

**编者按：**随着我国能源结构转型的深入和水电装机容量、年发电量的逐年提高，水电在改善能源结构、推动节能减排方面发挥着越来越重要的作用。本期科技专题介绍了中国葛洲坝集团有限公司在承建的一批巨型水电站或水利枢纽工程中技术创新取得的科技成果，详细介绍了乌东德水电站12500kN卷扬式启闭机设计制造关键技术以及公司在溪洛渡电站机电安装调试工程中应用的创新技术，这对进一步提高中国水电工程机电装备制造的国际影响力，推动中国水电机电安装行业的发展具有重要意义。

# 引领技术进步 勇夺水工启闭机之最

——中国葛洲坝集团机械船舶有限公司启闭机科技创新侧记

张庆军<sup>1</sup> 李亚将<sup>1</sup> 张为明<sup>2</sup>

(1.中国葛洲坝集团机械船舶有限公司 湖北宜昌 443007; 2.中国葛洲坝集团股份有限公司 武汉 430033)

近十多年来，水电装机容量和年发电量逐年提高，水电在我国能源结构中占据越来越重要的地位，对国民经济的绿色、环保、可持续发展起到了巨大的推动作用，水电工程也进入了前所未有的开发黄金期。目前在长江上游干流及金沙江、乌江、雅砻江、澜沧江、大渡河等已陆续建设了溪洛渡、向家坝、白鹤滩、乌东德、锦屏一级及二级、南水北调等一批巨型水电站或水利枢纽工程。这些超级工程的建设，使得大荷载、高扬程固定及移动卷扬式启闭机的需求量也越来越多，中国葛洲坝集团机械船舶有限公司作为水电金属结构行业的龙头企业，以市场开发为龙头，以技术创新为突破点，开展了一系列大荷载、高扬程卷扬式启闭机的研制工作，提高了公司的市场竞争力和经济效益，取得了巨大的社会效益。

## 市场开发成绩斐然

2005-2017年，中国葛洲坝集

团机械船舶有限公司抢抓机遇，勇于开拓，先后承接了包括浙江滩坑水电站8000kN-100m、6300kN-70m固定卷扬式启闭机、溪洛渡水电站2×4000kN-50m固定卷扬式启闭机（共10台套）、深溪沟2×8000kN-47m、5000kN-40m固定卷扬式启闭机、泸定电站2×6000kN-42m固定卷扬式启闭机、小湾水电站3200kN-130m固定卷扬式启闭机、构皮滩水电站4000kN-98m固定卷扬式启闭机、雅砻江锦屏二级水电站9000kN-118m固定卷扬式启闭机（共8台套）、清江水布垭电站3200kN双向门机、深溪沟4000kN双向门机、锦屏一级水电站6300kN双向门机、向家坝水电站2×6500kN-90m、2×4500kN-45m固定卷扬式启闭机、南水北调引江济汉2×5000kN桥式启闭机、白鹤滩水电站2×6300kN-42m、2×8000kN-42m、6300kN-42m、9000kN-42m固定卷扬式启闭机、2×6300kN-65m台车式启闭

机、乌东德水电站12,500kN-72m固定卷扬式启闭机、2×2000kN、2×2500kN、2×3200kN双向门机等超大型固定及移动卷扬式启闭机设计制造合同。

这些项目的顺利签约为公司开展大荷载、高扬程卷扬式启闭机的设计制造技术的研究工作提供了有利条件，其中乌东德水电站12,500kN卷扬式启闭机和锦屏二级水电站9000kN卷扬式启闭机的荷载和扬程参数量级都是目前国内水利水电工程超大型卷扬式启闭机的代表项目。面对新的技术挑战，公司组织强有力的工程技术人员，开展研究国内外工程启闭机的设计优点，并吸收国内外起重机设计制造方面的先进技术，使高扬程、大荷载启闭设备顺应机电设备的发展趋势，更加环保高效，满足不断发展的水头电站和高坝建设的需求。

## 设计制造工艺先进

为服务公司水电市场启闭机产



品开发需求,并提供技术支撑,中国葛洲坝集团机械船舶有限公司成立了以机械研究所(现为公司研发技术中心)为主的技术攻关小组,各专业人员采取分工协作的研究模式,根据不同的研究重点内容,运行理论分析、设计分析、试验、效果评价等手段,开展一系列的卷扬式启闭机技术研究工作,并将这些研究成果应用于承接的各类启闭产品中。经过十多年发展,目前已完成了对产品使用效果的分析、研究、总结、完善和改进,掌握了一系列大荷载、高扬程卷扬式启闭机的设计制造关键技术,取得了丰硕成果,奠定了公司在国内水工金属结构市场上的行业领先地位,也为实现国际水电工程的大发展创造了坚实的基础。机械研究所全体技术人员克坚克难,勇于创新,经过多年的实践研究,主要科研成果如下。

