

抽水蓄能电站岔管月牙肋体型研究

代元¹ 吴文平² 丁瑶¹

(1. 陕西工业职业技术学院 2. 西安理工大学)

摘要: 岔管体型影响抽水蓄能电站的效益, 月牙肋属于岔管内部的结构部件, 其体型优化具有实际应用意义。为优化月牙肋体型, 降低抽水蓄能电站的效益损失, 本文采用 CFD 方法, 比较不同肋宽比下, 岔管的流态变化、水头损失变化和年效益损失变化, 得到岔管月牙肋的最优体型。结果表明: 岔管肋宽比越大, 流态越差, 单一工况下水头损失变化不大, 但电站年效益损失影响较大, 最优体型为肋宽比等于 0, 将肋板全部外伸, 可减小 4.37% 的水头损失和 6% 的效益损失。

关键词: 抽水蓄能电站; 岔管; 月牙肋; 年效益损失; CFD

0 引言

抽水蓄能电站不同于传统的引水式水电站, 既发电又抽水, 输水系统中的岔管水流流向为双向流动, 在电站运行时产生水头损失, 影响电站运行效益, 因此抽水蓄能电站岔管体型优化是一个具有实际应用意义的问题, 许多学者对此进行了研究。最常用的方法是模型试验法和数值模拟法^[1-4], 夏庆福等对月牙肋岔管进行系统地模型试验研究, 给出了水力损失系数与分岔角、肋宽比、分流比的关系曲线^[5]。高学平等对一岔管的模型试验和数值模拟结果进行对比, 发现变化趋势一致, 验证了数值模拟结果的可靠性^[6]。王志国等进行大量实验, 给出了分流比、分岔角等因素的取值范围, 其中肋宽比应在 0.25~0.35 之间^[7]。梁春光等认为肋宽比在 0.1~0.4 范围内较合理^[8]。薛超结合结构特性与水力特性, 认为增加肋板宽度适可减

小应力^[9]。宋勇等对一实际工程的岔管进行月牙肋有限元分析, 发现减小肋宽比可以改善水力条件^[10]。

众多学者优化岔管都考虑了肋宽比^[11-13], 但是研究范围未有突破。普遍结论是在 0~0.5 范围内, 肋宽比越小, 水力条件越好, 结构应力越差, 相应地, 肋宽比越大, 结构应力越好, 而水力条件越差。肋宽比大于 0.5 时, 其对岔管水头损失的影响并无研究数据。另外前人优化岔管时, 仅从水头损失系数出发, 判定最优体型, 然而抽水蓄能电站发电工况与抽水工况的电价不同, 由水头损失引起的效益损失也不同, 应将效益损失作为判定最优体型的标准。本文为了全面进行抽水蓄能电站岔管月牙肋优化研究, 对于实际工程, 将肋宽比取值范围扩大到 0.52, 通过数值模拟技术分析肋宽比对岔管水力特性的影响, 最后结合年效益损失模型优选岔管体型, 得到肋宽比的最优值。

陕西工业职业技术学院科研基金资助项目 (2022YKYB-016)。

1 计算模型

本文结合某抽水蓄能电站加以研究, 该电站输水系统采用 2 洞 4 机方式, 安装 4 台单机容量为 300MW 的可逆式水力机组。岔管为对称 Y 型, 主管直径 4.8m, 支管直径 3.4m, 分岔角为 70°, 单机发电设计流量为 92m³/s, 单机抽水设计流量为 78.5m³/s。月牙肋内缘为抛物线, 肋板宽度 BT 为 1.28m。肋宽比是肋板水平断面宽度与管壳相贯线水平投影长度之比, 原岔管肋宽比 $\beta=0.357$, 月牙肋曲线方程如式 (1) 所示, 相贯线方程如式 (2) 所示:

$$y^2 = \frac{2717.2^2}{2309.9}(2309.9 - x) \quad (1)$$

$$\frac{(x + 2288.347)^2}{5818.247^2} + \frac{y^2}{3082.212^2} = 1 \quad (2)$$

本文只改变肋宽比, 其他岔管体型参数保持不变, 肋宽比取值范围在 0~0.523 之间, 为保证管内流体充分紊流, 主管和支管长度均大于 10 倍管径, 建立的计算模型如图 1 所示。

