巴基斯坦 Daral Khwar 水电站钢岔管设计

虞鸿^{①*}, 潘卫平^①, 刘海泉^②

① 浙江省水利水电勘测设计院, 杭州 310002;

② 国网电力科学研究院, 南京 211100

* E-mail: fishred2013@163.com

收稿日期: 2014-05-30; 接受日期: 2014-06-03

浙江省水利水电勘测设计院科标业项目(编号: 1207)和国际工程创新团队科标业项目资助

摘要 近年来我国不断承接国际水利水电工程总承包项目,但在实施过程中相对于国内工程,由于国情、技术规范和合同条款等方面的原因经常造成诸多设计上限制.巴基斯坦 Daral Khwar 水电站的非对称月牙肋钢岔管体型复杂,先采用结构力学按概率极限的原则对钢岔管进行初步设计,再用有限单元法复核其强度和刚度,经过完整严密的设计论证实现设计优化,最终得到咨询工程师和投资方的认可.为以后类似项目积累了经验,具有一定的实践意义.

关键词非对称月牙
肋钢岔管
结构设计
有限元计算
设计优化

1 引言

Daral Khwar 水电站位于巴基斯坦北部地区,系引水式电站,毛水头 318 m,电站装设两台 15.5 MW 立轴冲击式水轮机组(2 号机组和 3 号机组)和一台 6 MW 立轴冲击式水轮机组(1 号机组),总装机容量 36.6 MW,装机高程 1407.7 m,年平均发电量 1.48 亿千瓦时.该工程由当地政府投资,中国公司 EPC 总承包,业主工程师来自巴基斯坦当地咨询公司.

电站引水系统采用洞内明管、地埋钢管的方式铺设,钢管管径 2 m,总长 1028.8 m.引水钢管在电站主厂房经过 2 个钢岔管分成 3 个支管分别对 3 台机组供水.其中 1 号岔管主管管径 2 m,支管 1 与 2 号岔管相接,管径 1.6 m,支管 2 与 3 号机组相接,管径 1.1 m;2 号岔管主管管径 1.6 m,支管 3 与 2 号机组相接,管径 1.1 m;支管 4 管径 0.9 m,后接 1.8 m 的变径过渡段,管径变为 0.7 m 后进入蝶阀室.

经技术经济比较后,2 个钢岔管均采用非对称的

内加强月牙肋钢岔管.考虑当地基岩埋深大,覆盖层深厚的地质条件,2 个钢岔管和其后的变径管段和弯曲管段采用混凝土外包形成整体镇墩后埋设于土中.虽然结构形式类似于埋藏式岔管,但外包混凝土和周围的土体不承担内水压力,因此岔管部分最终仍按明岔管设计.

2 内加强月牙肋岔管的受力特点

内加强月牙肋岔管由瑞士 Escher wyss 公司开发,所以又称 E-W 型岔管,具有受力明确合理、设计方便、水流流态好、水头损失小,结构可靠、制作安装容易等特点^[1].岔管主管为一系统扩大渐变的圆锥,支管为一系列收缩渐变的圆锥,相邻锥管均公切于同一公切球,两支锥相贯处的不平衡力由加强构件月牙肋承担.这种岔管结构刚度小,管壳大部分呈膜应力状态,管壳的厚度主要由折角点应力集中控制.假设加强构件月牙肋上各横截面处于中心受拉状态,

引用格式: 虞鸿, 潘卫平, 刘海泉. 巴基斯坦 Daral Khwar 水电站钢岔管设计. 中国科学: 技术科学, 2014, 44: 905–910

Yu H, Pan W P, Liu H Q. Manifolds design for Pakistan Daral Khwar hydropower (in Chinese). Sci Sin Tech, 2014, 44: 905–910, doi: 10.1360/N092014-00178

按轴心或小偏心的受拉构件设计, 属于膜应力区. 月牙肋岔管的体型设计一般要求做到水流平顺, 水头损失小; 同时减少管壳折角部位的应力集中和肋板所承担的不平衡力, 便于材料强度的充分发挥, 减少钢材用量.