分析研究、掌握总结了超大型卷扬式启闭机传动布置方式的优化设计:卷扬式启闭机的核心设备是传动系统设备,其结构布置型式对提高卷扬式启闭机总体设计方案水平至关重要,通常必须要综合考虑启闭机的运行工况、使用环境、维护条件、安装空间、运输尺寸等因素。对此,公司研究对比了目前卷扬式启闭机的两种主要传动方式,即减速器加开式齿轮混合传动和采用大型硬齿面减速器直联卷筒的全闭式传动优缺点,并在此基础上对卷筒布置形式及驱动方式进行了比选和优化设计,即卷扬式启闭机的布置方式有双电机带动单个双联卷筒驱动缠绕;双电机带动两个双联卷筒缠绕;双电机带动四个单联卷筒缠绕;四电机带动两个双联卷筒缠绕、四电机带动四个单联卷筒缠绕等

多种布置方式。通过分析研究,找出针对不同荷载、不同扬程、不同使用场合的情况下选择最优的卷扬式启闭机传动结构布置型式。

系统地研究并实践了启闭机设计新理论:根据水工启闭机使用工况特点,即重载低速、使用频率低,且闸门最大启门力或持住力只是在孔口下方的一小段行程内,随着闸门的提升荷载逐渐减小,闸门提出孔口后,就只有闸门的自重了,因此采用等效荷载计算钢丝绳的静拉力,可适当减小钢丝绳的直径,增加柔性,有利于多层缠绕,更利于减小各机构外形尺寸。

此外,大荷载、高扬程卷扬式启闭机卷筒直径大,卷筒长度也长,当卷筒直径和卷筒长度增加到一定值后,在进行卷筒稳定性设计时通常是按照《水电水利工程启闭机设计规范》(DL/T5167-2002)中给出的公式进行计算。但卷筒的两端均设有起稳定性作用的辐板,并与传动齿轮箱或支承轴联接,在传统计算公式中,是没有考虑辐板因素的,因此技术人员通过研究及实践,计算新的卷筒稳定性临界应力公式,使卷筒壁厚降低20%~30%,不仅节省材料,减轻卷筒的重量,同时也降低了对卷板设备的要求,大大降低了工程成本。

创新应用了钢丝绳在卷筒内壁上压绳设计技术:通常大荷载、高扬程卷扬式启闭机采用多层缠绕,卷筒中部及两端均设有返绳挡环,因此钢丝绳必须穿过返绳环固定在卷筒外壁上,这样就必须在卷筒绳槽处开长斜向导槽,同时在返绳挡环内壁也相应的开长斜孔。采用该种结构型式机械加工难度大,且超大型卷扬式启闭机钢丝绳公称强度大,钢丝绳直径粗,

僵性大,卷绕性差,现场穿绳绕绳难度大。另外,钢丝绳在卷筒外壁上压绳,双联卷筒压绳需增加绳槽 $2\times 3$ 圈,卷筒长度较长,也使得卷筒重量增加。为此,公司技术攻关小组经过反复排绳设计和计算钢丝绳偏角,同时考虑超大型卷扬式启闭机卷筒直径大,安装人员可以在卷筒端部腹板减重孔进入卷筒内壁的情况下,提出在卷筒外壁返绳挡环处开入绳孔,在卷筒内壁位置上压绳方式。这样不仅机械加工比较容易,压绳方便,同时也减少卷筒长度、降低了卷筒重量,节约了工程成本。

创新采用电气同步、纠偏技术应用应用于双吊点启闭机:一般大荷载、高扬程双吊点式启闭机常采用双驱动或多驱动方式,参与运行的电机或传动链数量多,而且高扬程启闭机一次运行时间比较长,但因为传动链的各电机的转差率不同,机械的系统误差等原因,造成了启闭机各驱动单元不同步,影响设备的稳定运行。为此,技术攻关小组通过研究,确定采用电气同步、纠偏技术,即在卷扬式启闭机的每个卷筒轴上各安装一个绝对值型编码器以作为高度测量和同步运行的反馈与控制,消除了各卷筒绳槽直径加工误差对起升高度的影响,实现了钢丝绳超多层缠绕多驱动的同步控制,避免了因不同步引起的闸门偏斜、振动与卡死,以确保闸门运行的安全。

解决了在数控机床和普通机床上加工超大型卷扬式启闭机折线卷筒技术:钢丝绳卷筒分为普通螺旋线卷筒和平行折线型卷筒等。平行折线型卷筒的绳槽就是从直线段到斜线段,又从斜线段到直线段,如此往复连续过

