

冲击式水轮机泥沙磨损试验测试系统研发

刘小兵, 覃 蓓, 邓万权, 吉 雷, 张 力, 姚 兵, 刘季涛

(流体及动力机械教育部重点实验室, 四川 成都 610039)

摘 要: 冲击式水轮机在多沙河流上运行时会面临十分严重的泥沙磨损问题。针对目前国内缺乏冲击式水轮机泥沙磨损研究试验系统的情况, 研发了一套冲击式水轮机泥沙磨损试验测试系统。该系统由管路及供水系统、沙水池及泥沙搅拌系统、水轮机试验机组、数据采集与测控系统等部分组成, 可支持最高水头 800 m、最大流量 300 m³/h 和最高水轮机转速 2500 r/min 的冲击式水轮机泥沙磨损和性能试验, 采用可编程控制器(PLC)和 LabVIEW 软件可实现供水泵启停、水轮机转速调节和管路阀门自动控制, 同时能实时监测水轮机转速、水头、流量等关键参数。经过试验显示该泥沙磨损试验测试系统具有精度高(达 0.3%)、自动化水平高、运行稳定、操作简单以及人机界面友好等特点。

关键词: 冲击式水轮机; 泥沙磨损; 性能; 试验; 测控系统

中图分类号: TK735 文献标志码: A 文章编号: 1673-159X(2024)03-0018-07

doi:10.12198/j.issn.1673-159X.5430

Development of Sediment Wear Test System for Pelton Turbines

LIU Xiaobing, QIN Bei, DENG Wanquan, JI Lei, ZHANG Li, YAO Bing, LIU Jitao

(Key Laboratory of Fluid and Power Machinery, Ministry of Education, Xihua University, Chengdu 610039 China)

Abstract: Pelton turbines encounter significant sediment erosion issues when they operate in sandy river environments. Due to the absence of a sediment abrasion test system for Pelton turbines in China, a specialized system has been developed. The system comprises a pipeline and water supply infrastructure, sand pool with sediment mixing capabilities, hydraulic turbine testing unit, data acquisition, measurement, and control systems. It is capable of conducting sediment abrasion and performance tests on Pelton turbines with a maximum head of 800 m, maximum flow rate of 300 m³/h, and maximum turbine rotational speed of 2500 r/min. It utilizes programmable logic controller (PLC) and LabVIEW software to control water pump operation, turbine speed, and performance testing. The programmable logic controller (PLC) and LabVIEW software facilitate water supply pump start/stop, turbine speed adjustment, and automatic pipeline valve control. Additionally, key parameters include turbine speed, head, and flow rate are monitored in real-time. The tests results show that the sediment abrasion test system exhibits high precision (up to 0.3%), a high level of automation, stable operation, simplicity, and a user-friendly interface.

收稿日期: 2024-02-10

基金项目: 国家自然科学基金联合基金重点支持项目(U23A20669); 四川省工程研究中心创新能力建设项目(2022-510124-04-01-622476)。

第一作者: 刘小兵(1965—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为流体机械流动理论与泥沙磨损。

ORCID: 0000-0002-0145-3701 E-mail: liuxb@mail.xhu.edu.cn

引用格式: 刘小兵, 覃蓓, 邓万权, 等. 冲击式水轮机泥沙磨损试验测试系统研发[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2024, 43(3): 18-24.

LIU Xiaobing, QIN Bei, DENG Wanquan, et al. Development of Sediment Wear Test System for Pelton Turbines [J]. Journal of Xihua University(Natural Science Edition), 2024, 43(3): 18-24.

Keywords: pelton turbine; sediment wear; performances; experimental; measurement and control system

中国拥有丰富的水能资源,根据《水电发展“十四五”规划》,潜在开发装机容量约 660 GW,其中 450 GW 位于西南地区。冲击式水轮机因其高水头和高效率的特点,在多沙河流环境下面临严重的泥沙磨损,影响效率和稳定性,因此研究其抗磨损能力至关重要,而泥沙磨损试验是其重要的研究手段。

