

大型水轮发电机组
招标设计及选型技术情报交流会
文章选编

水利水电水力机械情报网

一九八七年三月

前 言

1986年5月水利水电水力机械情报网委托长江流域规划办公室在宜昌葛洲坝举办了《水轮发电机组招标设计及参数选择技术情报交流会》。水电部水利水电建设总局、水电部科技司、生产司、水科院、全国15个水电设计院（委、办）以及三峡开发总公司（筹）等25个单位、40名代表参加了会议，共收到交流文章、资料35篇。会议交流了机组招标设计的经验、大中型水轮机选择设计技术情报，并为三峡水轮机选择献计献策。

这次交流会的内容反映了近年来水力机械设计、招标工作的新动向和新经验，内容多、信息广，受到了与会者的一致重视和好评。

为了使广大同行能详细了解本次交流报告内容，我们决定出版本“选编”。

“选编”由《水力机械技术》编辑部负责编辑。由于篇幅限制仅选择了19篇，其中4篇已在《水力机械技术》及有关期刊上刊载过，这里不再重复。对于选登的文章，我们作了些删节、摘录或整理，因时间关系，删节后未经作者本人审阅，请作者谅解，如发现错误请及时同我们联系，以便纠正。

我们衷心希望本“选编”能受到同行们的欢迎，也希望对不足之处提出宝贵意见。

编 者

一九八六年十二月于长沙

目 录

前 言

美国水电站水轮机招标文件的设计和编制·····	···王福源 (1)
三峡水轮机招标工作初探·····	···黄守宣 (8)
天生桥二级电站机电设备招标书编制情况·····	···郭恒春 (15)
石塘水电站机组择优选厂总结·····	···水电部华东勘测设计院 (20)
“水轮发电机组及其附属设备招标及合同文件”标准格式编制概况·····	···奚家则 (26)
国内外混流式水轮机的发展水平·····	···吴培豪 (31)
三峡水轮机参数选择·····	···吴鸿寿 黄沅芳 (38)
三峡水轮机运行稳定性剖析·····	···龚本驹 (47)
三峡水电站建库后泥沙对水轮机磨损的初步分析·····	···刘宗远 黄孟星 刘景旺 (53)
龙滩水轮机参数选择及对有关问题的分析·····	···陈祖谋 (59)
岩滩水轮机机型选择及转轮现场铸钢问题·····	···广西电力局勘测设计院 (67)
羊卓雍湖水电站水轮机基本参数选择·····	···水电部成都勘测设计院 (73)
马迹塘灯泡贯流机组参数选择·····	···管对武 西岸田 陈善秀 (77)
李家峡水电站水轮机询价书·····	···中京国际工程咨询 (86)
鲁布革水电站水轮机及其辅助设备技术规范·····	···水电部昆明勘测设计院 (92)

美国水电站水轮机组 招标文件的设计和编制

水利电力部华车勘测设计院上海分院 王福源

一、招标文件是水电工程设计的主要组成部分

近年来，世界各国一般水电工程都是通过发包招标——投标承包的方式进行建设。有的一个工程整体发包，有的较大的工程由一个总承包人承包后再分包。也有的分项单独发包，对于机电设备一般采用单项发包。

因为招标文件包括了该项目的详细要求和规格，并直接作为工程施工或设备制造的具体依据，所以招标文件包括已完成的大量设计计算工作、汇总了许多设计研究成果，它本身也就成为工程设计中的一个主要组成部份。

在美国许多由私营公司或财团投资的工程项目的设计（包括招标文件编制）也是采用招标办法，由私营的工程咨询公司承包进行的，如哥伦比亚河上著名的石岛电站、加利福尼亚州的赫尔姆斯抽水蓄能电站，其设计、施工全部以发包招标方式进行建设的。由美国政府拨款建设的水利水电工程的设计由联邦政府所属的三个设计机构（垦务局工程区研究中心、陆军工程兵团和田纳西流域管理局）负责，但工程建设施工、设备订购则都是发包招标进行的。人们必须在激烈的竞争中去争取项目，竞争也促使人们必须高效率进行工作，高质量完成工作，讲究实际、讲究效益，从而也促使技术加快发展。

由于电站机电设计不同于坝工等其它专业设计，水轮发电机组本身的设计是由制造厂家负责的，电站设计部门只负责选择和布置设计以及研究和提出它们的技术规格和要求，因此在水电站机电设计全部工作中标书设计相对占着更大的比重，它也是在进行了大量基础工作和计算，许多专题研究论证后汇总编制出来的。从美国的机组招标文件看，它包括了相当于我们技术设计的全部成果，对于某些附属设备甚至还包括部份施工设计阶段的内容（如管路布置要求，若干附属设备的详细要求等），所以机组招标文件有相当大的工作量，也是相当重要的设计文件。

