

· 学科发展 ·

# 长江三峡水轮发电机组关键技术 基础性研究进展

姚福生

(机械工业部科技委, 北京 100823)

**[摘要]** 简要介绍三峡水轮发电机组的一些基础性研究进展,如:水轮机的优化设计和试验研究;水轮发电机组动力响应分析及系统稳定性研究;巨型推力轴承润滑理论与性能研究;水轮机转轮的制造工艺模拟和质量控制研究;发电机组热变形及冷却技术研究。

**[关键词]** 长江三峡项目, 水轮发电机组, 基础研究

1992年4月,全国人大通过了“关于兴建长江三峡工程决议”。这一举世瞩目的世纪工程是具有发电、防洪、航运、养殖、供水等巨大综合利用价值的巨型水利工程。其中,水轮发电机组是整个工程中的关键部分,其建设质量直接影响三峡工程的成败。

国务院三峡工程建设委员会于1993年7月26日召开第二次会议,审查通过了三峡工程初步设计报告,确认了三峡水轮发电机组的单机容量为700 MW混流式水轮发电机组26台,加上右岸预留地下厂房拟再装6台,共32台机组,总装机容量为22.4 GW,无论是装机台数还是总装机容量,均为世界之冠。

由于自然条件和防洪需要,三峡水电站初期水头61—94 m,后期水头71—113 m,水头变幅很大,给水轮机模型试验和设计增加了难度。机组的额定水头80.6 m,出力700 MW,是当今世界上最大的混流式水轮机转轮。水轮机模型效率可超过93%,达到国际先进水平。机组拟采用三个导轴承的半伞式结构,推力轴承负荷达5 700—6 000 t,也为当今世界之最。

发电机额定出力778 MW,功率因素0.9。为提高在高水头情况下水轮机运行的稳定性,发电机设计最大出力840 MW,可连续运行。发电机额定电压力20 kV或18 kV。冷却方式采用全空冷或定子水冷、转子空冷的方案。发电机定子机座外径约22 m,定子铁芯内径达19—20 m,铁芯长度约3.5—4 m,都是当今世界之最。机组大部件的强度、刚度和适应热变形的结构,都是保证稳定运行的重要因素。机组总重约7 450 t,是世界上最重的水轮发电机组。

制造如此巨型的混流式(Francis type)水轮发电机组,其设计、试验和制造等方面都是技术难题。国家自然科学基金委员会和机械工业部技术发展基金会为配合三峡工程的需要,根据专家建议,将“长江三峡水轮发电机组关键技术基础性研究”列为联合资助的重大项目,目的是,通过应用基础研究,为长江三峡水轮发电机组的设计、制造和性能优化提供新的理论、

本文于1996年7月3日收到。

方法、技术、工艺、判据和试验结果,使我国大型水轮机组的设计理论与方法、制造技术与工艺、机组性能等都达到国际先进水平。

经过广泛征求专家、学者的意见,确定了五个课题;即(1)三峡水轮机优化设计理论及试验研究;(2)三峡水轮发电机组动力响应分析及系统稳定性研究;(3)巨型推力轴承润滑理论与性能研究;(4)水轮机转轮的制造工艺模拟和质量控制研究;(5)发电机组热变形及冷却技术的研究。参加单位有:清华大学、华东工业大学、哈尔滨工业大学、华中理工大学、天津大学、西安交通大学、哈尔滨电工学院、北京农业工程大学、郑州机械研究所、沈阳铸造研究所、哈尔滨焊接研究所、杭州自动化研究院、哈尔滨电机厂和东方电机厂等。