多年来,研究者们针对泥沙磨损问题开发了一些试验装置,如射流冲击型^[1-4]、旋转型^[5-6]和圆盘绕流型^[7]等装置。射流冲击型装置主要采用含有固体颗粒的喷射水流或气流冲击试件表面造成磨损,常用于研究固体颗粒磨损的基本规律和材料的耐磨性。旋转型试验装置主要采用密封容器中盛沙水混合液及固定的试件,使容器或试件旋转,形成试件与沙粒的碰撞造成磨损,常用于研究材料的耐磨性和沙粒磨损的基本规律。圆盘绕流型试验装置主要采用高速旋转圆盘上的阻力体造成局部扰流而使扰动区的试件磨损,常用于模拟过流通道中局部阻力部件的沙粒磨损特性、空蚀与泥沙磨损联合作用以及材料的耐磨性。振动冲击型试验装置采用在含有磨粒的混合液容器中固定试件,依靠容器振动造成试件磨损,常用于研究试件表面的磨损现象和大小不同磨粒的混合磨损作用。目前研究发现,这些试验装置对水轮机过流部件的泥沙磨损试验研究还存在局限性,很难针对水轮机的内部实际流态。我们开发的反击式水轮机泥沙磨损试验系统和建立的测试方法^[8-9]结合其水轮机过流部件内部流态的数值结果,更贴近实际情况,但还不适用于冲击式水轮机。冲击式水轮机泥沙磨损试验测试系统由于其系统压力高、可靠性和安全性要求高,而且冲击式水轮机关键过流部件的水斗、喷针和喷嘴表面为曲面,因此对泥沙磨损试验测试仪器的精度和测试方法要求更高。

随着计算机、自动控制技术和虚拟仪器的发展,试验数据的实时采集和处理变得更加精确和自动化。哈尔滨大电机研究所基于高 II 台架构,采用新设计理念和设施,成功构建了先进的水力机械试验平台^[10]。此外,沈潜^[11]在东方电气的通用试验台

升级了测控系统,增强了性能参数的测试能力。中国水利水电科学研究院利用 LabVIEW 开发了一套综合的水力机械试验系统^[12],支持多种性能测试,并实现数据的实时处理和分析。葛睿萱^[13]则利用 LabVIEW DCS 工具集,开发了一个自动化的水轮机模型试验台,使效率测试更加高效。

目前,国内现有的冲击式水轮机试验台多为性能试验,基本无法开展泥沙磨损试验,通用的泥沙磨损试验台也并不能针对冲击式水轮机。基于此,根据冲击式水轮机工作和泥沙磨损试验原理,研发冲击式水轮机泥沙磨损试验系统,用于冲击式水轮机关键过流部件的泥沙磨损试验以及水轮机性能试验。

1 泥沙磨损试验系统主要参数

该冲击式水轮机泥沙磨损试验系统按照 GB/T 15613—2008《水轮机、蓄能泵和水泵水轮机模型验收试验》^[14]和 SL142—2008《水轮机模型浑水验收试验规程》^[15]的相关标准设计,可进行冲击式水轮机关键过流部件泥沙磨损试验和模型水轮机性能试验。参照国内外同类浑水试验台的设计水头,确定试验系统的试验水头和转轮节圆直径,试验系统的主要参数见表 1。

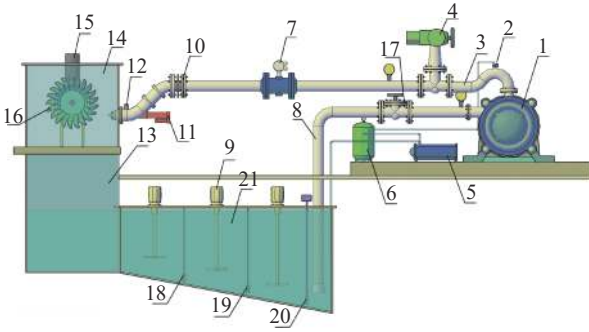
表 1 试验系统主要参数

Tab. 1 Main parameters of the test system

主要参数	参数值
最高试验水头/m	800
最大试验流量/(m ³ /h)	300
最高水轮机转速/(r/min)	2 500
转轮节圆直径/mm	400
最大供水动力/kW	2×450
测功电机功率/kW	250
测功电机转速/(r/min)	2 500

2 试验系统主体结构设计和特点

试验系统主体结构如图 1 所示,采用单喷嘴布置的开放式系统,主要仪器设备由供水泵、阀门、电磁流量计、试验模型冲击式水轮机组、测功电



1—供水泵; 2—真空阀; 3—出水管; 4—电动球阀; 5—真空泵; 6—真空罐; 7—电磁流量计; 8—进水管; 9—搅拌棒; 10—伸缩节; 11—喷射机构; 12—压力传感器; 13—集水箱; 14—可视化机壳; 15—测功电机; 16—模型转轮; 17—电动闸阀; 18—温度传感器; 19—液位传感器; 20—在线浊度仪; 21—沙水池。

图1 试验系统主体结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the main structure of the test system

