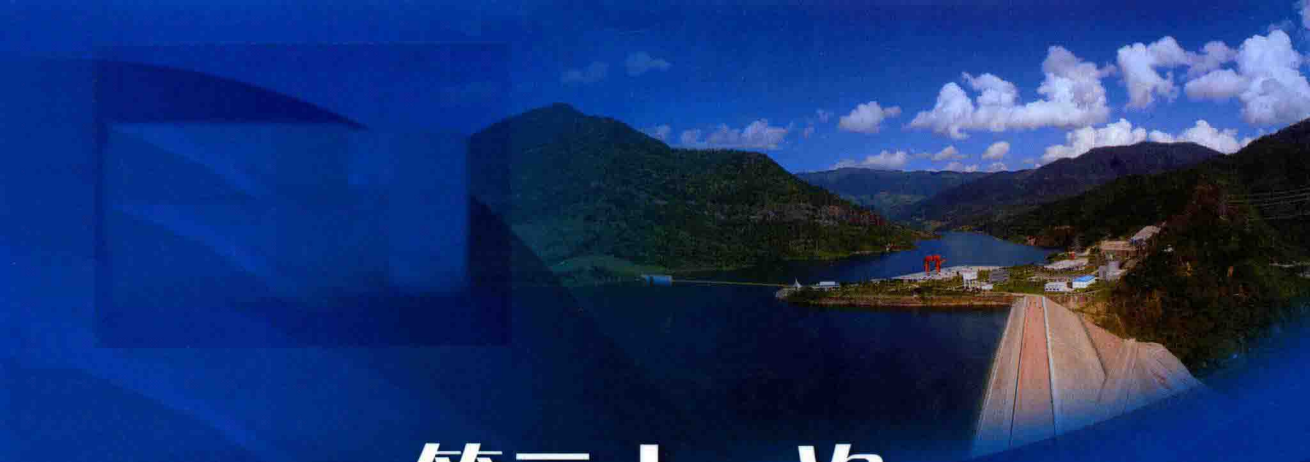




第二十一 次 中国水电设备学术讨论会 论文集

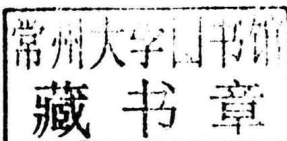
中国电机工程学会水电设备专业委员会
中国动力工程学会水轮机专业委员会 编
中国水力发电工程学会水力机械专业委员会



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

第二十一 次 中国水电设备学术讨论会 论文集

中国电机工程学会水电设备专业委员会
中国动力工程学会水轮机专业委员会 编
中国水力发电工程学会水力机械专业委员会



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书共收录 106 篇论文,分为 9 个部分:水力设计及选型、稳定运行、结构设计及制造、试验研究、安装运行及管理、状态检修、水电站改造、电气及辅机、其他。本书汇集了近几年来广大水电工程技术人员的研究和实践成果,内容涵盖水力发电、水力机械技术发展的新思想、新理论、新观点和先进技术,设计、制造、运行和管理中存在的技术问题,水电站事故教训的总结分析,泵站的选型设计以及水电事业的发展战略等。

本书可供大专院校、科研设计、制造、安装、运行及管理等部门的学生、专家和工程技术人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

第二十一次中国水电设备学术讨论会论文集 / 中国电机工程学会水电设备专业委员会, 中国动力工程学会水轮机专业委员会, 中国水力发电工程学会水力机械专业委员会编. -- 北京: 中国水利水电出版社, 2017. 10
ISBN 978-7-5170-5947-9

I. ①第… II. ①中… ②中… ③中… III. ①水力发电站—设备—学术会议—文集 IV. ①TV73-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第250921号

书 名	第二十一次中国水电设备学术讨论会论文集 DI ERSHIYI CI ZHONGGUO SHUIDIAN SHEBEI XUESHU TAOLUNHUI LUNWENJI
作 者	中国电机工程学会水电设备专业委员会 中国动力工程学会水轮机专业委员会 编 中国水力发电工程学会水力机械专业委员会
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京印匠彩色印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 45.75 印张 1085 千字
版 次	2017 年 10 月第 1 版 2017 年 10 月第 1 次印刷
印 数	001—800 册
定 价	200.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

