

苏州河河口水闸金属结构数学模型分析

严根华

(南京水利科学研究院,江苏 南京 210029)

摘要 根据苏州河河口水闸结构设计和受力特点,采用三维有限元数学模型,对水闸结构在反向挡潮和正向挡水两种基本工况下水闸的静力特征进行研究,对设计方案的安全性进行评估,指出存在的问题,提出优化方案。

关键词 水闸结构;有限元模型;受力特征;结构优化

中图分类号:TV66;O241.82 文献标识码:A 文章编号:1006-7647(2007)S1-0067-06

苏州河河口水闸工程位于上海市金山路苏州河河口,具有双向挡水功能。闸门总跨度 100 m,采用卧倒式结构,系我国跨度最大的大型挡潮结构。根据黄浦江潮位变化及内河水位调控要求,苏州河河口水闸需要承担最大高潮位 6.26 m、内河水位 2.8 m 的反向挡潮及最低潮位(0.24 m)下内河正常水位 3.5 m 时正向挡水两种基本工况的操作运行,以保证苏州河正常的观光效果。

该水闸闸门采用新型卧倒式结构,门叶与底轴刚性连接,并将底轴上的轴承座与基础固结,布置在两岸侧的液压启闭机通过拐臂带动底轴旋转从而实现闸门的启闭操作。为避免底轴基础沉降变形可能带来的不利影响,底轴分为两段,在中部(河中央)采用软连接。各门叶制造单元之间亦采用弱连接。鉴于水闸跨度大、运行状态复杂,因基础变位、水动力荷载作用等导致的水闸振动及运行非平稳性问题^[1-2],需要进行深入研究。本项研究重点通过数学模型对水闸的受力特征进行一般分析,揭示闸门结构在不同运行工况下的变形及受力特征,对存在的问题提出优化意见。

1 有限元数值计算模型

1.1 结构设计布置

1.1.1 原设计方案

闸门最初设计阶段的体型,孔口一半共由 9 扇门叶、26 根主纵梁构成。门叶底座分门形焊接底座和圆弧形铆接底座两种形式。门叶主纵梁为二侧翼板断面尺寸相同的工字钢,面板厚度为 8 mm。因受到底轴

焊接变形影响及底座根部局部应力过大等原因限制,门形焊接底座形式不予采纳。而圆弧形铆接底座具有结构刚度强、无焊接变形等特点,因此计算分析采用后者。门叶主纵梁结构断面尺寸见图 1。

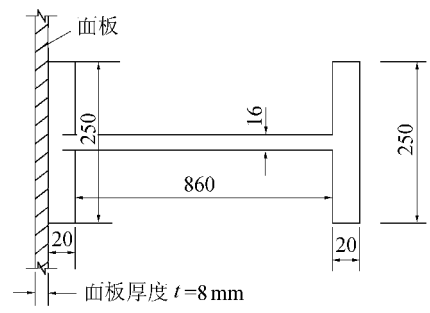


图 1 门叶主纵梁尺寸

1.1.2 改进方案

经对原设计方案初步计算,发现该型闸门应力偏大,门叶 26 根主纵梁中最小根部应力在 200 MPa 以上,门叶面板应力亦偏大,因此提出改进方案,将门叶面板厚度由 8 mm 调整为 10 mm,主纵梁的腹板与翼板厚度均有较大增加,主纵梁断面尺寸见图 2。