二、招标文件的设计程序和条件

美国垦务局工程研究中心进行一般大中型水电项目设计，大致可分为以下四个阶段：

（一）工程评估；在规划报告的基础上对某一具体电站进行策略评估，判定该工程的实

际效益（综合指标），供上级部门或州议会甚至国会决策。

（二）可行性研究；对该工程的综合效益及可行性进一步论证。

（三）初步设计；在该工程确定为建设项目后，具体进行初步设计（实际上包括了我们的技术设计阶段的大部份内容）招标文件编制即在本阶段中进行。

（四）施工设计；此时工程已经发包，相当数量的施工详图由承包单位负责，所以相对工作量比我们的施工设计小得多。

在开始初步设计后，根据可行性报告中的“水轮机选择”（由水力机械工程师负责）初步选定的比转速 n_s 值，即向水轮机制造厂进行初步联系，然后发出询价书，向制造厂提供水位、水头、机组台数、容量及初选的比转速等初步资料。要求得到两个以上的制造厂家所提供的机组估算资料，其中包括：

1. 三个以上机组额定转速的比较方案；
2. 相应的安装高程要求；
3. 相应的机组外形尺寸（包括蜗壳、尾管）及总重量；
4. 相应的飞逸转速；
5. 机组总估价；
6. 模型试验的价格；

根据以上资料，在初步设计开始阶段与制造厂进一步研究讨论。水机工程师的进一步比较，包括不同转速方案厂房布置、开挖工程量的比较，然后选定机组容量和机组转速，同时详细研究机组效率、安装高程等性能参数及其对运行的影响等技术经济比较工作，实际上亦已经开始了招标书的设计编制准备。

对于电站的机电设备可以采取总发包招标的办法，也可按不同设备采取分项招标。对大型电站的设备一般取后一种办法，大古力电站第三厂房的水轮机、发电机、调速器、主变压器、厂内2000吨门式起重机、275吨桥式起重机等设备，都分别编制招标文件发包招标的。

在进行了一系列参数研究，选定方案，同时也进行了各种布置方案比较，确定了厂房布置及各项主要设备的布置后，可以开始进行机组等主要设备的招标文件编制。

三、水轮机组招标文件

水轮机组招标文件总体可分成合同、商务条款和技术规格、技术要求两部份。前一部份由工程研究中心的工程施工处负责，后一部份由水机专业组室负责完成。

（一）一般合同条款

1. 邀请投标者

这部份包括发包的总范围；规定的投标日限；允许承包人变动修改投标文件内容的期限；开标日期；必需提交的投标文件数量；承包人如何对招标文件的要求方案提出补充或建议新方案；付款和结算办法；采用何种货币，（可由承包人提出要求）。

2. 一般总规定

这部分包括签署合同的前题，承包人的资格，承包人应提出总价格并对价格包括的内容作说明；双方工作通讯联系的时限要求；文件采用的语言文种；对分包或联合承包的规定；

买主负责工程师的职责及权力；对承包人提供的图纸错误的处理；买方驻厂代表的职责和权力；在制造投产过程中任何一方需要变更设计的处理；制造加工进度报告（一般要求至少每三个月提供一次）；由买方要求暂停加工或交货情况的处理；由承包人原因推迟交货的情况处理；运输途中的保险；国外进口设备的通关手续（买方所在国的海关手续及费用由买主负责办理）；承包人对买主的责任；总承包人与分包者同买主的关系；所提供的设备如涉及专利情况的处理；验收的条件和验收；承包人对所提供的设备的保证；设备不符合要求或不符合保证条件的情况处理；双方对资料保密的规定（不得转移给第三方）；争执和仲裁的规定等。

3. 专门的规定

包括设备供货范围及工作范围；发货具体时间要求及计划；推迟交货罚款的项目，买方提供图纸（包括枢纽布置、电站地理位置、厂房布置及表示机组布置的纵剖面图、厂内主要管网系统图及单线布置图、电气结线图及主要电气设备布置图等）给承包人；对包装的要求；运输的限制及要求；到工地现场的运输路线及路况；对工厂派驻现场代表及安装试验指导工程师的要求；买主应向承包人提供的现场设施、服务项目、安装场地、仓库等；设备验收以前必须的文件和资料等。

4. 对承包人提出的投标文件内容要求

包括在总价格基础上的分项价格表、附加项目价格表（如安装费用、现场试验费用等）；货币不同的价格换算办法；对水轮机保证的技术数据或建议数据；水轮机运行的其它数据及相应有关的各种曲线，（包括运行特性曲线、汽蚀性能曲线、飞逸特性数据、水推力、水轮机转动部份重量，推力轴承尺寸及重量、顶盖及底环的尺寸、主轴长度及直径和法兰尺寸等），调速器性能指标；进口伐尺寸、重量及漏水量保证；并应提供有关的图纸，如机组外形尺寸图（包括蜗壳和尾水管）；表示水轮机及主要部件结构形式和尺寸的平剖面图，轴承装配图，调速器布置图，进口伐布置及结构图；对二期及三期混凝土的布置要求；对埋设部件的详细图纸；与埋设管路（机墩）的详细连接布置图等。

投标文件应由承包人正式签署，一式四~六份。

（二）水轮机技术规格和技术要求，这部分由水力机械工程师负责编写。

四、水轮机招标文件中的技术规格和技术要求

（一）如何编制“技术规格和技术要求”