第二十一次中国水电设备学术讨论会组织机构

组 织 委 员 会

主 任：陆 力

副 主 任：陶星明 赵 琨 罗兴琦 张成平 黄悦照 张 强

石清华 陈服军 王雅军 戴康俊 彭忠年 刘英华

委 员：孙殿湖 郭 江 蒋登云 李胜兵 胡安飞 戴 江

孟晓超 金德山 李铁友 方向阳 贾彦博 张 梁

陈 东 李仁年 樊玉林 易忠有 穆建军 刘海辉

学 术 委 员 会

主 任：王福军

副 主 任：胡伟明 王正伟 郑 源 李 正 覃大清 杨建东

徐洪泉 陈顺义 游 超 赵永智 李效革

委 员：曹树良 马震岳 罗先武 王建华 苑连军 苟东明

李月彬 曾镇铃 武赛波 田子勤 刘厚林 卜良峰

张双全 何成连 许庆进 王洪杰

秘 书 处

秘 书 长：潘罗平

副秘书长：魏显著 韩伶俐

秘 书：马素萍 刘诗琪 张海平 安 庆 刘 娟 廖翠林

前言

由中国电机工程学会水电设备专业委员会、中国水力发电工程学会水力机械专业委员会和中国动力工程学会水轮机专业委员会联合主办的中国水电设备学术讨论会是一个跨学会、跨行业、跨部门且能充分体现我国水电设备行业最高水平的权威性学术会议，每两年召开一次。

第二十一次中国水电设备学术讨论会将于2017年10月底在天津召开，由3个专委会和水力机械专业委员会水力机械信息网、中国电机工程学会水电设备专业委员会信息网联合主办，天津市天发重型水电设备制造有限公司协办。本次会议的举办，将为国内大专院校、科研设计、制造、安装、运行及管理等部门学者、专家和工程技术人员搭建一个学术交流平台，就水力发电、水力机械技术发展的新思想、新理论、新观点和先进技术进行交流，对设计、制造、运行和管理中存在的技术问题开展研讨，对水电站事故教训进行总结分析，对新建或改造电站、泵站的选型设计及水电事业的发展战略提出建议，推动水电事业的科学发展。

会议征文共收到论文117篇，经相关专业专家审核，本书共收录106篇论文。根据稿件内容，共分为9个部分：水力设计及选型、稳定运行、结构设计及制造、试验研究、安装运行及管理、状态检修、水电站改造、电气及辅机、其他。本书汇集了近几年来广大水电工程技术人员的研究和实践成果，希望能对广大水电设备工作者提供借鉴和帮助，也期望能产生共鸣或争鸣，促进我国水电设备技术水平的提高，推动水电行业的科技进步。

经过3个专委会和两个信息网的通力合作，特别是在论文作者和审稿专家的积极支持与帮助下，本论文集得以顺利出版。在此，我们谨向为本论文集的出版提供过指导、支持和帮助的单位、专家及各位论文作者表示深深的谢意，同时感谢中国水利水电出版社编审人员的辛勤工作和努力。

