

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkj.2019.0074

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.
XUE C. Stress deformation, flow field characteristics and shape optimization of "Y"-type branch pipe with Solidworks[J].
South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(3): 177-184. (in Chinese)

基于 Solidworks 的“Y”形岔管应力变形和流场特性分析及体型优化

薛超

(辽宁省水利水电勘测设计研究院有限责任公司, 沈阳 110006)

摘要:结合辽宁省某输水工程沿线隧洞出口设置的“Y”型岔管,运用 Solidworks 软件中的 Simulation 和 Flow Simulation 模块对岔管进行了有限元静力分析和 CFD 数值模拟计算,提出了更为合理的“Y”型钢岔管体型。计算结果表明:对于“Y”形月牙肋岔管,当肋宽比 ≤ 0.12 时,其变形较大值一般位于两支管和月牙肋相贯处,成上下对称分布,且位移较大、较集中,应力较大值位于肋板内侧中心位置、管壳上下两侧靠近肋板端部位置和主管交界位置;当肋宽比 ≥ 0.24 时,其变形较大值一般位于岔管上下两侧主管和支管相贯处,成左右对称分布,且位移较大、较集中,应力最大值位于管壳和肋板端部交界处的管壳上;肋板的宽度和厚度对管壳的应力、岔管内水的流态和水力损失影响均很小,增加肋板的宽度和厚度能有效减小肋板本身应力。计算结果可为类似岔管的设计和推广提供一定的参考价值。
关键词:“Y”形岔管;二次应力;应力均值;有限元分析;CFD 数值模拟;优化设计;Solidworks Simulation; Flow Simulation

中图分类号:TV672.2 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Stress deformation, flow field characteristics and shape optimization of "Y"-type branch pipe with Solidworks

XUE Chao

(Liao Ning Water Engineering Consulting Co., Ltd., Shenyang 110006, China)

Abstract: Both Simulation and Flow Simulation modules within Solidworks software were used to build finite element static and CFD numerical simulation for a "Y"-type branch pipe. The "Y"-type branch pipe was chosen because it was used for the tunnel exit of a water delivery project in Liaoning Province. The results showed that, for the "Y"-type internal crescent-rib branch pipe, the large deformation is generally located at the intersection of the two branches and the crescent-rib when the rib breadth ratio is ≤ 0.12 . The distribution was symmetric around its horizontal axis, and the displacement was large and concentrated. The greater stress was located at the inner center of the rib, the upper and lower sides of the shell near the end of the rib and the junction of main pipe and branch pipe. When the rib breadth ratio was ≥ 0.24 , the large deformation was generally located at the intersection of the main pipe and the branch pipe on the upper and lower sides of the branch pipe. It was also symmetrically distributed in the left and right, and the displacement was large and concentrated. The maximum stress was located on the shell, which was near the end of the rib. The width and thickness of the ribs had little effects on the stress of the shell, the flow states of the water and the hydraulic loss in the branch pipe. Increasing the width and thickness of the ribs can effectively reduce the stress of the crescent-rib. The results can provide a reference for the design and promotion of similar branch pipes.

Key words: "Y"-type branch pipe; secondary stress; average stress; finite element analysis; CFD numerical simulation; optimized

收稿日期:2019-02-20 修回日期:2019-03-24 网络出版时间:2019-04-01

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190329.1520.002.html>

作者简介:薛超(1985—),男,吉林农安人,工程师,主要从事水力机械、水电站、泵站工程的研究。E-mail:317260806@qq.com

辽宁省某输水工程是辽宁省经济发展的命脉工程,是国家重点大型调水工程,全程自流方式输水,线路全长 589 km,共分为四段,输水管路(钢管和 PCCP)长 370 km,其余为隧洞段,其中第四段沿线某隧洞出口位置设置了“Y”形岔管,岔管全部采用外包钢筋混凝土结构,主管直径为 5.4 m,两根支管直径 3.8 m。岔管公切球直径采用与主管直径相同,岔管加强结构由 1 个“U”梁和 2 个腰梁组成,“U”梁和腰梁上下相交处通过拉杆连接。目前国内对“Y”形岔管的研究^[1-17]主要分为两个方向,一是基于 ANSYS 等有限元软件对岔管进行静力学分析计算,主要研究“Y”形和 T 型岔管的受力特点,岔管不同部位、不同构件的应力控制标准和应力大小,以及埋藏式钢岔管与围岩的联合承载机理等;二是基于模型试验和数值模拟对岔管内水流状态进行研究,主要研究分岔角、肋宽比、分流比等参数对岔管内水头损失和水流流态的影响。鉴于岔管的安全性尤为重要,国内学者对此研究大多是基于静力学一个方向,鲜有采用静力学和流体动力学相结合的方式对岔管进行研究,本文采用 Solidworks 软件的 Simulation 模块对长距离输水工程大口径“Y”形钢岔管

进行结构计算,并用 Flow Simulation 模块对岔管内部流场进行模拟,采用静力学和流体动力学相结合的方式对“Y”形岔管进行分析计算,在原设计方案基础上提出更为合理的技术方案,丰富了类似工程问题的研究方法,对复杂钢岔管的进一步研究具有一定的参考意义。