机、沙水池、泥沙搅拌器、浊度仪(泥沙浓度测试仪)等组成,泥沙磨损试件另行制作。采用的主要设备及参数见表2。

研发的冲击式泥沙磨损试验系统主体结构实物图如图2所示。

3 测控系统

试验测控系统由硬件结构和程序设计两部分组成,实现对冲击式水轮机泥沙磨损的试验测试。

3.1 测控系统硬件结构

测控系统的硬件结构主要由工控机、RS485通信模块、S7-1200可编程控制器单元、伺服驱动器、扭矩仪、各类传感器、配备RS485端口的可编程仪器以及四象限直流调速器等组成,其硬件结构框图如图3所示。该系统采用常规手动控制和微机自动控制两种操作模式,具备分散控制和集中统一控制功能,保证测控系统运行的安全可靠。

流量、喷口压力、水池温度、水池液位、管路真空度、沙水浓度等信号由电磁流量计、压力传感器、温度传感器、液位传感器、真空传感器、浊度仪等收集并传输至信号调理板。信号调理板将这些信号转换成1~5V的直流电压信号,经过数字滤波器去除干扰后的信号随后送至高精度数据采集模块(12位A/D转换),将模拟信号转换成数字信号以供工控机处理和分析。

测控系统通过RS485通信手段、中间继电器以及可控硅元器件对试验台供水泵启停、阀门开

表2 主要设备及参数

Tab. 2 Main equipment models and parameters

设备及型号	参数
2台D280-43×9多级离心泵供水系统	流量280 m ³ /h; 扬程387 m; 转速1480 r/min; 电机功率450 kW
2BV2071水循环式真空泵	极限压力33 MPa; 抽气速率1.83 m ³ /min; 功率3.85 kW; 耗水量4.2 l/min
JG90电动V型球阀	公称直径DN200; 公称压力0~10 MPa; 法兰连接; 介质温度-20~425 °C
TCZQ961N电动球阀	公称直径DN20; 公称压力0~10 MPa; 螺纹连接; 工作温度≤150 °C
Z941W不锈钢电动闸阀	公称直径DN200; 公称压力1.6~6.4 MPa; 法兰连接; 介质温度-29~425 °C; 执行器AK3230Z-1W
KFE-200电磁流量计	公称直径DN200; 公称压力10.0 MPa; 流量范围56.5~1 130 m ³ /h; 精度0.2%
Z4-280直流发电机	额定电压400 V; 额定功率250 kW; 额定转速200 r/min; 励磁方式: 他励
PDCR5071压力传感器	公称压力0~10 MPa; 精度0.2%
CYYZ18C压力变送器	公称压力0.1~0 MPa; 精度0.1%
MIK-P260液位变送器	0~5m; 精度0.5%
PT100温度传感器	-50~100 °C; 精度0.5%
NC-3、NJ2扭矩仪	0~2 000 N·m; 0~4 000 r/min; NC-3精度0.2%; NJ2精度0.1%
SIN-PTU100浊度计	在线分体式; 精度0.1%
BLD10-11-0.75搅拌机	搅拌轴长度L=1m、1.3m、1.6 m
水轮机关键过流部件	转轮节圆直径40 cm, 水斗21个, 以及喷针和喷嘴, 材质均为不锈钢
机壳	尺寸1.52 m×0.6 m×1.63 m, 材质厚度60 mm, 材质为不锈钢, 配可视化观察窗
沙水池	尺寸4.0 m×3.2 m×1.8 m, 有效容积V=15 m ³ ; 材质为不锈钢



