

文章编号:1672-3031(2018)05-0442-09

水力机械研究领域的发展

陆力, 彭忠年, 王鑫, 朱雷, 安学利, 刘娟

(中国水利水电科学研究院 水力机电研究所, 北京 100038)

摘要: 60年来, 中国水利水电科学研究院水力机械专业经过几代人的艰苦努力, 研发能力得到极大的提高。在研发平台建设、水力模型开发、测试技术和相关基础理论研究等方面取得了显著的进展, 目前是我国唯一专门从事水力机械应用基础和关键技术研究的国内外知名科研机构。本文从测试技术、CFD数值模拟及优化技术、状态监测和空化、空蚀及泥沙磨损等四个方面, 回顾了该院60年来在水力机械研究领域的发展过程, 重点介绍了近10年主要成果, 最后简要阐述了水力机械研究领域今后的研究重点和发展方向。

关键词: 水力机械; 水轮机; 水泵; 模型试验; 数值模拟; 泥沙磨损; 状态监测

中图分类号: TV143

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.2018.05.013

1 引言

解放后, 为适应我国水电建设的快速发展, 充分开发丰富的水能资源, 我国开始积极组建自己的水力机械专业研究队伍。1958年后期, 原电力部水电科学研究院与原中国科学院、水利部水利科学研究院相关专业合并后, 组建了水力机电研究所(以下简称机电所), 分为电气和水机两部分并设6个专业组, 主要从事水轮机现场效率试验、模型试验装备研发与建设、模型试验和新型水轮机组的开发研究, 以及水电站发电机、自动化及遥测遥控等的研究。1966年初, 机电所四、五、六专业组调整合并为四专业组, 主要从事水轮机泥沙磨损、水轮机空蚀及水轮机过水建筑物等方向的研究, 并增加了水轮机振动研究项目。文革期间研究所大部分科研人员下放各基层电站工作, 直至1978年全国科技大会后进行机构调整, 原水电站自动化和水电站遥测遥控专业等组建自动化研究所, 其他专业分成了研究室和实验室两大部分, 水力机电研究所名称仍保持不变^[1]。

建所60年来, 历经几代人的艰苦努力, 机电所已成为国内外知名的从事水力机械应用基础和关键技术研究的一流研究所。所内拥有大型现代化的试验平台和测试装备, 一流的研究手段和一批享誉国内外的知名专家学者。承担完成了大量国家及省部级重点研究项目, 为我国大型水利水电工程前期建设中的决策和后期的技术服务做出了巨大贡献, 取得辉煌的成绩和研究成果为我国水电事业的发展起到了重要推动作用。在“葛洲坝水电站轴流式水轮机转轮的研究”工作中利用自身的理论知识首先提出了轴流五叶片理论, 填补了国内该项技术的空白, 并获得1985年国家科技进步特等奖。

近年来研究所密切结合水利水电建设中的重大关键科技问题, 开展了一系列基础理论与应用研究, 承担了三峡右岸、锦屏 I 级和 II 级、溪洛渡、向家坝、乌冬德、白鹤滩等特大型水电站水轮机招标的同台对比复核试验任务。从2010年开始, 随着抽水蓄能电站水泵水轮机组招标中引入第三方试验台同台对比和验收试验, 承担了溧阳、仙居、绩溪和敦化等电站的模型试验任务。完成三峡、岩滩、叙利亚迪什林等多个电站的现场试验任务, 完成了中国长江三峡集团公司状态监测与诊断系统平台建设, 结合三峡、溪洛渡等大型水电站水轮机以及南水北调、滇池补水牛栏江泵站、引汉济渭三河口水利枢纽工程等大型调水工程用泵和水泵水轮机的研究, 利用CAD、CFD技术和高精度模

收稿日期: 2018-07-18

基金项目: 中国水科院科研专项(HM0145B432016, HM0145B552016, HM0145B182017)

作者简介: 陆力(1959-), 男, 河北唐山人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事水力机电设备研究。E-mail: luli@iwhr.com

型通用试验台，研发出了一系列性能优异的水轮机、水泵和水泵水轮机模型，其中混流式水轮机模型效率在国内率先突破94%。一批优秀技术成果应用于国内外的水利水电工程，创造了巨大的经济效益和社会效益。

2014年“混流式水轮机水力优化设计的关键技术及应用”、2017年“大型灌溉排水泵站更新改造关键技术及应用”获国家科技进步二等奖，“水力机械研发平台”、“混流式水轮机全系列水力模型研究和推广应用”、“水电机组智能评估及诊断技术研究与应用”分别于2014年、2017年、2018年获得大禹水利科学技术一等奖。