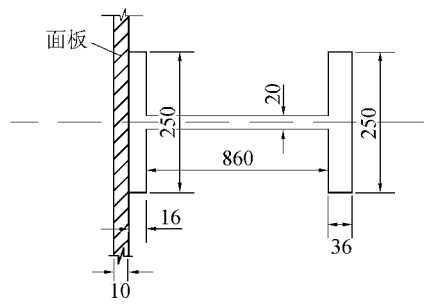


图 2 改进方案主纵梁断面尺寸

1.2 水闸结构有限元模型

考虑到水闸结构主要由钢板焊接而成,在进行有限元分析时,选用板壳单元更接近于结构的拓扑形式,能正确地反映结构的力学特性,而对于闸门面板上用于连接和加强刚度的工字钢则选用 besm4 来建模。建模时选用的单位制:长度为 mm,质量为 kg,力为 N,应力为 MPa。材料属性:弹性模量为 210000 MPa,密度为 7.8 t/m³,泊松比为 0.3。根据水闸结构构造特征,建模时考虑水闸全跨的一半模拟结构变形和受力特征。将门体离散为 33 756 个 shell 单元,3 468 个 beam 单元计 33 756 个结点,196 684 个自由度。计算方程个数为 196 684 个。图 3 绘出了半整体闸门和其中单扇门叶的有限元数值计算模型。

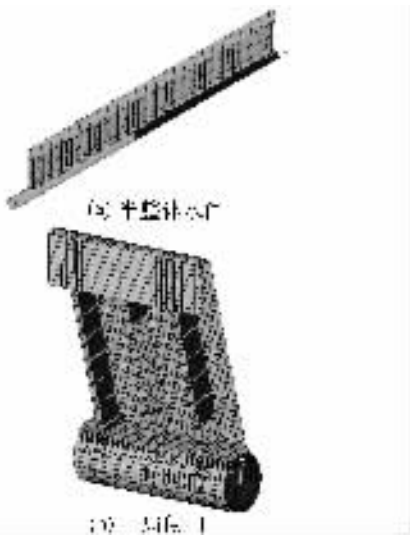


图 3 有限元模型示意图

1.3 边界条件的选取

按照水闸结构的设计构造,闸门(半整体)底轴上的 5 个支座均采用轴承座并在水平和垂直两个方向给予变位约束,但沿轴向保留旋转自由度。底轴两侧(近岸侧)采用启闭机联动,一旦闸门启闭结束,门体即处于定位状态。因此可将底轴两侧端点近似地认为不动点,即既无线位移又无角位移。闸门反向挡潮工况(门体垂直)和正向挡水工况(门体倾斜)下底轴各支座处的相对沉降量和绝对沉降量列于表 1。本次计算以底轴相对沉降量作为底轴初始变形控制值。

表 1 水闸底轴支座沉降量 cm

位置	挡潮工况		挡水工况	
	绝对沉降量	相对沉降量	绝对沉降量	相对沉降量
支座 1	-3.45	0	-4.0	0
支座 2	-4.25	-0.8	-4.46	-0.64
支座 3	-4.85	-1.4	-4.95	-0.95
支座 4	-4.90	-1.45	-4.92	-0.92
支座 5	-4.75	-1.3	-4.68	-0.68

2 反向挡潮工况水闸受力特征分析

实际运行时将出现两种主要工况:①正向挡水工况,②反向挡潮工况。其中反向挡潮工况是水闸设计控制工况。

2.1 门体水压力荷载

当水闸处于反向挡潮工况时,门体垂直,下游黄浦江侧水位系高潮位状态(为 6.26 m),此时设计内河水位为 2.8 m。根据水压力线性分布原理,闸门上下游水位差为 3.46 m,在内河水位(2.8 m)以上闸门面板上的压力呈梯度变化,而在 2.8 m 水位以下作用于闸门面板上的水压是不变的,其量值为 0.034 MPa。

2.2 门叶刚性连接水闸受力特征

水闸沿门宽方向的应力变化以纵梁根部应力为大,并沿门高度方向逐渐减小,呈现出由河中央向河岸侧逐渐增大的趋势。图 4 绘出了以纵梁序号为横坐标(1 号为近岸侧,26 号为河中央),应力值为纵坐标的水闸应力变化特征。由图 4 可见,在门叶刚性连接条件下,位于底轴支座部位处的主纵梁根部应力均出现大于 160 MPa 的峰值,比相邻纵梁的应力一般大 20 MPa 以上。最大应力值出现在近岸侧第 1 根纵梁下部门叶底座加劲板根部,为 189.1 MPa,最小应力出现在河中央第 24 根主纵梁位置,为 121 MPa。这是由于在水压力作用下支座部位受到位移约束,而且由于底轴沉降和水闸整体扭转变形引起近岸侧固支端的应力加大的缘故。这种应力变化特征与支座反力在近岸侧达到最大值相一致。门叶最大位移量出现在河中央侧闸门顶部,约 227.0 mm。