图2 试验系统主体结构实物图

Fig. 2 Physical drawing of the main structure of the test system

闭以及设备执行机构进行操控,该系统与工控机之间同样采用RS485通讯方式完成指令的传递与数据的互换。

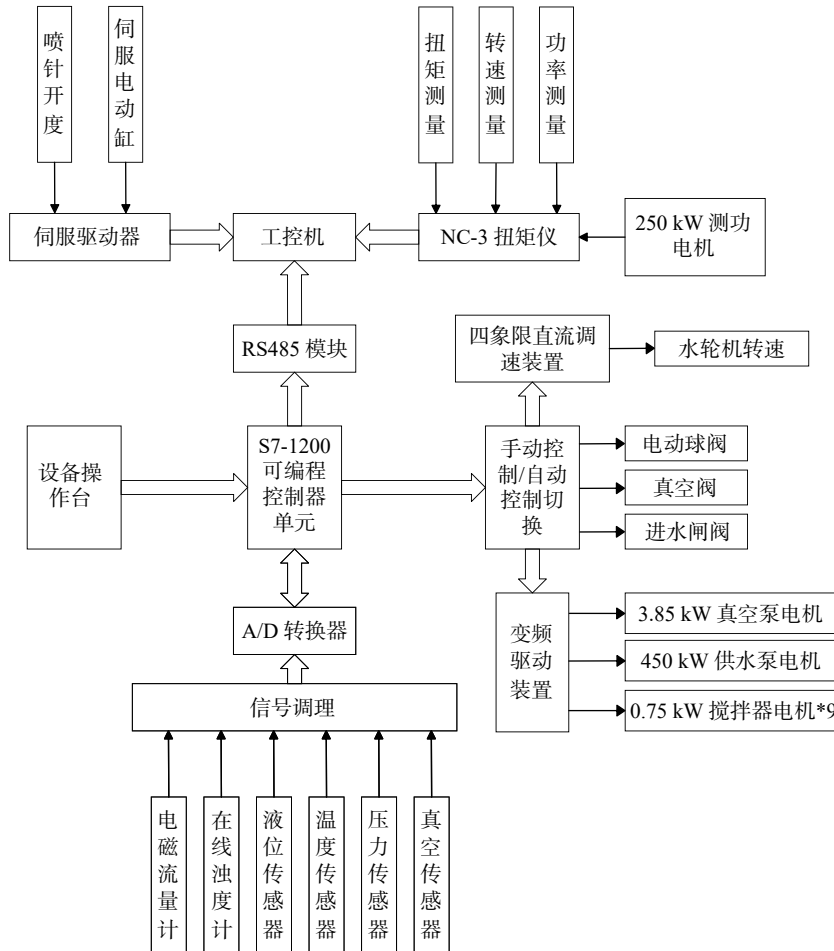


图3 测控系统硬件结构框图

Fig. 3 Block diagram of the hardware structure of the measurement and control system

测控系统采用西门子公司生产的 SINAMICS DCM 直流调速装置,具有高性能的转速和频率控制,电压可调范围 42~420 V,调频满足 100~6000 r/min 的调速要求。DCM 配备标准 CUD(控制单元)和高级 CUD 拓展模块,可同时控制供水泵电机、搅拌机电机、真空泵及冲击式水轮机的转速和频率,兼容更高计算性能和接口的应用。在室温下采用标准模拟量给定值输入时的稳定度在 $\pm 0.1\%$,充分保证了水轮机在发电状态下仍有 $\pm 0.1\%$ 的稳速精度。

可编程控制器(PLC)构成了测控系统硬件结构的核心,主要用于执行开关逻辑控制与动态操纵。在泥沙磨损试验过程中,PLC 对电磁流量计、压力传感器、在线浊度仪、液位传感器、温度传感器、真空传感器、水泵变频器以及直流调速器等模拟信号进行收集,并对这些信号进行逻辑处理,使其转化为可供工控机识别的有效数字信号。工控机与 PLC 进行实时数据共享,通过人机交互界面既可对试验系统运行状态进行在线监测,又可通过

控制窗口将控制信号输入给供水泵、阀门、变频器、水轮机等。

综合考虑试验现场环境、通信能力和项目成本等因素,选用西门子公司 S7-1200 系列,型号为 S7-1200 6ES7 214-1HG40-0XB2。该模块拥有 24 路数字量输入通道,4 路数字量输出通道,30 路模拟量输入通道和 26 路模拟量输出通道,充分满足现场试验所需要求。采用点对点的 PROFINET 总线通信,实时通信反应时间小于 10 ms,适用于需要快速响应的水轮机泥沙磨损试验。公开的用户通信和分布式 I/O 指令使测控系统高度集成且能与其他通信协议兼容,在后续的试验中可随意添加新设备和控制单元。

3.2 测控系统程序设计

测控系统程序设计框图如图 4 所示,软件操作界面运用 NI 公司研发的 LabVIEW 图形化编程语言开发环境进行构建。测控系统软件主界面如图 5 所示,此界面由整个试验系统的动态动画模块及

7个功能模块构成。动态动画模块为整体试验系统带来了实时监控效果,通过该动画模块可以展示试验系统中关键部件的即时状况,包括喷针开度、喷口压力、管路流量、进水管真空度、水箱中介质的温度和液位高度、水轮机转速、扭矩、功率和效率,供水泵和搅拌器电机频率以及电动球阀、真空阀、进水闸阀和真空泵、供水泵的控制信息等。7个功能模块分别为用户登录、状态栏、数据记录及存储、历史数据、故障显示、退出系统和系统急停。这些功能模块为动画模块提供了良好的性能延展性和人性化功能,试验人员通过功能模块和试验要求自行灵活调整各试验参数。