20 世纪 70 年代以来我国不少水电站采用这种岔管代替传统的三梁岔管, 取得良好的效果, 并随着西部水电开发和大型抽水蓄能电站的建设, 月牙肋岔管设计水平不断提高, 制作规模不断增大. 目前, 大型月牙肋岔管规模 HD (设计水头与管径的乘积)已经接近 5000 m^2 .

3 钢岔管设计中的问题

Daral Khwar 水电站钢岔管设计遇到的问题主要来自于巴基斯坦土地私有导致的征地难度大, 引水钢管和厂房的建设场地布置受到征地红线的控制, 并由此导致钢岔管的位置受到限制, 基本没有调整的余地. 最终的布置方案结构上存在以下两个方面的特点: 一是两个岔管之间的距离近. 1 号和 2 号岔管的分岔点间距 12.158 m , 岔管间最近的 2 个锥管相距 4.435 m , 小于 3 倍该段锥管直径(1.6 m), 对结构和流态存在比较明显的影响; 二是体型复杂, 弯管较多. 钢管经岔管分岔后, 支管分别还需转动 $76^\circ 43' 42''$,

$16^\circ 43' 35''$ 和 $7^\circ 34' 15''$ 才能进入厂房, 而且 1 号机组前还有一段 1.8 m 长的变直径过渡段, 水流通并不顺直, 不仅产生了一定的水头损失, 而且对整个岔管结构带来了不利的影响. 岔管布置参见图 1.

针对 Daral Khwar 水电站复杂体型的钢岔管部分, 管节折角点众多. 基于上述原因, 商务合同的条款规定压力管道钢材采用遵循 DIN17100 标准的 ST52-3 钢, 岔管各段的壁厚不得小于 28 mm . 由于本工程金属结构分包商为中国公司, 采用国内采购、制作模式, 故与合同条件存在较大差距. 设计建议采用国内的 Q345R 钢, 又会导致不少支管管节的厚度直径比大于规范的规定 $1/33$, 需要进行消除应力的处理^[2,3]. 由此对岔管进行优化设计, 合理选择壁厚, 不仅可以减小钢板厚度, 降低制造和安装难度, 而且可以节省投资和工期.

本次岔管优化设计先采用结构力学公式按概率极限原则^[4]进行初步设计, 再采用有限元计算的方法复核强度和刚度. 具体过程如下: 对于月牙肋岔管主体三锥相贯的管节和肋板以及部分控制性管节按我国的压力钢管设计规范中的公式初定厚度, 其他过渡管节根据上述计算结果结合结构构造要求选定管壁厚度; 采用 CAD 软件建立三维模型, 再采用有限元数值模拟复核管壁和肋板的强度.

图 1 岔管布置图(单位: mm)

4 钢岔管初步设计

4.1 体型设计

1 号钢岔管轴线分岔角 $61^{\circ}30'00''$, 从改善水流流态和增大焊缝间距的角度确定最大公切球半径 1300 mm, 各管节腰线转折角 $10^{\circ}\sim 13^{\circ}$. 2 号钢岔管轴线分岔角 $64^{\circ}30'00''$, 同样考虑水流和焊缝条件确定最大公切球半径为 1040 mm, 因为 2 号岔管管径小于 1 号岔管, 所以可以采用更大的转折角, 最后确定各管节腰线转折角 $12^{\circ}\sim 14^{\circ}$.

4.2 设计工况和设计参数

岔管荷载主要是内水压力. 正常运行状态下考虑三台机组同时甩负荷, 经过机组的调节保证计算, 蜗壳末端水压升高约 $10\%\sim 15\%$. 考虑当地运行管理水平, 要求考虑 20% 水压升高值, 综合荷载分项系数后, 内水压力设计值为 3.75 MPa.

另外按规范确定水压试验的内水压力为正常运行状态下的 1.25 倍, 即 4.69 MPa.