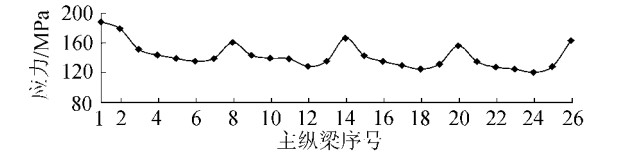


图 4 水闸主纵梁根部应力变化

2.3 门叶无连接状态水闸受力特征

根据水闸结构设计,门叶之间的连接采用槽钢型边梁中间设止水橡皮并用螺栓连接。其力传递能力较刚性连接要弱些。因此,探讨门叶之间无连接状态下水闸结构的变形和受力情况有助于分析判断水闸的可能受力情况变化,实际上这是门叶连接状态的另一个极限。

当水闸门叶之间处于无连接状态时,各门叶的变形相对独立而且不传递作用力。此时底轴作为力传递构件在应力应变方面起到控制作用。计算结果显示,该工况闸门的最大位移量为 221.5 mm,出现在

河中央门叶上方部位, 闸门的整体变位为扭斜面。门体的应力变化仍以近岸侧主纵梁根部部位为大, 面板部位略小。图 5 绘出了以应力值为纵坐标、以纵梁序号(编号方向由近岸侧向河中央方向) 为横坐标的闸门纵梁根部较大应力变化趋势。在门叶间无连接条件下, 门体的较大的应力值仍在底轴支座部位出现峰值, 但近岸侧的最大应力点发生部位出现在近岸侧第 2 个纵梁根部, 其应力值为 178.5 MPa。亦即位于第 1 扇门叶的第 2 根纵梁处(1 号支座处) ,其他支座的纵梁应力略小。

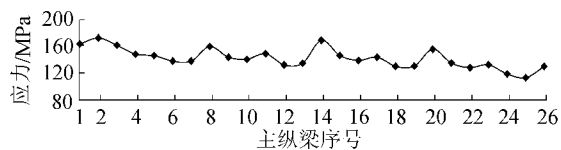


图 5 水闸主纵梁根部应力变化

从总体应力变化趋势看, 除几个底轴支座部位外, 水闸门体的应力由河岸侧向河中央呈现逐渐下降的趋势。门叶上游面的应力最大值发生在近河中央部位底轴上方第 2 道小横梁处, 其应力值约为 137 MPa, 其他部位则略小。

2.4 门叶连接方式对闸门受力的影响分析

根据给定的底轴沉降量条件, 当水闸处于反向挡潮工况时, 门叶连接方式对水闸应力分布具有一定的影响, 这种影响集中反映在水闸两侧部位。由图 4 可见, 门叶间刚性连接时, 近岸侧第 1 和第 2 个纵梁根部最大应力值达到或超过 180 MPa, 水闸最左侧门叶底座下方加劲板角点处(局部应力集中点) 的应力达 189.1 MPa。当门叶间不考虑连接作用时闸门的左下角加劲板角点应力集中点消失。而对应 1 号支座处的第 2 个主纵梁根部应力成为水闸最大应力点, 其应力值为 178.5 MPa, 该点应力与刚性连接时相当。河中央处最后一根主纵梁(序号为 26) 根部应力在门叶无连接时由 163.8 MPa 降为 130.1 MPa, 降幅超过 30 MPa。从整体上看, 水闸门叶间考虑刚性连接时, 最小应力值为 121.0 MPa, 出现在序号为 24 的主纵梁上, 而当门叶间不考虑连接时, 最小应力值降为 113.1 MPa, 出现在序号为 25 的纵梁部位, 降幅为 8.0 MPa。