由于时间仓促，受编者水平和经验所限，错误和不当之处在所难免，敬请各位读者批评指正。

编者

2017年10月

目 录

前言

水力设计及选型

苏基-克纳里水电站冲击式水轮机主要参数选择	杨旭 张士杰	(3)
高扬程泵站双级双吸离心泵应用探讨	刘利	(10)
高水头、大容量灯泡贯流式机组设计要点探究	方晓红 赵士正 刘文辉	(15)
公格尔水电站水斗式水轮机选型及参数设计	安刚	(22)
轴流转桨式水轮机转轮改型设计及性能分析	郑阳 周凌九	(28)
小水电机电设备优化选型与设计		
——以古巴玛雅里水电站项目为例	徐伟 吴韬 袁文娟 孙见波	(36)
高水头轴流转桨式水轮机水力设计及模型验收试验	杜荣幸 刘韶春	(43)
老挝南欧江六级水电站水轮机通流部件优化设计		
研究	田娅娟 沈孝杰 王鑫 薛鹏 陈锐 彭忠年 莫为泽	(49)
基于 CFD 的低水头贯流式水轮机性能研究	郑源 蒋文青 郭楚 孙奥冉	(58)
导水机构立面间隙对水泵水轮机转动动力矩的		
影响	李小芹 陈鹏 时晓燕 王福军	(66)
应用同步建模技术进行水力机械叶片建模	邓杰 陈锐	(72)
不同网格处理方式下蝶阀开启过程的对比		
研究	邹志超 王福军 许建中 李端明	(79)
水沙流动特性对水轮机磨损影响综述	朱雷 陆力 陈莹 孟晓超	(89)
双蜗室与三蜗室蜗壳对离心泵径向力影响的对比		
分析	高忠信 朱文若 廖丽莎 易艳林 陆力	(100)
离心泵空化柔度及空化波速计算与		
分析	孟龙 廖翠林 王万鹏 李铁友 何磊	(106)
出口安放角和叶片数对离心泵气液输送特性影响		
研究	何磊 瞿军 官衍斌 李铁友 孟龙	(112)
小堆主泵的水力性能优化设计研究	刘伟超 赵永智 郑津生	(118)
大型卧式双喷嘴水斗式水轮机的设计	汤毅强	(126)
调压阀在南山口二级电站的应用	周鑫 张振中 潘英林 唐山 张国勋	(138)

稳 定 运 行

水电站水轮发电机组轴系振动特性研究	王武昌	李铁友	王万鹏	廖翠林	(145)			
水轮发电机组故障动态应力及相关测量分析				林建安	(153)			
不同机组全特性曲线对抽水蓄能电站水力过渡过程的影响 分析	刘 君	张军智	张延锋		(161)			
混流式水轮机的异常压力脉动				李启章	(173)			
十三陵抽水蓄能电站 2 号机组稳定性试验研究与 探讨	张 衡	郭新杰	李贺宝	胡新文	陈 柳	任绍成	(178)	
水泵水轮机“S”特性区临界点测试技术 探讨	张海平	朱 雷	张建光	马兵全	陈 莹	孟晓超	(185)	
张河湾抽水蓄能电站厂房局部构件强烈振动原因 分析	李金伟	谷振富	于纪幸	欧阳金惠			(191)	
带调压阀的水轮机调节系统的稳定性计算与试验研究				孔昭年	张晓峰			
	张建明	尤永陶	张中亚	周同旭	熊晓蕾	程广蕾	赵跃智	(200)
混流式水轮机稳定运行区下限出力探讨	李友平	程 建	段开林	曹长冲			(207)	
大型竖井贯流式水轮机压力脉动特性研究			张步恩	郑 源			(212)	
黑麋峰抽水蓄能电站水泵水轮机无叶区压力脉动及其影响 分析	任绍成	刘 平	郑建兴				(219)	
水力机械暂态稳定性探讨	陆 力	徐洪泉	彭忠年	王万鹏	王武昌		(227)	
改善白山电站水力稳定性的技术措施	王向志	王茜芸	吴喜东				(233)	
部分负荷工况下水轮机尾水管压力脉动数值研究	张 广	许 彬	吴喜东				(239)	
某模型水泵水轮机 1 倍频压力脉动 研究	刘德民	赵永智	管子武	荀洪运	胡江艺		(245)	
部分负荷下超高水头水泵水轮机无叶区压力脉动特性 分析	管子武	刘德民	赵永智				(253)	
S 特性优化对改善甩负荷时尾水管进口压力的影响 研究	凡家异	文树洁	陈太平	王伦其	张 建		(264)	
消除特殊压力脉动的一种辅助方法	管子武	邓祥平	王钊宁				(278)	
GB1 堆焊焊条在水轮机抗磨蚀修复中的应用	王者昌	王浩洋					(285)	

结构设计及制造

无预压小弹簧簇支撑推力轴承在清远抽水蓄能电站的 应用	陈泓宇	杨小龙	程振宇	黄运福	(291)
开潭水电站 2 号机组定子测温电阻坏点处理	郭 鹏	方恒飞			(297)
越南松萝水电站灯泡贯流式水轮发电机设计		王鲁军			(303)

