

三峡工程水电站压力管道和蜗壳 技术结构型式的选择及论证

戴会超, 彭 澎

(中国长江三峡工程开发总公司, 湖北 宜昌 443002)

[摘要] 长江三峡水利枢纽工程建设中重大技术问题的决策是建立在大量科学试验和专家论证的基础上, 三峡工程水电站压力管道和蜗壳技术结构型式的选择不仅是重大的技术经济问题, 也是关系水电站长期运行问题, 文章介绍了三峡工程水电站压力管道和蜗壳技术型式选择及决策。

[关键词] 三峡工程; 压力管道; 蜗壳

[中图分类号] TV732.4; TK730.3+12 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2004)02-0033-05

1 三峡水电站压力管道型式的选择及论证

长江水利委员会(简称长江委)于1993年12月提出了《长江三峡水利枢纽水电站压力管道型式选择专题报告》。报告中明确了压力管道的布置; 并提出了两种结构形式, 即内水压力由钢管单独承受的明管方案和钢衬钢筋混凝土联合受力方案, 最后, 对两种结构型式进行了综合比较, 提出了选择意见, 供三峡总公司进行决策^[1]。

1.1 钢衬钢筋混凝土方案与明管方案比较

中国长江三峡工程开发总公司技术委员会(简称技委会)于1994年1月28~30日在北京召开了专家组会议。会议认为: 长江委提出的两种结构型式在国内外都有成功的实例, 在技术上均是可行的。在实施中也都会遇到各自的一些难点, 只要认真对待, 这些难点都是可以克服的。经过细致比较, 绝大多数专家倾向于选用钢衬钢筋混凝土联合受力的结构型式。主要的审议意见如下:

1.1.1 关于钢衬钢筋混凝土联合受力方案 主要优点: a. 钢衬和钢筋混凝土联合受力, 两者在同一部位同时出现缺陷并都达到破坏的概率很小, 万

一发生事故, 也不是撕裂性的突发事件, 因此, 管道的整体安全度相对较高; b. 钢衬可采用16 Mn钢板, 厚度比明管方案相对较薄, 缓和对高强度厚钢板的材质要求和卷板及焊接的困难; c. 造价与明管方案相比可以省一些, 单管施工工期比明管方案有1.5个月的余地; d. 抗地震性能较好。主要缺点: a. 钢衬钢筋混凝土联合受力设计, 目前国内尚无统一规范可以遵循; b. 外包钢筋混凝土在外荷载和温度变化作用下的开裂规律及裂缝, 对钢筋、钢衬应力的影响, 尚需进一步研究; c. 为确保水平段底部混凝土和钢衬紧密结合, 以保证钢衬钢筋混凝土发挥理想的联合作用, 施工上要研究相应的措施。

1.1.2 关于明管方案 主要优点: a. 钢管设计受力条件明确, 有规范可循, 设计理论较成熟; b. 管道安装和施工条件较好, 与土建干扰少。主要缺点: a. 钢板需从国外进口, 且厚板数量较多, 焊接难度相对较大, 安全度比钢衬钢筋混凝土联合受力方案相对较小; b. 与钢衬钢筋混凝土方案相比, 成本要高一些, 单管施工工期余地少1.5个月。

1.1.3 方案选择 专家们一致认为, 两个方案均可行。除少数专家倾向于采用明管方案外, 绝大多

数专家倾向选用钢衬钢筋混凝土联合受力方案。主要理由是：钢衬较薄，有利于保证钢材材质和焊接质量；只要认真浇好外包钢筋混凝土，可以保证钢衬和钢筋混凝土联合受力，因而安全度要比明管方案相对较高；采用该方案有可能基本立足于采用国内钢材，受国外条件的制约小；前苏联对钢衬钢筋混凝土联合受力的技术已有丰富的经验可资借鉴；我国近年来也设计建成了一些钢衬钢筋混凝土管道，有一定的经验和大量科研成果可供应用。

1.2 压力管道的优化^[2]