渡形成的绳槽型式。目前，大载荷、高扬程启闭机大都采用折线绳槽结构方式。通常，加工折线绳槽的方法有两种：一是采用数控车床，由X轴、Y轴、主轴回转三联动形成空间曲线加工而成，其加工效率高，质量保证，但设备资金投入较普通车床高。二是公司技术攻关小组开发了一套在普通车床上加工折线绳槽的技术，即在普通车床的刀架动力链上插装电磁离合器，并利用平行折线绳槽的折线段作为控制信号的方法，连续加工平行折线绳槽，也完全能够满足设计要求。2008年以前，公司都采用技术改造的普通车床加工折线绳槽，后来为提高生产效率，保证加工质量，现利用新购入的数控重型卧式车床CCK61630×200×160S进行数控编程机加工。

此外，近些年许多工程启闭机常采用全闭式结构型式，全闭式卷筒的端部连接采用的卷筒联轴器，结构型式与普通卷筒有差异，且尺寸比较大，普通尾座顶针无法满足加工需要。因此，公司又设计开发了一款转换顶板用于卷筒的装夹，并成功地完成了卷筒的装夹校正和机加工。

**超大型焊接卷筒卷制：**钢板在卷曲的过程中既存在塑性变形，又存在弹性变形，卸载后由于弹性变形的恢复，会产生回弹现象，厚板的回弹现象尤为严重，因此对于超大型启闭机卷筒厚钢板卷制，采用小曲率，多次数的反复卷曲，有效减少回弹现象。具体方法是先对钢板进行预弯，卷板机采用上辊旋转机械传动，下辊和侧辊升降液压传动，通过多次反复的卷圆，这样的卷板机卷出的剩余直边小。最后，在对接处外表面点焊，两端装上引（熄）弧板进行焊接。焊后

整形在卷板机上校圆。

**研发在不同弧形轨道上运行的自适应承重车轮组：**随着水电站建设技术的发展，高水头的水电站多采用双曲拱坝，在坝顶上运设置的门机需要在弧形轨道上运行，公司技术人员自行研发的一种自适应门机承重轮组，采用立轴支承机构，使运行机构中的行走台车自动适应弯轨的局部弧度，并且与多级的铰轴及平衡梁机构配合，不仅能自动适应弯轨在平面上的高低不平，从而避免出现啃轨问题，也可以自动适应安装过程中的水平和垂直误差，减轻传动机构构件的冲击，避免门机震动和倾覆。

**三维协同设计促进设计质量、效率提高：**随着“中国制造2025”战略规划和德国工业4.0智能化制造的推出，制造业质量和水平开始了全面提升，三维设计作为智能化制造的数据基础，公司研发技术人员充分利用SOLIDWORKS软件这一先进设计手段，开展如三维参数化设计、零部件三维标准库建立、有限元结构优化设计、启闭机动态装配及模拟仿真等研究。同时，针对目前存在的单机三维设计数据管理混乱、设计过程管理落后等问题，开展对启闭机产品数据的标准化、协同管理、安全管理等，使得管理和技术水平同时大幅度提升，逐步提高公司的行业竞争力。

### 科技创新成果丰硕

通过十多年的发展，公司在启闭机设计制造技术研究方面共获得包括“内壁压绳式钢丝绳卷筒”“一种用于大型法兰面加工的装置”“一种用于大型全闭式卷筒在车床上装夹的装置”“用于环形焊缝的自动化焊接装置”“省力移轴装置”“全闭式卷

扬机的卷筒联轴器钻孔装置”“自适应门机承重车轮组”“门式启闭机起升机构防止超速控制装置”等15项实用新型专利，“双吊点电气同步的方法和装置”等2项发明专利，“大荷载、高扬程固定卷扬式启闭机研制”获中国电力科学技术三等奖、“超大型全闭式传动卷扬式启闭机设计与制造关键技术研究”获水力发电科学技术奖二等奖、“卷扬式提升卷筒自动焊接工法”获得2014年度电力建设工法，以上部分科技成果的工艺水平已达到国际先进水平，这些先进技术的应用将极大促进启闭机产品的多样化，系列化。同时，这些科技成果的成功应用使公司在启闭机产品市场具有强势竞争力，获得更大的经济效益和社会效益。

### 工艺装备水平领先

为提高公司生产加工能力和启闭机制造质量水平，公司自2008年先后购置了Φ5×20m、Φ4×6m、Φ1.35m×20m高精度数控卧式车床、CDW11X NC-250×3000微控水平下调式三辊卷板机、Φ200TK6920/16000×6000mm数控落地镗铣床等先进机械加工设备。其中，固定卷扬式启闭机架、门机小车架或台车架采用在数控落地镗铣床上加工，由于加工范围较广，可以一次装夹完成各平面的铣削，保证了各安装表面的平面度和高低差要求，生产效率和质量大大提高。