磁轭圈式灯泡机组磁极芯棒及固定螺杆的设计计算	王 辉	汪小芳	(309)
观音岩水电站 4 号、5 号发电机结构特点		唐凤姣	(315)
江边水电站高转速水轮发电机总体方案设计	李铁军	张福芹	(322)
大型水轮发电机组转子支架焊接质量控制	李国亚	盖 斐	(327)
TurboDyn 转子动力学软件在蓄能机组中的应用	李海玲	任绍成	李志和 (333)
清远抽水蓄能电站进水阀结构特点分析	陈泓宇	程振宇	(343)
海南琼中抽水蓄能电站发电电动机设计	付朝广	吴晓健	(350)
越南会广水电站大口径蝶阀性能及结构特点	龙良民	李 捷	(358)
一种改进的锥形阀密封结构设计及应用	张旭毅	焦达先	潘罗平 (365)
3D 打印技术在模型转轮制造领域应用的可行性研究	程广福	魏 松	(369)
抽水蓄能电站水泵水轮机导水叶止推装置剖析	陈泓宇	何少润	季怀杰 (373)
高水头混流式小型转轮分两段式装焊技术		李 华	(381)
钢衬钢筋混凝土压力引水结构技术研究	单 钧	齐 岳	李守志 (386)
东方红水电站水轮发电机选型设计		王鲁军	(390)

试 验 研 究

清远抽水蓄能电站 1 号机组动平衡试验	何少润	陈泓宇	(397)
广东清远抽水蓄能电站发电电动机效率试验方法及结果 分析	杨桂周	李声宝	包康康 (404)
石塘水电站转轮改造项目水轮机模型验收 试验	姚 丹	卢 池	郭 娜 李广府 (413)
水轮机模型验收试验浅析		卢 池	陈梁年 (418)
白鹤滩水电站 HEC 水轮机模型验收试验		李海军	(423)
电涡流和电容传感器在蓄能机组摆度测试中的应用 分析	李贺宝	彭 宝	胡新文 李江涛 李海玲 杨跃超 (429)
基于 Labview 的数据采集巡检存储程序在水轮发电机现场试验中的 应用	杨跃超	姜明利	李海玲 李金伟 (435)
水电站机组相对效率试验分析	孙铭君	陈 柳	李金伟 于纪幸 (441)
轴流式水轮机模型锥管结构及其对性能试验的 影响	张建光	孟晓超	张海平 朱 雷 马兵全 陈 莹 (446)
水泵水轮机模型压力脉动验收及比较 分析	徐洪泉	孟晓超	陈 东 张海平 潘罗平 (451)
勐戛河水电站带调压阀水轮机调节系统动态特性的试验 研究	周同旭	孔昭年	王柏柏 张中亚 张晓峰 尤永陶 熊晓蕾 张振中 (459)
水泵事故断电过程现场试验研究	贾瑞旗	闫 宇	张弋扬 何成连 (464)

安装运行及管理

清远抽水蓄能电站机电技术管理综述	汪志强	陈泓宇	(475)
清远抽水蓄能电站机电设备油漆防腐涂装技术			
应用	陈泓宇	陈志凌	吕志鹏
严继松	程振宇	(481)	
清远抽水蓄能电站机组设备安装技术管理	程振宇	陈泓宇	施玉泽
(489)			
清远抽水蓄能电站机组水泵启动浅析	郑启剑	陈泓宇	陈燕新
(495)			
500kV 三相一体式变压器安装过程及技术要求			张向南
(500)			
混流式水轮机止漏环对机组运行的影响及应对措施			李海军
(506)			
乌东德转轮加工厂 500t 桥机吊装方案优化与实践	马玉葵	杜建国	王献奇
(510)			
水电设备技术标准国内外对比			
研究	廖翠林	李铁友	王万鹏
徐洪泉	赵立策	(518)	
水电站机电设备质量控制			
浅析	何磊	赵立策	李铁友
王万鹏	廖翠林	吕京宸	(523)
清远抽水蓄能电站的 KKS 标识应用与基建 KKS 实施模式	陈泓宇	李华	(529)
溪洛渡水电站筒形阀同步方式及运行方式研究			孙立鹏
(535)			