显然, 当门叶间视为刚性连接时, 因受底轴扭转影响及力传递作用导致水闸最左侧(近岸侧) 门叶底座出现较大局部应力集中点(189 MPa) , 并使河中央最后一根主纵梁应力上升至 163.8 MPa。而当门叶间不考虑连接时, 门叶间应力传递消失, 使较大应力值下降。但在 2 号、3 号、4 号支座处的主纵梁应力没有明显变化, 说明门叶间的连接状态对水闸两侧(河岸侧与河中央) 的应力分布有较大的影响。

此外刚性连接时门叶最大位移量出现在闸门河中央侧顶部, 位移量约 227.0 mm。而当门叶间不考虑连接时, 最大位移量为 221.5 mm, 仍然出现在河中央门叶上方部位, 闸门的整体变位为扭斜面。

3 正向挡水工况水闸结构的受力特征

3.1 荷载作用情况

水闸处于正向挡水工况时, 其作用力合力方向指向下游, 即内河水位高于黄浦江潮位, 闸门结构处于倾斜状态。内河正常设计水位为 3.5 m, 黄浦江水位为 0.24 m, 水闸上下游最大水头差 3.26 m。下游水位以上闸门面板上部的压力呈线性梯度变化, 而在下游水位以下作用在闸门面板上的压强恒定为 0.032 MPa。

3.2 闸门结构受力特征

该工况下的水闸变形和应力分布有其自身特征。当门叶之间考虑采用刚性连接时, 水闸在水压力荷载作用下的变形特征与反向挡潮工况类似, 以河岸侧底轴启闭机控制点为不动点, 门叶自下而上向下游偏转, 同时其偏转变形量向河中央方向亦逐渐增加, 至河中央水闸上部偏转量达到最大值, 形成一个扭转变形斜面, 最大变形值为 184.5 mm, 位于河中央闸门上端。

闸门的门叶垂向应力分布表现出由上至下逐渐增加的趋势, 较大的应力值基本上分布在门叶下部。这是门叶作为悬臂状结构的力传递特性所决定的。门体最大应力值为 165.8 MPa, 位于近岸侧第 2 根主纵梁的下端翼缘。从总体上看, 各主纵梁下端翼缘部位分别为结构局部应力集中区。闸门面板应力相对较小, 接近最下端横梁处最大应力值为 112.0 MPa。

在水压力荷载作用下水闸底轴的最大变形值为 26.0 mm, 底轴转角为 1.45°, 系基础沉降变形与扭转变形之合位移, 最大位移出现在底轴最右端河中央部位。底轴的最大应力值为 107.0 MPa, 位于底轴左端固定位置处, 应力分布呈现出沿河中央方向逐渐减少的变化趋势。

若不考虑门叶之间的连接效果, 则当水闸在挡水工况下运行时门叶的最大变形出现在河中央闸门的上方部位, 其位移值为 166.7 mm, 该位移量为基础沉降与门叶变形的合位移。水闸的最大应力值为 149.0 MPa, 位于河岸侧第 2 主纵梁的下端翼缘。闸门上游面的最大应力位于河中央门板下部横梁处, 最大应力值 104.4 MPa, 而在河岸附近该位置处最大应力值为 108.405 MPa。底轴的最大变形仍在底轴最右端河中央部位, 为 24.5 mm, 最大扭转角为 1.5°。

底轴最大应力值出现在河岸侧 约 98.3 MPa。

4 基础变位对水闸受力特征的影响分析

工程上水闸底轴的沉降是不可避免的,但沉降量的控制是必要的,过大的沉降量将导致门体受力的不利影响。计算结果表明,水闸沿门宽方向的应力变化有其特有规律。当水闸门叶间采用刚性连接时,近岸侧门叶底座加劲板部位局部集中应力随沉降量的增加而加大。底轴无沉降量时应力值为 152 MPa,而当底轴沉降量为 1.5 倍设计给定值时应力达 212.5 MPa。