1 研究方法

“Y”形岔管的体形确定后,运用 Solidworks 软件基本建模工具创建岔管各个零件,包括主管、支管、腰梁、“U”梁(或月牙肋)、拉杆,然后用接合的配合方式(相当于焊接)将其组装成装配体模型。最后用 Simulation 模块对岔管进行静力分析计算,用 Flow Simulation 模块对岔管进行 CFD 数值模拟,通过调整模型参数值和对有限元位移、应力值、岔管内水流流态、水流压强等参数进行分析即可得出最优设计方案,各计算方案及参数见表 1。管壳、腰梁、“U”梁(或月牙肋)、拉杆均采用 Q345C 低合金高强度钢,质量密度 $\rho=7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,弹性模量 $E_s=2.06 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$,泊松比 $\nu_s=0.3$,相应的允许应力按照规范^[18]经过计算确定,具体详见表 2。

表 1 岔管计算方案及相关参数

Tab. 1 Calculation plans and related parameters of branch pipes

单位:mm

腰梁、“U”梁(无内伸)、拉杆组合方案(原设计方案)	岔管壁厚	腰梁、“U”梁厚度	腰梁、“U”梁短边高度	腰梁长边高度	“U”梁长边高度	“U”梁内伸宽度
A1	30	120	850	1 800	2 700	无内伸
腰梁、月牙肋、拉杆组合方案	岔管壁厚	腰梁、月牙肋厚度	腰梁短边高度	腰梁长边高度	月牙肋肋宽	月牙肋肋宽比
A2	30	120	850	1 800	1 000	0.24
月牙肋方案	岔管壁厚	月牙肋板厚度		月牙肋板宽度		肋宽比
A3	30	120		300		0.07
A4	30	120		500		0.12
A5	30	120		1 000		0.24
A6	30	120		1 500		0.36
A7	30	120		2 000		0.48
A8	30	140		1 500		0.36
A9	30	150		1 500		0.36
A10	30	160		1 500		0.36

表 2 岔管钢材允许应力

Tab. 2 Allowable stress of Branch Pipes

钢号	钢板厚度/mm	屈服强度/MPa	强度设计值/MPa	结构系数 γ_d	允许应力/MPa	应力区域
Q345	>16~40	335	295	1.76	152.38	整体膜应力区
				1.43	187.54	局部膜应力区

注:表 2 中计算允许应力时所用到的设计状况系数 ψ 取 1,结构重要性系数 γ_0 取 1.1。

2 分析过程

2.1 模型范围及边界条件

岔管实际采用全部外包钢筋混凝土的形式,岔管和混凝土之间添加 5 mm 厚的沥青卷材,因此本岔管按明岔管设计校核(在变形位移不超过 5 mm 的情况下),内水压力(0.8 MPa)由岔管承担,外部压力由钢筋混凝土承担。模型在主管和支管端部取固定约束,为减小约束端的局部应力影响,增加计算的准确性,计算长度从管端沿主、支管轴线方向分别向上、下游增加 5 m。

2.2 网格划分

由于岔管结构复杂且模型较大,若整体采用精

密网格会导致网格生成过程和计算求解过程十分漫长,严重时会出现报错。在满足计算精度要求的前提下,考虑到岔管自身结构特点,位移和应力的关注点往往位于岔管和梁(或肋板)、拉杆的交界处,所以采用网格控制的办法对岔管和梁(或肋板)、拉杆焊接位置进行局部网格加密,局部网格单元大小为 7 mm,整体最大网格单元大小为 135 mm,网格比率取 1.2,全部采用基于曲率的实体网格进行划分,得到网格控制见图 1。

A3 方案网格划分细节见表 3。

由表 3 可以看出,月牙肋方案中模型尺寸最小的 A3 方案网格单元和节点的数量分别为 5 117 484、7 463 492,计算量和计算精度足够满足问题分析的要求。

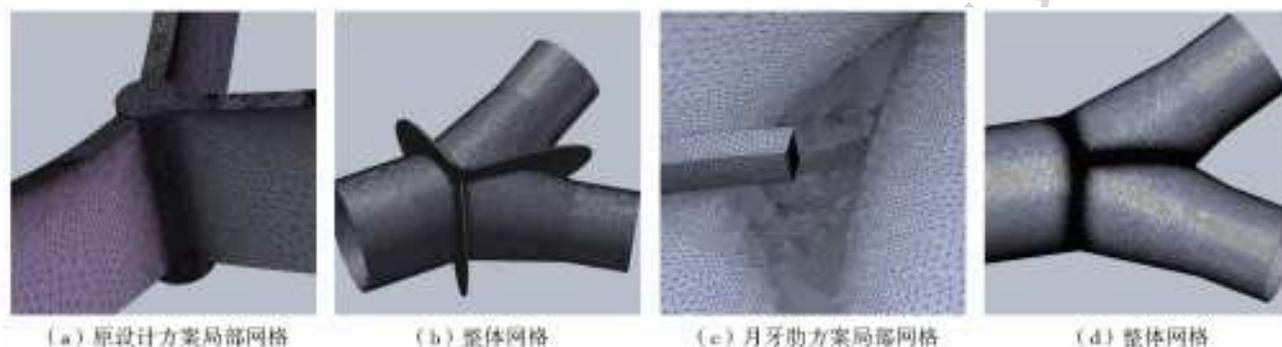


图 1 岔管网格控制图

Fig. 1 Grids of Branch Pipe

表 3 A3 方案网格划分细节情况

Tab. 3 Meshing details of A3 program

方案	网格类型	所用网格器	最大单元大小	最小单元大小	单元总数	节点总数	网格品质
A3	实体网格	基于曲率的网格	135 mm	27 mm	5 117 484	7 463 492	高

