

# 江苏溧阳抽水蓄能电站 上、下水库进/出水口金属结构吊装技术

陈 林

(中国水利水电第五工程局有限公司,四川 成都 610225)

摘 要:介绍了江苏溧阳抽水蓄能电站上、下水库进/出水口金属结构的布置型式和主要部件采用的吊装方法及工艺。

关键词:溧阳抽水蓄能电站;金属结构;布置型式;吊装方法和工艺

中图分类号:TV7;TV52;TV743;TV547

文献标识码: B

文章编号:1001-2184(2017)03-0040-05

## 1 工程概况

江苏溧阳抽水蓄能电站安装6台单机容量为250 MW的水泵/水轮机电动/发电机组,引水、尾水系统为一管三机布置,在电站上、下水库各布置有两个进/出水口。

上水库进/出水口结构为塔式,进水塔均布8个闸门孔口,设有8套事故检修闸门,每个闸门通过其上方的固定卷扬式启闭机进行启闭。孔口宽6.896 m,孔口高度为7 m,闸门底坎高程为242 m,闸墩塔体平台高程为295 m,闸门门型为平面滑动闸门,钢基铜塑复合滑道支承,利用水柱动水闭门,门顶设有充水阀,用于充水平压后静水启门,闸门平时锁定在高程295 m的平台上;启闭机布置于311.9 m高程,启闭机容量为4 500 kN,既可现场操作,也可远方操作;每个进水塔在高程318.9 m设1台5 t环形检修吊,用于卷扬式启闭机的检修和维护;每个进出水塔设有一座公路桥,与水库库岸连接,桥宽为6 m,桥长为135 m。上水库进/出水口金属结构布置情况见图1。

下水库进/出水口结构为井式。在进/出水口最前段布置4孔垂直拦污栅,孔口宽度为6.55 m,孔口高度为14 m,设计水位差5 m,底板高程为-20 m,拦污栅用拉杆连接至检修平台高程25.6 m处。每套拦污栅共分5节,节间采用销轴连接,栅体与栅槽之间采用楔形配合,主支承滑块为复合材料。拦污栅采用1台单向门机操作和检修。门机额定启闭容量为2×500 kN,扬程7 m,门机轨道铺设在高程25.6 m的平台上。在进/出水口后段设1套检修闸门。孔口宽10 m,孔口高

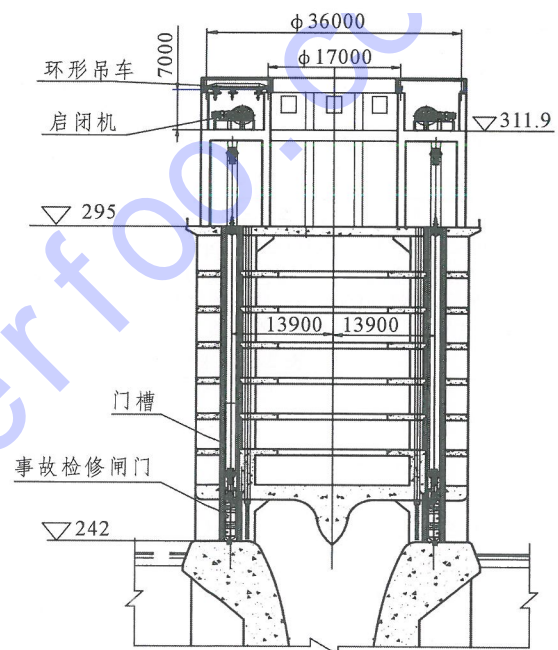


图1 上水库进/出水口金属结构布置图

度为10 m,底板高程为-20 m,设计水位为19 m,设计水头为39 m,闸门门型为平面滑动闸门,钢滑块支承,采用充水阀充水平压,静水启闭,主要用于尾水洞和尾水事故闸门的检修,闸门平时用锁定梁锁定在各自孔口内。启闭机型式为固定卷扬式启闭机,启闭机容量为2 000 kN,启闭机控制方式采用现地控制方式。下水库进/出水口金属结构布置情况见图2。