作为水轮机组设备的招标文件，必须将准备购买的水轮机的使用条件、使用要求、必须保证的工作性能，选用材料、成套供应范围、运输和安装的要求等都详细明确地提出；任何疏忽都可能造成将来运行中的缺陷。技术规格和要求也是通过一定格式以条文、说明编写，但又是必须在大量的设计计算和专题研究论证的基础上才能进行的。例如美国哥伦比亚河上的MONARY 电站二期工程，在确定订购转浆式水轮机组之前，设计部门不仅自己作了机型选择报告，还委托美国韦伯——斯通工程咨询公司作了“定浆与转浆式水轮机在MONARY 电站的综合比较报告”之后，经华盛顿总工程师办公室审查后才确定的。垦务局工程研究中心负责设计的圣路易斯抽水蓄能电站机组转速选择也进行过两次论证比较，大古力第三厂房

70万机组更是对机组参数进行了大量研究比较，如对比转速多次论证，单机容量和比转速的论证报告，电力部门对第三厂房机组运行要求的论证，机组大部件运输方案论证，提高机组容量可能性的论证、机组结构与制造厂的多次技术讨论、机组安装进度研究等等，然后在此基础上编制的招标文件。在编制水轮机组招标文件之前，没有这一系列设计比较和研究论证，标书的技术要求条款，就无法确切提出或很难满足将来电站实际运行要求。此外在编制招标文件时还应掌握了解有关的国际通用技术标准，以此作为衡量机组质量的准绳，同时还应了解水轮机的国际先进水平和设计产品，了解新型结构、新材料及其使用情况，综合这些研究成果、资料 and 情况才能使所提出的技术规格和技术要求既先进又可靠，才能最大限度满足电站实际运行要求。

（二）“技术规格和技术要求”的一般内容

按美国陆军工程师团、田纳西流域管理局的设计导则规定，“水轮机技术规格和技术要求”的内容一般包括十一个方面，现扼要介绍如下：

1. 发包项目及工作范围

明确要求的水轮机台数、是否供应调速器、进口伐等其它设备。要求制造厂承包的工作范围。

2. 模型试验

通常要求制造厂进行三个不同水轮机模型的试验，全部特性试验及汽蚀试验都应有合适的通流部件相配。模型转轮直径第一次试验时应不小于250mm。对试验台装置，测试精度也应提出必要的要求。

模型试验项目一般要求包括：

（1）导叶自关闭（自平衡）性能试验，要求在接力器失去油压时，导叶能自动关闭到不大于20%的额定开度位置；

（2）效率特性试验；

（3）汽蚀特性试验（应包括真机所要求的整个运行范围）；

（4）飞逸特性试验；

（5）水力稳定性试验，测出各种水头下的稳定运行出力范围。

当第一个模型转轮经过完整的试验后，由买主进行验证试验。

在验证试验时有任何一项指标不满足要求，则这次模型试验费用买方不予付款，并可以对某些性能提出进一步修改提高的要求，再进行第二、第三个模型转轮试验。

对于试验符合技术要求并被选定的转轮，买主代表有权检验模型转轮尺寸和叶型，承包人应向买主提供模型转轮叶型的样板。买主将根据这些样板校核将来制造厂提供的真机叶型的检验样板是否和水力相似一致。

承包人应向买主提供完整的试验报告，报告内容至少应包括以下方面：

（1）试验装置和测流装置、测流方法，以及综合测试方法的详细介绍。

（2）效率、出力、汽蚀、水力稳定性、飞逸转速的数据处理实例、换算到真机值的实例。

（3）试验成果与招标书技术要求的对比分析说明。

（4）根据直径为300mm转轮试验成果绘制的各种模型特性曲线。

- (5) 换算到真机的各种运行特性曲线。
- (6) 模型机组各主要部分, 包括转轮、导叶、座环、蜗壳和尾管的尺寸。
- (7) 汽蚀试验的照片。
- (8) 转轮拟采用不锈钢防护的区域范围。
- (9) 导叶水力平衡试验成果。

3. 材料及工艺

所有采用的材料和工艺应符合有关标准和规定, 包括ANSI、ASTM、ASME、NEMA、SAE、NEPA、Fed、SPec等有关标准。

对各种采用的材料, 应提出拉、压应力的允许使用值。制造厂应提供各主要部件的实际设计最大应力值。真机应能承受可能出现的最严重的工况时(飞逸工况)应力要求。

所有材料, 均应根据有关试验标准进行选样试验, 证明合格后再投料生产。材料试验成果应提供给买主。所有材料试验以及买主驻厂代表的费用应由承包人负担, 承包人可以考虑将这些费用列入投标报价的总金额中。

所有的焊接工都应经过考核, 具有合格证书。买主代表有权检查焊接工艺和程序。在厂内进行的所有焊缝, 都应作相应的应力释放处理。

4. 水轮机

对要求提供的水轮机型式, 旋转方向, 是否调相以及水头、上、下游水位、下游水位与流量关系曲线等基本情况描述。对于额定出力和效率, 应说明:

(1) 各种工作水头时要求的水轮机保证出力值。

(2) 是否要求115%发电机额定容量(KVA)条件下工作, 要求在这种情况下工作时, 任何部件不出现过应力状态。

(3) 水轮机的效率要求——最高效率、额定工况点效率、加权平均效率、以及要求的出力运行范围内的各主要工作点的效率(均为保证效率)。

电站水轮机的安装高程要求以及相应的下游水位变化范围。水轮机应满足在要求运行范围内稳定工作, 在要求运行的水头和出力的范围内相应的汽蚀保证。

对机组额定转速、飞逸转速的规定, 并要求制造厂提供机组的自振频率。

机组过渡过程变化参数及设计要求。并要求制造厂对调速时间进行核算。

对机组的控制操作方式(现地操作、遥控或微机控制)的要求。

对于转轮主要内容:

(1) 提出对转轮尺寸、结构、水力振动限制、强度和刚度要求、要求使用的材料。

(2) 转轮的全部过流通道的叶型误差允许标准, 叶片间开口尺寸误差, 叶片出口边厚度、进口边厚度、出口边与下环连接部位和进口边与冠上连接部位的尺寸, 都需在出厂前进行严格检查符合有关标准。转轮在最后精加工之前, 工厂应向买主驻厂代表提出加工程序、方法、所应用的检验工具、方法和样板等有关报告, 在取得驻厂代表同意后再进行最后加工。加工后的详细检查记录应交驻厂代表, 经复查认可后, 才能出厂。工厂还必须提供成套的真机叶型检查样板, 以便在工地进行复查。

(3) 根据模型试验的成果确定转轮的汽蚀防护区。一般要求防汽蚀材料为18—8不锈钢。在汽蚀防护区的保护层材料, 经加工后的厚度应不少于5 mm, 工厂应提供足够的资料

证明保护层厚度是否符合要求。

(4) 应根据转轮的最终设计和实际敷焊不锈钢保护层面积, 与原合同标书技术要求中提出的敷焊面积比较, 可以调整原合同中该项付款实际数值。

(5) 转轮的汽蚀保证要求及规定值。当出现过量的汽蚀时, 制造厂必须在接到通知后一定时间内(双方商定), 到现场进行叶型修正和补焊、打磨、抛光等工作。如汽蚀情况严重, 必要时由制造厂更换转轮, 并按合同规定承担罚款。

水轮机导轴承一般为分块瓦结构, 自循环冷却方式。如采用油泵强迫循环冷却方式, 则应设有两台油泵, 一台由交流电动机操作, 一台为直流电动机操作。

要求蜗壳及其延伸段的钢板厚度最薄不小于19mm。材料质量应符合标准。设计应尽量减少工地焊接工作量, 并应考虑到在工地焊接的焊缝不作退火处理。所有焊缝用 γ 射线进行探伤检查。如果蜗壳在工地作水压试验, 则可用磁粉探伤检查焊缝。蜗壳、延伸段和座环应在工厂内进行预装。如确定在工地作水压试验, 承包人应负责提供作水压试验用的闷头和密封装置, 同时提供压水水泵装置。

导叶应具有水力平衡性能, 能在失去操作油压的情况下自动关闭到20%额定开度状态。导叶应有良好的端面及立面密封止水性能, 上、下端及立面接触面, 均应敷设不锈钢, 其厚度不小于7mm。导叶应可以互相置换。

接力器一般采用直缸式, 操作油压可选用21、31.7、60公斤/厘米²。

5. 备品备件

一般要求承包人提供以下备品备件:

- (1) 两套导叶轴颈衬套
- (2) 一套剪断销装置(供全部导叶)
- (3) 一套水导轴承钨金瓦衬
- (4) 一个主轴密封部位的轴衬套
- (5) 一套水导轴承循环油泵(交流电动式)
- (6) 一套水导轴承循环油泵(直流电动式)
- (7) 一套主轴密封
- (8) 一套导叶顶端和底部的密封盘根及附件
- (9) 润滑油脂系统的备件

6. 工厂安装和试验

水轮机在工厂车间内至少对以下部份进行预装配, 并作必要的调整。应向买主提供工厂组装的有关记录。

- (1) 尾水管里衬
- (2) 尾水管与出流环的组装
- (3) 蜗壳与进口延伸段以及和座环的组装, 或与模拟座环进行组装
- (4) 座环与机坑里衬、顶盖、出流环的组装
- (5) 除转轮和主轴以外机坑内所有装备的预装, 包括导水机构、导叶、顶盖、底环、座环、出流环以及全部在机坑内的管路、走道、栏杆等。
- (6) 接力器应在工厂内作油压试验, 试验压力为工作压力的1.8倍。

7. 现场试验

一般包括下列内容:

(1) 蜗壳水压试验

(2) 机组启动试验

(3) 按有关标准进行机组出力、效率、振动等性能试验。

(4) 机组作用负荷试验。

(5) 在承包人对机组的保证期内, 还应作机组过速试验。分阶段(不同开度)逐步升速。在每次升速运转稳定后, 作各种必要的记录。一直到全开度, 在达到飞逸转速时, 机组运行不超过 5 分钟。