2.3 计算结果分析

2.3.1 静力学计算结果分析

表 1 中 A1 至 A10 方案岔管的管壳及加强梁(月牙肋)应力、位移有限元计算结果见表 4。

由表 4 可以看出,有的方案最大应力值很高,不但超过了允许应力,而且超过了材料的屈服应力,但此最大应力均出现在模型中两个相邻构件的交界处(图 2),如管壳与拉杆、梁(或肋板)的交界处,此最大应力属于二次应力^[19],是由于管壳与拉杆、梁(或肋板)的刚度相差较大,有明显的自由变形差,是为满足相邻部件的变形协调要求所产生的应力,具有自限性和局限性,虽超过了材料的屈服应力,使得有一方发生部分屈服,但此屈服导致与另一方的约束作用即行缓解,应力不再上升,相反边界应力会迅速衰减(图 2),它一般不会导致结构发生破坏,不用过分担心。因此应力均值更具有参考意义,表中的应

力均值均小于允许应力。

表 4 中列出了管壳位移参数,是因为在有限元分析中,位移是最基本的未知量,而应力是通过位移计算出来的,位移要比应力和应变更加准确^[20],所以把位移和应力二者结合起来去分析问题,往往能得出更为准确的结果。

A4 方案应力最大值分布情况见图 2。

由图 2 可以看出,A4 方案(其他方案同理)的岔管应力最高点位于岔管上、下端部月牙肋和管壳交界处的管壳上,主要集中在倒圆角附近,且不随倒圆角半径的大小不同而发生转移,说明此处应力集中现象比较明显。

由 A1、A2、A5 方案计算结果可以看出,在主管和支管相贯处设置腰梁,可以明显减小管壳的应力和位移,这是因为腰梁的刚度较大,限制了管壳的变形量,但由此产生的最大应力(二次应力)也较大。“U”梁

表 4 岔管管壳及加强梁(月牙肋)应力、位移计算成果
Tab. 4 Stress and displacement simulation results of branch pipes

单位:MPa

方案	主管管壁最大应力/ 应力均值	支管管壁最大应力/ 应力均值	腰梁最大应力/ 应力均值	“U”梁最大应力/ 应力均值	主管最大位移/ 位移均值/mm	支管最大位移/ 位移均值/mm
A1	234.8/58.46	135.4/57.72	164.1/37.46	106.2/45.72	2.51/0.95	2.53/1.11
方案	主管管壁最大应力/ 应力均值	支管管壁最大应力/ 应力均值	腰梁最大应力/ 应力均值	月牙肋最大应力/ 应力均值	主、支管最大位移/ 位移均值/mm	拉杆最大位移/ 位移均值/mm
A2	319.4/70.42	127.6/58.46	152.8/34.74	175.5/36.1	2.5/0.94	2.63/1.88
方案	主管管壁最大应力/ 应力均值	支管管壁最大应力/ 应力均值	月牙肋最大应力/ 应力均值	月牙肋最大位移/ 位移均值/mm	主管最大位移/ 位移均值/mm	支管最大位移/ 位移均值/mm
A3	127.2/85.23	472.5/78.35	393.8/54.12	5.24/3.13	3.30/1.73	5.24/2.46
A4	127.8/84.66	433.6/72.43	335.6/40.47	4.12/2.33	2.93/1.79	4.12/2.19
A5	132/84.48	216.1/65.68	180.3/24.9	2.21/1.12	3.27/1.93	3.27/1.61
A6	135.2/84.27	169.5/63.76	156.4/19.54	1.11/0.53	3.7/2.02	3.7/1.28
A7	138/86.53	233.4/64.36	192.9/18.85	0.52/0.29	3.94/2.07	3.94/1.14
A8	136.3/85.41	183.5/63.54	168.8/18.57	1.00/0.48	3.74/2.02	3.74/1.25
A9	137/85.49	187.4/63.64	172.3/18.16	0.95/0.46	3.76/2.02	3.76/1.23
A10	136.7/85.38	197.3/63.81	172.8/17.85	0.91/0.44	3.78/2.03	3.78/1.23