## 2 金属结构与机电设备参数

上、下水库进/出水口金属结构、机电设备包括18扇平面闸门、18台固定卷扬式启闭机、8孔拦污栅、1台单向门机及5台检修吊。主要技术参数见表1~4。

收稿日期:2017-04-23

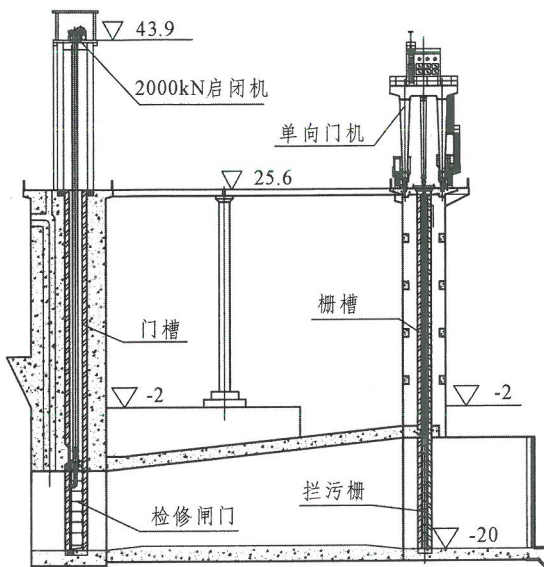


图2 下水库进/出水口金属结构布置图

表1 上、下水库进出/水口闸门技术特性表

序号	名称	参 数	
		上水库闸门	下水库闸门
1	孔口型式	潜孔式	潜孔式
2	孔口宽度	6.896 m	10 m
3	孔口高度	7 m	10 m
4	闸门高度 (不含充水阀)	7.35 m	11.4 m
5	闸门型式	平面滑动闸门	平面滑动闸门
6	设计水头	49 m	39 m
7	总水压力	22 898.44 kN	34 975.3 kN
8	底坎高程	242 m	-20 m
9	闸门吊点具	单吊点	单吊点
10	闸门数量	16	2
11	平压方式	充水阀	充水阀
12	启闭方式	动水闭门, 静水启门	静水启闭
13	操作-机械	4 500 kN 固定 卷扬式启闭机	2 000 kN 固定 卷扬式启闭机

表2 上、下水库进出/水口启闭机技术特性表

序号	名 称	参 数	
		上水库启闭机	下水库启闭机
1	启闭力	4 500 kN	2 000 kN
2	起升高度	55 m	50 m
3	起升速度	0.24 ~ 2.4 m/min	1.9 m/min
4	工作级别	Q2-轻	Q2-轻
5	滑轮倍率	8	6
6	钢丝绳规格	50ZAB 8T × 36SW + IWR-1770 ZS	40ZAB6 × 36SW + IWR1770ZS
7	电动机型号	YZPB355L1-10	YZR315S-8
8	减速器型号	SH4H26S400	QY34d800-315
9	工作制动器型号	YWZ5-500/200	YWZ5-500/121
10	安全制动器型号	SHI252- φ2 900 × 40	SHI202- φ2340 × 40

表3 下水库进出/水口拦污栅技术特性表

序号	名 称	参 数
1	孔口型式	潜孔式
2	孔口尺寸(宽×高)	6.55 m × 14 m
3	设计水头差	5 m
4	底槛高程	-20 m
5	栅条净距	150 mm
6	支承跨度	6.85 m
7	支撑形式	MGF 复合材料滑块
8	吊点型式	双吊点
9	启闭机械	2 × 500 kN 门机

### 3 吊装方案策划

上、下水库进/出水口金属结构、机电设备数量多,外形尺寸大,重量重,大多数部件为散件到货,在现场进行组装和吊装需要较大的场地。结合金属结构布置型式和土建结构施工,利用上、下水库库底作为金属结构部件组拼和移动式起重机占位的场地,上水库库底为开挖至基岩面,采用碎石回填,回填均分层碾压;下水库库底为开挖至基岩面后碾压、整平。根据上、下水库库底设计参数要求,地面的承载力、平整度等均满足大型移动式起重机作业要求,各部件在库底进行组拼后,待土建施工到一定部位,用移动式起重机将各部件吊装就位。上水库事故检修闸门门叶在库底组拼成整体,土建施工到高程 263.5 m 时,将闸门门叶吊入门槽内存放;进水塔施工到高程 311.9 m 时,将启闭机整体吊装就位,进行安装;启闭机具备起吊条件后,与闸门连接,将闸门吊出门槽,进行闸门附件安装。下水库检修闸门门叶在库底组拼成两大节,土建施工到高程 25.6 m 时,将两大节门叶吊入门槽内组拼成整体,土建施工到高程 44.6 m 时,将启闭机整体吊装就位,进行安装;启闭机具备起吊条件后,与闸门连接,将闸门吊出门槽,进行闸门附件安装。下水库单向门机在库底将门架拼装成一体,然后吊装就位,再将门机起升设备吊装至门架上就位安装;单向门机具备运行条件后,用起重机将拦污栅分节吊装至高程 25.6 m 平台存放,用单向门机将拦污栅逐节吊入栅槽内进行安装。