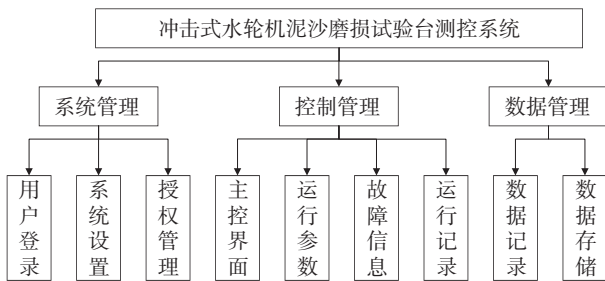


图4 测控系统程序设计框图

Fig. 4 Block diagram of the program design of the measurement and control system

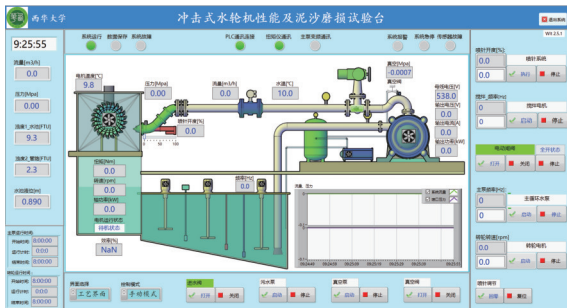


图5 测控系统软件主界面

Fig. 5 The main interface of the measurement and control system software

主界面包含对直流发电机转速设定控制、喷针开度设定、搅拌器的频率设定和供水泵电机频率设定,并监控搅拌器的启动情况、喷针开度的反馈值、流量的监测值、水轮机的扭矩和转速、实际功率、发电机的运行状态等。主界面下方则是对进水阀、真空阀的供水泵和真空泵的启动设定。系统急停按钮的作用是紧急情况停止供水泵、搅拌器以及控制水轮机的转速。主界面的右下角显示流量和压力的实时监控数据曲线,左侧显示流量、压力、液位、试验介质浊度,左下角设有手动模

式、自动模式、联动调试模式选项,便于试验人员选择试验台的运行方式。

4 试验系统误差分析

误差分析是评价试验数据可靠性的重要指标。在当前的数据采集系统和高精度测量仪器中,随着技术的进步,随机误差已被大幅减少,因此系统误差成为总测量误差的主要来源。在冲击式水轮机泥沙磨损试验过程中,需要将管路系统的流量、压力、转速和浊度等信号通过测控系统收集和传递,在此过程中难免会出现干扰波动,测量信号进入测控系统后经过传递也会形成一定的误差,因此根据误差分析理论,可具体从系统误差展开分析。

系统误差主要取决于测量方法和测量仪器的校验结果。系统误差的计算公式为

$$r_s = \sqrt{r_q^2 + r_p^2 + r_t^2 + r_n^2} \quad (1)$$

式中: r_s 为系统误差; r_q 为电磁流量计测量误差; r_p 为喷针出口压力测量误差; r_t 为浊度仪测量误差; r_n 为转速测量误差。各相关仪表精度见表2。经计算 r_s 为0.3%。

水轮机泥沙磨损试验后,需要对冲击式水轮机关键过流部件的泥沙磨损情况进行测试,以获取水斗、喷嘴口环的泥沙磨损试验数据。根据目前国内可用于冲击式水轮机关键过流部件泥沙磨损测试的设备情况,确定的测试方法有试块失重法、轮廓线法和三维扫描法。试块失重法一般精度较高,可用于水斗、喷针和喷嘴口环测试,但试块的设计、制作和安装固定很难,同时部件的一些位置还无法布置试块。轮廓线法可用于喷针和喷嘴口环测试,但对部件的尺寸大小有要求,一般不宜过大。三维扫描法可开展水斗、喷针和喷嘴口环测试,对部件的尺寸没有要求,但精度较低,试验时间长,不过可作为试块失重法、轮廓线法无法测试区域的测试补充。该泥沙磨损试验测试系统的3种测试方法目前采用的主要仪器仪表见表3。

根据采用的仪器仪表,可以获得不同测试方法下的总体测试误差(见表4)。3种测试方法的测试精度(含系统误差)如下:三维扫描法的精度为

表 3 泥沙磨损测试仪器的精度(误差)

Tab. 3 Accuracy (error) of test instruments for sediment abrasion

测试方法	仪器仪表	精度
三维扫描法	KSCAN-20三维扫描仪	20 μm
试块失重法	AE224C电子天平	0.000 1 g
轮廓线法	LJ-X8080激光测量仪	1 μm