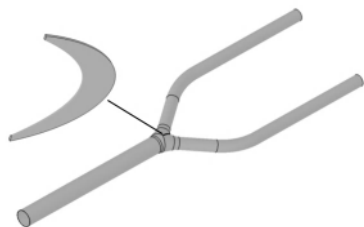


图 1 岔管计算模型

2 数学模型及求解设置

2.1 数学模型

雷诺数较大时, 流体为完全紊流状态, 具有无序性、耗散性、扩散性。多个研究表明, 标准 $k-\varepsilon$ 双方程模型计算量适中且精度和适用性好, 适合完全湍流的流动过程模拟, 应用较为广泛。所以本文选用该紊流模型, 其对应的 k 方程和 ε 方程分别为:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\gamma_i}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \quad (3)$$

$$\gamma_i \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \beta g_i \frac{\gamma_i}{\sigma_i} \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} - \varepsilon$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\gamma_i}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} + \quad (4)$$

$$C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (P + G) \left(1 + C_{3\varepsilon} R_f \right)$$

式中, k 为紊动能; ε 为耗散率; t 为时间; U_i 、 U_j 为 x_i 和 x_j 方向上的速度分量; P 为剪力产生

项, $P = \gamma_i \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j}$; G 为浮力项; R_f 为计入浮

力影响的理查森数, $R_f = -\frac{1}{2} G \bar{v}^2 / (P + G)$, $G \bar{v}^2$ 为侧向能量分量所产生的浮力产生项; β 、 σ_k 、 σ_ε 、 C_{μ} 、 $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ 为经验系数, 可以根据情况取一定的常数值, $C_{1\varepsilon}=1.41 \sim 1.45$, $C_{2\varepsilon}=1.9 \sim 1.92$, $C_{3\varepsilon}=0.012$, $C_{\mu}=0.07 \sim 0.09$, $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\varepsilon=1.3$ 。

2.2 求解设置

紊流模型选择标准 $k-\varepsilon$ 模型, 中等紊流强度, 选择高精度求解格式, 收敛条件为 RMS 1×10^{-4} 。岔管入口断面给定流速, 出口断面给定静压 5.47MPa, 壁面为粗糙壁面。

2.3 网格无关性分析

采用非结构化四面体网格, 在壁上采用边界层网格, 选取岔管原设计模型进行网格无关性分析, 水头损失随网格数量的变化如下表所示。网格数量较少时, 计算结果不稳定, 当网格数量在 448 万以内时, 发电工况和抽水工况水头损失变化幅度较大, 当网格数量超过 448 万时, 随着网格数量的增加, 水头损失的变化趋于稳定, 当网格数量超过 838 万时, 两种工况相邻网格密度之间的计算结果误差均在 0.01% 以内。由于网格数量越大, 计算速度越慢, 收敛所需

的迭代步数越长，所以综合考虑计算结果误差和计算速度，在后续计算中主管和支管最大网格单元大小取0.1m，月牙肋、入水口和出水口取0.05m，网格数量约668万左右。

表 岔管模型网格无关性分析

网格数量 $N/万$	发电工况		抽水工况	
	水头损失	计算结果误差	水头损失	计算结果误差
	h_f/m	差 $\Delta h_f/\Delta N$	h_f/m	$\Delta h_f/\Delta N$
37	1.153		0.831	
160	1.199	0.04%	0.904	0.06%
248	1.217	0.02%	0.837	-0.08%
448	1.256	0.02%	0.876	0.02%
668	1.304	0.02%	0.898	0.01%
838	1.326	0.01%	0.910	0.01%
1040	1.330	0.00%	0.925	0.01%

3 计算结果分析

3.1 岔管水流流态分析

图2为岔管月牙肋板上的压力图，发电工况压力集中在肋板顶点位置，此处容易发生变形破坏，肋宽比越大，应力越分散，抽水工况最大压力在肋板两端位置，肋宽比对于压力在肋板上的分布特征无影响，仅是受力范围变化。