### 4 主要部件的吊装

#### 4.1 上水库进出水口检修事故闸门的吊装

##### 4.1.1 吊装方法

闸门系用运输汽车经上库公路运输至库底拼



表4 上、下水库进出/水口金属结构主要部件尺寸、重量表

序号	布置位置	部件名称	外形尺寸/mm	重量/t
1	上水库进出水口闸门	上节门叶	8 596 × 1 560 × 2 300	17.64
2		中节门叶	8 596 × 1 560 × 2 610	14.275
3		下节门叶	8 596 × 1 560 × 2 440	16.228
4	上水库进出水口启闭机	卷筒	φ2 900 × 5 100	31
5		机架	7 700 × 5 500 × 1 760	22
6		减速器	3 010 × 1 853 × 1 697	17.6
7		第一节门叶	2 585 × 1 500 × 11 400	22
8	下水库进出水口闸门	第二节门叶	2 585 × 1 500 × 11 400	21.3
9		第三节门叶	2 585 × 1 500 × 11 400	21.1
10		第四节门叶	2 585 × 1 500 × 11 400	22
11		机架	4 940 × 4 460 × 1 855	8.5
12	下水库进出水口启闭机	卷筒	φ2 340 × 3 263	13
13		减速器	3 120 × 1 262 × 1 610	13.51
14		顶节栅叶	950 × 3 300 × 7 130	9.654
15	下水库进出水口拦污栅	中节栅叶	950 × 3 000 × 7 130	9.686
16		中节栅叶	950 × 3 000 × 7 130	9.686
17		中节栅叶	950 × 3 000 × 7 130	9.686
18		底节栅叶	950 × 3 000 × 7 130	9.668
19	下水库进出水口单向门机	门架及大车行走机构		28.255
20		起升机构	2 690 × 2 325 × 1 671	11.728

装平台卸车,卸车、组拼和闸门倒运装车采用220 t汽车起重机吊装,闸门堆放和拼装位置布置在库底233 m高程平台距进水塔体中心50 m外。闸门组拼完成后用运输车将闸门整体运至塔体周围,用250 t履带起重机从塔体263.5 m高程将闸门吊入门槽内就位。上水库事故检修闸门吊装情况见图3。

缠绕成8股垂直连接,故单股钢丝绳承受的荷载为:

$$G_p = \frac{W}{n} = \frac{54.728}{8} = 6.841(t)$$

式中  $G_p$  为单股钢丝绳承受的荷载;  $W$  为吊装重量;  $n$  为钢丝绳股数。

钢丝绳选用6 × 37 + FC、抗拉强度为1 400 MPa的系列钢丝绳,安全系数为6。

选用φ32.5钢丝绳,其破断拉力为548.5 kN,许用拉应力[P] = 548.5/6 = 91.4 (kN),吊装荷载  $G_p = 6.841 \times 9.8 = 67(kN)$ , [P] >  $G_p$ ,满足吊装要求。

(3) 吊车性能校核。

闸门吊装重量为54.728 t,250 t履带起重机在16 m旋转半径、臂长58.5 m时吊重为57.8 t,满足吊装要求。

4.2 上水库进出水口启闭机吊装

4.2.1 吊装方法

启闭机采用汽车运输,经上库公路运输到塔体周围库底高程238 m,利用130 t汽车起重机将机架、减速器、卷筒等部件组合在一起,用500 t履带起重机将其吊装至高程311.9 m安装平台就位并安装。上水库启闭机吊装情况见图4。