2 主要研究领域进展

以下主要就测试技术，CFD数值模拟与优化设计，水电机组智能评估及诊断技术和空化、空蚀及泥沙磨损研究等4个主要方面的研究进展进行介绍。

2.1 水力机械测试技术进展

2.1.1 水力机械模型测试技术 水力机械是一门以试验科学为主的学科，高精度水力机械试验设备及测试技术是设计开发和验证新型水力机械产品的必要条件，也是研究解决现场实际运行中出现异常故障的重要手段。建所初期，由于资源欠缺，实验室建设遇到了很多困难。原水电科研院于1958年建成一座1000 m²的模拟试验楼，因机构改变而移交新成立的机电所，改为水力机械试验室。文革后，为适应三峡水电站水轮机模型验收试验，试验台进行了大规模改建，于1987年通过部级鉴定，水科院水轮机通用模型试验台达到国际先进水平，曾获水电部科技进步一等奖，1989年获国家科技进步二等奖。

随着我国水电事业的蓬勃发展，特别是为满足三峡等水电站单机容量700 MW以上机组的同台对比试验的需要，2006年在中国水利水电科学研究院大兴试验基地，建成了更加现代化的高精度水力机械模型试验室。研制了水力机械模型通用试验平台，最高试验水头150 m，最大试验流量2.0 m³/s，试验条件满足IEC60193及GB/T15613等国内外标准的要求，模型效率试验综合误差小于±0.2%。试验平台可以进行水轮机、水泵和水泵水轮机等模型的能量、空化、压力脉动、飞逸特性及力特性等各项性能测试。开发了基于PXI和SCXI平台的高精度数据采集系统，实现了对电磁流量计、差压传感器、绝压传感器、动态压力传感器、力矩传感器等多种传感器的信号调理和高速数据采集；开发了基于图形化程序开发语言Labview数据采集程序，试验数据以高采样频率进行数据采集，并实时显示试验结果和数据曲线；开发了基于PLC的试验控制系统，实现对试验系统的远程和集中控制。

表1 水力机械模型通用试验台比较

试验台	VOITHUHD2-2	ALSTOMT3	EPFLPF2	IWHR-TP1	哈电高水头II台	东电DF-100
最高水头/m	240(T)/250(P)	100(T)/150(P)	120	150	150	100
试验流量/(m ³ /s)	1.5	0.9	1.4	2.2	2.0	1.5
模型转轮直径/mm	300~500	300~500	300~500	250~500	300~500	350~500
功率/kW	600	360	300	540	500	500
转速/rpm	2000	1000~2400	2500	2600	300~2500	3000
供水泵	2台	-	-	24SA-10	24SA-10B	2台
电机功率/kW	1600	-	-	724×2	600×2	700
电机转速/rpm	1490	-	-	1200	-	1100
综合效率误差/%	±0.2	±0.25	<±0.25	±0.2	±0.2	<±0.25

世界范围内主要的水力机械模型通用试验台主要有VOITH(德国海德海姆)、ALSTOM(法国格勒诺布尔)、EPFL(瑞士洛桑)、Rainpower(挪威特隆汉姆)、ANDRIZ(瑞士苏黎世，原VA-TECH Vevey)

和中国的中国水利水电科学研究院(IWHR)、哈尔滨大电机研究所(HEC)和东方电机有限公司(DEC)。各试验台的参数对比见表1。对比情况表明,我院的高精度水力机械模型试验台最大试验水头150 m,最大试验流量 $2.2 \text{ m}^3/\text{s}$,效率试验的综合不确定度优于0.2%,达到了国际先进水平。

研制了高灵敏度的卧式和立式水轮机测力静压轴承,测量力矩范围 $0 \sim 3000 \text{ N}\cdot\text{m}$,灵敏度达到 $0.015 \text{ N}\cdot\text{m}$,可承载轴向力2.5 t和径向力200 kg,并可用于转轮轴向力和径向力测量,提高了测试精度;研制了静态质量法水大流量标准装置及原位标定方法,检测能力达到 $2.2 \text{ m}^3/\text{s}$,不确定度优于0.05%,可进行800 mm以下口径的流量计校准,确保了模型试验中流量的高精度测量和量值溯源。

研究了新型测试技术在水力机械模型试验中的应用,开展了贯流式水轮机测试技术、水轮机转轮叶片动应力和压力脉动测量、水轮机内部流动PIV测试及基于声学法的空化检测和识别等试验方法和应用,取得了良好的成果。

作为中国认监委“水电站水力设备质量检验测试中心”的重要组成部分,积极开展水力机械相关的计量和检测工作。在国内率先开展第三方试验台水轮机和水泵模型同台对比复核试验工作,解决了长期困扰大型水电设备招标中缺乏技术评判而导致机组性能不达标的难题,将选择优秀水力机械模型关口提到机组招标之前,整体提高了投标水力机械的性能水平,为电站创造了巨大的经济和社会效益。

2.1.2 现场测试技术 水电机组原型测试技术,是通过大量的传感器对机组运行状态进行全面的信号测量,结合计算机数据存储技术,运用数学分析方法对测量数据进行处理,从而了解机组运行状态,为机组优化运行、消除机组隐患和开展状态检修提供数据基础和依据。