以上五个课题于1994年下半年开始启动,现将进展情况分述如下。

## 1 三峡水轮机优化设计理论及试验

水轮机除了具有一般叶轮机械的流动共性外,还有其特殊性,主要是:(1)自进水道起经进水蜗壳、导叶、叶轮和排水道,总流程较长,由于其相互影响,先进的设计方法是统一联合计算,所以解题比较复杂,特别是蜗壳内的流动尤为复杂,因此对其水力模型需要专门研究。(2)长江水中带有不少泥沙,水轮机内部流动属于液固两相流动,这不同于清水流动模型。(3)水轮机内部一个特别重要问题是非稳定流动和汽蚀(又称空蚀或空泡现象),这是极为复杂的流动现象。在大型水轮机流动中,转轮汽蚀现象不仅直接影响其水动力性能,而且还会导致剥蚀叶片,发生振动和噪音。本课题首要的任务是针对水轮机流动的特点确定理论计算的数学模型,结合我国在叶轮机械流动研究方面的成果,提出了长江三峡水轮机的三维有限元杂交交命题的计算模型、三维紊流计算的 $K-\epsilon$ 双方程模型、三元贴体面元法的空化流动模型的多目标函数与多优化参数的水轮机水力设计系统等。

由于需大量的运用微机进行计算,并有大量计算结果和优化计算结果要在计算机上显示出来,以供分析、比较及修改,为此,课题组研究了卫星结构和图形显示等计算系统。

部分理论研究成果已取得阶段性成果;两类相对流面的流动分析计算程序大部分已进行调试;已对转轮进行三维紊流计算,获得了转轮内流速度场和压力场参数,由计算结果估算的转轮水力效率是可信的;对单目标函数的转轮和蜗壳进行了优化设计计算,结果较为合理;空化流动计算已完成基础的叶栅计算程序调试;关于水流稳定性研究,完成了尾水管涡带分析计算。

理论计算需经试验考核,为此,结合课题研究要求,确定了试验研究方案:流场试验拟用五孔测针进行静止通流部件的流动测量和用扫描法进行多点传感器的数据采集;用闪频光纤内窥镜观察空化特性;水流稳定性采用原型观察与模型试验相结合的方法进行。上述试验技术和方法,在水力机械研究中都是先进的。

## 2 三峡水轮发电机组动力响应分析及系统稳定性研究

在大型水轮发电机组中,由于存在电磁不平衡力和流体不平衡力的作用,有时会产生很大的动态轴承力和轴的强烈振动,影响机组的安全运行,因此对三峡水轮发电机组进行动力响应分析及系统稳定性研究就显得十分重要。

一年多以来,课题组在理论计算模型和计算方法研究方面取得了进展:在主轴系统方面,

考虑了主轴系统刚度、质量、支臂弹性、陀螺力矩、水附加质量、质量与电磁不平衡力、转轮径向力、导轴承及推力轴承非线性油膜力、止漏环水膜力、轴承座动刚度等影响因素,建立了计算主轴系统稳态、瞬态及随机摆度响应的力学模型,研究了处理轴系非线性的若干方案,确定了计算模型的大小及计算方法,现正在编程和分部调试。此外,还建立了转轮叶片系统水弹性模型,完成了相应公式的推导和数值处理技术,完成了程序编制与调试;在主轴支承边界条件方面,建立了计入分块瓦摆角和摆速影响的导轴承非线性油膜力计算模型,建立了计入止漏环两端压力差、轴向及周向雷诺数、间隙尺寸等影响因素的水膜紊流整体流动力学模型,并已进行程序研制;激振载荷方面,建立了用于转轮径向力计算的粘性流体-固体结构耦合作用力学模型。此外,还建立了计入铁芯损耗、磁饱和效应,励磁磁势、负载电流、气隙偏心等影响因素的电磁不平衡力有限元计算模型,并已开始程序编制;机电耦联非线性振动方面,根据水轮发电机组定、转子绕组的特点,确定了它们的磁势及磁场关系,计算了定、转子间的气隙磁场及气隙磁场能,研究了阻尼绕组的非线性电磁力,推导分析了各种非线性电磁力和电磁力矩的数学关系式;在非转动结构(机架)动力分析方面,建立了实际应用最广泛的典型联接件,即螺栓联接的动力特性力学模型,对其非线性方程的解法进行了研究。同时,还建立了以DASAP90动力分析程序为基础的,将主轴系统与非转动结构联结起来的动刚度计算方法,并完成了程序编制。现已可在486微机上对水轮发电机组非转动结构部分进行整机动力分析,并可在支承部位向转子系统提供支承动刚度。此外,还研究了以油膜刚度矩阵和阻尼矩阵的线性组合表达油膜作用的模化方法,并完成了整机动力分析程序的总体流程设计及工具模块的程序化。