注:表 4 中应力、位移均值分别指有限元分析中所有节点的应力、位移算术平均值。

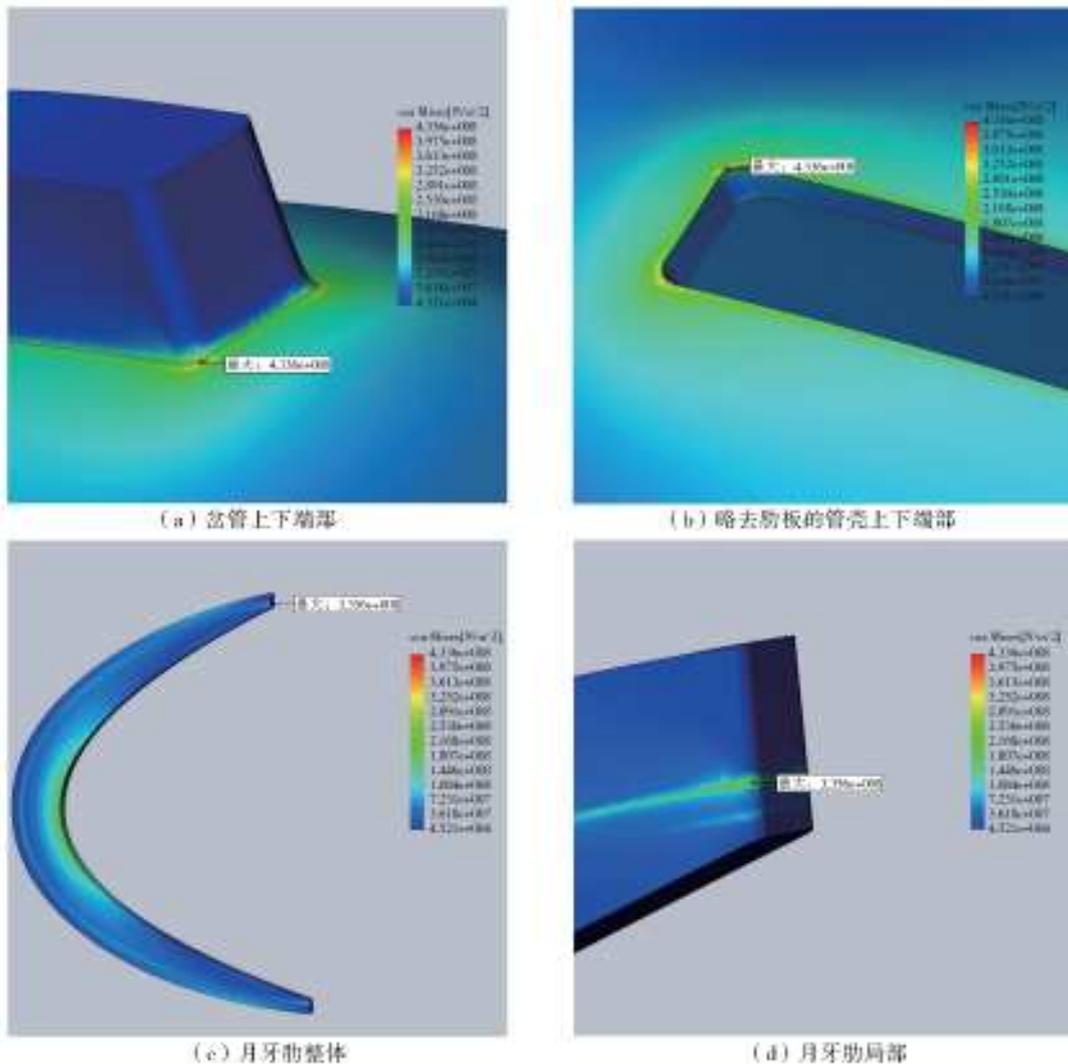


图 2 A4 方案岔管局部应力

Fig. 2 Local stress distribution of A4 programs

的应力均值要明显大于月牙肋,这是由于对称“Y”形岔管本身受力特点所导致的,在一定的内水压力作用下,左右支管对“U”梁(或肋板)的合力作用点往往位于岔管内部,因此采用内伸形式的月牙肋的受力情况要比“U”梁(无内伸)更为合理,故月牙肋的整体应力均值要偏小。

A4、A5 方案的岔管位移见图 3。

由 A3、A4、A5、A6、A7 方案计算结果可以看出,随着肋板宽度的增加,肋板的应力、位移均显著减小,支管的位移显著减小,主管的位移略有增加,管壳的应力均值先减小后增大,但幅度很小,支管的最大应力先减小后增大,变化显著,其中 A6 方案支管的最大应力和应力均值均为最小,分别为 169.5

MPa 和 63.76 MPa,均小于允许应力。A3 和 A7 方案肋板的应力、位移均值降低率分别为 65.17% 和 90.73%,可见,增加肋板宽度主要作用是降低月牙肋本身的应力值,而对管壳应力值的影响不大。值得一提的是,由图 3 可以看出,A4 方案的岔管最大位移位于月牙肋和支管交界处,随着肋板宽度的增加,该点逐渐向月牙肋两侧的主管与支管交界处转移,这是由于月牙肋本身构造特点,增加其肋板宽度会显著提高其整体刚度,同时也会影响其与主、支管的相对刚度大小,导致三者的变形发生变化调整,这也是支管位移变小、主管位移变大的原因所在。由于 A6 方案主管、支管、肋板的最大应力和应力均值均为最小,优选 A6 方案。