表 4 试验测试系统泥沙磨损测试总体误差

Tab. 4 Overall error in sediment abrasion testing of experimental test systems

测试方法	误差/%
三维扫描法	0.36
试块失重法	0.30
轮廓线法	0.30

0.36%, 试块失重法的精度为 0.3%, 轮廓线法的精度为 0.3%, 可知测试总体误差主要来自试验系统误差。

在该试验系统上对额定水头 330 m、额定流量 240 m³/h、额定转速 1800 r/min、转轮节圆直径 40 cm 的一台冲击式水轮机进行泥沙磨损试验, 泥沙浓度为 0.5 kg/m³, 部件材质为 04Cr13Ni5Mo 不锈钢。水斗试块失重法部分测试数据见表 5, 其试块布置如图 6 所示的位置 01、02、03, 水斗三维扫描法测试磨损云图如图 6 所示, 喷嘴口环轮廓线法测试曲线如图 7 所示。

由表 5 可知, 水斗工作面均有较为明显的磨损, 离分水刃、缺口较近的区域磨损更厉害, 在离水斗出水边较近的区域也存在较为严重的磨损, 在靠近缺口以及工作面前端的区域磨损较轻, 磨损率在 0.30~0.34 μm/h。由图 6 可知, 该水斗产生磨损的区域主要为分水刃、缺口以及水斗工作面其他区域, 其中分水刃和缺口区域的磨损较为严重, 分水刃磨损率约为 1.24~5.00 μm/h。由图 7 可知, 喷

表 5 水斗试块失重法测试数据

Tab. 5 Data from bucket test blocks weightlessness method

布置位置	磨损量 ΔW/g	磨损深度 Δh /μm	磨损率 ε/(μm/h)
01	0.002 2	13.542 2	0.338 6
02	0.002 1	13.148 7	0.328 7
03	0.001 9	11.992 1	0.299 8

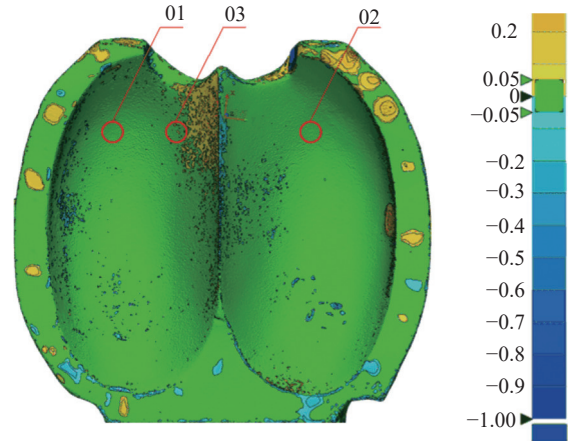


图 6 水斗三维扫描法测试磨损云图

Fig. 6 Wear cloud of bucket tested by 3D scanning method

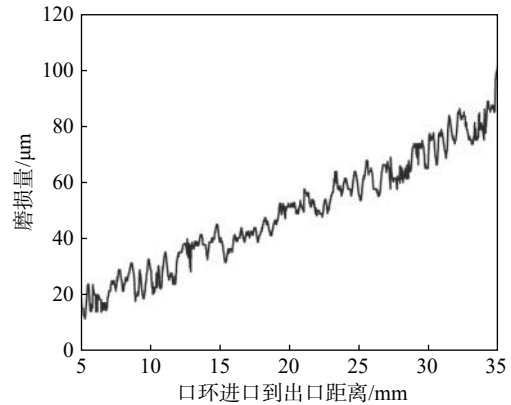


图 7 喷嘴口环轮廓线法测试曲线

Fig. 7 Curve from the nozzle's mouth ring contour line method test

嘴口环壁面有明显的磨损, 磨损后的壁厚整体减小, 在距口环出水口处, 即在口环喉部区域磨损率高达 2.5 μm/h。

3 种测试方法的水轮机泥沙磨损分布情况与电站真机所呈现的情况较一致, 验证了试验系统的准确性, 为冲击式水轮机泥沙磨损试验研究提供了试验平台。

5 结论

针对高水头冲击式水轮机的泥沙磨损研究需要, 研发了一套冲击式水轮机泥沙磨损试验系统。该系统主要由管路及供水系统、沙水池及泥沙搅拌系统、水轮机试验机组、数据采集与测控系统组成, 主要结论如下。

