



浮箱结构船闸人字闸门预应力背拉杆设计

邢述炳

(江苏省交通规划设计院, 江苏 南京 210005)

摘要: 大型船闸人字闸门因门体较高、启闭时雍水阻力及风阻力较大, 背拉杆大多采用预应力结构。为延长其顶底枢的使用寿命, 常在最低通航水位以下设置浮箱。结合下坝复线船闸, 先介绍预应力背拉杆及浮箱的布置形式, 再着重引入美国陆军工程师兵团SHERMER C L提出的理论进行设计计算, 最后对有浮箱结构的人字闸门背拉杆预应力施加方法进行探讨。

关键词: 人字闸门; 预应力; 背拉杆; 浮箱; 扭矩

中图分类号: U 641.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)08-0147-05

Design of prestressed back-tie rods in miter gate with floating box structure

XING Shu-bing

(Jiangsu Province Communications Planning and Design Institute Co., Ltd., Nanjing 210005, China)

Abstract: The application of prestressed back-tie rods in the large-scale miter gate can increase the torsional rigidity. Combining with the Xiaba multiline lock, the paper introduces the arrangement form and the calculating theory which is put forward by the U.S. Army Corps of Engineers SHERMER C L, and discusses the choice of the parameters and calculation process. Moreover, it investigates the application of prestress to the back-tie rods. The result shows that the calculating theory of the prestressed back-tie rods is feasible. It may serve as reference for related engineering calculations, construction and maintenance.

Key words: miter gate; prestressed; back-tie rods; floating box; torque

1 概况

单向、高水头、大孔口船闸通常采用人字闸门作为挡水建筑物。从结构上看, 人字闸门属于典型的超大型开口薄壁结构, 因门体较高, 抗扭刚度很小, 自重、水压力及风压力产生的扭矩较大, 故其背拉杆宜采用预应力结构。背拉杆作为门体必需构件, 对其施加预应力, 可有效避免人字闸门在运行过程中发生过大的翘曲或扭曲变形, 提高人字闸门的抗扭刚度, 减少人字闸门在自重作用下的下垂变形, 同时也将提高人字闸门在关闭状态下的抗弯刚度。

下坝复线船闸为芜申线Ⅲ级通航建筑物, 最大设计水头9.43 m, 工作闸门采用横梁式钢质平板

人字闸门。该人字闸门门体较重, 为延长顶底枢运转件的使用寿命, 在最低通航水位以下设置了浮箱。此外, 上下闸首闸门高宽比相当, 均采用单交叉式背拉杆形式。背拉杆预应力的施加采用花兰螺母, 结构布置见图1。

2 预应力背拉杆计算

2.1 计算理论

美国陆军工程师兵团SHERMER C L根据麦克阿瑟(MacArthur)船闸模型试验及路易斯维尔(Louisville K Y)备用船闸现场试验提出一种计算人字闸门预应力背拉杆的理论^[1]。下坝复线船闸人字闸门预应力背拉杆依据该理论进行设计, 背拉

收稿日期: 2013-01-16

作者简介: 邢述炳(1984—), 男, 工程师, 主要从事水工金属结构及机械设计。

杆的变形见图2。该理论认为：当门扇扭转变位 Δ 时，背拉杆的长度也将变化 δ （主背拉杆 AH 伸长或缩短至 $A'H'$ ，副背拉杆 ED 缩短或伸长至 ED' ）， Δ 与 δ 成线性关系。假定外荷载扭矩所作功 ΣTZ 完全且刚好由背拉杆预应力所作功 ΣQD 平衡，可得门扇扭转变位的基本方程式：