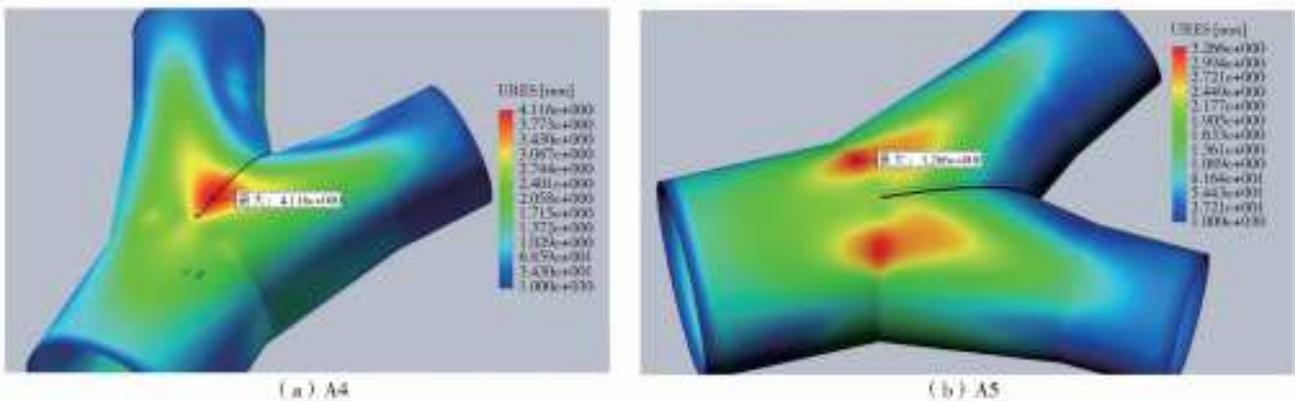


图 3 A4、A5 方案岔管位移

Fig. 3 Displacement distribution of A4 and A5 programs

由 A6、A8、A9、A10 方案计算结果可以看出,随着月牙肋厚度的增加,肋板的应力均值、位移均值略微减小,主管和支管的应力均值和位移均值几乎不发生变化,肋板和支管交界处的最大应力略有增加。可见,当肋板厚度达到一定值时,肋板厚度的变化对岔管的应力影响很小,尤其是对管壳的影响可

以忽略,没有必要为降低微小幅度的应力而增加肋板的厚度,从而导致岔管重量和造价大幅上升,优选 A6 方案。

2.3.2 CFD 数值模拟结果分析

A4、A5、A6、A7 方案岔管内水流速度迹线见图 4。

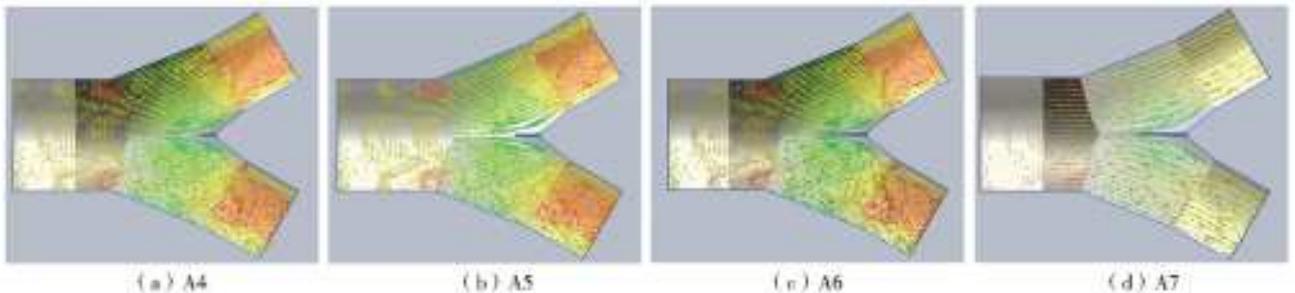


图 4 A4、A5、A6、A7 方案岔管内水流速度迹线

Fig. 4 Water flows of A4, A5, A6, and A7 programs

为了更好地观察水流的漩涡和死区,通过显示流体沿 X 轴方向(平行于主管轴线指向下游)流动,可以更清楚地观察漩涡。使用两色颜色板以 0 为分隔线显示 X 方向的速度分量。X 方向的速度分量分别以红、蓝两色显示,红色代表正值,蓝色代表负

值,即蓝色区域显示相反方向的流动,也就是接近一半的漩涡。具体见图 5。

从图 4 和 5 可以看出,当肋板厚度不变时,随着肋板宽度的增加,漩涡范围逐渐扩大,且有沿着肋板向上游侧移动的趋势,而岔管内水流迹线并没有发

生明显改变,用 Flow Simulation 自带的计算器计算 其对应的水头损失见表 5。

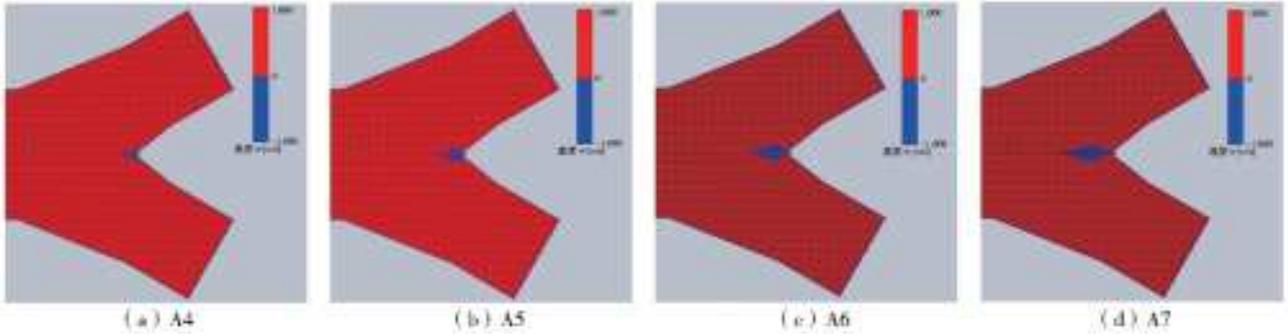


图 5 A4、A5、A6、A7 方案岔管内水流速度矢量和速度云图

Fig. 5 Water flow velocity vector and speed clouds of A4, A5, A6, and A7 programs