### “一带一路”前景广阔

在国家实施“一带一路”战略的大背景下，随着国家经济实力的日益加强，企业开展对外承包工程的宏观

# 乌东德水电站12500kN卷扬式启闭机 设计制造关键技术研究

张庆军<sup>1</sup> 张为明<sup>2</sup> 李亚将<sup>1</sup>

(1.中国葛洲坝集团机械船舶有限公司 湖北宜昌 443007;

2.中国葛洲坝集团股份有限公司 武汉 430033)

**摘要:** 本文对乌东德水电站12,500kN卷扬式启闭机的设计制造关键技术进行总结,并介绍了其设计制造特点,以便应用于类似水电站用超大型卷扬式启闭机的研制。

**关键词:** 驱动方式 启闭机 卷筒 自动化焊接 手摇移轴装置 荷载限制装置

**中图分类号:** TV664+.1 **文献标识码:** B **文章编号:** 1002-3607(2018)01-0017-03

## 1 项目背景

乌东德水电站是金沙江干流上的重要梯级电站,也是我国水电重点建设项目,其中安装在5#导流隧洞进口924.70m高程排架的平台上的两台12,500kN固定卷扬式启闭机为该工程最大的起重设备,它的启闭容量也为目前国内外同类产品之最。它的安全运行,对于整个工程的安全运行至关重要,它的技术创新对于提高启闭机运行质量、促进我国启闭机设计制造技术有着十分重要的影响。面对新的技术挑战,公司工程技术人员在已完成的大荷载、高扬程固定卷扬式启闭机研究基础上,对该设备的总体布置,零部件设计制造等内容开展研究

工作,进一步提高产品质量,满足乌东德水电站工程建设的需求。

## 2 主要技术指标

主要技术指标见表1。

## 3 总体布置型式及设计特点

传动系统的优化设计是卷扬式启闭机的技术核心,其布置与选型的优劣对提高启闭机总体设计方案水平至关重要。通常,必须要综合考虑设备的运行工况、使用环境、维护条件、安装空间、运输尺寸以及其他特殊情况等因素。

通过对比分析,12,500kN卷扬式启闭机的起升机构采用四套单联卷

表1 项目类别及相关技术参数

项目	参数	
工作级别	M3	
额定启闭力(kN)	12,500	
扬程(m)	72	
起升速度(m/min)	~1.0	
吊点间距(m)	单吊点	
卷筒直径(mm)	Φ2350	
钢丝绳型号	58ZABCFC6x36SW+IWR-1870ZS	
滑轮倍率	2×8	
钢丝绳支数	2×2×8	
电动机	型号	YZP355M2-10
	功率(kW)	160
	工作制	S3 40%
	转数(r/min)	585
减速器	台数	2
	型号	TLH4900-530
制动器	传动比	530
	型号	YWZE-630/200-RL/HL(4套)
	制动力矩(N·m)	2500~5000
开度仪及数量	GDK-2(1套)	
荷载传感器	PR6201/54(2套)	

环境得到进一步改善。中国企业,尤其是与葛洲坝类似的基础设施企业,越来越多的参与到国际工程的市场竞争中来,但是市场竞争不仅包括资本和技术的竞争,亦包括品牌与标准的竞争,工程建设标准已成为市场准入的隐形门槛和获取最大利益的技术保护壁垒。因此,为了促进中国标

准走出去和“一带一路”发展战略的要求,同时也为了落实集团公司国际优先发展战略,公司2017年4月在原来主编并出版的《水电工程启闭机制造安装及验收规范》(NB/T35051-2015)工作经验基础上,开展国际水电工程与启闭机设计制造相关的技术标准收集、国际水电工程重点案例

分析等研究工作,同时也对公司主编的启闭机制造标准进行英文版的翻译工作,这对于进一步提高中国水电工程机电装备制造的国际影响力,推广“葛洲坝”启闭机技术与品牌、增强了公司在国际工程总承包项目中启闭机产品制造的市场竞争力具有极大的推动作用。

筒、双电机驱动的全对称设计方案，主要技术特点如下。

(1) 每个卷筒采用短轴型式，其中一端卷筒轴经滚动轴承支承于轴承座上，另一端通过WZL型式的卷筒联轴器与减速器低速轴相连。该联轴器能承受很大的径向载荷和传递较大的扭矩，并且采用球铰结构，转动灵活，最大偏转角度可达 $3^{\circ}$ ，以可靠消除卷筒的安装误差和重载变形，可以替代国内外常用的齿轮卷筒联轴器和鼓形滚柱联轴器。