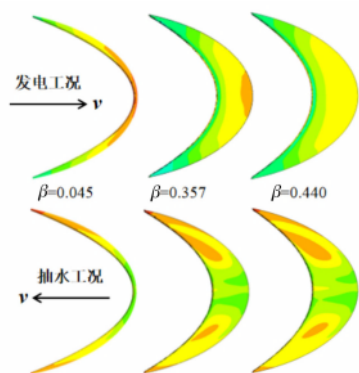


图2 岔管月牙肋水压云图

图3为发电工况岔管横截面上的流速矢量图。水流对称向两个支管进行分流，流速逐渐增大，支

管内侧流速最高，外侧流速较低。 $\beta=0$ ，即无月牙肋时，档部的水流平顺，无涡流。 $\beta \neq 0$ 时，岔管档部有低流速区域，肋宽比越大，低流速区面积越大。

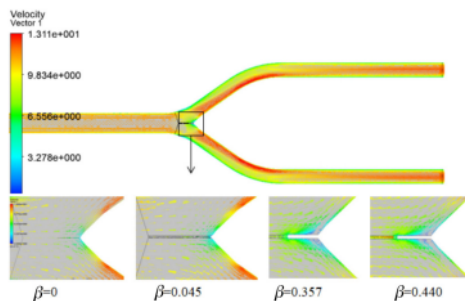


图3 发电工况岔管横截面流速矢量图

图4为抽水工况岔管横截面上的流速矢量图。水流从支管向主管汇流，主流分布在支管外侧，内侧越靠近肋板，流速越低，肋宽比越大，低流速区面积越大。弯管改变了岔管支管内的水流流态，所以优化岔管体型时应考虑弯管的存在。

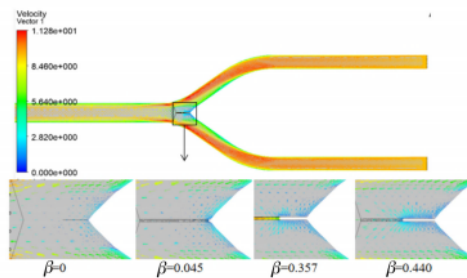


图4 抽水工况岔管横截面流速矢量图

3.2 水头损失分析

岔管水头损失随肋宽比的变化如图5所示。抽水工况水头损失先增大再减小，随后再次增大，当肋宽比为0.36时，水头损失最小，为0.898m，当肋宽比小于0.36时，变化幅度在4.16%以内，超过该值时，水头损失的增幅较明显。发电工况水头损失在0~0.15和0.15~0.44两个区间内都有先增大后减小的趋势，且后者均大于前者，当肋宽比大于0.44时，水头损

失随肋宽比增大而增大。

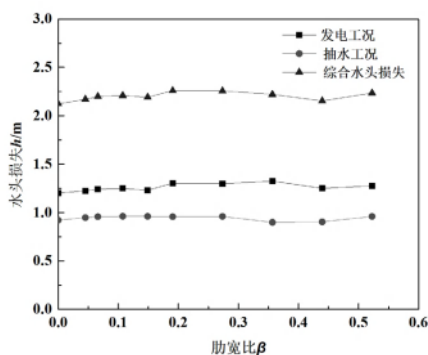


图5 水头损失随肋宽比的变化

抽水工况和发电工况水头损失总体变化幅度都较小，说明肋宽比的变化对于岔管单个工况水头损失的影响较小，但抽水蓄能电站既发电又抽水，为更全面研究肋宽比这一体型因素，定义综合水头损失 h 为发电工况水头损失与抽水工况水头损失之和。综合水头损失的变化趋势与发电工况的变化趋势相同，在 0~0.44 之间出现了两个最值，当肋宽比为 0 时，综合水头损失最小，为 2.124m，当肋宽比为 0.19 时，综合水头损失最大，为 2.260m，变化幅度为 6.43%。当肋宽比为 0 时，即岔管内部无肋板，将月牙肋全部外伸时，岔管的综合水头损失最小，为 2.124m，相较于原岔管，可减小 4.37% 的水头损失。