表 5 岔管肋板宽度与水头损失系数对应关系
Tab. 5 Relationship between the width of the rib and the hydraulic loss

方案	水头损失系数 ϵ
A4(肋板宽度 500)	0.063 8
A5(肋板宽度 1 000)	0.067 3
A6(肋板宽度 1 500)	0.070 9
A7(肋板宽度 2 000)	0.074 3

注:表中 $\epsilon=2\Delta p/\rho v^2$,其中 Δp 为进出口压差(Pa); ρ 为流体密度(kg/m^3); v 为断面平均流速(m/s)。

从表 5 可以看出, A7 与 A4 相比,肋板宽度增加 300%,对应水头损失系数增加 16%,可见肋板宽度的改变对水头损失的影响很小。所以通过

CFD 数值模拟之后,维持经有限元静力分析优选出的 A6 方案。

同理,由 A6、A8、A9、A10 方案经过类似比较,可以得出以下结论:当肋板宽度不变时,随着肋板厚度的增加,漩涡范围逐渐扩大,且有逐渐覆盖整个肋板的趋势,而岔管内水流迹线并没有发生明显改变。A10 与 A6 相比,肋板厚度增加 33%,对应水头损失系数增加 3.95%,可见肋板厚度的改变对水头损失的影响很小。

综上,经有限元静力分析和 CFD 数值模拟计算,通过对各方案逐一对比分析,最终选择 A6 方案,将 A6 方案岔管变形比例适当放大,见图 6。

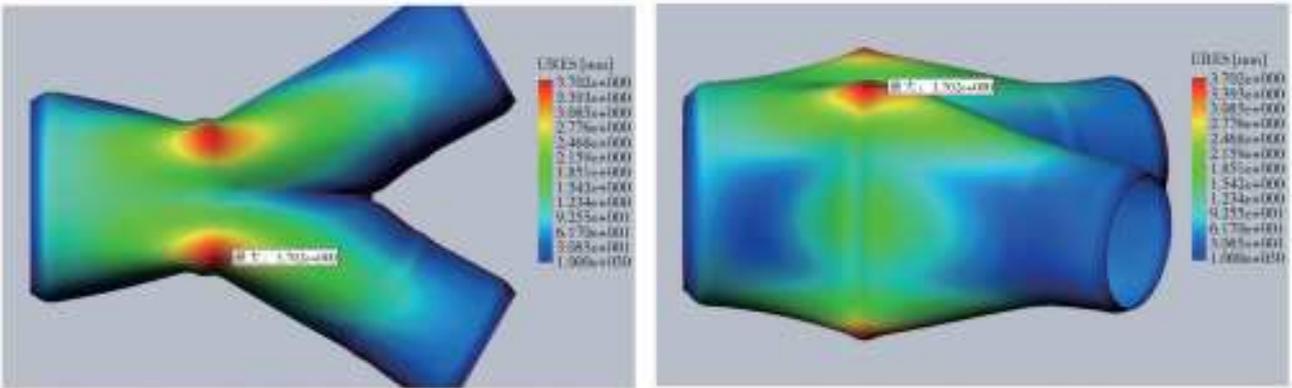


图 6 岔管变形比例放大图(变形比例 386.558)

Fig. 6 Deformation ratio of Branch Pipes (deformation ratio:386.558)

从图 6 可以看出,在一定的内水压力作用下, A6 方案岔管的最大位移为 3.7 mm,位于主管和支管交界处偏向上部,岔管的上部和下部向外侧变形,钝角区主管与支管相贯的位置向内侧变形,肋板受拉向上、下两侧变形。

A6 方案和原设计 A1 方案对比情况见表 6。

由表 6 可知,优化后的 A6 方案与原设计方案 A1 相比,体积和重量均大幅降低,整个构件重量降低率为 34.96%。

3 结 论

通过对“Y”形钢岔管的有限元静力分析和 CFD 数值模拟计算,可以得出以下结论。

(1) “Y”形月牙肋岔管的变形较大值一般位于管壳上下两侧主管相贯的位置(在肋板的刚度达到一定值的前提下),成左右对称分布,且位移较大、较集中。当肋宽比 ≤ 0.12 时,管壳和肋板的应力和位移均较大,且最大位移位于肋板上,说明肋板的尺寸

表 6 A1 和 A6 方案岔管参数对比
Tab. 6 Parameters of A1 and A6 programs

A1	岔管壁厚/ mm	腰梁、“U”梁 厚度/mm	腰梁、“U”梁 短边高度/mm	腰梁 长边高度/mm	“U”梁(无内伸) 长边高度/mm	岔管及加强梁 总重量/kg/总体积/m ³
	30	120	850	1 800	2 700	111 222/14. 168
A6	岔管壁厚/ mm	月牙肋板厚度/ mm	月牙肋板宽度/ mm	肋宽比		岔管及月牙肋 总重量/kg/总体积/m ³
	30	120	1 500	0. 38		72 340/9. 215