若将水闸门叶间视为无连接状态时,在计算沉降量范围内水闸最大应力移至第 2 根纵梁根部翼板和门叶底座侧板相邻区域。随着沉降量的增加,近岸侧第 1 根纵梁的应力迅速增大,图 6 绘出了不同沉降量条件下主纵梁根部的应力变化特征。

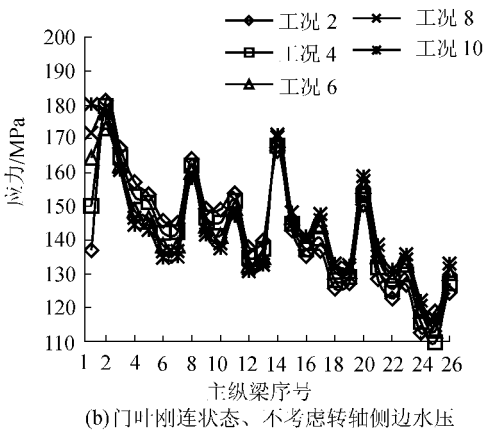
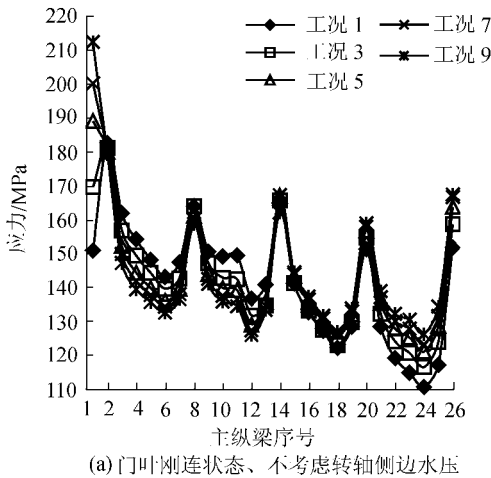


图 6 主纵梁根部应力变化

5 底轴沉降量对支座反力作用的影响

水闸处于反向挡潮或正向挡水工况时,作用于门叶的水压力荷载将通过底轴传向岸侧启闭装置。底轴 5 个轴承座(取水闸的 1/2 为计算范围)(图 7)将承受垂直和水平两个方向的支承反力。有限元计

算时,将底轴的每个支座划分为 3 个断面(见图 7),主纵梁计算断面尺寸如图 2 所示。

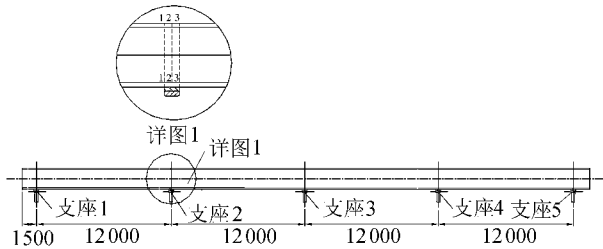


图 7 整体计算简图(单位:mm)

该项计算重点针对反向挡潮工况条件,分别对不同的支座沉降量、水闸门叶之间有无连接等工况进行底轴支座反力分析。计算结果表明,水闸底轴沉降量的变化将导致诸支座反力的改变。相对而言,各支座水平向的反力随沉降量变化不出现本质的变化(见图 8(a)),而沉降量对底轴支座的垂向反力具有明显影响,图 8(b)显示了门叶间刚性连接时诸支座的垂向反力变化特征。显然,随着沉降量的加大,支座的垂向反力明显加大。其中,1 号和 5 号支座反力方向向上,其他支座反力方向向下。1 号支座最大垂向反力值为 5.9487×10^6 N,出现在工况 9(相对沉降量为 1.5 倍的设计给定值)。从总体上看,支座垂向反力随底轴沉降量的加大而增加。另一方面,当门叶间刚性连接时,支座反力略大于门叶间自由状态时的反力值。说明支座沉降量越小,支座反力亦越小,门叶间连接越弱,支座反力亦略小。