五、招标文件的汇总和投标文件的评估

经必要的专题论证和研究, 并同制造厂初步讨论等必要的工作后, 即可参照上述招标书的内容, 编制完成详细的水轮机技术规格和技术要求, 然后经水机专业组、机电处校核、审查后, 送本设计单位的施工及工程管理部门同有关其它设备的技术规格和技术要求以及一般合同条款商务条款汇总, 经设计单位领导批准就可发送承包单位。一般应使承包人在收到招标文件以后, 有 3~6 个月的时间, 准备投标文件。

在收到所有投标文件后, 即着手准备开展评标工作, 评标工作一般由本单位进行, 必要时也可约请有关工程咨询公司专家参加评标工作。

由于各制造厂都是在研究招标文件后, 确认自己可以按技术规格提供买主所需的设备, 也可能某些投标者会提出不同参数的方案, 但一般还是按买主要求提供。所以在了解投标文件以后, 在进行技术评估的同时主要对经济指标进行比较。按垦务局工程师介绍评标工作一般按下列几方面进行:

1. 将各个投标文件主要经济指标、技术数据、以及标书收到的日期等列出明细表。

2. 重点比较出力、转速、效率、汽蚀等保证值, 也比较各机组对安装高程的要求。

3. 同时衡量比较下列价格要点:

(1) 水轮机组总价格。

(2) 备品价格。

(3) 可选择的项目的价格(如水轮机与发电机轴线找正及同床加工、蜗壳静水水压试验。)

(4) 安装工作的价格, 包括提供安装工程师的价格。

(5) 物价系数及价格变化因素的估测。

(6) 对厂房开挖及工程量的影响; 安装工作量的差异及影响。

(7) 交货进度计划。

(8) 各种性能参数达不到技术规格要求时承包人承诺的罚款值或罚款系数。

(9) 设备的运输费用。

(10) 如国外进口的设备、应考虑关税、保险等价格。

(下转 14 页)

三峡水轮机招标工作初探

长江流域规划办公室 黄守宣

一、国际招标是保证三峡电站机电设备性能优越的途径

近年来世界各国往往采用国际招标的方式采购水电站机电设备。不仅那些经济和技术落后的国家是这样，就连美国和加拿大水电设备制造技术具有相当高水平的国家也不例外。例如美国的大古力第三发电厂的70万千瓦机组，巴西、巴拉圭的伊泰普、委内瑞拉的古里、加拿大的麦卡、泰国的高岭电站和秋兰电站、伊拉克的贝肯坝、南斯拉夫的DJERDAP灯泡机组……都是通过国际招标的方式采购机电设备的。

三峡电站的机电设备也应采用国际招标的方式采购。三峡电站的特点归纳起来有三点：

1. 大。三峡水轮机最大外径超过10米，转轮重量400吨左右，水轮机高度将近6米，比目前世界上最大的大古力和伊泰普水电站的水轮机还要大。国内外的制造厂都没有制造过这么大的混流式水轮机。

2. 难。三峡水轮机要求能在51至98米水头范围内连续稳定运行。在水头为65.3米时，机组功率为50万千瓦，水头在71.8米时，机组功率达57.5万千瓦，要求水轮机比转速系数达到 $K = 2300$ 以上，即比转速285米·千瓦以上。冬季带峰荷运行，开停机频繁，要求机组负荷变化范围宽。在各种负荷条件下，不产生有害的振动和气蚀，而且还保持较高的效率，这些问题都是水轮机制造者难以解决的问题。

3. 多。三峡电站装机26台。机组质量的好坏，价格的高低，对电站的投资以及电站建成后的经济效益都起非常深远和重大的影响。

从经济观点出发，总希望价格越低越好。由于各个制造厂的经营方式和技术水平差异很大，同样规格的设备，不同的制造厂其价格相差十分悬殊。

例如，委内瑞拉古里Ⅱ电站4台61万千瓦混流式水轮机（1975年）投标价格：

投标单位	水轮机报价（万美元）
1. 日立	1827.5
2. 阿理斯—查摩	3236.2
3. 爱舍维斯	3247.0
4. 多米宁	3810.4
5. 阿尔斯通	4255.7
6. 诺哈夫	4697.3

最高报价是最低报价的2.57倍！如果不进行招标，就很难买到价格合理的设备。

从资金来源的角度分析,如果利用世界银行贷款作为兴建三峡工程的资金来源,按规定也必须采取国际公开招标方式购买设备。

总之,三峡电站采用国际招标的方式采购机电设备是大势所趋。只有这样才能采购到工艺技术先进、设备结构合理、性能参数高、运行适应性广、安全可靠、经久耐用而且价格低廉的机电设备,使三峡电站机电设备达到世界先进水平。从而使我国水电设备制造技术得到迅速发展。

二、三峡机电设备招标的前期工作和今后打算

为了搞好招标工作,从1983年以来,我们进行了以下几项工作:

1. 邀请国内外著名的水轮机和发电机制造厂进行三峡机电设备技术座谈会。我们将三峡工程的自然条件、工程概况、特点、电站的任务、主要参数和资料,尽可能详细地告诉制造厂,让他们有充分的时间进行认真的技术准备,提供推荐方案。至今已有十三家世界著名的水轮机和发电机制造厂(包括我国的哈尔滨电机厂和东方电机厂)来汉座谈了三峡机电设备技术问题,提出了正常高水位150米的16个方案(见表1)和正常高水位180米的10个方案。这些座谈会使我们了解到各制造厂的技术特点和工艺水平,为我们搞好设计工作提供了十分有益的资料,也为搞好招标工作打下了基础。

表1 世界著名的水轮机制造厂建议的三峡方案

制 造 厂	建 议 的 三 峡 水 轮 机 参 数							
	n_s (米·转)	D_1 (米)	n (转/分)	$\eta_{m \max}$ (%)	$\eta_{p \max}$ (%)	N (兆瓦)	H_s (米)	转轮重 (吨)
哈尔滨电机厂	274.3	9.5	71.4	≥ 92.5		508	-3	440
东方电机厂	295	9.1	76.9	93.5	95.5	508	-3	380
美国 A·C	285	9.7	71.4	93.5	95.5	543	-3	425
日本日立	291.4	9.323	75	91(93)	94(96)	520	-3	310
	291.4	11.2	62.5	91(93)	94(96)	750	-3	510
法国奈尔皮克	288	9.5	75	93.5		508	-3	~500
加拿大多米宁	262.4	10.09	68.18	93.3	95.3	510	-2	420
	274.9		71.4	92.9		510	-2.6	387
德国伏依特	288	9.27	75			508	-1.5	(440)
	261.8	9.75	68.18			508	-0.5	
瑞士 EW	288		75	(92.5) 93.0	(94.7) 95.6	508	-6	
日本东芝	275	9.87	71.4			511	-3	
日本三菱	275		71.4			511	-3.5	315

2. 搞好三峡电站的机电设计工作。

国外的机电设备招标文件都是在设计工作进行到相当深度之后编写的。这项工作我们现

在还在深入进行。去年三月，我们完成了 150 米水位方案的初步设计报告。目前由于三峡的正常高水位尚未确定。有些工作无法做深，我们正在对 160、165 和 170 米水位方案进行探讨和研究。

3. 成立编标小组

编制三峡电站巨型设备的招标文件，必须在思想上重视，组织上落实。我们正在收集国内外有关水轮机和发电机方面的规程、规范、标准及国内外机电设备招标文件。水电建设总局招标文件研究班 1982 年 5 月编写的“大中型水轮机招标文件纲要”为三峡的编标工作提供了一份很有参考价值的资料。在搞好机电设计的基础上，以这本“纲要”为基础，吸取国内外招标文件的优点，依靠我们自己的力量编制出三峡招标文件。

三、三峡水轮机招标文件技术规范中的若干问题探讨

1. 水轮机的参数

(1) 水轮机的额定值

水轮机额定净水头为 65.3 米，额定转速为 75 转/分，导叶 100% 开度运行时，水轮机的额定出力保证值不小于 50.76 万千瓦。水头为 71.8 米以上时水轮机能超过额定出力 1.15 倍运行。水轮机的额定比转速 n_s 为 287.86 (米·千瓦)。鉴于与我们座谈的水轮机制造厂提出的方案中有五个方案都达到了这个标准。我们认为上述参数是合适的。

混流式水轮机效率与比转速的发展趋势如表 2 所示；

水轮机制造水平提高以后，比转速提高的同时，效率也提高，是可能的。

表 2

年 代	比转速(米·千瓦)	效 率
1900 年	151~265	80% 左右
1930 年	113.5~284	91%~98%
1983 年	75.76~303	96%~92.5%

(2) 水轮机的最高效率及加权平均效率。

三峡水轮机的最高效率值要求不小于 95.5%，出现在 65.3 至 74.2 米水头之间。水头从 61 米至 88 米以及出力在很宽的范围内，都应有较高的效率值。

水轮机的效率保证值应以相似条件下模型试验测定值为依据，效率修正计算公式如下：

$$\Delta \eta = \frac{2}{3} (1 - \eta_{\max}) (1 - \sqrt[5]{\frac{D_{1M}}{D_{1P}}})$$

根据三峡电站下泄流量在一年内的分配以及水头历时过程线。初步算得的效率加权系数 C_i 如表 3，水轮机的加权平均效率按下式计算：

$$\eta_{av} = \frac{\sum (\eta_i \cdot C_i)}{100}$$

加权平均效率是衡量水轮机经济性能指标极为重要的参数之一，国际招标中对此极为重视，如果加权平均效率不能满足合同规定的保证值时，则每一台机效率每差 0.1%（扣除指定误差以后，三峡机组效率精度误差取 0.2~0.3%），承包人应支付违约金，罚金金额占水轮机总投标价的 1%。若效率差超过 2% 时，发包人有权拒收。

(3) 三峡水轮机安装高程和气蚀损坏限制标准

表 3

$\begin{matrix} C_i & H \\ N \end{matrix}$	51	61	65.3	74.2	88	Σ
115%	0	0	0	5	2	7
100%	0	0	10	10	3	23
90%	0	4	25	25	3	42
80%	0	2	15	15	1	23
60%	1	1	3	0	0	5
Σ	1	7	53	30	9	100