1) 试验系统的主体装置系统能满足最大供水动力 2×450 kW, 最高水头 800 m, 最大流量 300 m³/h, 最大转速 2 500 r/min, 转轮节圆直径 40 cm 的冲击

式水轮机关键过流部件泥沙磨损试验和模型冲击式水轮机性能试验。

2) 试验系统结合了可编程逻辑控制器(PLC)和虚拟仪器 LabVIEW 软件的技术,研发的测控系统能够自动化地实现供水泵的启停、水轮机转速调节以及相应管路阀门的操纵。此外,系统还能对水轮机转速、扭矩、功率、流量、水头和浊度(泥沙浓度)等关键参数进行集中控制、实时监控、数据采集与储存以及数据分析与处理。

3) 试验测试系统选用了高精度测量仪器设备,系统精度高达 0.3%。同时,该系统还具备自动化水平高、运作稳定、操作简单以及人机界面友好等特点,是国内首套冲击式水轮机泥沙磨损试验系统。

4) 试验测试系统采用的 3 种测试方法的测试精度(含系统误差)为:三维扫描法的精度 0.36%,试块失重法的精度 0.3%,轮廓线法的精度 0.3%。试验结果显示其电站冲击式水轮机泥沙磨损的试验结果与真机的实际磨损分布情况较一致。

参 考 文 献

[1] NEVILLE A, WANG C. Erosion-corrosion of engineering steels-can it be managed by use of chemicals?[J]. *Wear*, 2009, 267(11): 2018 – 2026.

[2] ZHAO Y L, ZHOU F, YAO J, et al. Erosion-corrosion behavior and corrosion resistance of AISI 316 stainless steel in flow jet impingement[J]. *Wear*, 2015, 328/329: 464 – 474.

[3] BARIK R C, WHARTON J A, WOOD R J K, et al. Electro-mechanical interactions during erosion-corrosion [J]. *Wear*, 2009, 267(11): 1900 – 1908.

[4] 姜胜利, 郑玉贵, 乔岩欣, 等. 高速喷射式冲刷腐蚀实验装置的研制及其实时动态电化学测试[J]. *腐蚀科学与防护技术*, 2009, 21(5): 489 – 491.

JIANG S L, ZHENG Y G, QIAO Y X, et al. Design of a high-speed jet impingement erosion-corrosion apparatus and in situ electrochemical measurement[J]. *Corrosion Science and Protection Technology*, 2009, 21(5): 489 – 491.

[5] 李平, 彭学周. 带有测温系统的液固两相流旋转冲蚀试验装置[J]. *电子测量与仪器学报*, 2017, 31(7): 1017 – 1024.

LI P, PENG X Z. Development of a rotary erosion-wear test apparatus with temperature measurement system for liquid-solid two-phase flow[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2017, 31(7): 1017 – 1024.

[6] 偶国富, 曹海彬, 朱祖超, 等. 加氢含硫污水管道冲蚀临界特性的电化学测试[J]. *化工学报*, 2009, 60(3): 691 – 695.

OU G F, CAO H B, ZHU Z C, et al. Determination of critical erosion-corrosion properties of hydrocracker sulfur-containing waste water pipe by electrochemical method[J]. *Journal of the Chemical Industry and Engineering Society of China*, 2009, 60(3): 691 – 695.

[7] 张昕, 燕军乐, 杨振彪, 等. 黄金峡泵站水泵母材泥沙磨损试验研究[J]. *长江科学院院报*, 2021, 38(12): 98 – 103.

ZHANG X, YAN J L, YANG Z B, et al. Experimental research on silt abrasion of water pump base material in Huangjinxia pump station[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2021, 38(12): 98 – 103.

[8] 王宇. 映秀湾电站水轮机导水机构沙水流动的数值模拟及泥沙磨损试验装置设计[D]. 成都: 西华大学, 2020.

WANG Y. Numerical simulation of sand and water flow in hydraulic turbine guide mechanism of Yingxiuwan Hydropower Station and design of sand wear test device[D]. Chengdu: Xihua University, 2020.

[9] 刘小兵, 曾永忠, 华红, 等. 水轮机沙水流动及磨损[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020.

LIU X B, ZENG Y Z, HUA H, et al. Sandy water flow and sediment erosion of hydraulic turbine[M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2020.

[10] 陈金霞, 赵越, 覃大清. 哈电高水头试验台(II)测试系统的特点[J]. *大电机技术*, 2002(4): 47 – 50.

CHEN J X, ZHAO Y, QIN D Q. The character of the test system for HEC No. 2 high head hydraulic model test stand[J]. *Large Electric Machine and Hydraulic Turbine*, 2002(4): 47 – 50.