三峡电站引水管道内径为 12.4 m，具有压力管道直径大、HD 值高等特点，经综合比选，选用钢衬钢筋混凝土联合受力结构。1998 年 3 月长江委提出了《长江三峡水利枢纽电站压力管道优化设计报告》。这是自 1994 年 1 月技委会审定《水电站压力管道型式选择专题报告》以后，经 4 年的时间，作了大量科学试验和设计计算研究，并参考了前苏联和俄罗斯的工程实践经验，对压力管道设计作了优化修改后的最终设计成果。三峡压力管道在设计内水压力下，外包混凝土按限裂设计，全部内水压力由钢衬、钢筋共同承担，总的安全系数大于 2.2。钢衬钢筋各自单独承担全部内水压力时，要求安全系数均大于 1.0。该方案外包混凝土选用 II 级钢筋、需布设 4~5 层环筋，施工难度大，不利于保证混凝土浇筑质量。经设计优化，总的安全系数调整为 2.0；钢衬、钢筋各自单独承担全部内水压力时安全系数分别为 1.2 和 0.8，选用 III 级钢筋调整为 3 层环筋，可节约钢材 10% 左右，又有利施工。

中国长江三峡工程开发总公司技术委员会于 1998 年 4 月 5~9 日在北京召开了《三峡水利枢纽电站压力管道优化设计报告》审议会，会议基本同意长江委提出的优化设计报告，认为设计总体上合理可行、方便施工、节省投资。

三峡总公司于 1998 年 4 月 16 日以三峡技设字 [1998] 第 79 号文转发了《三峡水利枢纽电站压力管道优化设计报告审议会会议纪要》，总公司原则同意会议纪要，务必精心设计，并采取有利于施工的措施，以确保工程质量。

2 三峡水电站蜗壳结构型式的选择及论证^[3]

2.1 水轮机蜗壳运行特点

2.1.1 规模巨大 三峡电站水轮发电机组单机出力 700 MW，钢蜗壳包角 345°，平面最大宽度为 34.325 m，进口断面直径 12.4 m，运行期最大静水头为 118 m，蜗壳进口断面最大设计水头（含水锤压力）为 139.5 m，蜗壳末端断面最大设计水头 152.4 m，运行期最大的 PD 值约 17 000 kN/m。

2.1.2 运行水头变幅大 三峡电站装机 26 台，左岸电站 14 台，右岸电站 12 台，按先左岸后右岸分期建设，而同期建设的机组则逐年分批投产发电。因大多数机组初期运行水头较低，而每年汛期运行水位又不得高于防洪限制水位，因此蜗壳运行水头变幅大，详见表 1。

表 1 蜗壳运行静水头

Table 1 Static operation head of spiral case

| 运行工况 | 运行初期 | | | 运行后期 | | |
|--------|----------|-----------|------------------------------|----------|-----------|------------------------------|
| | 水位 /m | 静水头 /m | PD/ 10 kN·m ⁻¹ | 水位 /m | 静水头 /m | PD/ 10 kN·m ⁻¹ |
| 正常高水位 | 156 | 99 | 1 228 | 175 | 118 | 1 463 |
| 防洪限制水位 | 135 | 78 | 967 | 145 | 88 | 1 091 |
| 枯季消落水位 | 140 | 83 | 1 029 | 155 | 98 | 1 215 |

由表 1 可见，运行初期蜗壳最小水头为 78 m，与运行后期最大静水头 118 m 比较，变幅为 40 m；与进口断面最大设计水头 139.5 m 比较，变幅高达 61.5 m；若与蜗壳末端断面最大设计水头 152.4 m 比较，变幅更高达 74.4 m。

2.2 水电站蜗壳的 3 种结构型式的比较

2.2.1 国内外大型水电站蜗壳的 3 种结构型式 国内外大型中、高水头水轮机蜗壳的结构型式主要有 3 种：a. 钢蜗壳外铺设垫层后浇筑外围混凝土（简称垫层蜗壳）；b. 钢蜗壳在充水加压状态下浇筑外围混凝土（简称充水加压蜗壳）；c. 钢蜗壳外直接浇筑混凝土，既不设垫层，也不充内压（简称完全联合承载蜗壳）。国内外大型水轮机蜗壳结构和主要参数见表 2~4。

2.2.2 垫层蜗壳 我国以往大中型水电站的钢蜗壳，大都用外加垫层的做法。国内采用垫层蜗壳的最大机组是李家峡水电站，单机容量 400 MW，蜗壳静水压 140 m，HD 值 1 280 m²。前苏联也多采用垫层蜗壳，如装机容量 5 000 MW 的克拉斯诺雅尔斯克电站是现今世界上采用垫层蜗壳的最大机组，单机容量 500 MW，蜗壳进口直径 8.7 m，设计内压 135 m，HD 值 1 175 m²。西方国家及日本采用垫层蜗壳较少。