状态检修

溧阳抽水蓄能电站球阀开启异常的分析及处理方法			赵世宽	(545)
高压油顶起装置压力故障分析及处理	陈泓宇	季怀杰	杨伟坡	(550)
某抽水蓄能电站磁极阻尼环脱槽变形故障分析	李华	陈泓宇	(555)	
清远抽水蓄能电站 1 号发电机转子一点接地故障的				
查找及处理	陈泓宇	黄运福	杨庆文	程振宇
(562)				
水电机组状态监测技术研究现状及前景探讨	曹登峰	潘罗平	周叶	(568)
HT6000 水轮发电机组状态检测系统在十三陵抽水蓄能电站机组中的				
应用	卢宝江	杨占良	李贺宝	刘伟
姜明利	李金伟	(573)		
大型水轮发电机组推力轴承油膜厚度监测装置研发与				
应用	曹登峰	陈中志	潘罗平	谢辉平
周叶	于晓东	(583)		

水电站改造

牛路岭水电站水轮发电机增容改造特点			张敏毅	(593)
老水电站兼顾丰、枯水期流量变化的一种水轮机改造				
方案	薛鹏	孔虎泰	李祥锋	田娅娟
王鑫	陈锐	(597)		
HL240 型水轮机技术改造	王鑫	田娅娟	薛鹏	彭忠年
(602)				
乃吉里水电站发电机通风降温技改分析				张智远
(609)				

电 气 及 辅 机

清远抽水蓄能电站调速液压系统浅析	郑加乘	陈泓宇	陈燕新	杨 帆	(617)
白市水电站消防设计综述				龙良民	(625)
GIBE III 水电站循环冷却供水系统优化设计	朱亚军			赵 弦	(633)
中国长江三峡集团公司水电站控制电缆管理探讨	陈绪鹏			康永林	(637)
国外孤网运行水电站设计中的特殊问题探讨	李天仲			甘 磊	(644)
南水北调 35kV 供电系统无功补偿的研究与实践				苗志强	(651)
水电信息监控展示趋势及监控 3D 架构实现				雷 亮	(656)
KSTY 水电站电气主接线设计的探讨				杨异希	(664)
清远抽水蓄能电站机组励磁系统 PSS 试验与参数优化				韩文杰	(667)
浅谈计算机监控系统控制柜接地系统	彭德民			刘德龙	(675)
AGC、AVC 在水电厂计算机监控系统改造中的平滑过渡	王明军			彭德民	(678)

其 他

3MW 单机容量海上风电场的经济效益敏感性

分析	罗 维	张斯翔	王 伟	冯浩达	胡宗邱	雷 肖	(685)
超大直径锥形阀液压控制系统的设计与应用	焦达先			韩云峰		张旭毅	(690)
导流罩对锥形阀排放性能的影响分析	焦达先	徐 勇		张旭毅		曹登峰	(696)
小型海岛抽水蓄能-风-光复合发电系统稳定性研究				高瑾瑾		郑 源	(701)
风光水多能互补供电技术研究	徐 伟	徐国君		陈 艇		王学锋	(708)
小浪底水利枢纽排沙洞弧形工作闸门调试经验浅析				张冠杰		冯占役	(714)

水力设计及选型

苏基-克纳里水电站冲击式水轮机主要参数选择

杨 旭 张士杰

(中水北方勘测设计研究有限责任公司, 天津 300222)

摘 要: 巴基斯坦苏基-克纳里水电站选用的水轮机组为近年来国内外较大规模的高水头、大容量冲击式机组, 水轮机主要参数选择直接关系到电站的运行效益、安全稳定性以及运行使用年限。本文在电站设计阶段, 结合统计结果和以往成功经验对水轮机关键参数进行了合理选择, 为电站的长期高效、安全、稳定运行创造了良好条件。