4.2.2 吊装工艺

(1) 吊点选择。

吊点选取在启闭机机架上焊接四个吊耳。吊

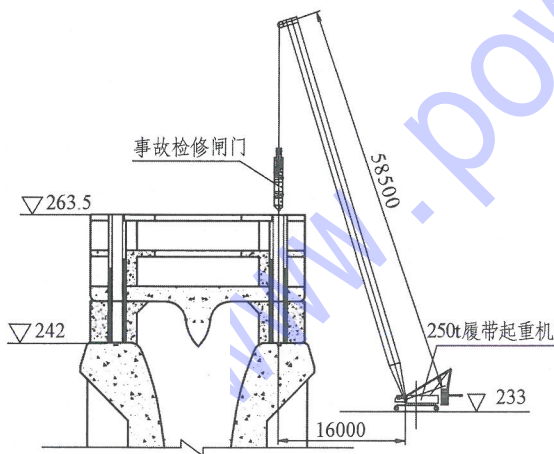


图3 上水库事故检修闸门吊装示意图

4.1.2 吊装工艺

(1) 吊点的选择。

吊点选取为闸门启闭时与启闭机连接的连接销轴,该销轴主要承载闸门自重、水压力及摩擦力等,承载力满足闸门吊装要求。

(2) 吊装索具的选择。

吊钩与吊点连接采用一根L = 14 m的钢丝绳

耳材质为 Q345, 与机架焊接为开坡口深熔角焊, 焊脚高度  $K = 14 \text{ mm}$ , 吊耳板厚度  $\delta = 30 \text{ mm}$ , 吊耳许用拉应力  $[\sigma] = 220 \text{ MPa}$ , 许用剪应力  $[\tau] = 130 \text{ MPa}$ , 吊耳焊缝许用拉应力  $[\sigma] = 220 \text{ MPa}$ , 许用剪应力  $[\tau] = 150 \text{ MPa}$ , 吊耳结构尺寸及受力情况见图 5。

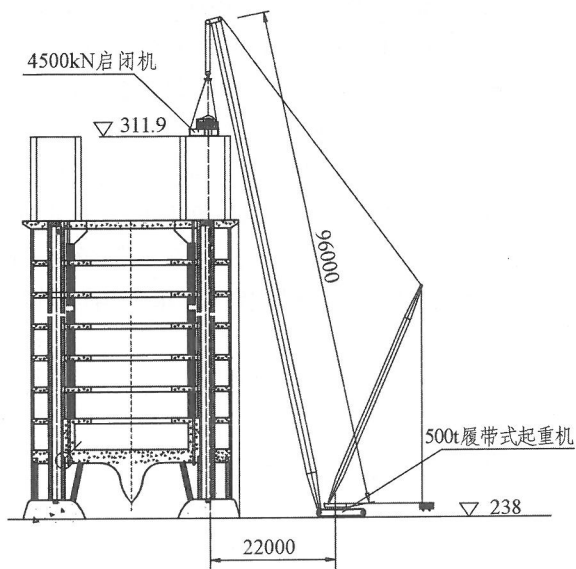


图 4 上水库启闭机吊装示意图

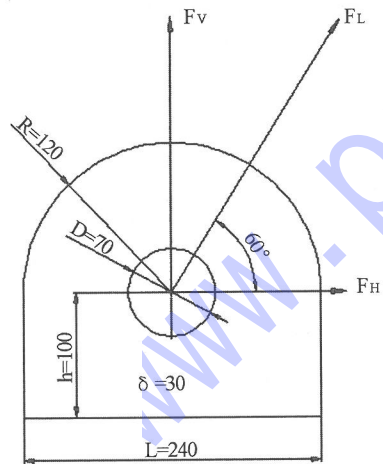


图 5 吊耳结构尺寸及受力示意图

$$\begin{aligned} \text{吊耳在吊绳方向最大拉应力 } \sigma &= \frac{F_L}{(2R - D)S} \\ &= \frac{211\ 680}{(2 \times 120 - 70) \times 30} = 41.5 \text{ (MPa)} < [\sigma] = 220 \text{ (MPa)}, \text{ 满足要求。} \end{aligned}$$

$$\text{吊耳在吊绳方向最大剪应力 } \tau = \frac{F_L}{(R - D/2)\delta}$$

$$= \frac{211\ 680}{(120 - 70/2) \times 30} = 83 \text{ (MPa)} < [\tau] = 130 \text{ (MPa)}, \text{ 满足要求。}$$

$$\begin{aligned} \text{吊耳焊缝最大拉应力 } \sigma &= \frac{F_V}{1.4KL} = \\ &= \frac{183\ 750}{1.4 \times 14 \times 240} = 39.06 \text{ (MPa)} \end{aligned}$$