现场测试通常包括水轮机效率测试、机组稳定性测试、力特性测试。

水轮机效率测试包括绝对效率和相对效率测试,其中相对效率测试又称指数试验,是以水轮机流道中内外测压力差表征的流量,计算得到水轮机效率,在现场应用最广泛,比如轴流水轮机现场协联关系的确定等。确定水轮机绝对效率主要包括流速仪法、压力时间法、热力学法、声学法等。

机组稳定性测试主要为了合理划分机组安全稳定运行区间,指导机组优化运行,同时可以检验机组设计、制造和安装质量。在机组出现故障时,可以通过稳定性测试与监测,发现引起故障的原因,提出解决措施。稳定性测试测点通常包括机架振动、大轴摆度、压力脉动和噪声量。试验项目包括机组启动过程、停机过程、变转速过程、变励磁过程、变负荷过程和甩负荷试验等。

力特性试验主要包括轴向水推力测量、主轴扭矩测量、叶片动应力和残余应力测量等等。除此之外,还有动平衡试验、转轮固有频率试验等等。

水电机组设备现场测试技术的发展与当代前沿科学高度融合。目前其发展主要表现在传感器的精密化、测量参数和数据的集成化、试验分析的智能化等方面。如1/1000 K高精度测温传感器的应用,使得高水头水轮机效率试验适用的热力学法得到广泛的应用。而新式转浆流速仪的抗磨损和高密封能力,使得基于流速仪法的水轮机效率试验的精度得到了极大的提高。

目前国内外原型试验技术如稳定性试验等经过数十年的发展,已经日臻成熟,但在绝对效率、应力应变、磨损裂纹和空蚀等试验测量方法领域,由于其安装、检测和分析技术均存在较多的技术难点,现场实施案例不多,相当一部分技术仍停留在理论和研究阶段。

随着我国及国际水电工程的建设 and 实施,其原型测试技术得到了广泛的应用与实践,水平得到了极大的提高。近年,我所参与了多个原型测试领域测试和评价技术国际标准的编写和制订工作,开展了大型混流式和轴流转浆式水轮机转轮叶片动应力测试研究,研究转轮叶片在不同工况下的动应力和静应力水平分布情况及动应力的频率特征,分析动应力成因及对转轮叶片寿命影响,为转轮裂纹机理研究以及指导大型水电机组的安全高效运行提供参考。特别是完成了三峡电厂升水位过程中的机组稳定性和能量特性试验,试验水头68~110 m,每隔1 m对机组效率及稳定性进行了全面实测,积累了机组全水头运行稳定性及能量特性数据,为保证机组安全及经济运行提供了真实可靠的资料,对保障机组安全稳定和高效运行有重要的意义。

2.2 CFD数值模拟及优化设计研究进展 利用CFD数值模拟技术,对水力机械内部流动的微观结构、速度场、压力场等流动细节以及能量损失机理等进行深入研究,充分掌握其内部复杂的流场结

构,了解水流的实际运动状态,对于改善水力机械的性能和可靠性具有重要意义^[2-3]。

国外自1980年代即开始将CFD方法应用于水轮机、水泵等^[4]内部流动的计算,1990年代起开始在大计算机上尝试水轮机全流道的数值模拟^[5]。之后,水力机械内部三维流动计算^[6-7]成为本领域的研究热点,以此来分析转轮在不同工况(包括偏离最优工况)时的特性,并通过对不同设计方案的比较获得指导性的设计经验^[8-10],进一步提高转轮性能。近年来,国外学者对水力机械内部非定常流动现象的数值模拟关注较多,如水轮机内部空化^[11-14],尾水管涡带及压力脉动^[15-17],部分工况点水力机械稳定性问题^[18],转动部件与静止部件之间的干涉^[19],应用CFD方法预测水力机械部件的泥沙磨损^[20-21]等。

国内学者针对水力机械开展内部流动的CFD数值模拟研究主要包括水力机械内部流动计算方法^[22]和计算模型研究^[23]、内部空化及漩涡^[24]等特殊流动现象的CFD模拟、汽液两相流的数值模拟^[25-26]以及考虑流固耦合的转轮结构动力学分析^[27]等。

自1980年代初,我所开展了水力机械内部流动的CFD数值模拟研究,对导水机构、水轮机转轮、蜗壳等通流部件进行模拟,还开展了固液两相流中空泡的溃灭计算研究、固体颗粒在流体中的运动轨迹模拟研究以及转轮内部黏性流仿真的探索性研究^[28-31],提出了能考虑入口环量分布、考虑旋转影响的混流式叶轮的准三维 S_2 流面有限元设计方法^[32],自主开发了三维黏数值模拟软件并进行了性能预估研究^[33],结合国家攻关项目开展了固液两相流及磨损预估研究^[34]。近年来,我院机电所针对水泵动静干涉、水轮机尾水管涡带及压力脉动等非定常流动^[35-36]、开展汽液两相流数值模拟^[37]、鱼类在水轮机内的损伤机理^[38]、耦合刚体动力学模型的计算流体力学方法^[39]、适用于水力机械内部流动数值模拟的湍流模型与对比研究^[40]以及应用CFD方法进行水力机械辅助设计^[41-42]等方面做了大量工作。在水力机械内部流动数值模拟研究中我们坚持自主开发与商业软件相互结合的研究策略,在该研究领域取得了显著进步。