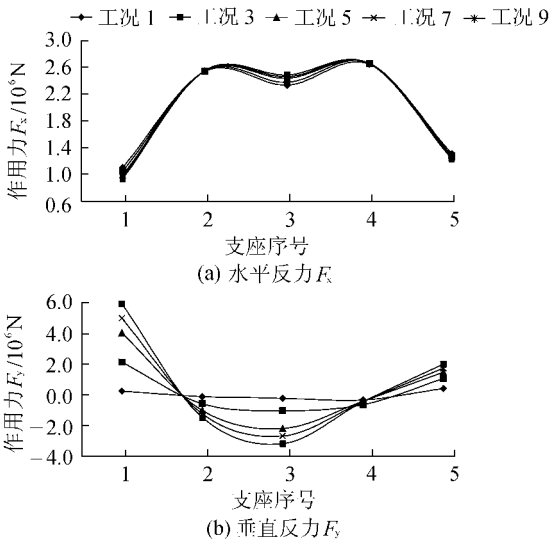


图 8 门叶刚性连接时不同沉降量相应的支座反力

6 水闸结构的静态优化

底轴不同沉降量的水闸受力分析表明,水闸改进设计方案尚有较多部位应力超标(大于允许应力 150 MPa),尤其近岸侧若干门叶主纵梁及底轴支座相邻部位的纵梁根部应力偏大,有必要作进一步修

改。根据应力较大值出现的位置判断,可以通过局部加强主纵梁根部强度和进一步加大主纵梁腹板宽度的途径进行水闸结构的修改优化。

6.1 修改布置简介

修改布置共进行了3组方案的研究,其中方案3集合了方案1和方案2的优点,同时采取加大主纵梁腹板宽度(将原宽度860mm调整为950mm),并采取局部增加门叶底座侧板厚度等优化措施来改善闸门结构的应力分布,控制应力集中现象。

6.2 修改方案的优化效果

对于本工程水闸而言,方案优劣的评价指标主要是应力和位移。门叶间刚性连接和自由连接两种情况下诸主纵梁根部应力变化绘于图9。从位移角度看,3个修改方案的门叶最大位移无本质变化。但对于门叶主纵梁的应力状态来说,方案1门叶应力除近岸侧个别区域超过150MPa外,大部分在允许范围内,但闸门上游面较大应力值亦达到150MPa左右。修改方案2部分主纵梁应力较方案1小,部分主纵梁应力较方案1大,且少数底轴支座处的主纵梁根部应力仍大于150MPa。方案3门叶应力有明显下降,而且大部分区域已有一定的安全裕度。3个修改方案底轴的转角在2.1°~2.3°范围内变化,底轴应力在130~138MPa左右。因此,从闸门应力分布角度考虑,修改后的方案3较优。

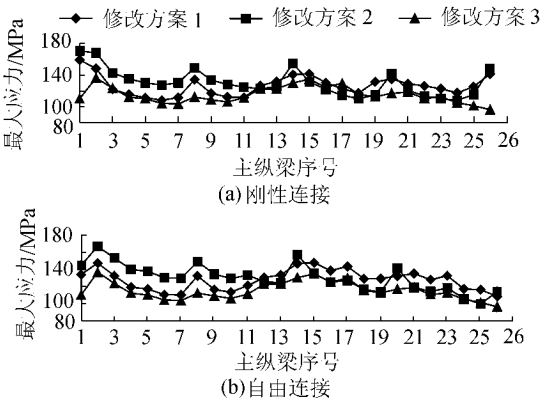


图9 不同方案的主纵梁应力分布

7 最终施工方案闸门结构的静、动力分析

最终施工方案的闸门结构将纵梁腹板进一步加大至1200mm,底轴管壁厚度沿轴向作变截面考虑,以求经济合理。计算时将门叶小横梁用板单元取代梁单元建模,以分析小横梁本身的应力特性。

7.1 反向挡潮工况水闸受力特征分析

在给定底轴沉降量条件,以及水压力荷载作用下,闸门的变形仍然表现出扭转面变化特性。门体最大位移值出现在河中央处门叶上方的顶端,为199.1mm。闸门较大应力出现在第2扇门叶上部小