式中  $F_V$  为吊耳垂直载荷;  $K$  为焊缝焊接高度;  $L$  为焊缝长度;  $\sigma < [\sigma]$ , 满足要求。

$$\begin{aligned} \text{吊耳焊缝最大剪应力 } \tau &= \sqrt{\tau_M^2 + \tau_Q^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{3F_H h}{0.7kL^2}\right)^2 + \left(\frac{F_H}{1.4kL}\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{3 \times 106\ 095 \times 100}{0.7 \times 14 \times 240^2}\right)^2 + \left(\frac{106\ 085}{1.4 \times 14 \times 240}\right)^2} \\ &= 60.76 \text{ (MPa)} \end{aligned}$$

式中  $\tau_M$  为水平弯矩产生的剪应力;  $\tau_Q$  为水平载荷产生的剪应力;  $F_H$  为吊耳水平载荷;  $h$  为吊耳销孔中心到焊缝距离;  $\tau < [\tau]$ , 满足要求。

### (2) 吊装索具的选择。

选用四根  $L = 12 \text{ m}$  钢丝绳一弯两股作为吊绳, 通过计算可知钢丝绳水平夹角约为  $60^\circ$ , 故单股钢丝绳承受的荷载  $G_p$  为:

$$G_p = \frac{W}{n \sin \beta} = \frac{74}{8 \times \sin 60^\circ} = 10.68 \text{ (t)}$$

式中  $W$  为吊装重量;  $\beta$  为钢丝绳水平夹角;  $n$  为钢丝绳股数。

钢丝绳选用  $6 \times 37 + \text{FC}$ 、抗拉强度为  $1\ 550 \text{ MPa}$  系列钢丝绳, 安全系数为 6。

选用  $\varphi 39$  钢丝绳, 其破断拉力为  $875 \text{ kN}$ , 许用拉应力  $[P] = 875/6 = 145.83 \text{ (kN)}$ , 吊装荷载  $G_p = 10.68 \text{ t} \times 9.8 = 104.66 \text{ (kN)}$ ,  $[P] > G_p$ , 满足吊装要求。

钢丝绳与吊耳连接采用  $35 \text{ t}$  弓形卸扣。

### (3) 吊车性能校核。

启闭机吊装重量为  $74 \text{ t}$ ,  $500 \text{ t}$  履带起重机在  $22 \text{ m}$  旋转半径采用轻重混合主臂, 臂长  $96 \text{ m}$ , 配重  $160 \text{ t}$  时吊重为  $74.2 \text{ t}$ , 满足吊装要求。

## 4.3 下水库进出水口检修闸门的吊装

### 4.3.1 吊装方法

闸门门叶用汽车运输经库底临时道路至库底  $-2 \text{ m}$  高程, 闸门卸车和组拼采用  $75 \text{ t}$  汽车起重机, 将第三、四节门叶组拼成一体; 第一、第二节门



叶组拼成一体,用500 t汽车起重机先将第一、二节门叶吊装到闸门底坎就位,再将第三、四节门叶吊入门槽并与前两节组拼。下水库检修闸门吊装情况见图6。

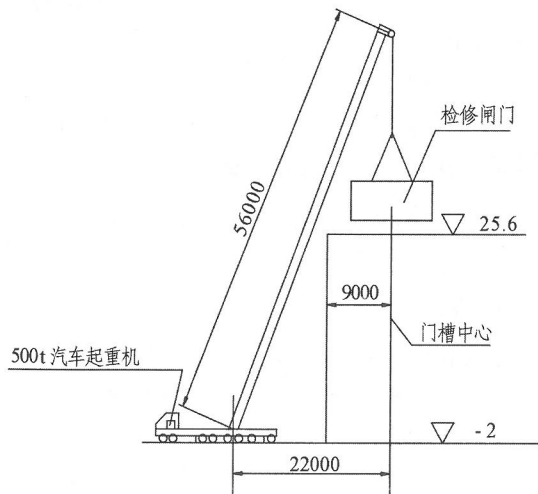


图6 下水库检修闸门吊装示意图

#### 4.3.2 吊装工艺

##### (1) 吊点的选择。

第一、二节门叶吊装的吊点选取为闸门启闭时与启闭机连接的连接销轴,该销轴主要承载闸门自重、水压力及摩擦力等,承载力满足闸门吊装要求。第三、四节门叶吊装在第三节门叶顶部筋板位置焊接四个吊耳作为吊点,吊耳型式与上库进出水口启闭机吊装吊耳相同,吊耳材质为Q345,与门叶焊接为开坡口深熔角焊,焊脚高度 $K=12\text{ mm}$ ,吊耳板厚度 $\delta=24\text{ mm}$ , $R=100\text{ mm}$ , $D=60\text{ mm}$ , $h=100\text{ mm}$ , $L=200\text{ mm}$ ,按上库进出水口启闭机吊装吊耳的校核方法对吊耳强度和焊缝强度进行校核,经计算,满足吊装要求。