$$\Delta = \frac{\Sigma TZ + \Sigma QD}{Q_0 + \Sigma Q} \quad (1)$$

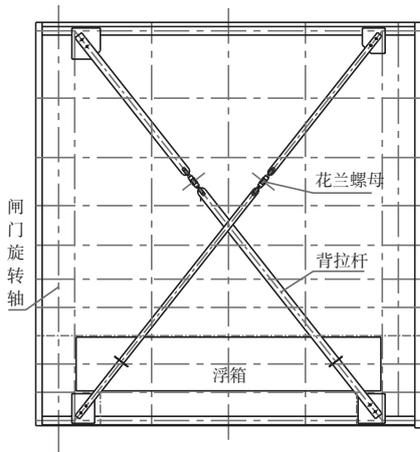


图1 人字闸门结构

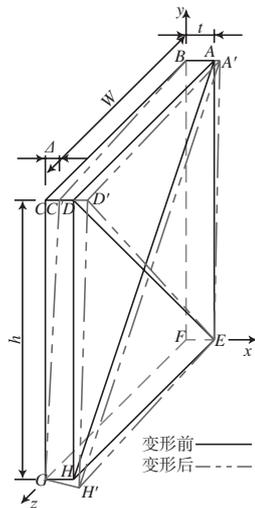


图2 背拉杆变形

式中： Q_0 为不包括背拉杆的门扇抗扭弹性常数； ΣQ 为各预应力背拉杆的抗扭弹性常数之和。若门扇在静荷载（门扇自重、浮箱浮力）下能竖直悬挂，即 $\Delta=0$ ，则背拉杆施加预应力刚好平衡门扇自重（及浮力）所产生的扭矩面积，即 $TZ_{静} + \Sigma QD=0$ 。在上述条件下，门扇旋转时的扭转变位均由动荷载（壅水阻力、风阻力）产生。将此扭转变位 Δ 代入与 δ 的线性关系式中，可计算出预应力背拉杆在开门及关门过程中的应变及应力。

2.2 参数计算

2.2.1 荷载计算

引起闸门扭曲变形的荷载按方向可以分为两类，一类是竖直荷载，另一类是水平荷载。其中，竖直荷载主要有闸门门体自重及浮箱产生的浮力；水平荷载主要有壅水压力和风压力。相对于风压力，壅水压力在水平方向上对门体的扭转变形更不利，故上闸首闸门按上游最高通航水位确定淹没水深算壅水压力，下闸首闸门按下游最高通航水位确定淹没水深算壅水压力。门扇荷载分析如图3所示，门扇主要计算参数及荷载的计算结果见表1。

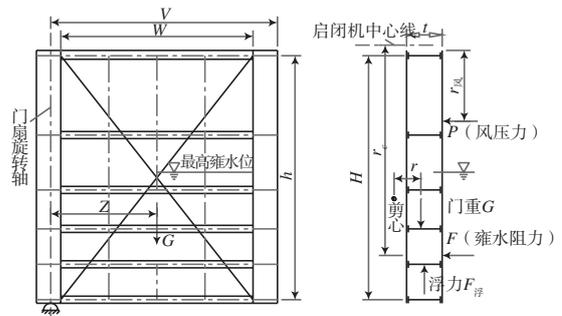


图3 门扇荷载计算简图

2.2.2 结构常数计算

闸门在外荷载作用下沿闸门剪力中心扭曲，

表1 门扇主要计算参数及荷载的计算

门扇主要计算参数/m					竖直荷载/kN		水平荷载/kN		外荷载扭矩面积/(kN·m ²)				
闸首	门扇高度 $h_{\text{门}}$	门扇宽度 $W_{\text{门}}$	门扇厚度 $t_{\text{门}}$	门扇中心距旋转中心距离Z	最高雍水位至门底距离 $h_{\text{水}}$	最高雍水位至门顶距离 $h_{\text{风}}$	门体自重G	浮箱浮力 $F_{\text{浮}}$	雍水压力 P_{AH}	风压力 P_{w}	竖直荷载产生的扭矩面积 $TZ_{\text{竖}}$	雍水压力产生的扭矩面积 $TZ_{\text{水}}$	风压力产生的扭矩面积 $TZ_{\text{风}}$
上闸首	11.28	13.584	1.50	6.38	9.63	1.65	818.8	243.0	261.6	13.1	-5 197.1	±10 632.7	84.5
下闸首	14.26	13.584	1.50	6.38	7.56	6.70	999.8	324.0	205.4	53.2	-8 442.1	±13 608.4	1 200.8

剪力中心是一个点,位于水平剪力中心轴与垂直剪力中心轴的交汇处。在水平方向,若外力不使门扇绕旋转轴旋转,各主梁上的荷载应与它们的相关刚度成正比,即合力的位置必须沿着主梁刚度的水平重心轴,此重心轴的位置即为水平剪力中心,从中和轴到重心轴的距离 Y 按式(2)计算。在垂直方向上,可将门扇视为支撑在顶枢和底枢的悬臂梁。在门扇上作用垂直荷载之后,若顶底梁腹板的水平剪力未被垂直力的扭矩 VA 平衡,门扇将扭转,故令垂直力和水平力的力矩总和为零,列平衡方程,可解得面板中心到端面剪力中心的水平距离 X ,如式(3)所示。

$$Y = \frac{\sum(I_n y)}{\sum I_n} \quad (2)$$

$$X = \frac{b}{I} \sum(a y y_n) \quad (3)$$

式中: I_n 为任一主横梁绕其垂直中和轴的惯性矩; y 为穿过门扇的垂直断面的水平形心轴至任一主横梁的距离; b 为面板中心到主横梁翼缘的距离; I 为门扇垂直端面绕水平形心轴的惯性矩; a 为位于面板和翼缘间中点之外那一部分主横梁的横截面面积; y_n 为穿过门扇垂直断面的水平弯曲中心至任一主横梁的距离。