钢材初选为 Q345R, 管壁厚度 16~35 mm, 屈服强度为 325 N/mm²; 肋板厚度 50~100 mm, 屈服强度为 275 N/mm². 考虑各分项系数后按下式计算各结构部位的抗力限值, 计算结果见表 1.

$$\sigma_R = \frac{1}{\gamma_0 \psi \gamma_d} f,$$

其中, σ_R 结构抗力限值(MPa); f 为钢材强度设计值, 厚度 16~35 mm 的钢板 $f=290$ MPa, 厚度 50~100 mm 的钢板 $f=290$ MPa; 结构重要性系数 γ_d ; 设计状况系

数 ψ , 持久状况 $\psi=1.0$, 短暂状况 $\psi=0.9$; 结构系数 γ_d , 整体膜应力区为 1.6, 局部膜应力区 1.3, 局部膜应力和弯曲应力组合区为 1.1. 岔管增加 10%, 水压试验情况, 降低 10%. 经计算各区应力限值见表 1.

4.3 初定管壁和肋板厚度

按平面问题计算, 根据简化的 Mises 应力公式求得各应力区的应力

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{\theta}^2 + \sigma_x^2 - \sigma_{\theta}\sigma_x + 3\tau_{x\theta}^2},$$

其中, σ —钢管结构构件的作用效应计算值(MPa);

σ_x —轴向正应力计算值(MPa), 以拉为正;

σ_{θ} —环向正应力计算值(MPa), 以拉为正;

σ_r —径向正应力计算值(MPa), 以拉为正;

$\tau_{x\theta}$ —剪应力(MPa), 以拉为正.

按 $\sigma \leq \sigma_R$ 的应力要求, 计算各控制管节和加强构件的壁厚, 结果如表 2 所示.

5 三维有限元强度复核

5.1 三维有限元模型

不考虑外包混凝土的共同作用, 将镇墩中的管道按明管建立三维管道的 CAD 模型, 采用壳单元进行网格划分和模型离散化. 采用壳单元而不是常用的实体单元的主要原因有以下两点: 首先, 初定主管分成 40 段, 每个网格尺寸约 150 mm×150 mm. 这种网格的长、宽方向与厚度方向的比值已经达到 4~5 倍, 对要求三向尺寸相近的四面体的实体单元是不

表 1 允许应力限值

应力区域	部位	持久状况	短暂状况
整体膜应力区 σ_{R1}	膜应力区的管壁及小偏心受拉的加强构件(月牙形肋板)	165 (142)	203 (175)
局部应力区		203	250
局部应力区+弯曲应力 σ_{R2}	距加强肋 $3.5\sqrt{r\delta}$ 以内及转角点处管壁	240	296

表 2 各控制管节和加强构件的壁厚

管段或构件	壁厚 (mm)	管段或构件	壁厚 (mm)
1 号岔管主体	36	1 号岔管月牙肋	80
2 号岔管主体	28	2 号岔管月牙肋	80
变径过渡段	14	2000 主管	24
1600 支管 1	24	1100 支管 2, 3	16
900 支管 4	16	700 管	14

注: 上述厚度均包括 2 mm 的锈蚀裕度.

合适的; 其次, 如果厚度方向仅用一层实体单元划分, 就无法反映管壁中存在的弯曲应力. 而执意采用多层网格划分为了使网格合理就必须使用尺寸更小的单元, 使得网格变得极为复杂, 所需的计算资源就呈几何增长, 而且会在表面不连续处产生应力集中, 使结果失去合理性. 而壳单元在计算中既具有弯曲能力又能反应膜应力, 可以承受平面内荷载和法向荷载, 特别适合岔管的计算. 采用 8 节点四边形壳体单元, 该单元在每一个节点处有 6 个自由度: 也就是节点坐标系下 X, Y, Z 方向的 3 个平动自由度和绕 X, Y, Z 轴的 3 个旋转自由度. 单元在平面内的 2 个方向均具有两次的形函数可以很好地模拟具有曲线边界的壳体. 模型每个管周和相贯线分成 40 份, 全部采用映射结构化网构划分, 离散化后的模型有 41100 个节点, 12280 个单元. 镇墩中主管和支管末端延伸长度已超过 $0.78\sqrt{rt}$, 可以认为受约束影响的局部应力区已经结束, 所以在主管端采用固定约束, 各支管端采用支撑约束. 如图 2~4 所示.