在实验研究及现场实测准备方面,完成了五强溪电站水轮机转子模型水力试验台轴系振动实测和数据处理工作,分别用脉动法和时序法分析了上述试验台轴系的动力特性和临界转速。同时,还制定了五强溪4号机现场实测初步方案,对被测量点的传感器类型和安装方法,二次仪表及记录设备配置,以及数据处理方法等,进行了分析、比较、选择。目前该课题组正在水力模型试验台上进行转轮径向力实测及模型与真机间径向力转换工作。今后,还要研制转轮系统水附加质量、弹性和阻尼矩阵计算程序,事故状态电磁激振力计算程序,导轴承及止漏环动力特性计算程序,瞬态及随机激励下主轴摆度计算程序,整机动力分析程序等。

### 3 巨型推力轴承润滑理论与性能研究

水轮发电机组的结构和布置型式取决于推力轴承的安放位置。推力轴承置于发电机转子上方时,机组为悬型;置于发电机转子下方时称为伞型。此时,如果发电机转子上方再设置导轴承,则称为半伞型。现在国内外都趋向采用半伞型。国外认为,这样大的机组应当采用三个导轴承。采用半伞型时,推力轴承有两种安置方法:置于下机架上,或置于推力轴承支架上。国外700 MW水机组放在下机架上,其特点是稳定性高。原苏联的640 MW机组则放在推力支架上,通过推力支架把推力负荷传给水轮机顶盖,其受力的过渡过程比较复杂,且由于轴径较大,可维修性较差。关于推力轴瓦的结构方案约有四种:(1)钨金瓦,小弹簧多点支撑;(2)弹性金属塑料瓦,弹性支撑;(3)钨金瓦,平衡梁支撑;(4)钨金瓦,每块瓦三个碟形弹簧支撑。关于推力轴承的镜板(推力头)加工工艺也是一大难题。推力轴承直径较大(外径6 m,内径5.2 m),国内加工尚有困难。目前,国内锻造极限为直径5.2 m。国

外镜板可以焊接制成,但我国对于直径大、厚度薄的环形部件的加工制造尚需攻克。

针对推力轴承中的一系列问题,课题组一年多来做了一系列有成效的研究:

(1) 编制了“各种支承轴承热弹流的计算程序”。这套程序能联立求解雷诺方程、能量方程、温粘方程、热传导方程和热弹位移方程,并综合考虑了轴承尺寸、载荷、转速、进油温度、油槽油温、推力瓦和托瓦热传导,以及推力瓦、托瓦、托盘热弹变形的影响。

(2) 完成了计入镜板表面加工精度有关的因素(如摆度、表面粗糙度、波浪度)对轴承润滑性能的影响,及其理论分析和计算程序,并进行了初步的计算分析。

(3) 针对三峡水电机组可能采用的单托盘、双托盘,弹簧支承及钨金瓦面和塑料瓦面两类材料的轴承方案进行了计算分析。

(4) 对理论计算中两个重要的温度边界条件,即油膜进口温度边条和瓦块与油的换热系数边条作了理论计算,并与实验数据作了对比。

(5) 对推力轴承的搅拌损耗作了理论上的探讨,导出了某些部分的搅拌损耗理论计算公式。

(6) 在油槽流态的理论分析上也建立了二维数学模型,并使用 ADINA 程序进行计算分析。

在试验研究方面作了以下工作:

(1) 完成了双托盘支承的钨金瓦面的推力轴承的推力台试验,进行了四种线速度和不同比压的工况试验,最高试验比压达 9 MPa。在三峡线速度 18 m/s 下,最高试验比压达 8.5 MPa。试验最大 PV 值达到 176 MPa·m/s(相当于 1795.2 kgf·m·cm<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>),创造了钨金瓦面材料 PV 值的最高记录。

(2) 在单托盘支承的塑料瓦面材料的推力台试验中,已进行了三种线速度下不同比压工况的试验。在三峡线速度下,最高试验比压达到 11 MPa,最大 PV 值在达到 198 MPa·m/s(相当于 2019.6 kgf·m·cm<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>),也创造了塑料瓦面材料 PV 值的最高记录。

下一步在理论研究方面,拟将目前完成的研究成果用于计算程序中,以期达到理论计算与实际结果在工程允许的误差范围内,在此基础上结合试验数据,提出推力轴承的简易计算方法;同时,要完成塑料瓦面材料润滑机理的研究以及轴承的动态分析。在试验研究方面,将完成弹簧束支承的钨金瓦面和塑料瓦面的推力轴承试验,以及在 3000 t 推力台上进行三峡全尺寸的模拟试验,完成可视化试验台的制造、安装、调试。

#### 4 水轮机转轮的制造工艺模拟和质量控制研究

水轮机转轮是水轮机中的最重要部件,总重约 500 t。三峡水轮机转轮由上冠、变曲面的 13 只叶片和下环三部分焊接组成,主张都采用 OCr13Ni5Mo 不锈钢材料。上冠直径 8.3 m,重 130 t,在重型机器厂分块铸造,运到组焊场地拼焊加工。下环加工后厚度为 220 mm,高 2.2 m,直径 10.4 m,总重 100 t。对下环的加工有两种主张:一为厚钢板压型后拼焊;二是采用分半铸造。每个转轮有 13 只叶片,每只叶片单重 18 t,最厚部位 290 mm,最薄部位在出水边,不到 40 mm,一个叶片展开尺寸为 3.5 m×5.8 m。叶片毛坯有模压和铸造两种,采用数控技术成型加工。针对上述情况,课题组进行了以下工作,并取得了可喜的进展。

(1) 超厚截面马氏体不锈钢焊接行为及焊接材料匹配规律研究

完成了针对马氏体不锈钢以及异种钢焊接材料体系的研制，研制了五种马氏体不锈钢以及五种异种钢用的焊接材料。

对研制的焊接材料进行了工艺性能研究，保证了良好焊接工艺性能，确定了最佳工艺参数；进行了系统的综合力学性能试验研究（强度、塑性、冲击韧性）；进行了气蚀与磨损试验，并对其断裂韧性进行了较为系统的研究。

焊接裂纹试验研究。对所研制材料采用热塑性试验方法评定了热裂纹敏感性，并采用插销试验方法评定其冷裂敏感性及其机制。

微观组织结构和脆化机制的试验研究中，对马氏体不锈钢母材及其焊接材料的微观组织结构、动态相变过程及精细结构形态进行了较深入系统的研究。此外还研究了焊接热输入对母材、热影响区组织与脆硬倾向的影响规律。

#### (2) 大型变曲面构件电渣熔铸工艺模拟与优化研究

在电渣熔铸叶片毛坯方面，特别是对复杂结晶器型腔的研究取得突破性进展，引起国外密切注意。在变曲面构件实体造型及其剖分方面已能铸造所需要的大部分复杂形状铸件。此外，在确立电渣熔铸综合数学模型的建立方法上，正在就“凝固传热数学模型”、“金属熔滴数学模型”等几个主要模型进行离散处理，为程序编制奠定了基础。同时，对电渣熔铸过程的边界条件，进行了多次试验，已取得进展。

