减速机输出轴不够造成的安装问题。其安装结构形式见图2。



1. 新编码器 2. 高度限制器 3. 原编码器 4. 分动箱

图2 安装结构形式

#### 4.3 PLC及通讯组态

电控系统选用西门子S7-1200系列PLC做控制器,PLC组件由CPU模块1412C、DP主站模块CM1243-5、数字IO模块SM1223、数字输入模块SM1221以及模拟

量输出模块SM1232等硬件组成。PLC和绝对值编码器通过PROFIBUS数据总线连接,实时读取编码器编码值,利用PLC程序进行周期计算得出每扇闸门位置状态和升降速度实时信号,以便系统对每扇闸门进行速度与位置监控。为了方便数据设置、报警查询和降门速度曲线记录等,本设计还选用7寸触摸屏用作系统HMI,设计了友好的人机交互界面,实时显示各系统状态和相关数据。硬件通讯组态见图3。

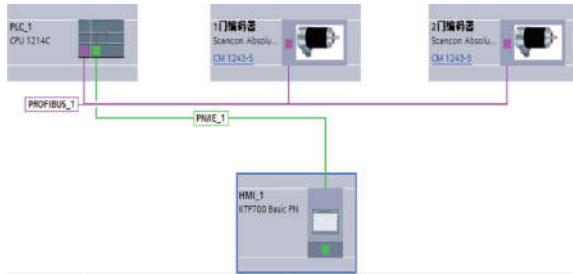


图3 硬件通讯组态

#### 4.4 系统功能设计

事故快速闸门升降门控制分正常升降门、有电快速降门、断电快速降门三种模式,其中正常升降门又有本地操作和中控LCU远程操作状态,快速降门也分中控LCU自动命令和机组紧停命令两种状态。因此,电控系统在电路设计和控制程序设计上主要考虑以下几点:

1) 原有事故快速闸门正常升降门操作方式保持不变,电路上增加启闭机升降动作信号反馈,程序上增加相应的联锁与互锁功能,做到正常升降门时制动器松闸命令一到就立即松闭闸,既不影响正常操作,又可防止误动作和误操作。

2) 保持原有快速降门操作方式不变,将原LCU快降信号用中继扩展后分别接入启闭机原电控柜和本系统内,同时将中控室1、2号机组紧停按钮更换并分别新增一个触点接入本系统,同时为了方便调试和维修还在柜门上新增加一套手动快降旋钮。

3) 控制程序逻辑上设计必要的互锁,并严格按照快降优先模式设计。

4) 每扇闸门对应的2台制动器在执行快降程序前自动依次分配成主、辅制动器,主制动器提供60%以上的制动力,并负责下降过程中的速度调节功能;辅制动器提供剩余制动力,并为主制动器提供备用制动力,

一旦主制动器发生异常，辅制动器要能保证闸门制动，确保闸门及相关设备安全。

5) 闸门快速下降过程中会受到水流、水压和浮力的影响，系统根据编码器换算测量出的速度和高度自动调节、补偿和修正闸门降落速度，其快速降门时调速控制模型见图4。

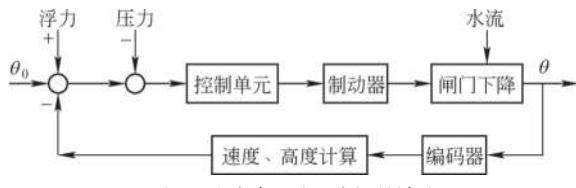


图4 快速降门时调速控制模型

6) 初始设计闸门快降时间限定在3 min以内，即先以4 m/min速度将闸门从11 m高下降至0.5 m减速高度，减速后以2.6 m/min的速度将闸门降至0.2 m预停高度后停止，延时1 s后松开主制动器，辅制动器仅提供微小的制动力矩，让闸门快速冲底确保闸门完全关闭。

7) 系统设置必要的闸门行程到位、超限报警、超限极限保护；闸门正常升降、快降模式下降落速度超限报警、超限极限检测和自动抱闸保护；AC电源、编码器异常、空分合闸、通讯异常和硬件故障检测与保护等功能。

## 5 系统应用与验收

在该水电站1、2号机组制动系统硬件改造完毕后，先分别进行了静水单门落门调试，将相关参数调试完毕后再进行了静水双门同降调试，根据静水调试结果进一步优化和调整相关参数。

在制定了严格的动水试验方案、强化和落实好各项应急预案后，先进行了水轮发电机空载变速门高阈值点试验，数据分析后得出发电机在闸门处于0.4~0.6 m时空载转速不能达到额定转速，即此区间为门高安全区。在试验中还发现动水关门到门高安全区阈值点以下时机组振动较大，据此，将快速落门流程修改为先以4 m/min速度从11 m下降至0.6 m减速高度，减速后再以2 m/min的速度直接降门到门槽底部，达到了既保证闸门快速降落来防止机组飞逸，又减少降门末端水轮室的流态急剧变化引发水锤效应以及抬机等现象，同时还有效

减缓水轮发电机组振动，进一步提高系统稳定性和安全性。

做好各项准备工作后，对2台机组进行40 MW满负荷发电电动水快降验收试验，闸门在预定时间内按预定流程顺利关闭，全过程闸门降门速度无剧烈过冲和振荡现象，制动器未出现异常状况，摩擦材料未出现任何热失效现象，水轮发电机组平稳停机，系统验收取得圆满成功。1号机组40 MW满负荷发电电动水降门速度曲线见图5。

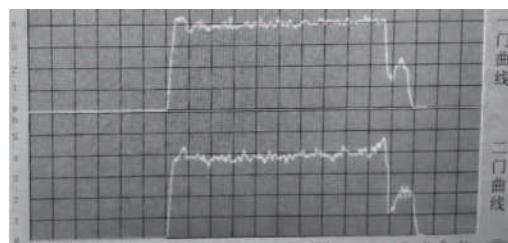


图5 满负荷发电电动水降门速度曲线

## 6 结论

我国目前的中小型水电站和水利工程，大部分使用的是与该水电站类似的卷扬式启闭机，都不同程度的存在着离心飞摆调速器不能满足快降要求、断电不能快速降门、安全冗余低等问题。本文介绍的事故快速闸门卷扬式启闭机断电可控落门智能制动系统有着设计新颖、过程可控、性能可靠、安全冗余高等优点，能够很好地解决事故快速闸门快降相关问题，值得借鉴。

## 参考文献

- [1] 崔坚. 西门子工业网络通讯指南 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [2] 夏德铃, 翁贻方. 自动控制理论 第4版 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [3] NB/T 35051—2015 水电工程启闭机制造安装及验收规范 [S].

~~~~~

作 者: 盛国超

电子邮箱: shengguochao@126.com

收稿日期: 2018-01-06