选择不合理,刚度不够,应适当增加肋板宽度。降低月牙肋的应力值,最有效的办法是增加肋板的宽度,其次是增加肋板的厚度。肋板的宽度和厚度对管壳的应力、岔管内水的流态和水力损失影响均不大。

(2) 前人大多数是基于 ANSYS 软件对水电站钢岔管进行静力分析,本文采用有限元静力分析和 CFD 数值模拟相结合的方式,运用 Solidworks 软件对自流式长距离输水工程中的大口径“Y”形钢岔管进行分析和计算,为今后类似工程提供参考。

(3) 本文从月牙肋的厚度和肋宽比两个方面对岔管进行 CFD 分析,并未对分岔角进行模拟。

参考文献(References):

- [1] 杜芳琴,伍鹤皋,石长征. 月牙肋钢岔管设计中若干问题的探讨[J]. 水电能源科学, 2012, 30(8): 129-131, 219. (DU F Q, WU H G, SHI C Z. Discussion on some issues of design of crescent-rib reinforced bifurcation [J]. Water Resources and Power, 2012, 30(8): 129-131, 219. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-7709. 2012. 08. 038.
- [2] 罗玮,周玮. 缅甸 DAPEIN(I)水电站岔管优化设计[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(6): 181-184. (LUO W, ZHOU W. Optimization design of branch pipe in DAPEIN(I) Hydropower Station[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(6): 181-184. (in Chinese)) DOI: 10. 3724/SP. J. 1201. 2013. 06181.
- [3] 苏凯,李聪安,伍鹤皋,等. 水电站月牙肋钢岔管研究进展综述[J]. 水利学报, 2017, 48(8): 968-976. (SU K, LI C A, WU H G, et al. Review of the crescent-rib steel bifurcation of hydropower station[J]. Journal of Water Resources, 2017, 48(8): 968-976. (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 20160986.
- [4] 朱宏伟,任德记,高阳峰,等. 月牙肋钢岔管的有限元分析[J]. 水利科技与经济, 2008, 14(2): 113-114, 120. (ZHU H W, REN D J, GAO Y F, et al. Finite element analysis of the steel Y-pipe with crescent rib[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2008, 14(2): 113-114, 120. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1006-7175. 2008. 02. 011.
- [5] 齐文强,邹柏青,李月伟. 基于 CATIA 的月牙肋钢岔管三维设计[J]. 水电与新能源, 2016(7): 12-16. (QI W Q, ZOU B Q, LI Y W. Three-dimensional design of the crescent ribbed steel branch pipe with CATIA[J]. Hydropower and New Energy, 2016(7): 12-16. (in Chinese)) DOI: 10. 13622 /j. cnki. cn42 - 1800 /tv. 1671 - 3354. 2016. 07. 003.
- [6] 胡馨之,伍鹤皋,石长征,等. 肋板形状对月牙肋钢岔管应力影响的研究[J]. 水力发电, 2017, 43(3): 49-53. (HU X Z, WU H G, SHI C Z, et al. Effect study of rib shape on the stress of crescent-rib reinforced branch pipe[J]. Water Power, 2017, 43(3): 49-53. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 0559-9342. 2017. 03. 011.
- [7] 叶文宇,王荣荣,罗玉霞. 善泥坡水电站非对称 Y 型月牙肋岔管设计[J]. 工程建设与设计, 2017: 94-96. (YE W Y, WANG R R, LUO Y X, et al. The design of non-symmetrical Y-shaped crescent rib reinforced branch pipe in Shannipo Hydropower Station[J]. Construction & Design for Project, 2017: 94-96. (in Chinese)) DOI: 10. 13616/j. cnki. gcj sysj. 2017. 12. 028.
- [8] 杨贵海. 一种基于几何解析法的月牙肋岔管设计方法[J]. 中国农村水利水电, 2018(4): 95-97, 103. (YANG G H. A design method of crescent rib tube based on geometric analysis method[J]. China Rural Water and Hydropower, 2018(4): 95-97, 103. (in Chinese))
- [9] 李生庆,黄涛. 月牙肋岔管结构分析[J]. 四川水力发电, 2013, 32(4): 120-124. (LI S Q, HUANG T. Analysis of crescent rib bifurcation pipe structure[J]. Sichuan Water Power, 2013, 32(4): 120-124. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-2184. 2013. 04. 036.
- [10] 王茜,刘永孝,刘洁玉. 基于 CAD 和三维软件 CATIA 的月牙肋岔管体型设计[J]. 西北水电, 2015(6): 32-34. (WANG Q, LIU Y X, LIU J Y. Outline design of crescent-rib bifurcated penstock by CAD and CATIA [J]. Northwest Water Power, 2015(6): 32-34. (in Chinese)) DOI: 10. 3969 /j. issn. 1006-2610. 2015. 06. 009.
- [11] 王小军. 基于三维有限元的下型月牙肋钢岔管设计及应力分析[J]. 水电能源科学, 2016, 34(3): 98-100,