关键词: 苏基-克纳里水电站; 冲击式水轮机; 转轮; 比转速; 喷嘴; 额定转速

1 工程概况

苏基-克纳里水电站(以下简称“SK 电站”)位于巴基斯坦伊斯兰共和国西北部开伯尔-普赫图赫瓦省曼瑟拉(Mansehra)地区的 Kunhar 河上。该工程主要由大坝、引水隧洞、地下厂房和输电线路等部分组成。水库正常水位以下原始库容为 907 万 m^3 , 原始死库容为 630 万 m^3 , 原始调节库容为 270 万 m^3 。电站为引水式地下厂房, 引水隧洞长约 19.5km, 设计引水流量为 $114.6\text{m}^3/\text{s}$, 最大引水流量为 $126.06\text{m}^3/\text{s}$ 。

电站总装机容量为 873.508MW, 多年平均发电量为 3081GW·h, 安装 4 台立轴冲击式水轮发电机组。工程任务为发电, 在电力系统中担任调峰运行任务。

2 水电站基本参数

(1) 水库水位: 水库调节方式为日调节, 最高水位为 2233.00m, 最低水位为 2223.00m。

(2) 下游水位: 发电最高尾水位为 1316.15m。

(3) 电站净水头: 最大水头为 910.64m, 最小水头为 834.41m, 额定水头为 847.65m。

(4) 电站动能指标: 电站装机容量为 873.508MW, 装机 4 台。

(5) 泥沙情况: 电站多年平均年入库含沙量为 $0.18\text{kg}/\text{m}^3$, 不设沉沙池, 利用水库自然沉沙, 在水库运行 20 年时多年平均年过机含沙量为 $55\text{g}/\text{m}^3$, 对应的中值粒径 d_{50} 约

为 0.0052mm。

(6) 发电引水系统：引水隧洞长约 19.5km，洞径为 6m，引水隧洞后接调压井；调压井后接 2 条直径 3m 的压力竖井，然后一管两机进入水轮机。引水系统水力损失和电站发电净水头关系见表 1。

表 1 机组水力计算表

项 目	毛水头/m	单机流量/(m³/s)	水头损失/m	净水头/m
最大值 (1+1)	910.85	4.3	0.211	910.64
额定值 (2+2)	910.85	28.65	63.2	847.65
最小值 (2+2)	910.85	31.515	76.44	834.41

注 表中 1+1 是指 1 条压力钢管中有 1 台机引水发电，2+2 是指 2 条压力钢管中分别有 2 台机组引水发电。计算采用水轮机安装高程 1322.15m。

3 水轮机主要参数计算

该电站水头范围在 835~910m，安装 4 台单机容量 218.377MW 的水轮发电机组，是国内勘测设计单位无论在国内，还是走向国际市场以来，所承担设计、安装单机容量最大、发电水头最高的冲击式水力发电站。根据对已建、在建工程统计，该水头段并达到该单机容量下的冲击式水轮发电机组，在国际上也只有几家著名的水轮发电机组制造厂具有研发、设计和制造经验。由于水头高、单机容量大，电站发电引水含一定量泥沙且在汛期较为集中，所以水轮机参数的选择对电站长期高效、稳定运行影响较大。国内外典型中、高水头冲击式水轮机应用情况见表 2 和表 3。

表 2 国内典型中、高水头冲击式水轮机应用情况

序号	电站名称	水头 /m	额定出力 N_r /MW	转轮直径 D_1 /m	额定转速 n_r /(r/min)	喷嘴数	投产年份	制 造 商
1	天湖	1016~1026	15.6	1.7	750	2	1992	重庆水轮机厂
2	羊卓雍湖	790~859	23.1	1.565	750	3	1997	德国 VOITH
3	盐水沟	583~629	37.5	1.7	600	2	1966	捷克 SKODA
4	冶勒	546.7~644.5	122.5	2.6	375	6	2006	法国 ALSTOM
5	大发	482~513.8	123.73	3.0	300	6	2009	东方电机厂 其中转轮和喷嘴装配由奥地利维奥公司设计和制造
6	仁宗海	547.6~610	123.73	2.6	375	6	2009	东方电机厂 其中转轮和喷嘴装配由奥地利维奥公司设计和制造
7	金窝	595~619.8	143.6	2.63	375	6	2009	东方电机厂 其中转轮和喷嘴装配由奥地利维奥公司设计和制造