注：由于水库调度方案未最后定，表格中的 C_i 值以后还要变。

三峡水轮机装机高程（以导叶中心高程）定为59米，在表4水头和尾水位条件下，水轮机应能连续稳定运行，不产生超过允许的气蚀损坏。

表 4

水头 (米)	尾水位(海拔 高程米)	最小出力 (兆瓦)	最大出力 (兆瓦)
51	79	175	342
61	74	230	460
65.3	64	253	506
71.8	62	291	582
88	62	370	582
98	74	420	582

水轮机运行8000小时，其中低于最小出力的运行时间不超过总运行时间的10%，超过最大出力的运行时间不超过50小时，水轮机固定导叶、活动导叶、转轮叶片、下环等过流部件表面的气蚀失重，不应超过 $1.0D_2^2$ 公斤（ D_2 为转轮出口直径，米）。

如果超过了气蚀限制值，承包者应负责修理和补焊所需费用、人力、材料均由承包者负责。

(4) 水轮机运行稳定性的要求

三峡水轮机在表4规定的水头和出力范围内应能连续安全稳定运行。所谓稳定运行指的是：

- 尾水管内水压脉动值不大于 $\Delta H/H \leq 5\%$
- 主轴在水导处的摆度：

在正常运行区运行时，保证不超过 $250\mu m$ ，在振动区运行时，保证最大摆度不超过 $500\mu m$ ；

- 顶盖垂直方向振动：

正常运行区，保证不超过 $10\mu m$ ；极低负荷运行时，不超过 $40\mu m$ ；

- 噪音的限制：

距顶盖上1米，距轴中心4米处，不超过100分贝；距涡壳和尾水管进入门1米处，不超过100分贝。

上面提出的振动标准是根据西德伏依特公司座谈会上提供的表5所列几个电站的实测数据为依据的。

伊泰普水轮机在75~100%负荷下预期摆度 $230\mu m$ ，实测为 $155\mu m$ ，制造厂保证值为 $240\mu m$ 。

水轮机运行的稳定性在评标和判标中应该给予足够的重视，对于电站运行来说，安全发

电是最大的经济。

表 5 世界上若干水轮机的主轴摆动参数

电 站 名 称	水 头	转 速	单机出力(兆瓦)	最大摆度 (μm)	出现最大摆度时的负荷 (%)
伊 泰 普	118.4	92.3	740	365 (实测) 390 (预测)	40~50%
依 都 比 亚 拉	84	94.74	380	180	24%
保 罗 阿 丰 索	115	120	417	330	45%
绍 西 毛	71	90.00	272	450	45%
卡 巴 拉 巴 沙	113.5	107	415	320	40%
依 尔 哈 索 铁 拉	48	85.7	194	170	40%

注：伏依特公司的保证值：

0~30%负荷下 }
60~75%负荷下 } 保证摆度值530 μm
75~100%负荷下 保证值 240 μm

(5) 关于水轮机直径与重量

我国多年来习惯于采用标称直径 D_1 （即进口直径）作为水轮机的代表尺寸。对于相似转轮 D_1 大，重量也重。但国内外各制造厂的资料表明，由于水轮机设计方法不一样，形状差别很大，如果用这个观念来评标判标，就会造成错误。

中国的 $D_1=9.5$ 米的水轮机外径大于10.6米，比AC公司的 $D_1=9.7$ 米水轮机的外径10.2米还大，重量也重。因此在招标文件中对水轮机的 D_1 不要规定过死，也不能简单地以 D_1 来评价水轮机的大小。

(6) 蜗壳及尾水管外形尺寸

蜗壳在x轴方向的总宽度直接影响到电站厂房的总长度。在初步设计阶段，我们选择的蜗壳总宽度为33.85米，考虑了两边的混凝土厚度后，确定了机组段宽度为37.7米。参加座谈的外国制造厂建议的蜗壳总宽度多数在34米以上，见表6，需进一步研究。

表 6 蜗 壳 及 尾 水 管 尺 寸

制 造 厂	中 国	奈 尔 皮 克	伏 依 特	A · C	DEW	三 菱	日 立
蜗壳宽度 (米)	33.85	35.8	31.955 33.652	34.15	33.64	35.0	34.3
尾水管高 (米)	28.0	28.0	26.18 27.8	27.0	28.63	24.6	26.5
尾水管长 (米)	42.75	56.5	50.215	43.0	48.85	47.9	50.3

此外，国外几家制造厂推荐的尾水管长度一般采用 $(5.02\sim5.7) D_2$ ，比国内通常采用的尾水管长度长4~10米。

(7) 三峡电站的重力加速度

水轮机出力计算中,重力加速度 g 通常采用 9.81 已足够精确。但国外的一些标书中都标上很精确的重力加速度值,例如伊泰普电站,它的重力加速 $g = 9.7895$ 米/秒²。三峡电站的 g 值,根据三斗坪所在的地理位置和装机高程计算为 $g = 9.793868$ 米/秒²,与通用的 $g = 9.81$ 米/秒² 相比,相对误差为 0.165% 。