[11] 沈潜. 东电水力机械通用试验台测试与控制系统改造[D]. 重庆: 重庆大学, 2005.

SHEN Q. The reconstruction of the test and control system for universal test stand for hydraulic machinery in DFEM[D]. Chongqing: Chongqing University, 2005.

(下转第 44 页)

thermal layout optimization method of wind turbine engine room[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2017.

[6] 韩阳阳. 瓦斯发电站发电机组冷却系统优化改造[J]. 机械管理开发, 2021, 36(3): 158 – 160.

HAN Y Y. Optimization and renovation of cooling system of generator set of gas power station[J]. Mechanical Management and Development, 2021, 36(3): 158 – 160.

[7] 谭礼斌, 袁越锦, 黄灿, 等. 基于 CFD 的某变频发电机流场数值模拟[J]. 青岛理工大学学报, 2020, 41(6): 143 – 150.

TAN L B, YUAN Y J, HUANG C, et al. Numerical simulation of flow field for frequency conversion generator unit based on CFD[J]. Journal of Qingdao Technological University, 2020, 41(6): 143 – 150.

[8] 谭礼斌, 袁越锦. 基于 STAR-CCM+ 的通机整机流场数值模拟[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2021, 40(5): 69 – 75.

TAN L B, YUAN Y J. Numerical simulation on flow field analysis of general purpose engine based on STAR-CCM+[J]. Journal of Xihua University (Natural Science Edition), 2021, 40(5): 69 – 75.

[9] 王旭龙, 朱晔, 郑卫强. 风力发电机组机舱散热外布局优化设计研究[J]. 机械设计, 2021, 38(2): 78 – 85.

WANG X L, ZHU Y, ZHENG W Q. Research on optimization design of the heat-dissipation external layout of the wind turbine's engine room[J]. Journal of Machine

Design, 2021, 38(2): 78 – 85.

[10] SILVA P R S, LEIROZ A J K, CRUZ M E C. Evaluation of the efficiency of a heat recovery steam generator via computational simulations of off-design operation[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2020, 42(11): 1 – 18.

[11] 闫闯. 考虑多热源影响的风电机舱散热布局优化研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2019.

YAN C. Study on optimization of heat dissipation layout of wind turbine engine room considering the influence of multiple heat sources[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2019.

[12] 马铁强, 闫闯, 林耀坤, 等. 双馈风力发电机温度场与环境温度相关性研究[J]. 重型机械, 2019(6): 27 – 33.

MA T Q, YAN C, LIN Y K, et al. Research on the correlation between ambient temperature and temperature field doubly-fed wind turbines[J]. Heavy Machinery, 2019(6): 27 – 33.

[13] 谭礼斌, 袁越锦, 黄灿, 等. 基于 STAR-CCM+ 的发电机流场对比分析及结构优化[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2019, 38(4): 77 – 82.

TAN L B, YUAN Y J, HUANG C, et al. Flow field comparison analysis and structure optimization research of a generator unit using STAR-CCM+[J]. Journal of Xihua University (Natural Science Edition), 2019, 38(4): 77 – 82.

(责任编辑: 饶莉)

(上接第 24 页)

[12] 孟晓超, 张建光, 张海平, 等. 基于 LabVIEW 的水力机械模型性能测试系统[C]//中国水力发电工程学会水力机械专业委员会—第十七次中国水电设备学术讨论会论文集. 北京: 中国水利水电出版社, 2009: 385 – 389.

MENG X C, ZHANG J G, ZHANG H P, et al. Hydraulic machinery model performance test system based on LabVIEW[C]//Proceedings of the Seventeenth China Hydropower Equipment Symposium of the Hydraulic Machinery Committee of China Hydropower Engineering Society. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2009: 385 – 389.

[13] 葛睿莹. 水轮机模型试验台自动化试验系统研制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.

GE R X. Development of automatic test system of model hydro-turbine test stand[D]. Harbin: Harbin Insti-

tute of Technology, 2019.

[14] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 水轮机、蓄能泵和水泵水轮机模型验收试验: GB/T 15613—2023[S]. 北京: 中国标准出版社.

Standardization Administration of the People's Republic of China. Hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines model acceptance tests: GB/T 15613 — 2023[S]. Beijing: Standards Press of China.

[15] 中华人民共和国水利部. 水轮机模型浑水验收试验规程: SL 142—2008[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.

Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Code of practice for model acceptance tests of hydraulic turbine with sediment water: SL 142 — 2008[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2009.

(责任编辑: 夏书林)