表 2 国内一些大型机组蜗壳结构及其主要参数

Table 2 Structure and major parameters of domestic big-scale turbine spiral cases

| 电站名称 | 二滩 | 广州蓄能电站 | 天荒坪蓄能电站 |
|-------------|-----------|----------|---------|
| 单机容量/MW | 550 | 300 | 300 |
| 装机台数 | 6 | 8 | 6 |
| 总装机容量/MW | 3 300 | 2 400 | 1 800 |
| 蜗壳进口直径/m | 7.2 | 2.1 | 2.0 |
| 设计内水压力/m | 231 | 775 | 870 |
| 最大静水压力/m | 194 | 540 | 680.2 |
| 浇筑混凝土时保压值/m | 194 | 270/450 | 540 |
| 保压值/最大静水压力 | 1.0 | 0.5/0.83 | 0.8 |
| 钢蜗壳水压试验压力/m | 254/346.5 | 1 162 | 1 305 |

表 3 不同蜗壳结构形式国内外最大单机容量

Table 3 Max. unit installed capacity various types of spiral cases at home and abroad

| 蜗壳形式 | 垫层蜗壳 | 充水保压蜗壳 | 完全联合承载蜗壳 |
|------------|----------|--------|----------|
| 国外 单机容量/MW | 500 | 716 | 640 |
| 电站名称 | 克拉斯诺雅尔斯克 | 大古力 | 萨扬舒申斯克 |
| 国内 单机容量/MW | 400 | 550 | |
| 电站名称 | 李家峡 | 二滩 | |

表 4 国外一些大型机组蜗壳结构及其主要参数

Table 4 Structure and major parameters of big foreign turbine spiral cases

| 电站名称 | 大古力 | | 依泰普 | 古里 II 级 | 列维尔斯托克 | 邱吉尔瀑布 |
|-------------|-------|-------|----------------|---------|--------|-------|
| | I | II | | | | |
| 水轮机额定出力/MW | 611 | 716 | 715 | 610 | 495 | 483 |
| 水轮机额定水头/m | 86.9 | 86.9 | 118.4 | 130.0 | 130.0 | 313 |
| 蜗壳进口断面直径/m | 10.56 | 10.56 | 9.64 | 7.90 | 7.32 | 4.45 |
| 蜗壳设计压力/m | | 120 | 168 | 200 | | 350 |
| 水压试验压力/m | | 181.7 | 252 | 300 | 243 | 525 |
| 试压值/最大静水压力 | | 1.5 | 1.5 | 1.5 | | 1.5 |
| 浇筑混凝土时保压值/m | | 96.5 | 最大静水压力 的 0% | 151 | | |

实践证明，这种蜗壳是可以安全工作的，但也存在一些问题：**a.** 钢蜗壳单独承受内水压力，钢板用量多；**b.** 垫层末端钢蜗壳有应力集中现象；**c.** 垫层仍会传递荷载，外包混凝土分担的内水压

力较难确定；**d.** 外包混凝土与钢蜗壳之间嵌固作用弱，不利于机组的抗振。这些问题，随机组容量的增大会更加明显。

2.2.3 充水加压蜗壳 长期以来，美国多采用充水加压浇筑混凝土蜗壳。美国 ASME 标准规定，所有压力容器都必须进行水压试验。蜗壳属于压力容器，因而蜗壳水压试验和充水加压浇筑混凝土就一直被采用。在加拿大、巴西、西欧，对大中型机组，多采用充水加压蜗壳。值得指出的是，西方的单机容量超过 500 MW 机组的水电站，如大古力、古里、伊太普等水电站，无一例外，都采用充水加压蜗壳。此外，高水头、大容量和可逆式抽水蓄能机组，采用充水加压蜗壳居多。我国鲁布、天生桥二级、二滩等水电站和广州、潘家口、十三陵、天荒坪等抽水蓄能电站的蜗壳都作了水压试验，并采用充水加压浇筑混凝土。