##### (2) 吊装索具的选择。

第一、二节门叶吊装的吊钩与吊点连接采用一根 $\varphi 32.5$ , $L=12\text{ m}$ 钢丝绳缠绕成6股垂直连接,钢丝绳选用 $6\times 37+FC$ ,抗拉强度为1400 MPa系列钢丝绳,安全系数为6,其破断拉力为548.5 kN。经校核计算满足吊装要求。第三、四节门叶吊装采用4根 $\varphi 32.5$ , $L=12\text{ m}$ 钢丝绳八股、四吊点吊装。通过计算可知,钢丝绳水平夹角约为 $67^\circ$ ,钢丝绳选用 $6\times 37+FC$ ,抗拉强度为1400 MPa系列钢丝绳,安全系数为6,其破断拉力为548.5 kN,经校核计算满足吊装要求;钢丝绳与吊耳连接采用25 t弓形卸扣。

##### (3) 吊车性能校核。

两大节门叶吊装重量分别为43.1 t、43.3 t,500 t汽车起重机(180 t配重)在22 m旋转半径、伸出臂长56 m时吊重为62.6 t,满足吊装要求。

#### 4.4 下水库进出水口启闭机吊装

##### 4.4.1 吊装方法

启闭机(整体到货)通过环库公路用汽车运输至出/进水口两侧-2 m高程库底位置,用500 t汽车起重机将其吊装至43.9 m高程安装平台就位并安装。启闭机吊装重量为35.01 t,500 t汽车起重机(配重140 t,支腿9.6 m,全方位作业)在18 m旋转半径、主臂56 m+延伸臂6 m时的吊重为37.2 t,采用4根 $\varphi 28$ , $L=12\text{ m}$ 钢丝绳、四个12 t卸扣、四吊点进行吊装。下水库启闭机吊装情况见图7。

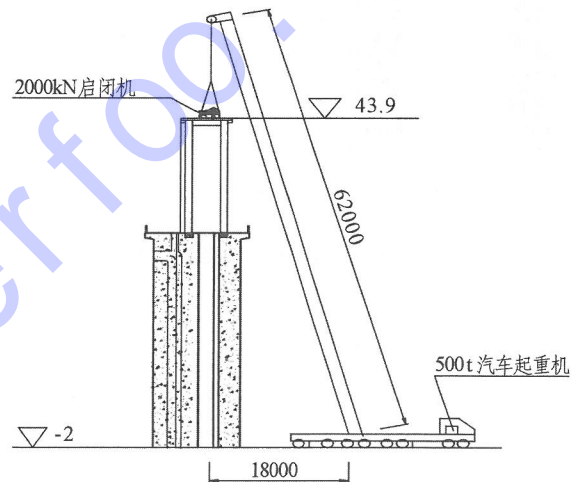


图7 下水库启闭机吊装示意图

##### 4.4.2 吊装工艺

##### (1) 吊点的选择。

吊点选取在启闭机机架上焊接四个吊耳。吊耳型式与上库进出水口启闭机吊装吊耳相同,吊耳材质为Q345,与门叶焊接为开坡口深熔角焊,焊脚高度 $K=10\text{ mm}$ ,吊耳板厚度 $\delta=20\text{ mm}$ , $R=90\text{ mm}$ , $D=50\text{ mm}$ , $h=80\text{ mm}$ , $L=180\text{ mm}$ ,按上库进出水口启闭机吊装吊耳的校核方法对吊耳强度和焊缝强度进行校核,经计算,满足吊装要求。

##### (2) 吊装索具的选择。

吊装采用4根 $\varphi 28$ , $L=12\text{ m}$ 钢丝绳八股、四吊点吊装。通过计算可知:钢丝绳水平夹角约为 $76^\circ$ ,钢丝绳选用 $6\times 37+FC$ ,抗拉强度为1400

(下转第78页)