2.3 水电机组智能评估及诊断技术进展 水电机组作为低速旋转机械,故障是从量变到质变的渐变过程,通过故障诊断技术捕捉事故征兆,实现早期预警和防范故障是可能的。通过测试或在线监测获取机组振动的状态数据,开展了智能诊断的方法研究,对机组可能发生或已发生的振动故障进行预测和判断,避免和预防振动事故的发生,其研究和应用具有重要的现实意义和工程应用前景。

当前,水电机组智能评估和故障诊断技术的研究大多停留在理论阶段,研究的热点主要集中在两个方面:一是为提取故障特征参数的信号分析技术研究,应用于处理非平稳、非线性信号的滤波、降噪和深层次分析,主要包括短时傅里叶变换、维格纳分布、小波变换、希尔伯特-黄变换等;二是用于故障识别和故障推理的诊断理论和方法研究,主要包括基于人工神经网络、贝叶斯网络、支持向量机、模糊理论、粗糙集理论、混沌和分形理论、人工免疫系统故障诊断理论和方法的研究。同时,针对水电机组故障的多样性和复杂性,以及各种诊断理论和方法的局限性,出现了基于多种诊断方法的多信息融合诊断技术研究。

国外,商业化的水电机组智能评估和故障诊断系统并不多,具有代表性的有美国GE Bently公司的System1系统平台、瑞士Vibro-Meter公司的VM6000系统、丹麦Rovsing公司的OPEN predictor系统和德国艾默生公司的CSI6500系统。

这几套系统结构比较完整,功能相对独立,具备有故障库平台、征兆输入接口、规则编辑工具和诊断结果解释等功能模块。这些模块针对水电机组的特点和结构特征等,主要对机组的振动、摆度、转速、压力脉动、绝缘、空蚀、裂纹、气隙、磁场、温度、水位、流量、功率、电流和电压等参数进行了相应的监测诊断,基本实现了水电机组故障的初步诊断功能。但这些系统缺乏故障定位功能,故障诊断的结果也只能作为运行人员的参考,因此还需进一步地研究提高诊断结果的实用性。

大多数水电机组故障诊断系统只在故障诊断工程应用方面进行了初步尝试,实际应用也仅限于机组某部件或某种故障的诊断,建立在整个水电机组的状态监测基础上,能够对状态检修起指导作用的成熟的故障诊断系统还没有。主要是因为水电机组的参数、形式各异,故障类型也各不相同,可能发生故障的部位、性质等难以穷尽,故障信息难以建全,且部分水电故障机理尚不清楚,现有

的故障样本较少,不利诊断系统的学习与积累^[43]。

故障诊断是一门实践性极强的技术,要使故障诊断技术在理论研究和应用方面取得突破性的进展,为实际的生产运行和设备安全真正提供保障手段,研究人员必须结合现场运行技术人员经验以及领域专家的知识,将具体的案例转换为计算机可以识别的规则,并将推理机制与实际诊断思维方法、诊断信息相结合,才能建立接近人工专家诊断的推理机制。

目前我国大部分已经投入运行的系统在机组状态监测方面的技术相对较成熟,而在机组故障诊断方面一般仅停留在对机组某个环节或者部分异常状态的诊断分析,诊断方法的研究较多,但由于这些方法都或多或少存在某些方面的不足,诊断的实时性和准确性还难以得到保证,使得其应用方面还相对薄弱。因此,要达到水电机组故障诊断的应用目标,把科学技术转化为生产力,推动社会的发展,还需对故障诊断技术进行更加深入的研究。

近年来,我国在水电设备智能评估和故障诊断技术领域投入较大,取得了大量研究成果,理论上已达到国际水平,但在应用技术方面仍与国外有一定差距。我所通过分析提炼机组试验和在线监测的海量数据,提出了表征机组运行状态的特征参数,通过分析各特征参数与机组运行工况参数之间的耦合关系,建立了基于健康样本的多维度水电机组健康评估、异常检测和性能退化预测方法,该方法能及时检测到机组存在的异常,提醒运行人员有针对性进行机组运行维护,部分成果已经应用到“中国长江三峡集团公司状态监测与诊断系统平台”^[44-47]。