(2) 采用4个单联焊接卷筒，绳槽为双折线型式，大大缩短了单个卷筒长度，减轻了吊装单元自重。

(3) 在定滑轮装置处设置荷重传感器，用于起升载荷的信号输出，测量更加准确可靠。

(4) 在每个卷筒轴端部装有1套起升高度限制传感器，用于上下极限位置控制和显示吊具的高度。

## 4 技术创新点

### 4.1 布置型式

通过对12,500kN卷扬式启闭机技术及成本的比选，确定了采用双电机驱动全闭式传动方式，通过电动机带动减速器两侧的4个单联卷筒缠绕，然后通过动滑轮组、定滑轮组、平衡滑轮组，实现闸门的上升和下降。滑轮组采用滚动支承方式。采用此种布置型式，首先，双电动机驱动将电动机容量和减速器的输出扭矩降低了一半，电动机和减速器技术参数都在标准产品范围内，不必重新设计非标产品，降低了制造难度和生产成本。其次，采用四个单联卷筒，结构尺寸更小，自重轻便于吊装。对称布置，结构受力均匀合理，材料的性能得以充分利用，四个支

承点的基础载荷完全一致，对土建设计及布置有益(见图1)。

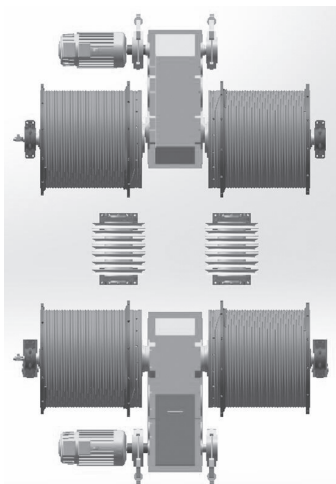


图1 启闭机传动方式布置

### 4.2 驱动方式

传统的减速器配开式齿轮的传动方案虽然经济性好，且能降低对减速器输出扭矩的要求，但受开式齿轮加工精度、安装精度、润滑条件等多方面限制，适用范围有限，运行时噪音及震动较大，且需要较大的平面布置尺寸，开式齿轮的啮合条件还容易受机架支承梁变形的影响。全闭式的传动方案虽然硬齿面减速器造价偏高，但可以使启闭机整机结构紧凑，有利于整机平面布置的优化；采用硬齿面减速器齿轮加工精度高，润滑条件好，运行的噪音及震动小；同时后期维护方便简单、清洁卫生。

### 4.3 卷筒对接环形焊缝的自动化焊接技术

目前启闭机卷筒在平焊位的辐板与筒体环形组合焊缝、辐板与轮毂的环向对接缝焊接大多采用手工和半自动电弧焊，对于自重吨位较小的卷筒结构平焊位的环形焊缝(见图2)，通过支撑卷筒自重托盘的旋转运动来实行焊接的自动化。针对尺寸和自

重较大卷筒环形焊缝的焊接，公司研发技术人员开发了一种自动化焊接装置。通过带导向轮的焊接小车和环形柔性轨道来实现环形焊缝的自动化焊接，可实现直径在1m及以上的环形对接焊缝、组合焊缝、角焊缝在平焊位置的自动化焊接。其中焊接小车采用三轮小车，前段一个车轮，后段两个车轮，一侧为主动轮，另一侧为从动轮。前轮作为导向，可在环形柔性轨道上行进，摩擦阻力小，可靠性高，有效保证焊丝填充位置的准确度。