5.2 强度复核结果

按持久状态和水压试验的短暂状态分别施加

图2 岔管整体网格

图3 1号岔管网格

图4 月牙肋网格

3.75 和 4.69 MPa 的内水压力, 整个模型的最大变形为 4.163 mm. 计算得到的结果见表 3 和 4. 限于篇幅, 仅显示持久状态整体节点应力云图和 1 号岔管的部分节点应力云图见图 5~8 所示. 岔管的计算结果在 Z 向具有较好的对称性, 岔管本体部位应力情况复杂多变, 距岔管远处则应力分布趋于均匀.

表3 1号岔管应力计算汇总表

工况	σ_{Vmax}	Mises 应力 (MPa)	允许抗力限值 (MPa)	位置
持久状态	局部应力区	189.95	240	岔管腰线折点
	膜应力区	<130	165	
	月牙肋	118.479	142	月牙肋内缘中点
短暂状态	局部应力区	243.317	296	岔管腰线折点
	膜应力区	<165	203	
	月牙肋	143.982	175	月牙肋内缘中点

表 4 2 号岔管应力计算汇总表

工况	σ_{Vmax}	Mises 应力 (MPa)	允许抗力限值 (MPa)	位置
持久状态	局部应力区	226.446	240	岔管腰线折点
	膜应力区	<130	165	
	月牙肋	125.845	142	月牙肋内缘中点
短暂状态	局部应力区	274.478	296	岔管腰线折点
	膜应力区	<160	203	
	月牙肋	157.306	175	月牙肋内缘中点

图 5 整体内表面节点应力云图

图 7 1 号岔管月牙肋支管 3 侧节点应力云图

图 6 1 号岔管内表面节点应力云图

图 8 1 号岔管月牙肋支管 2 侧节点应力云图

6 结论和建议

根据有限元复核的结果, 可以得到以下结论.

1) 整个管壁和加强构件月牙肋的厚度已经能够满足结构强度的要求, 相对招标文件中规定的岔管部分厚度不得小于 28 mm 的条款有较大幅度的优化. 钢材采用符合中国标准的 Q345R, 方便中国公司

在国内的采购, 从而降低了整个岔管的制作、安装难度.

2) 较近的两个岔管分岔点使连接管段的管壁应力有所增加, 但通过适当加厚管壁可以抵消这种影响.

3) 弯管段对管壁应力的影响不大, 但考虑水流的流态, 钢管线路布置还是应该尽量避免转弯或尽可能增大管径的转弯半径.

4) 非对称 Y 型月牙肋岔管的加强构件两侧面的

Mises 应力并不一致, 由于结构上的不对称, 明显有弯曲应力存在, 所以月牙肋按轴心受拉构件设计的假设还有待商榷, 建议非对称 Y 型月牙肋岔管适当

增大中心截面的长度, 减小弯曲应力的影响.

最终, 岔管优化设计通过咨询工程师的审核, 投资方采纳该设计为最终的实施方案.

参考文献

- 1 王志国. 水电站埋藏式内加强月牙肋岔管技术研究与实践. 北京: 中国水利水电出版社, 2011
- 2 水利部长江水利委员会长江勘测规划设计研究院. 水电站压力钢管设计规范 SL281-2003. 2003
- 3 国家电力公司西北勘测设计研究院, 国家电力公司昆明勘测设计研究院, 武汉大学. 水电站压力钢管设计规范 DL/T5141-2001. 2002
- 4 王仁坤, 张春申. 水工设计手册. 第 2 版. 北京: 中国水利水电出版社, 2013

Manifolds design for Pakistan Daral Khwar hydropower

YU Hong¹, PAN WeiPing¹ & LIU HaiQuan²

¹ Zhejiang Design Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hangzhou 310002, China;

² State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 211100, China

In recent years, Chinese enterprises perform international engineering, procurement and construction water conservancy project. In the practice process, engineering design is limited by foreigner conditions, specifications and contract terms. Because asymmetrical crescent-rib branch pipes of Pakistan Daral Khwar Hydropower have sophisticated types, their outline designs are conducted with structural mechanics under probability limit principles first. Then FEM is employed to check manifolds' strength and rigidity. At last the prioritization scheme is accepted by design consultants and investors. Based on convincing calculation and explanation, the design alteration is realized at last, which not only brings us precious experience but also practical significance for our future work.

asymmetrical crescent-rib branch pipe, structural design, FEM, design prioritization

doi: 10.1360/N092014-00178