横梁槽钢腹板与翼板交汇部位,为174MPa;次高应力位于第3扇门叶面板上部相同部位的小横梁槽钢腹板与翼板交汇部位,为162.5MPa;其次较大应力出现在近岸侧闸门面板与底轴连接部位根部的角点处,为159.7MPa。门叶面板最大应力为141.2MPa,出现在闸门近岸侧靠底轴部位;底轴应力在130.0MPa以内。

若不考虑底轴的沉降量,则闸门最大应力为171.73MPa,仍然出现在第2扇门叶上部小横梁槽钢腹板与翼板交汇部位;闸门的最大位移变形量为198.9mm,依然出现在河中央门顶处。数据显示,随着底轴沉降的加大,闸门的应力和位移随之加大。

7.2 正向挡水工况水闸结构的受力特征

按给定底轴沉降量考虑,闸门处于正向挡水时水闸最大变形值为151.85mm,其变形特点仍然为扭转变形斜面。闸门最大应力出现在近岸侧第2扇门叶上部面板横向加强梁处,最大应力值为138.64MPa;在最大应力处下方的次梁应力值下降为130.9MPa;门叶与底轴交界处的最大应力为121.68MPa。若不考虑底轴沉降量,闸门的位移和应力略有减少。门体最大位移值为151.5mm,整体最大应力值为136.6MPa。

7.3 闸门结构的动力特性

闸门结构的动力特性指结构的固有振动频率与振型,反映结构的动力特性。分析计算获得了闸门结构固有振动信息。表2列出了闸门前14阶自由振动固有频率,图10绘出了前4阶振型。计算结果表明,闸门自由振动的一阶基频为3.5Hz,反映闸门顺河向的横向弯曲变形;二阶振型为门叶面板的扭转振动,相应的振动频率为7.35Hz。实际工程上门叶底部受到底轴固定轴承的约束,一阶横向弯曲振型将消失,基频会有所提高,但因受到水介质的影响^[3],闸门的振动频率会下降30%~60%。估计闸门的基频将在3.0Hz左右。通常作用于闸门的水动力荷载为波浪力等低频荷载,因此诱发结构共振的可能性不大。但运行时尚需密切注意闸门运行状况,碰到问题及时处理。

表2 闸门模态频率

模态序号	频率	模态序号	频率	模态序号	频率
1	3.496	6	14.92	11	23.04
2	7.357	7	14.95	12	24.41
3	9.312	8	17.45	13	27.11
4	10.78	9	21.65	14	28.40
5	13.35	10	22.43		