3.3 年效益损失分析

抽水蓄能电站在运行时，水头损失造成发电效益损失和抽水效益损失，其影响因素包括流量、电价、运行时长等，两种工况的取值均不同，所以为准确评估肋宽比对电站运行效益的影响，根据该电站水头损失计算年效益损失值，以抽水蓄能电站年效益损失作为选择最优体型的判断依据。图 6 为年效益损失随肋宽比的变化，年效益损失的变化呈波状趋势，肋宽比对年效益损失的影响较大，差值为 11.05 万，并且当肋宽比在 0.19~0.36 之间时，效益损失较大，所以肋

宽比不宜设置为该区间值，也不宜超过 0.5。当肋宽比为 0 时，年效益损失达到最小值，为 156.85 万元，与原设计岔管相比，年效益损失降低了 9.93 万元，减小幅度为 6%。

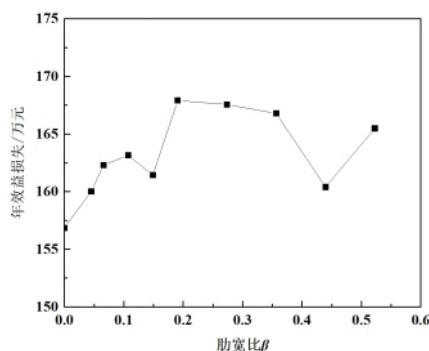


图6 年效益损失随肋宽比的变化

4 结束语

本文对月牙肋岔管的肋宽比进行了优化研究，认为与岔管相连的弯管会改变分岔处的水流流态，所以优化岔管体型时应考虑弯管的存在；在考虑弯管的情况下，抽水蓄能电站岔管年效益损失随肋宽比增大呈波形趋势，在 0~0.52 范围内存在最小值，且经研究发现，肋宽比不宜在 0.19~0.36 之间或大于 0.5，此范围内年效益损失均较大。当肋宽比为 0，即月牙肋全部外伸时，年效益损失最小，相比原设计岔管，每年可降低 9.93 万元损失。

参考文献

- [1] 侯才水，张剑，崔丽萍. 抽水蓄能电站岔管流态 CFD 优化分析 [J]. 水电能源科学，2011，29 (3)：84-88.

- [2] 胡馨之, 伍鹤皋, 石长征, 等. 肋板形状对月牙肋钢管应力影响的研究 [J]. 水力发电, 2017, 43 (3): 49-53.
- [3] 王克忠, 邓浩浩, 茹荣. 无压引水洞岔洞水力模型试验及仿真分析 [J]. 水力发电学报, 2018, 37 (11): 65-74.
- [4] 倪勇, 罗竹梅, 张星海, 等. 高水头电站岔管过渡段水力优化研究 [J]. 水力发电, 2020, 46 (5): 80-84.
- [5] 夏庆福, 孙双科, 王晓松, 等. 抽水蓄能电站月牙肋岔管局部水力损失系数的试验研究 [J]. 水利水电技术, 2004 (2): 81-85.
- [6] 高学平, 张尚华, 韩延成, 等. 引水岔管水力特性三维数值计算 [J]. 中国农村水利水电, 2005 (12): 93-97.
- [7] 王志国, 陈永兴. 西龙池抽水蓄能电站内加强月牙肋岔管水力特性研究 [J]. 水力发电学报, 2007, 26 (1): 42-47.
- [8] 梁春光, 程永光. 基于 CFD 的抽水蓄能电站岔管水力优化 [J]. 水力发电学报, 2010, 29 (3): 84-91.
- [9] 薛超. 基于 Solidworks 的 Y 形岔管应力变形和流场特性分析及体型优化 [J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17 (3): 177-184.
- [10] 宋勇, 杨小林, 王瑶, 等. 肋宽比对月牙肋应力变形的影响分析 [J]. 四川水利, 2022, 43 (1): 27-28, 42.
- [11] 杨校礼, 高季章, 刘之平. 有加强肋板的三岔管水流数值模拟及水头损失研究 [J]. 水力发电, 2004 (5): 18-20, 27.
- [12] 杨校礼, 高季章, 刘之平. 基于水流数值模拟的抽水蓄能三岔管肋宽比最优化分析 [J]. 水利学报, 2005 (9): 1133-1137.
- [13] 高亚楠, 郑源, 杨为城, 等. 基于水流数值模拟的岔管体型优化 [J]. 水电能源科学, 2011, 29 (2): 56-58.

(收稿日期: 2023-10-16)