#### (3) 大型变曲面构件热模压成型工艺模拟与优化研究

由于中高比速混流式转轮叶片曲面复杂，采用了将较小模型转轮叶片压成正面为平面，背面为曲面的坯料，然后再测量厚度制作真机坯料的方法很实用，现已试制成产品。

在图形转换方面，利用引进的软件，按一元流理论将传统叶片木模图，转换成沿流线方向描述的图形，此成果已应用在叶片的数控加工上。

已完成了中、高比速转轮叶面展开软件包的研究。

取得了叶片模压成型过程中的回弹量经验数据，掌握了热弯坯料的加热温度、热弯叶片的保温时间与回弹量之间的关系。

#### (4) 叶片数控加工工艺优化研究

已完成混流式转轮叶片曲面描述及准确的数值模拟方法研究，以及有关软件的开发工作。在 486 微机已开发出从混流式叶片的木模图描述到流面转换的通用软件。该软件的部分功能可为叶片热模压及电渣熔铸等参照和借用。本研究项目中，针对混流式叶片曲面特点，分别用 Bezier，均匀 B-Spline，Nurts 三种曲面方法进行数值模拟，研究证明，后两种方法能准确地数值模拟叶片曲面。

在混流式叶片三维线框造型方面，已开发了均匀 B-Spline 曲面线框造型算法程序及有关接口程序。

在叶片型面检测方法上，采用三维摄影几何学的方法。测量的三维型面数据可送入 CAD/CAM 软件进行数据处理。

## 5 发电机组热变形及冷却技术的研究

### (1) 通风系统基本结构

提出三峡水轮发电机组不论采用全空冷或半水冷，通风系统应采用双路径向无风扇端部

回风形式。这种结构在国内外已广泛应用。

#### (2) 定、转子损耗

已完成了数学模型建立、函数方程式论证、计算程序编制。在定子损耗方面,确定三峡机组端部损耗采用准三维电磁有限元法进行分析;在定子线棒附加铜耗方面,采用新型换位技术进行分析。在转子损耗方面,采用二维非线性温度场法进行参数及阻尼系统分析;采用场路结合法分析三峡机组阻尼系统的损耗和温升。

#### (3) 通风系统流场

利用网络矩阵法计算了发电机的风量分配及通风损耗,并建立了流场数学模型,采用 ADINA-F 流场计算软件完成流场的初步计算。

#### (4) 温度场

完成了二维温度场建模、编程、真机模拟等计算工作,利用 ADINA-T 对三维温度场进行算例计算工作。

#### (5) 热变形及热应力

在我国自行开发的分析软件 MFEP4 的基础上完成了三峡机组热变形及热应力分析软件的需求分析和系统设计,并完成了部分软件编码调试和部分打印推动程序。此外,还应用软件 IDEAS 前处理,采用有限元分析方法开展了热应力、变形以及温度场的分析研究。

#### (6) 模型及真机试验

完成了散热系数和阻力系数试验模型的设计工作,1996 年完成模型试验。

“三峡水轮发电机组关键技术的基础性研究”重大项目在各参加单位科研人员的努力下正在顺利进行,已取得的成果有的已应用到实际生产中。本文仅提供该课题开展一年多来的阶段成果信息,由于参加单位多,还有不少需要互相协调和支持工作要做,相信在课题组的努力下,该项目所取得的成果一定会对三峡机组产生积极的影响,同时在学术水平上也会有所建树。

## PROGRESS OF BASIC RESEARCH OF THREE GORGES HYDROGENERATOR KEY TECHNOLOGY

Yao Fusheng

(Science & Technology Committee, Ministry of Machinery Industry of PRC, Beijing 100823)

**Abstract** This article briefly describes some progresses of basic research for Three Gorges Hydrogenerator, such as: Optimum design of water turbine and testing research; Analysis of dynamic response for hydrogenerator shaft system and its stability study; Lubricating theory and performance study of 6000 t large thrust bearing; Thermal deformation and cooling technique of generator.

**Key words** Three Gorges project, hydrogenerator, basic research