107. (WANG X J. Bu-type crescent rib steel bifurcation pipe design and stress analysis based on three-dimensional finite element [J]. Water Resources and Power, 2016, 34(3): 98-100, 107. (in Chinese))
- [12] 董家, 严根华, 杨兴义, 等. 月牙肋岔管群水力损失模型试验与数值模拟结果的比较[J]. 水电能源科学, 2016, 34(10): 60-64. (DONG J, YAN G H, YANG X Y, et al. Experimental research and numerical simulation comparison of unsymmetrical "Y"-type penstock for hydraulic loss [J]. Water Resources and Power, 2016, 34(10): 60-64. (in Chinese))
- [13] 王志国. 高水头大 PD 值内加强月牙肋岔管布置与设计[J]. 水力发电, 2001(10): 56-58, 62. (WANG Z G. Layout and design of internal crescent-rib branch pipe with high head and large PD values [J]. Water Power, 2001(10): 56-58, 62. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 0559-9342. 2001. 10. 021.
- [14] 伍鹤皋, 石长征, 苏凯. 埋藏式月牙肋岔管结构特性研究[J]. 水利学报, 2008, 39(4): 460-465. (WU H G, SHI C Z, SU K. Study on structure characteristics of embedded crescent-rib reinforced bifurcated pipe [J]. Journal of Water Resources, 2008, 39(4): 460-465. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 0559-9350. 2008. 04. 011.
- [15] 李玲, 李玉梁, 黄继汤, 等. 三岔管内水流流动的数值模拟与实验研究[J]. 水利学报, 2001(3): 49-52. (LI L, LI Y L, HUANG J T, et al. Numerical simulation and experimental study on water flow in "Y"-type tube [J]. Journal of Water Resources, 2001(3): 49-52. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 0559-9350. 2001. 03. 010.
- [16] 何新红, 石广斌, 牛天武. Xeset+2 水电站三梁岔管结构优化分析[J]. 西北水电, 2009(2): 22-25. (HE X H, SHI G B, NIU T W. Analysis of optimization of Y bifurcated pipe structure for Xeset+2 hydropower station [J]. Northwest Hydropower, 2009(2): 22-25. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1006-2610. 2009. 02. 007.
- [17] 罗玮, 周玮, 伍鹤皋. 缅甸 DAPEIN (I) 水电站埋藏式钢岔管设计[J]. 水电能源科学, 2011, 29(2): 53-55. (LUO W, ZHOU W, WU H G. Embedded steel branch pipe design for DAPEIN (I) Hydropower Station in Burma [J]. Water Resources and Power, 2011, 29(2): 53-55. (in Chinese))
- [18] NBT 35056-2015 水电站压力钢管设计规范[S]. (NBT 35056-2015 Design code for steel penstocks of hydroelectric stations[S]. (in Chinese))
- [19] ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 79, Steel penstocks[S]. American, 1993.
- [20] DS SolidWorks 公司. Solidworks Simulation 基础教程[M]. 第三版. 陈超祥, 胡其登译. 北京: 机械工业出版社, 2014. (DS SolidWorks Corporation. The basic course of Solidworks Simulation[M]. 3rd ed. CHEN C X, HU Q D, Beijing: China Machine Press, 2014. (in Chinese))
- (上接第 176 页)
- [24] 牟强, 贾广社. 改进固定工期大中型工程的完工成本估算[J]. 中国管理科学, 2018, 26(4): 180-187. (MOU Q, JIA G S. Improving cost estimate at completion of the duration-fixed mega construction project [J]. China Journal of Management Science, 2018, 26(4): 180-187. (in Chinese)) DOI: 10. 16381/j. cnki. issn1003-207x. 2018. 04. 020.
- [25] 刘珺珺, 汪妮, 解建仓, 等. 基于蚁群算法的水资源优化配置博弈分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(8): 205-212. (LIU H H, WANG N, XIE J C. Game analysis on optimization allocation of water resources based on ant colony algorithm [J]. Journal of Northwest A&F University (Nat. Sci. Ed.), 2014, 42(8): 205-212. (in Chinese)) DOI: 10. 13207/j. cnki. jnwafu. 2014. 08. 023.
- [26] 徐胜, 马小军, 钱海, 等. 基于遗传-模拟退火的蚁群算法求解 TSP 问题[J]. 计算机测量与控制, 2016, 24(3): 143-148. (XU S, MA X J, QIAN H, et al. Genetic-simulated annealing-based ant colony algorithm for traveling salesman problem [J]. Computer Measurement & Control, 2016, 24(3): 143-148. (in Chinese)) DOI: 10. 16526/j. cnki. 11-4762/tp. 2016. 03. 039.
- [27] 费腾, 张立毅. 现代智能优化算法研究[J]. 信息技术, 2015(10): 26-29. (FEI T., ZHANG L Y. Research on modern intelligent optimization algorithm [J]. Information Technology, 2015(10): 26-29. (in Chinese)) DOI: 10. 13274/j. cnki. hdzj. 2015. 10. 007.
- [28] 张春梅. 引黄济青改扩建工程 HT 段进度管理研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2018. (ZHANG C M. Study on management of HT section of the yellow river diversion project [D]. Qingdao: Qingdao University, 2018. (in Chinese))