表 3 国外典型中、高水头冲击式水轮机应用情况

序号	电站名称	水头 /m	额定出力 N_r /MW	转轮直径 D_1 /m	额定转速 n_r /(r/min)	喷嘴数	投产 年份	制造商
1	圣西玛 (挪威)	885	315	5.06	300	5	1980	KB
2	朗西玛 (挪威)	1126	257	3	428.6	5	1977	KB
3	奥尔兰德 I (挪威)	840	243	3	375	6	1973	KB
4	弗洛格斯 (法国)	1330	234	2.85	500	6	1975	N
5	蒙·圣尼斯	869	203.5	3.1	31.5	6	1969	N·C
6	CCS (厄瓜多尔)	604.1	184.5	3.28	300	6	2016	安德里茨
7	Mont Cenis (法国)	869	200		375	6		GE (ALSTOM)

3.1 比转速

单喷嘴比转速 n_{s1} 。由于 SK 电站发电水头很高，必须重视冲击式水轮机叶斗的空蚀问题。根据挪威水轮机制造厂在高水头冲击式水轮机方面的选型经验^[1]，可按图 1 中曲线 2 选择单喷嘴比转速，即不超过曲线 2 的水平可避免汽蚀破坏，故此曲线称之为“免汽蚀”曲线。从图 1 中可以看出，当 SK 电站额定水头 H_r 取 847.68m 时，按照曲线 1， n_{s1} 只能取到 11.3m·kW，水平太低；而按照曲线 2， n_{s1} 取值不宜超过 17.5m·kW。曲线 1 为国内目前避免汽蚀破坏水平。曲线 2 为根据挪威经验，避免汽蚀破坏水平。

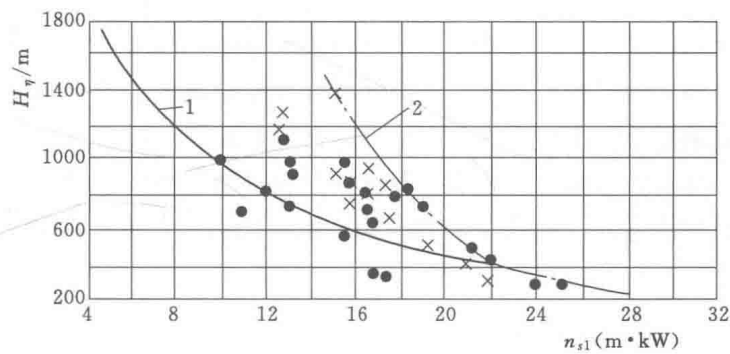


图 1 挪威“免汽蚀”曲线

国内外部分已投入运行的 600m 水头及以上冲击式水轮机 n_{s1} 统计见表 4。

表 4 国内外部分已投入运行的 600m 水头及以上冲击式水轮机 n_{s1} 统计表

序号	电站名称	水 头 /m	单喷嘴比转速 n_{s1} /(m·kW)	喷嘴数
1	仁宗海	547.6~610	19.8	6
2	冶勒	546.7~644.5	18.8	6
3	CCS	594~617	18.04	6
4	蒙·圣尼斯	869	16.9	6
5	玛尔塔	1102	11.7	6

参考其他国内外冲击式水轮机参数水平及“免汽蚀”曲线 2，考虑到 SK 电站存在的泥沙磨蚀因素，且通过向制造厂咨询，确定水轮机单喷嘴比转速宜取 $15.8\text{m} \cdot \text{kW}$ 。

3.2 喷嘴数量

根据经验统计，SK 电站水轮机的喷嘴数可以选 5 个或 6 个。

多泥沙电站冲击式水轮机，在单喷嘴比转速确定的情况下，喷嘴数量的选择直接影响水轮机比转速的选择，进而影响到水轮机的效率和抗泥沙磨蚀性能。同容量下的水轮机，随着喷嘴数的增多，水轮机比转速提高，额定转速增大，水轮机转轮直径和喷嘴直径相应减小，对降低水轮发电机组投资有利。但根据经验统计，转轮的整体泥沙磨损量与喷嘴数目成正比，在转速恒定的情况下，喷嘴数增加，则会增加水轮机的泥沙磨损，从这一角度应减少喷嘴数量。因此，喷嘴数量最终需要结合水轮机单机容量、设计制造水平和工程运行要求综合确定。