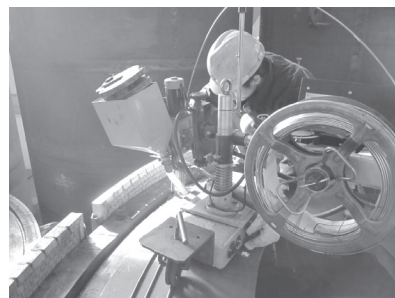


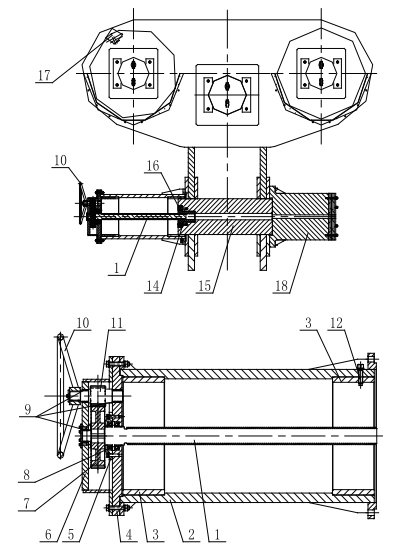
图2 卷筒辐板环形焊缝焊接

### 4.4 大型动滑轮组手摇移轴装置设计

大型启闭机动滑轮装置一般设计有手摇移轴装置，但在吊轴穿入闸门耳吊孔的过程中，吊轴的自重会使动滑轮装置朝一边偏斜，吊轴与吊耳孔之间在穿轴时产生较大的摩擦阻力，而且随着启闭机容量(即启闭力)的增大，特别是对乌东德12,500kN卷扬式启闭机来说，动滑轮装置的吊轴直径和长度都很大，重量达2000kg，在销轴穿入闸门耳吊孔的过程中，销轴的自重使动滑轮装置朝一边偏斜，销轴与吊耳孔之间在穿轴时产生较大的摩擦阻力，不易于穿轴。如果在工地现场采用撬棒来转动手轮，将造成动滑轮装置手轮和螺杆的损坏。因此设计了一套省力移轴装置(见图3)，包括销轴，套筒位于销轴的一端，套筒

两端设有自润滑衬套,销轴与自润滑衬套形成滑动配合,套筒远离销轴的一端支承有螺杆,螺杆的端头固设有齿轮,齿轮与齿轮轴啮合配合,齿轮的分度圆直径大于齿轮轴的分度圆直径,齿轮轴的自由端设有手轮,螺杆的另一端与螺母螺纹连接,螺母通过连接螺钉与销轴的端部连接。

该种设计方法,通过设置的齿轮组和螺杆螺母机构,可以解决现有技术超大型启闭机动滑轮装置穿轴困难的问题,减轻了人工转动移轴装置手轮所需力量,不需采用另外的工具就能可靠地将销轴穿入闸门吊耳孔中,提高了启闭机的操作性和可靠性,降低了劳动强度,改善了现场劳动条件。



1-螺杆; 2-套筒; 3-自润滑衬套; 4-内端盖; 5-压盖; 6-外端盖; 7-齿轮; 8-滚动轴承; 9-自润滑轴承; 10-手轮; 11-齿轮轴; 12-定位螺钉; 13-闸门吊耳; 14-螺母; 15-销轴; 16-连接螺钉; 17-动滑轮; 18-平衡重

图3 启闭机动滑轮组

#### 4.5 荷载检测及限制装置改进设计

12,500kN启闭机的起升荷载较大,滑轮组倍率较大,而每一根钢丝绳绕过一个滑轮后,由于传动效率的问题,从绕入到绕出来的钢丝绳拉力来比较的话,会有一定明显的变化。因

此,对于绕出(或绕入)卷筒侧钢丝绳与绕入(或绕出)平衡滑轮侧钢丝绳的拉力差别较大,荷载传感器的测量数据也不准确。因此,首次采用附着式测力传感器这一安装方式,将定滑轮组一侧支座的腹板作为检测的应变梁,腹板开设结构孔用于安装传感器,接口孔上、下二个面上分别粘贴电阻应变片,即利用附着同步变形的原理将被测应变梁的受力变形转换成传感器的变形,从而间接的检测定滑轮支座的受力情况,传感器标定只需对传感器弹性体加上标准载荷相应得到其输出值即可,使得测试精度大大提高。荷载传感器具体安装方式见图4。

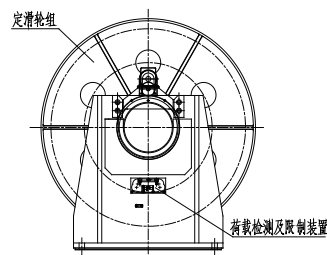


图4 荷载检测及限制装置

#### 4.6 研制出了新型的卷筒联轴器配钻孔攻丝方法

常规的卷扬式启闭机卷筒联轴器的配钻孔及攻丝需要使用专用的卷筒托架,再用镗床经行配钻孔攻丝,对于外形尺寸较大的卷筒还需要搭建工作平台和摇臂钻床等设备共同完成。此类方法工装尺寸较大,调校也相对费时,加工过程繁琐,施工周期长,而且镗床和钻床的功率较大,传递到丝攻上的扭矩也比较大,若遇到卡阻现象,很容易将钻头扭断,很难处理断掉的钻头。