充水加压蜗壳是一种部分联合承载的结构，充水的水压愈大，联合承载的程度愈小。这种蜗壳主要有以下优点：**a.** 钢蜗壳及外包混凝土内拉应力比较均匀；**b.** 钢蜗壳与外包混凝土之间的荷载分配比例可以根据需要选择，而且荷载分配明确可靠；**c.** 机组运行时，钢蜗壳能贴紧外包混凝土，使座环、蜗壳与大体积混凝土结合成整体，增加机组基础的刚度，从而能避免钢蜗壳在运行时承受动水压力的交变荷载和由此产生的变形，增加其抗疲劳性能；也可以依靠外包混凝土减少蜗壳及座环的扭转变形。这些都能减少机组振动和变形，有利于机组稳定运行。这一性能对于大型机组和抽水蓄能机组都极为重要。

2.2.4 完全联合承载蜗壳 这种蜗壳是将混凝土直接浇筑在钢蜗壳上，既不设垫层，也不充水加压。在这种蜗壳中，钢蜗壳只承受部分内水压力，因而可以减薄钢板厚度，缓解钢蜗壳的技术难度，取得以钢筋取代钢板的经济效益。这种蜗壳具有很大的刚度和强度安全系数，对机组运行有利。北欧、前苏联和日本采用完全联合承载蜗壳较多，但是与前苏联不同，北欧和日本的钢蜗壳是按单独承受全部内水压力设计制造的，他们并不因有外包钢筋混凝土而将钢蜗壳的钢板减薄。

2.2.5 3 种结构型式的评价 美国哈札 (HARZA) 公司两位专家 Richard W. Fajalare 和 Ronald E. Isrelsen 在水电评论 (Hydro Review) 1989 年 10 月刊上写了一篇“蜗壳埋设在全球范围

的实践”的文章。介绍了蜗壳混凝土埋设的3种型式,并提供了6个水轮机供应商在世界各地钢蜗壳埋设的工程信息,单机容量3~700 MW,水头21~626 m,蜗壳直径1.4~10.0 m,HD值最大约为1 200~1 422 m²。文章指出:充水加压蜗壳在美国仍处主导地位,但完全联合承载蜗壳在美国以外逐渐多起来。3种结构型式的优缺点和适用范围仍未得到充分论证。但“看起来无压埋设方法(译注:即完全联合承载蜗壳)能节省一些钱和施工时间”。

2.2.6 三峡电站蜗壳结构选型的重要性

1) 三峡电站水轮机蜗壳的工作特点。单机容量大,台数多,蜗壳尺寸大,HD值高,水头变幅大,每年又有相当一部分时间在防洪限制水位下运行。而且由于厂房布置的原因,蜗壳外围二期混凝土较薄。特别是我国尚无这样大机组的制造和运行经验。

2) 在对三峡电站蜗壳结构型式进行选择论证时,主要比较了垫层蜗壳和充水加压蜗壳两种方案。对两种方案选取应考虑的因素是:a.蜗壳结构的刚度和机组运行稳定性;b.施工方便和工期;c.投资。

三峡电站是当今世界上最大的水电站,在我国电网中也是举足轻重的巨型电站。鉴于电站的重要性,保证电站安全运行和机组运行稳定性是首要任务。保证机组运行稳定首先在于机组设计制造质量,但蜗壳结构型式的合理选择也是一个重要因素。因此,着眼于加强蜗壳结构的刚度和机组运行稳定性,三峡总公司技委会和厂房专家组对蜗壳结构型式的选择作了大量的论证工作^[4]。

1.1 三峡水电站厂房充水保压蜗壳结构关键技术创新

三峡水电站具有单机容量大(700 MW),台数多(26台)的特点,电站总装机容量达18 200 MW,在电网中是举足轻重的巨型电源,也是在建的世界上规模最大的水电站。鉴于该电站的重要性,为保证机组运行稳定,蜗壳混凝土结构型式的合理选择是重要因素之一。电站机组的蜗壳尺寸大(平面直径在x轴方向为34.2 m),HD值高(1 730 m²),水头变幅大(40 m),而且由于厂房布置的原因,蜗壳外围二期混凝土相对较薄,合理选择蜗壳混凝土结构型式的目的是增强蜗壳结构的刚度,有利于提高机组运行稳定性。针对上述问题

开展了大量的设计、计算和试验研究工作。

三峡工程机组容量大,蜗壳外围混凝土相对比较单薄,经分析比较,充水加压蜗壳结构型式比较适合三峡工程的实际情况,但是需要进行深入的论证,为此开展了大量的试验研究工作。采用的关键技术和主要创新点有:

1) 采用大型的物理仿真模型,模拟三峡水电站700MW机组段(38.3 m×39.0 m)座环、钢蜗壳(进口钢管直径12.40 m)及外围混凝土整体结构,研究了结构的受力特性、超载能力和破坏形态。武汉大学水利电力学院和长江水利科学院分别进行了模型试验,两者的试验成果相近,可信度高。模型规模、重复加载次数(1 200次)和内水压力的超载试验,在同类型结构模型试验中居于国内外领先水平。

2) 研究论证中进行了大量的三维有限元计算:
a. 对垫层蜗壳和充水保压蜗壳两种方案作了三维有限元静力分析,结果表明充水保压方案优于垫层蜗壳方案,为设计采用充水保压方案提供了科学依据;
b. 对充水保压蜗壳方案进行了三维分析,就保压水头进行了优选;
c. 在确定保压水头70 m以后,利用三维有限元仿真分析,模拟混凝土浇筑过程,研究提出了保压保温控制标准和措施,以降低高水位运行期外围混凝土承担的荷载,减小低水位运行期钢蜗壳与外围混凝土交界面的缝隙。

3) 可考虑温度、徐变、自重、水压等荷载和缝面接触问题,同时又可模拟结构、材料参数和边界条件随混凝土龄期和施工过程变化的三维有限元仿真计算,在蜗壳结构计算中达到国际先进水平。

4) 采用数值分析和结构模型试验相结合的技术路线进行综合研究,研究成果完整、系统,已应用于三峡左岸电站厂房工程。

3 结论

三峡水电站压力管道条数多(26条),管道直径大(12.4 m),HD值高达1 730 m²。在不同设计阶段,特别是技术设计阶段,在三峡总公司组织长江委和有关科研院校作了大量的设计、研究和试验工作,取得了丰硕的成果。

1) 针对三峡水电站压力管道的特点,选择下游坝面钢衬钢筋混凝土管的结构型式和布置是适宜的,也是有利的。它具有以下优点:a. 与坝内埋

管相比,减少了对坝体断面的削弱,对坝体安全有利。减少了管道安装与大坝混凝土施工的干扰,并可使管道随机组投产进度安排施工,减少投资积压;b.与明管方案相比,钢衬较薄,有利于保证钢材材质和焊接质量,只要认真浇好外包钢筋混凝土,可以确保钢衬和钢筋混凝土联合受力;因此,比明管有更高的安全度;c.采用该方案,除下弯段钢衬可能需采用进口60 kgf/mm²级钢材外,其他部分钢衬、钢筋全可在国内采购,不受国外条件制约。

2)蜗壳外围混凝土结构型式有垫层蜗壳、充水打压蜗壳和钢蜗壳裸露埋入混凝土即完全联合承载蜗壳3种结构型式。大型机组或高水头机组宜采用充水打压蜗壳和完全联合承载蜗壳,这样使座环、钢蜗壳和大体积混凝土结合成整体,刚度大,有利于抗振和保证机组稳定运行。针对三峡电站单

机容量 70×10^4 kW、HD值大、机组运行水头变幅大的特点,采用充水打压蜗壳,有利于厂房抗振。三峡水轮机蜗壳与外围混凝土结构型式,根据专家的咨询意见,三峡总公司决策取消1.5倍最高运行水头的打压试验工序,仅采用保压浇筑蜗壳外围混凝土。

参考文献

- [1] 长江三峡水利枢纽水电站压力管道形式选择专题报告[R].武汉:长江水利委员会,1993
- [2] 长江水利委员会.长江三峡水利枢纽电站压力管道优化设计报告[R].武汉:长江水利委员会,1998
- [3] 长江水利委员会.三峡水电站水轮机蜗壳充水加压方案专题研究报告[R].武汉:长江水利委员会,1999
- [4] 张光斗.关于三峡二期工程几个技术问题的意见[J].中国三峡建设,1999,(1):33~34

Selection and Verification of the Structural Pattern of the Penstock and Spiral Case of the TGP Power-station

Dai Huichao, Peng Peng

(China Yangtze Three Gorges Project Development Corporation, Yichang Hubei 443002, China)

[Abstract] The article introduced the selection and verification of the structural pattern of the penstock and spiral case of the TGP power-station. The decisions on the key technical issues in the construction of the TGP were made based on a huge number of scientific tests and verifications. The selection of the structural pattern of the penstock and spiral case in the TGP power-station is not only an important technical and economic issue, but also an issue relating to the long-term operation of the power-station.

[Key words] TGP; penstock; spiral case