对不同喷嘴数机组进行参数分析比选，见表 5。

表 5 不同喷嘴数机组参数分析比选

N_r /MW	Z /台	喷嘴数	n_r /(r/min)	Q_r /(m^3/s)	d_0 /mm	D_1 /m	D_1/d_0	额定效率 /%	加权平均 效率/%
221.725	4	5	375	28.65	245	3.221	13.15	92.77	92.38
		6	375	28.65	235	3.258	13.86	93.12	92.78

通过比较，在相同额定转速条件下，两种喷嘴数水轮机转轮直径相差不大。6 喷嘴水轮机组加权平均效率较 5 喷嘴高 0.4 个百分点，对电站长期运行多发电量非常有利。

根据向制造厂咨询的结果，无论从设备投资、设备制造难度、发电量和实际工程利用情况看，采用 6 喷嘴比采用 5 喷嘴更有利于 SK 电站，因此，推荐 SK 电站水轮机采用 6 喷嘴方案。

3.3 额定转速

根据初步确定的水轮机比转速，计算出机组可选同步转速范围为 $274 \sim 392\text{r/min}$ ，对应的常用转速为 300r/min 、 333.3r/min 和 375r/min ，3 种转速水轮机制造难度系数见表 6。

表 6 各同步转速机组制造难度系数表

项 目	300r/min	333.3r/min	375r/min
转轮直径 D_1/m	4.034	3.646	3.258
最大水头 H_{max}/m	910.64	910.64	910.64
水轮机制造难度系数	14819	12105	9666

根据统计，国内外已投运高水头、大容量冲击式水轮机的制造难度系统见表 7。

表 7 国内外部分冲击式水轮机制造难度系数表

电站名称	水轮机单机出力 N_i/MW	转轮直径 D_1/m	最大水头 $H_{\max}$ /m	水轮机制造难度系数
冶勒	122.5	2.6	644.5	4357
大发	123.73	3.00	513.8	4624
仁宗海	123.73	2.6	610	4124
金窝	143.6	2.63	619.8	4287
CCS	188.266	3.28	616.74	6635
蒙·圣尼斯	203.5	3.1	869	8351
玛尔塔	180	2.7	1102	8034
朗西玛	257	3	1126	10134
弗洛格斯	234	2.85	1330	10803

从表 7 中可以看出，当 SK 电站水轮机额定转速为 375r/min 时，水轮机转轮直径最小且水轮机制造难度系数最低，而其他转速水轮机的制造难度系数偏大，已超出国内外已投运水轮机统计的制造水平。由于 375r/min 水轮机比转速较高，水轮机易取得更好性能，所以，确定额定转速为 375r/min。相应地，水轮机比转速为 38.6m·kW。

3.4 转轮直径估算

当额定转速 n 取 375r/min 时，计算转轮直径大约为

$$D_1 = \frac{40 \sqrt{H_r}}{n} = 3.11(\text{m})$$

式中： H_r 为水轮机额定水头，该电站取 847.65m； n 为水轮机额定转速，该电站取 375r/min。

根据向制造厂咨询的结果，综合考虑该工程特点，初步确定转轮直径为 3.258m。转轮示意图如图 2 所示。

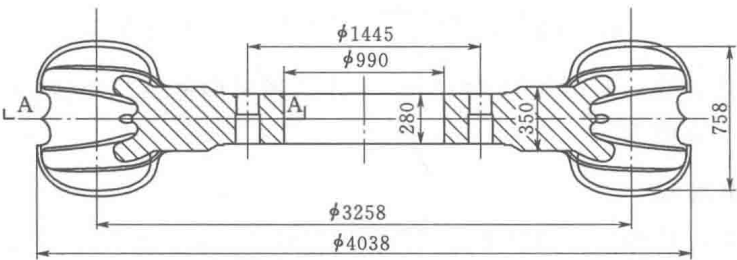


图 2 转轮示意图

3.5 喷嘴射流直径

(1) 喷嘴射流直径。喷嘴射流直径 d_0 用下式计算：

$$d_0 = 545 \sqrt{\frac{Q_r}{KZ \sqrt{H_r}}} = 220.7(\text{mm})$$