为此,技术人员研发了一种利用磁力钻根据所要加工的螺孔尺寸,配置合适的导向套来进行钻孔和攻丝的制造

方法(见图5)。即将磁力钻以卷筒端面的腹板为基础,将整个磁力钻固定好,然后根据要加工的螺孔大小,配置合适的导向套,并以此导向套来控制钻头角度,保证钻头与加工面的垂直度,从而进行钻孔加工,最后再分多次,逐步加大丝攻的尺寸将螺纹加工到位。磁力钻相对扭矩小,且增加了断电保护装置,在遇到卡阻现象时,会自动停止工作,从而避免钻头断裂的情况出现。该方法使用灵活,不需要用较大的工装和设备,因此在保证装配精度的同时大大缩短加工时间,并且可重复使用、节省投资。

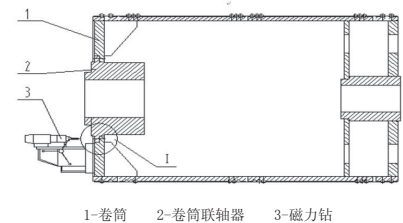


图5 配钻孔示意图

## 5 结语

以总体布置的合理性、吊装单元的轻量化、制造工艺的可靠性、经济性、先进性做为主要条件,并吸收各类启闭机设计制造方案的优点,攻克了一系列技术难题,最终实现12,500kN启闭机在乌东德水电站工程上的成功应用,对于类似超大型卷扬式启闭机在高水头电站和高坝建设的应用和推广,值得借鉴。

#### 参考文献:

- [1] 水利水电工程启闭机设计规范: DL/T5167-2002[S].
- [2] 张质文. 起重机设计手册[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1998.
- [3] 成大先. 机械设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [4] 钢结构设计手册: GB50017-2003[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.

# 匠心铸造精品 创新引领未来

——中国葛洲坝集团溪洛渡左岸电站机电安装调试工程创新技术介绍

莫文华<sup>1</sup> 崔慧丽<sup>1</sup> 张为明<sup>2</sup>

(1.中国葛洲坝集团机电建设有限公司 成都 610000; 2.中国葛洲坝集团股份有限公司 武汉 430033)

溪洛渡水电站是国家“西电东送”的骨干工程，位于四川省雷波县和云南省永善县交界的大峡谷内，以发电为主，兼有防洪、拦沙和改善下游航运条件等综合效益。电站分左、右岸地下电站，各安装9台单机容量77万kW机组，总装机容量1386万kW。

中国葛洲坝集团公司在承建溪洛渡左岸电站机电安装调试工程中，通过优化施工工艺，改进施工方案，研究总结出一套巨型机组优质高效装机的理论，并经过溪洛渡左岸电站的应用实践，提高生产效率，保证工期优化，使机组振动摆度指标均达到精品机组指标，实现了全部机组顺利投产目标。2013-2014年，溪洛渡左岸电站机电安装调试工程陆续投产发电。

2016年，溪洛渡水电站工程获得有国际工程咨询领域“诺贝尔奖”之称的“菲迪克2016年工程项目杰出奖”。这是目前世界第三、中国第二大水电站，也是世界上最先进的水电工程技术之一，它在提高工程质量、优化工程进度、提升工程安全等方面均较传统的施工方式表现出极大的优势，对推动我国水电机电安装行业的发展具有重要意义。

同时，溪洛渡左岸机组安装工程获国家级工法1项，科技进步奖2项，

发明与实用新型专利8项，技术创新保证了工程技术先进、质量优良、经济安全，也更新了巨型水机组安装技术和工艺，形成了具有自主知识产权的安装核心技术。该工程在机电安装方面应用的创新技术主要有以下几项。

## 科学高效的施工组织设计

针对电站机电设备安装与调试工程规模大、周期长，技术复杂等特点，项目部采取整体规划、专项研究的模式，实施前进行系统组织设计，通过对工期进度的优化及工位、人力物力等资源的整合，坚持以进度、安全、质量、投资控制为核心，科学高效地精细化管理，创造了“一月双投”“半年六投”77万kW机组的水电新纪录。

## 巨型水轮机基础现场机加工技术

随着技术和管理的进步，严于“三峡标准”的溪洛渡机电设备安装标准已发展成为国内水电行业新的标杆。作为机组安装的定位中心，水轮机基础的机加工采用9m车床在现场进行加工，加工精度要求高，加工量大，最终确保加工出来的下固定止漏环、座环固定导向条同心度小于0.05mm，底环安装面、顶盖安装法兰面平面度

小于0.10mm。

## 发电机定子组装质量控制技术

发电机定子最大外径16,890mm，最大高度5535.5mm，定子铁芯高度3295mm，整体定子总重772.2t。在定子安装中，为合理布设工位、节约安装工期，发电机定子采取机坑组装机工艺，避免了定子吊装引起的变形，自行设计了恒温恒湿控制装置，营造了机组安装无尘恒温的良好内部环境，有效保证了机组安装质量。定子叠片运用分段定位筋及预叠片新工艺，精确控制了定子圆度、提前工期10-15天，同时结合“巨型水轮机基础现场机加工技术”，采用高精度测量仪对定子中心、高程进行了一次确定，确保了机组安装效率及质量。