2.4 空化、空蚀及泥沙磨损研究进展 我国是一个多泥沙河流的国家,随着水电开发的迅速发展,南水北调等跨流域重大水利工程、长江和金沙江流域内一系列大中型电站和泵站已经投入运行或在建或规划中,存在磨蚀的水轮机或水泵大量增加。已建泵站和电站的运行经验表明,运行于含沙河流的泵站和电站常遭受到磨蚀、空蚀及两者的联合作用,其破坏十分严重。磨蚀破坏不仅造成巨大的经济损失,还严重影响水电站与泵站的安全运行。由于运行条件和工况复杂多变,水力机械的空化空蚀和泥沙磨损破坏是一十分复杂的物理过程,涉及复杂的气液、泥沙磨损、摩擦学、材料学和表面防护等多学科问题,具有多相、微观、瞬态和随机的特点,相关的理论建模和试验研究往往十分复杂和困难,有关的研究虽取得了一定进展但仍不充分。水力机械磨蚀学科的发展具有重要的理论研究和工程意义^[48]。

我所长期从事水力机械的空蚀、磨损机理研究;材料抗泥沙磨损特性研究,并在材料防护研究方面具有优势及专长。

1980年代建立了转盘、水洞、射流冲击式等试验平台,先后完成辽宁蒲石河、北京板桥峪等抽水蓄能水轮机、三峡、溪洛渡等巨型工程水轮机的磨损问题研究,还与HITACHI公司、VOITH公司、GE ALSTOM公司、IMPESA公司、荏原公司等开展了国际合作项目的研究工作。在抗磨材料方面开展了环氧、喷焊和超高分子量聚乙烯等特有技术的研究。特别是改性超高分子量聚乙烯材料抗磨板的应用取得了不菲的业绩。先后为刘家峡、万家寨、大峡、青铜峡和盐锅峡等大中型水电站提供了数十套抗磨板,应用机组的最大单机容量为265 MW,抗磨板最大尺寸达8.8 m,涉及总装机容量逾4000 MW,抗磨板净面积累计已超过1200 m²。水泵超高分子量聚乙烯复合密封环获得国家专利,并被列为水利部97年重点科技成果推广项目。该水泵密封环作为定型产品已用于黄河流域的陕西东雷、宁夏固海、甘肃西岔等泵站,累计投入运行30余套。

1990年代建立的先进的水力机械浑水试验台,先后为刘家峡水电厂改造增容、山西万家寨引黄工程耐磨蚀水泵研制及同台对比试验、小浪底中试增压水泵研制等国内大型工程项目承担了科研攻关任务,并取得了满意的结果。为适应三峡、小浪底等巨型水电工程的需要,该试验台经扩建改造完成后,先后完成了三门峡水电厂轴流式水轮机的浑水模型试验、三峡水轮机的浑水模型试验等研究工作。

2011年在国家重大科学仪器设备开发专项的支持和资助下,自主开发了我国首个综合性水力机械磨蚀测试系统,该系统具有测量精度高、分析手段与测试技术先进、应用范围广且通用性好等特点。该系统的成功研制,可为磨蚀领域的基础和工程应用研究提供先进的物理平台,对提高我国在

水力机械空化、空蚀及磨损理论研究水平、提升我国水力机械的抗磨蚀防护技术水平,巩固我国在水力机械磨蚀领域的优势地位具有重要支撑作用。系统为水电站水力设备质量检验检测中心的认证扩项提供了技术平台支撑,填补了我国在“磨蚀试验和磨蚀量”检测项目领域的空白。依托该系统已先后完成乌东德白鹤滩、西藏扎拉电站、滇中石鼓高杨程泵站、黄金峡泵站的泥沙磨损评估工作。为相应工程提供了全面的泥沙特性分析、泥沙磨损能力及备选材料抗磨特性测试数据,并根据工程泥沙及机组运行特点对机组大修周期内的磨损程度进行了预估,为工程的主机招标、防护措施的制定、电站运行、大修周期的制定等提供了可靠的技术支持。

3 研究领域发展方向

目前,中国是世界水电装机第一大国,也是发展速度最快的国家。我国水利水电工程建设规模为世界之最,在水电站及泵站工程实践中积累了大量的实际经验,已有多项水力机械技术处于世界领先或世界先进水平^[49]。单机700 MW的水轮机组大部分安装在中国,水轮机组国际上单机最大的800 MW水轮机组已经完全国产化并成功投运于向家坝水电站,白鹤滩水电站的1000 MW水轮机组不久也将投入运行,自主开发的轴流泵水力模型在我国南水北调工程中得到全面应用。作为水电科技工作者,为我国的水电事业繁荣发展感到高兴的同时,也要清醒地认识到我们科研工作还远不能满足工程发展的需要,水电工程建设和设备制造中出现的新问题正在向我们挑战。如何安全、高效、合理地利用好我国宝贵的水能资源是我们的责任,深感任重道远。

水力机械学科涉及面广,关系到能源和生态的可持续发展,社会经济效益十分可观。水力机械学科必须鼓励创新,充分吸收国外的经验,积极开展结合工程实际的理论研究,目前国内应该重点开展的研究领域有:

(1)水力机械多参数多目标优化设计方法研究。水力机械不可避免的要非设计工况区运行,由此导致运行不稳定,实际运行加权效率过低,不能满足实际运行的需求。目前水力机械的优化设计几乎都是基于设计工况进行,片面的追求设计点的特性而忽略了设计点附近区域的特性。有必要将水力机械的能量特性、空化特性、运行稳定性、强度与疲劳特性等综合考虑进行多参数多目标优化设计。提高机组运行稳定性,提高运行区加权效率水平。

(2)水力激振传播规律及其对水轮机振动的影响研究。开展水力激振源(叶道涡、卡门涡、叶片脱流、尾水管涡带等)的诱发和动态传播的规律,通过对关键工况点的压力脉动、振动、内部动态流场进行测量和时域分析,确定激振源的传播方向和速度,以及对水轮机组振动的影响。通过本研究揭示水轮机水力激振的机理,建立合适的水力设计方法以降低水力激振对机组振动的影响。

(3)超高水头、超低水头水轮机研发。我国水电资源丰富,但多数都集中在西部的高山深谷中,而在经过多年的快速开发后,进一步进行大规模的高水头水电站的开放必然成为一个趋势。因此高水平的高水头低比速的水轮机将成为研究和应用的重点。超低水头水力发电是近年来水力机械领域的一个研究热点,它在进一步开发利用低水头资源,为众多老旧小水电的改造提供新的环境友好型解决方案,水生态文明建设和城镇化建设,以及回收利用水泵余能和开发利用等方面有着重要的研究意义。

(4)鱼友好型水轮机基础理论及关键技术研究。随着对生态环保的重视,对鱼友好型水轮机将有一定需求。完善过机鱼伤害机理,建立并完善鱼友好型水轮机生物设计准则;研究鱼友好型水轮机水力设计方法,研制鱼友好型水轮机模型;研究鱼友好型水轮机试验技术及过机鱼损伤评价方法,建立过机鱼伤害模型试验平台,研究过机鱼伤害比尺效应。

(5)潮流能水轮机关键技术研发。潮流能是一种开发前景广阔的清洁可再生能源,潮流能水轮机是将潮流动能转化为转轮机械能,驱动发电机产生电能的关键装置。转轮与流体相互作用的水动力学问题是潮流能水轮机研究中的关键,主要包括潮流能水轮机转轮及周围流场的高精度数值模拟仿真,基于反问题设计理论并结合模型试验等手段对转轮几何参数和叶片翼型的优化设计,建立适用

于潮流能水轮机的翼型数据库, 发展完善潮流能水轮机转轮的水力设计及结构设计方法, 研究海洋复杂运行环境中潮流水轮机的非定常特性。

(6)空化、泥沙磨损以及两者联合作用机理研究。影响空化、磨损及两者联合作用行为的因素十分复杂, 既有速度、压力等流场参数, 又有沙粒和材料特性等, 目前该方面的研究大多聚焦在实验研究, 应开展相关的数值仿真研究以期突破试验研究的局限性。可采用欧拉模型和空化模型来计算三相的作用, 以期获得不同泥沙粒径和浓度下泥沙磨损与空化的相互影响关系以及出力变化情况。研究可提高水力机械的抗空化、磨损能力并改善其优化设计方法。

(7)水电机组现场安全高效运行技术研究。当前大中型水电站都已安装了水电机组在线监测与故障诊断系统。但这些系统都存在数据孤岛、业务单一等缺陷。构建多源异构海量信息的分布式诊断系统, 实现跨学科、跨流域、跨平台的远程智能诊断将是未来的研究方向。借助具有超大规模分布式计算和存储能力的云计算技术, 实现流域内水电机组群的知识集成和数据共享; 通过移动终端和可穿戴设备的日渐普及, 使水电厂工程技术人员在任何时间和地点获取机组设备性能信息和相应维修策略, 完成定期点检和状态监测的无缝融合, 实现发电厂的可靠、经济、高效运行, 满足社会经济发展的需要。

参 考 文 献:

- [1] 陆力, 高忠信, 潘罗平, 等. 50年来水力机电研究领域发展与回顾[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2008, 6(4): 299-307.
- [2] 王福军, 黎耀军, 王文娥, 等. 水泵CFD应用中的若干问题与思考[J]. 排灌机械, 2005, 23(5): 5-14.
- [3] 郭鹏程. 水力机械内部复杂流动的数值研究与性能预测[D]. 西安: 西安理工大学, 2006.
- [4] SHYY W, BRAATEN M E. Three-dimensional analysis of the flow in a curved hydraulic turbine draft tube[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 1986, 6(12): 861-882.
- [5] VU T C, SHYY W. Performance prediction by viscous flow analysis for Francis turbine runner[J]. Journal of Fluids Engineering, 1994, 116(1): 116-120.
- [6] CARIJA Z, MRSA Z. Complete Francis Turbine Flow Simulation for the Whole Range of Discharges[C]//4th International Congress of Croatian Society of Mechanics. Osijek: Croatian Society of Mechanics, 2003.
- [7] DRTINA P, SALLABERGER M. Hydraulic turbines basic principles and state-of-the-art computational fluid dynamics applications[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 1999, 213(1): 85-102.
- [8] MUNTEAN S, SUSAN-RESIGA R F, BERNAD S, et al. Analysis of the GAMM Francis Turbine Distributor 3D Flow for the Whole Operating Range and Optimization of the Guide Vane Axis Location[C]//Proceedings of the 6th International Conference on Hydraulic Machinery and Hydrodynamics. Timisoara: Politehnica University of Timisoara, 2004.
- [9] SWIDERSKI J, MARTIN J. Practical Implementations of Computational Fluid Dynamics in the Design of Hydraulic Turbines-virtual Hydraulic Laboratory[C]//International techno-scientific conference. Czorsztyn, 2000.
- [10] ROTH M, PEIKERT R. Flow Visualization for Turbomachinery Design[C]//Proceedings of Seventh Annual IEEE Visualization '96. San Francisco: IEEE, 1996.
- [11] SINGHAL A K, ATHAVALE M M, Li H, et al. Mathematical basis and validation of the full cavitation model [J]. Journal of Fluids Engineering, 2002, 124(3): 617-624.
- [12] SCHNERR G U H, SAUER J U. Physical and Numerical Modeling of Unsteady Cavitation Dynamics[C]//4th International Conference on Multiphase Flow. New Orleans, 2001.
- [13] SAUER J, SCHNERR G H. Unsteady Cavitating Flow - a New Cavitation Model Based on a Modified Front Capturing Method and Bubble Dynamics[C]//2000 ASME Fluids Engineering Summer Conference. Boston: ASME, 2000.
- [14] KUBOTA A, KATO H, YAMAGUCHI H. A new modelling of cavitating flows: a numerical study of unsteady cavitation on a hydrofoil section[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1992, 240(1): 59-96.

- [15] ALLIGNÉ S, LANDRY C, FAVREL A, et al . Francis turbine draft tube modelling for prediction of pressure fluctuations on prototype[J] . Journal of Physics: Conference Series, 2015, 656(1): 1-4 .
- [16] BACKMAN A G . CFD validation of pressure fluctuations in a pump turbine[D] . Lulea: Lulea University of Technology, 2008 .
- [17] NICOLET C, ARPE J, AVELLAN F . Identification and Modeling of Pressure Fluctuations of a Francis Turbine Scale Model at Part Load Operation[C]//22nd IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems . Stockholm, 2004 .
- [18] KRAPPEL T, RUPRECHT A, RIEDELBAUCH S, et al . Investigation of Francis turbine part load instabilities using flow simulations with a hybrid RANS-LES Turbulence Model[J] . IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2014, 22(3): 1-10 .
- [19] ANTONSEN Ø . Unsteady flow in wicket gate and runner with focus on static and dynamic load on runner[D] . Trondheim, Norwegian University of Science and Technology, 2007 .
- [20] POUDEL L, THAPA B, SHRESTHA B P, et al . Computational and experimental study of effects of sediment shape on erosion of hydraulic turbines[J] . IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2012, 15(3): 1-9 .
- [21] GJØSÆTER K . Hydraulic design of Francis turbine exposed to sediment erosion[D] . Trondheim, Norwegian University of Science and Technology, 2011 .
- [22] 尹俊连, 王德忠, 王乐勤, 等 . 水泵水轮机流动CFD模拟的研究进展[J] . 水力发电学报, 2013, 32(6): 233-238, 243 .
- [23] 苏文涛, 郑智颖, 李小斌, 等 . 混流式水轮机偏工况运行的大涡模拟方法验证[J] . 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(7): 84-91 .
- [24] 曹芳滨 . 基于CFD的长短叶片水轮机转轮三维空化数值模拟[D] . 昆明: 昆明理工大学, 2013 .
- [25] 康杰 . 混流式水轮机气液两相流数值模拟[D] . 昆明: 昆明理工大学, 2008 .
- [26] 冯俊, 郑源 . 基于气液两相流模型的水轮机数值模拟研究进展[J] . 水利科技与经济, 2012, 18(4): 4-7 .
- [27] 王正伟, 刘艳艳, 赵潇然, 等 . 水力机械转轮流固耦合特性分析与设计要素研究[J] . 水利水电技术, 2015, 46(6): 72-78 .
- [28] 林斌良, 许协庆 . 水轮机转轮内部层流和湍流的三维计算[J] . 水利学报, 1990(3): 22-32 .
- [29] 陆力, 许协庆 . 固液两相流体中刚性平面边壁附近的空泡溃灭计算[J] . 水动力学研究与进展(A辑), 1990, 5(4): 108-119 .
- [30] 邵长城, 许协庆 . 绕物体水流中固体颗粒运动轨迹和冲击作用计算[J] . 水利学报, 1986(6): 39-47 .
- [31] 张世雄, 许协庆 . 水力机械转轮内部流动的三维有限元计算[J] . 水利学报, 1984(8): 37-46 .
- [32] 高忠信 . 混流式叶轮的准三维S₂流面有限元设计方法[J] . 水利学报, 1992(4): 63-69 .
- [33] 高忠信, 周先进, 张世雄, 等 . 水轮机转轮内部三维粘性流动计算与性能预测[J] . 水利学报, 2001(7): 30-35 .
- [34] 高忠信, 周先进, 张世雄, 等 . 水轮机转轮固液两相三维紊流计算及磨损预估[J] . 水利学报, 2002(9): 37-43 .
- [35] GAO Z, ZHU W, LU L, et al . Numerical and experimental study of unsteady flow in a large centrifugal pump with stay vanes[J] . Journal of Fluids Engineering, 2014, 136(7): 1-10 .
- [36] 高忠信, 邓杰, 葛新峰 . 三维非定常湍流尾水管涡带数值模拟[J] . 水利学报, 2009, 40(10): 1162-1167 .
- [37] 高忠信, 邓杰, 葛新峰 . 圆形弯管气液两相流数值模拟[J] . 水利学报, 2009, 40(6): 696-702 .
- [38] 廖翠林, 陆力, 李铁友, 等 . 鱼友型水轮机研究进展及建议[J] . 中国水利水电科学研究院学报, 2014, 12(4): 414-420 .
- [39] 王鑫, 田娅娟, 薛鹏, 等 . 一种基于刚体动力学分析的计算流体力学方法[J] . 水利学报, 2013, 44(S1): 106-110 .
- [40] ZHU W, GAO Z, TANG Y, et al . Adaptability study on the turbulence model to the performance and blade surface pressure prediction of a Francis turbine[J] . Engineering Computations, 2016, 33(1): 238-251 .
- [41] 陈锐, 田娅娟, 王鑫, 等 . 引汉济渭三河口水利枢纽工程可逆式水泵水轮机研究[C]//第十九次中国水电设备学术讨论会论文集 . 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 2013 .