8 水闸施工方案与原设计方案受力特性比较

由于苏州河河口水闸宽度大、结构形式新颖,无

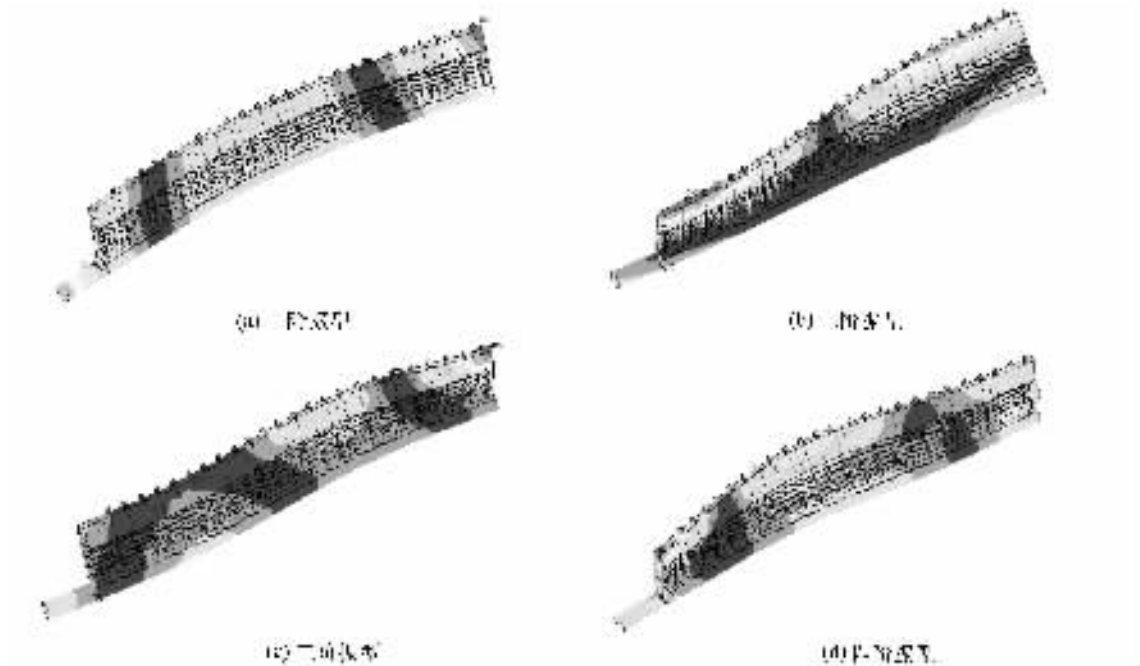


图 10 闸门自由振型(无量纲)

现成设计和运行经验可借鉴,因此在闸门结构设计方面经历了从无到有、逐步深化完善的过程。闸门的受力特性分析主要研究闸门结构在设计荷载作用下的位移变形和应力分布特征。表 3 给出了不同工况下水闸施工方案与原设计方案的受力特性比较情况。由该表可以看出:挡潮工况下施工设计方案的闸门最大位移下降 12.3%;若不考虑门叶上部加劲横梁的局部应力集中点,门叶与底轴交界处的集中应力下降 15.5%。正向挡水工况下施工设计方案的闸门最大位移下降 17.7%,门叶与底轴交界处的集中应力下降 46.4%。

表 3 水闸原设计方案与施工方案的受力特性比较

方 案	受力部位	反向挡潮工况		正向挡水工况	
		最大位移/ mm	最大应力/ MPa	最大位移/ mm	最大应力/ MPa
原设计方案	门叶	227.0		184.5	
原设计方案	底轴		189.1		227.0
施工方案	门叶	199.1	174.0	151.85	138.64
施工方案	底轴		159.7		121.68

注:反向挡潮工况施工方案时门叶最大应力位于小横梁面板处,正向挡水工况施工方案时最大应力位于横梁处。

9 结 语

苏州河河口水闸最终设计方案的闸门结构总体布置合理,除个别小横梁部位局部应力集中区外,主要部位的应力水平在材料容许范围以内。挡潮工况下施工设计方案的闸门最大位移下降 12.3%;若不考虑门叶上部加劲横梁的局部应力集中点,门叶与底轴交界处的集中应力下降 15.5%。正向挡水工况下施工设计方案的闸门最大位移下降 17.7%,门

叶与底轴交界处的集中应力下降 46.4%。

分析计算表明,闸门底轴的沉降对闸门的受力和变形产生一定影响,随着底轴沉降的加大,闸门的应力和位移随之加大。因此底轴的沉降量应当加以控制。

闸门结构的动特性分析表明,考虑水介质影响时闸门的基频约 3.0 Hz,而作用于闸门的水动力荷载一般为波浪力等低频荷载,因此诱发结构共振的可能性不大。但运行时尚需密切注意闸门运行状况,出现问题及时处理。

参考文献:

- [1] 严根华.水工闸门流激振动及动态优化设计[J].水利水运科学研究,1999(1):12-21.
- [2] 严根华.水动力荷载与闸门振动[J].水利水运工程学报,2001(2):10-15.
- [3] YAN Gen-hua, YAN Shi-wu. A numerical study of the frequencies of 3-D coupled hydroelastic resonant vibrations of radial gate [C]//Aero-hydroelasticity development and applications, Beijing: Seismological Press, 1993: 296-302.

(收稿日期:2007-01-15 编辑:高建群)