## 巨型水轮机筒阀一次预装控制技术

溪洛渡电站筒形阀是目前世界最大的，筒阀直径达9820mm。安装中，采用自主研发的巨型水轮机筒阀一次预装技术，通过控制筒阀导向条与座环固定导向条之间间隙，筒阀上升下降过程中的位移偏差，确保了一次预装的成功率，减少了筒阀吊装次数，提高了工效。

超高落差气体绝缘金属封闭输电

(下转第26页)

规模小的乡镇污水处理厂, 适宜建设集中运营中心, 配合流动值守。

项目公司在运营期内, 往往会经历水量增长、水质变化、提标改造、大修等, 因此工程设计要有合理的分期分组, 还要考虑提标改造、中水回用、能资源回收等可拓展性。

### 3 运行管理应注意的重要事项

#### 3.1 注重经验的积累和总结

运行管理水平是污水厂盈利的关键。

就技术层面而言, 做好污水厂的运行管理并不简单。污水厂来水的水质水量总在变化中, 再加上气候的变化、工厂异常排放等因素给污水处理造成的不利影响, 排放水质保持常年的、稳定的出水达标是不容易的。不同工艺、不同地方的污水处理厂所面临的问题都不一样, 需要探索并积累运营经验。

就经济层面而言, 污水处理企业

必须在控制成本的前提下, 保持出水达标。否则, 污水处理收益达不到预期目标。污水处理行业投资回报率本来就不高, 一旦运行成本高于经济评价时的预测值, 收益和现金流都会受到影响。

运行管理的关键是工艺维持与修正。现在, 各地都在加速建设污水厂, 建成的污水厂中, 有一部分运行不稳定, 尤其是工业园区的污水厂。究其原因, 污水水量、水质变化大是主因。来水变化大, 所采用的处理工艺适应性又差, 所以工艺维持有困难, 管理难度大。对于这样的污水厂, 修正运行参数或改变运行模式均无法凑效的情况下, 只能进行工艺改造。

#### 3.2 重视培养运营人才

随着技术进步, 污水厂自动化水平也在不断提高, 但单纯依靠自动化控制, 目前来说, 还是无法维持工艺稳定的, 人工经验仍然是制胜法宝。

特别是对于突发、偶发或间歇性异常情况, 及时有效地处置预案在运行管理中尤为重要。

众所周知, 微生物降解污染物是目前处理市政污水最为普遍的方法, 也是最为经济和环保的技术。对于以生物处理为主体工艺的污水厂, 运行管理人员不仅要关注MLVSS, SV等指标, 而且要了解污水处理微生物的特征, 每日观察生物相, 根据生物相的变化, 判断出水处理状况是趋于良好还是趋于恶化。

提高管理水平, 关键在人。投资人在做经济评价时, 常常不重视人的因素, 人工成本预计偏低, 尤其在2万吨/天以下规模的污水厂, 人工成本往往占的权重较大, 而实际上, 可研报告中的人工成本往往很难招聘到有经验的人员或没有考虑招聘、培训、人员流动等因素。

(上接第20页)

#### 线路(GIL)安装技术

溪洛渡左岸GIL设3回共计5563m, 垂直高差475m, 其安装技术难度大、质量要求高、施工条件复杂。项目部针对现场运输道路和安装区域的特点制定专项运输和安装方案, 吊装区内设备工器具摆放有序、标识清晰, 安全文明施工井然有序, GIL工作区域被业主评为样板工作面。

2000年以来, 中国进入大水电时代, 在世界排名第一和第二的水电站

建设中, 葛洲坝集团先后完成了三峡工程18台70万kW和2台5万kW水轮发电机组、溪洛渡工程9台77万kW级巨型水轮发电机组优质安装任务, 总投产量达到1963万kW。其中, 水轮发电机组包括了四个主机厂家四种结构、发电机三种冷却方式(空冷、水冷、蒸发)、蜗壳三种埋设方式(直埋、保压、电层)等技术特点, 首批国产设备安装调试任务均在葛洲坝机电人手中得以实现, 创造了多项水电纪

录, 实现多项重大技术创新与突破。

溪洛渡多台机组安装及运行主要技术指标达到高于国家标准的溪洛渡精品机组标准, 电站巨型机组的安装投产, 将对后续100万千瓦级水轮发电机组的设计研制、安装调试, 提供技术支持及有效借鉴, 也将会对推动我国水电重大技术装备的发展和水电沿着“一带一路”战略走向世界做出贡献。