- [42] 薛鹏, 田娅娟, 王鑫, 等. 高水头段水轮机水力模型技术研发[C]//第十九次中国水电设备学术讨论会论文集. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 2013.
- [43] 常玉红, 桂中华, 丁光, 等. 水电机组智能诊断技术研究与应用现状[J]. 水电自动化与大坝监测, 2014, 38(3): 5-10.
- [44] AN X L, PAN L P, ZHANG F. Analysis of hydropower unit vibration signals based on variational mode decomposition[J]. Journal of Vibration and Control, 2015, 23(12): 1938-1953.
- [45] AN X L, PAN L P. Characteristic parameter degradation prediction of hydropower unit based on radial basis function surface and empirical mode decomposition[J]. Journal of Vibration and Control, 2013, 21(11): 2200-2211.
- [46] 安学利, 潘罗平, 张飞, 等. 水电机组状态退化评估与非线性预测[J]. 电网技术, 2013, 37(5): 1378-1383.
- [47] 安学利, 潘罗平, 桂中华, 等. 抽水蓄能电站机组异常状态检测模型研究[J]. 水电能源科学, 2013, 31(1): 157-160.
- [48] 刘娟, 许洪元, 齐龙浩. 水力机械中冲蚀磨损规律及抗磨措施研究进展[J]. 水力发电学报, 2005, 24(1): 113-117.
- [49] 邴凤山. 改革开放三十年我国大型水电机组蓬勃发展[J]. 电力设备, 2008, 9(8): 103-106.

Review on hydraulic machinery research

LU Li, PENG Zhongnian, WANG Xin, ZHU Lei, AN Xueli, LIU Juan

(Department of Hydraulic Machinery, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: The research and development ability of the department of hydraulic machinery of IWHR have been improved highly over the past 60 years. Much evolvement has been obtained in different fields such as hydraulic model exploitation, development of research and development platform, test technology and related foundation theory etc. It has been the only well-known scientific research institution which is good at the research of hydraulic machinery application and key technology in water resource and hydro-power field. The development and main achievement are summarized for our institute over the past 60 years in hydro-power field from four aspects of test technology, hydraulic machinery equipment technology, and numerical simulation technology, intelligent evaluation and diagnosis technology for hydropower units and cavitation, cavitation and sediment wear. The history of foundation, healthiness and growing of hydraulic machinery field is reviewed. The main achievements of the last decade are introduced. Research emphases and development direction are also expatiated.

Keywords: hydraulic machinery; water turbine; pump; model test; numerical simulation; sand abrasion; status monitor

(责任编辑: 杨虹)