尺必须详细记录清楚。

为保证灌浆质量检查的科学性、客观性、准确性,该洞段还引入了第三方检测,最终检测成果显

示该洞段灌后平均最大透水率仅为0.31 Lu,远小于设计不大于1 Lu的灌浆质量防渗要求。具体试验统计参数见表2。

表2 V类围岩洞段灌浆检查孔压水试验(第三方检测)统计表

单元	灌浆部位	检查孔数量 /个	透水率 /Lu		
			最小值	最大值	平均值
1	Y0+606~Y0+621.5	5	0.08	0.37	0.21
2	Y0+621.5~Y0+635.5	3	0.25	0.34	0.31
3	Y0+635.5~Y0+654	5	0.18	0.4	0.27
合计		13			

#### 4 结语

清远抽水蓄能电站在中平洞灌浆施工过程中,克服了工作面狭小、地质条件差、工作任务量大、施工难度大的难题,采取了正确的灌浆参数和适宜的灌浆施工工艺以及多种质量检查试验相结合的措施,有效地提高了隧洞灌浆的施工进度,取

(上接第44页)

MPa系列钢丝绳,安全系数为6,其破断拉力为412 kN,经校核计算满足吊装要求;钢丝绳与吊耳连接采用12 t弓形卸扣。

(3)吊车性能校核。

启闭机吊装重量为35.01 t,500 t汽车起重机(配重140 t,支腿9.6 m,全方位作业)在18 m旋转半径、主臂56 m+延伸臂6 m时吊重为37.2 t,满足吊装要求。

#### 4.5 下水库进出水口单向门机的吊装

在库底将下水库单向门机门架和大车行走机构拼装成一体,用350 t汽车起重机将其吊装至高程25.6 m就位,再将门机起升机构吊装至门架上就位,吊装最重件为门架和大车行走机构的组合体,重量为28.255 t。350 t汽车起重机在20 m旋转半径、主臂长度为46.2 m时的起吊重量为30 t;在上部结构中间两根横梁两侧焊接4个吊耳作为吊点,选用4根 $\phi 32.5$ , $L=6$  m钢丝绳四吊点、单股吊装。

得了良好的灌浆效果。

作者简介:

寇文博(1987-),男,河北衡水人,项目工程质量部主任,助理工程师,从事水利水电工程施工技术与管理工

(责任编辑:李燕辉)

#### 4.6 下水库进出水口拦污栅的吊装

先将拦污栅分节运输至库底,用130 t汽车起重机将拦污栅分节吊装至25.6 m高程平台存放,用单向门机将拦污栅逐节吊入栅槽内进行安装,单节拦污栅最重件为9.686 t,130 t汽车起重机在20 m旋转半径、主臂长度为41.98 m时的起吊重量为13 t,选择拦污栅节间连接销轴作为吊点,选用2根 $\phi 24$ , $L=14$  m钢丝绳两吊点、双股吊装。

#### 5 结语

项目部因地制宜、选用不同规格型号的起重机顺利地完成了溧阳抽水蓄能电站上、下水库进/出水口金属结构和机电设备吊装工程,不仅技术方案可行、安全质量有保证,而且经济合理,同时与土建工程施工穿插进行,保证了整个工程按期完成。

作者简介:

陈林(1977-),男,重庆江北人,高级工程师,从事水电站机组安装和金属结构制作与安装技术工作。(责任编辑:李燕辉)

## 中国水电五局再添六项电力建设工法

日前,中国电力建设企业协会发文公布了2017年电力建设工法,由中国水电五局公司申报的《高悬空重载整流锥混凝土施工工法》等6项工法榜上有名。电力建设工法是以工程为对象,以量化的工艺流程为核心,运行系统工程原理,将先进技术与科学管理相结合,经过工程实践形成的、相对成熟的综合配套施工方法,其关键技术和管理水平具有显著的先进性和创新性,代表了全国电力建设行业技术水平和施工能力。这次由中国水电五局申报的《浇筑用梯形可调节模板组施工工法》《尾水隧洞开挖体型控制施工工法》《可折叠式无轨滑模施工工法》《大体积倒坡混凝土快速施工工法》《抽水蓄能机组底环安装施工工法》6项施工工法先后通过了中电建协组织的中国电力建设工法专家评审委员会的资料预审、网络评审、会议审定、公示,最终获批为2017年度电力建设工法。据悉,此次全国范围内获批的电力建设工法仅有163项。