2. 水轮机结构要求

(1) 水轮机转轮

由于外形尺寸大,只能采用铸焊结构,上冠、下环,叶片分成单件制造,上冠和下环分半。总共分成17件。

对于转轮材料问题,在招标文件中不作硬性规定。可以采用贝肯坝标书的方式,把普通碳钢转轮和不锈钢转轮都列在报价表中,让投标者填写。根据报价情况及气蚀量保证值,在评标时再决定。

(2) 水轮机主轴及导轴承

水轮机与发电机共用一根轴。用钢板分段卷制,采用内法兰结构。

机组转动部分的临界转速应比最大飞逸转速高 25% 。

导轴承、轴瓦应具有互换性,轴承冷却水最高水温 28°C ,应能承受水压 12 公斤/厘米²。

(3) 座环

采用铸焊结构无碟形边平行式的座环。

(4) 蜗壳

采用钢板焊接结构。设计时按最大水头 98 米,机组甩最大负荷 57.5 万千瓦,所产生的水锤压力考虑,此时蜗壳钢板承受的应力不超过钢板屈服应力的 $2/3$ 。

蜗壳的所有焊缝都必须作射线检查,并进行静水压力试验。承包者提供全部水压试验所需的设备闷头和仪器。

对于蜗壳钢板材料,可以在标书中列出不同等级的钢板由承包者填报,评标时再作判断。

(5) 顶盖

顶盖采用钢板焊接结构。顶盖必须具有足够的刚度和强度。在水头和尾水位变化范围内挠度和变形最小。应按导叶采用两轴承考虑顶盖结构。

3. 对水轮机模型及模型试验

(1) 模型水轮机直径 $D_{1M} = 350$ 毫米。

(2) 模型水轮机的蜗壳及尾水管必须与真机所采用的相似。

(3) 试验水头,至少不能低于 40 米。

(4) 为了观察水流离开转轮的情况,紧接在转轮下面的尾水管须用透明材料制造。

(5) 模型水轮机的试验应能反映真机,水头范围从 $51 \sim 98$ 米,出力从 $30\% \sim 115\%$ 的情况。

(6) 模型水轮机各项测试精度要求如下:

三峡机组	VOITH	DEW
水头精度 $f_H = \pm 0.1\%$	$\leq 0.1\%$	$\pm 0.1\%$
流量精度 $f_Q = \pm 0.2\%$	$\leq 0.18\%$	$\pm 0.15\%$

转速精度 $f_n = \pm 0.02\%$	$\leq 0.02\%$	
力矩精度 $f_m = \pm 0.15\%$	0.1%	$\pm 0.1\%$
水轮机效率精度 $f_\eta = \pm 0.27\%$	$< 0.20\%$	$\pm 0.25\%$
重复误差 $\pm 0.2\%$	$\leq 0.15\%$	

(7) 模型试验应提供如下试验报告

① 反映真机运行水头范围内的综合特性曲线图，特性曲线图上应有等效率曲线、等开度曲线、压力脉动区及等气蚀系数曲线。

② 推算出原型水轮机各水头、出力条件下的 η_F 。按原型水轮机加权平均效率计算表格提供 η_{ave} 。

③ 列出不同开度，不同水头下的出力 N ，效率 η ，流量 Q 和气蚀系数 σ 。

④ 飞逸特性曲线，即飞逸转速与流量，水头开度的关系。

⑤ 水推力值。

⑥ 导水叶不同开度下的水力矩特性。

⑦ 标出水轮机运行不稳定区。

从签订合同后15个月内完成所有试验项目。试验时必须有发包单位的代表及工程师参加。

(上接第7页)

六、几点想法

(一) 随着我国社会改革的进展，中央关于扩大企业自主权的决定逐步深入贯彻，以往对水电设备的生产完全由国家计划安排的办法，也正在逐步改变。现在国务院又提出了机电设备实行招标的办法。因此工程设计部门应该着手把机电设备招标文件的编制和标书设计作为主要内容之一列入工程设计中。我们应该积极推行电站机电设备实行招标的办法，这对提高设计质量，更主要是提高设备质量，更好地满足电站实际运行的要求将起一定作用。同时也是为适应对外开放引进设备，或是承包国外电站设计，为第三国向外国订购设备所必需的。为此请我部主管部门充分重视抓早抓好这项工作。

(二) 建议水电总局在1982年招标文件研究班的基础上，组织国内有关方面的力量，共同编制出一套我国模式的标准水轮发电机组招标文件是必要的，并且现在也已具备了条件。

(三) 招标文件的编制，不是简单的文字编写工作，它必须在完成大量专题研究、设计方案比较的基础上，把本电站的实际运行要求充分吃透，同时详细了解当前世界水平，此外还必须具有一定的经济观点，然后才能对设备提出合适的要求，在这样的基础上才能写好编好招标文件，才能使电站得到优良的设备。并安全可靠运行。

(四) 编写好招标文件另外一个很重要的条件是要有一套完整的国家标准。而我们目前还不完整。由于没有标准，无章可循，这容易导致供需双方就一、二个具体问题或某一项技术要求引起争议，这一定程度也影响招标文件的质量，为此建议有关部门使标准完善化。