门扇发生扭转变位时,变位的幅值取决于背拉杆的长度、门体的厚度及门扇旋转轴到斜接柱外边缘的距离。当背拉杆无抵抗力时,背拉杆长度变化对门扇变位的比率 R_0 按式(4)计算。背拉杆变形时门扇的刚度 A' 主要由顶或底主梁的截面面积和门轴柱或斜接柱的截面面积确定,按式(5)计算。

$$R_0 = \pm \frac{2Wt}{v\sqrt{(h^2 + W^2)}} \quad (4)$$

$$A' = \frac{1}{8}(2A_{\text{边主梁}} + 2A_{\text{边柱}}) \quad (5)$$

式中: t 为门扇面板中心平面到背拉杆中心平面的距离; W 为背拉杆在水平线上的投影长度; h 为背拉杆在竖直线上的投影高度; v 为门扇旋转轴至斜接柱外边缘距离; $A_{\text{边主梁}}$ 为顶或底主梁的截面面积; $A_{\text{边柱}}$ 为门轴柱或斜接柱的截面面积。

根据工程需要,背拉杆材料采用Q345B,按《船闸闸阀门设计规范》容许应力值进行计算^[2]。

主背拉杆总面积 A_{\pm} 选择按式(6)计算,副背拉杆总面积 $A_{\text{副}}$ 选择按式(7)计算。参考相关工程数据,主副背拉杆实际总面积按1.5~2.5倍理论计算结果取值。根据 R_0 , A' 及背拉杆实际取值总面积 A ,由式(8)可算得背拉杆长度的实际变化与门扇变形之比 R 。门扇的抗扭刚度主要跟门扇水平梁的修正抗扭极惯性矩 J_1 及门扇垂直梁的修正抗扭极惯性矩 J_2 有关,抗扭弹性常数 Q_0 按式(9)计算。背拉杆的抗扭弹性常数 Q 按式(10)计算。

$$A_{\pm} = \frac{TZ_{\text{竖}} + TZ_{\text{水}} + TZ_{\text{风}}}{[\sigma]R_0 h v} \quad (6)$$

$$A_{\text{副}} = \frac{TZ_{\text{水}}}{[\sigma]R_0 h v} \quad (7)$$

$$R = R_0 \frac{A'}{A + A'} \quad (8)$$

$$Q_0 = KG \sum \left(\frac{J_1}{h} + \frac{J_2}{v} \right) \quad (9)$$

$$Q = \frac{R_0 R A E h v}{L} \quad (10)$$

式中: K 为系数,经试验定为4(对以英制为单位时),换算为国际单位 $K=68$ ^[1]; G 为背拉钢材的抗剪弹性模量; J_1 为门扇水平梁的修正抗扭极惯性矩; J_2 为门扇垂直梁的修正抗扭极惯性矩; E 为背拉杆材料的弹性模量; L 为背拉杆的长度。结构主要参数计算结果见表2。

2.3 预应力值的选择

背拉杆预应力值有3种主要状态:静止状态、开门状态和关门状态。其中开、关门状态均为门扇运动状态,当闸门前后无雍水水头时,可认为是闸门静止;当雍水水头出现在闸门面板侧时,可认为是闸门开启;当雍水水头出现在闸门背拉杆侧时,可认为是闸门关闭。预应力值的选择应保证在这3种状态下门扇均保持平直。首先应保证静止状态下门体竖直悬挂,即 $\Delta=0$ 。当开门时,门扇运转时的变位按式(11)计算,关门时按式(12)计算。

$$\Delta_{\text{开}} = \frac{TZ_{\text{水}}}{Q_0 + \sum Q} \quad (11)$$

$$\Delta_{\text{关}} = \frac{TZ_{\text{水}} + TZ_{\text{风}}}{Q_0 + \sum Q} \quad (12)$$

$$D - \Delta = \frac{[\sigma]L}{RE} \quad (13)$$

表2 主要参数计算结果

闸首	拉杆	剪力中心相关参数				刚度与变形相关参数				抗扭弹性相关参数			
		形心轴到底主梁距 y/mm	水平形心至弯心距 Y/mm	面板至垂直弯心距 X/mm	变化比率 R ₀	变形时门扇刚度 A'/mm ²	背拉杆理论面积 A/mm ²	背拉杆实际面积 A'/mm ²	实际变形之比 R	水平修正抗扭极惯性矩 J _y /mm ⁴	垂直修正抗扭极惯性矩 J _x /mm ⁴	门扇的抗扭弹性常数 Q _d / (kN·m)	背拉杆的抗扭弹性常数 Q'/ (kN·m)
上闸首	主背拉杆	4 445.3	55.0	374.9	±0.172 7	21 120	2 943.5	6 000	0.134 5	2.71×10 ⁶	1.84×10 ⁶	2.10×10 ⁴	2.33×10 ⁵
	副背拉杆						1 966.6	4 000	-0.145 2				1.68×10 ⁵
下闸首	主背拉杆	5 564.4	72.7	703.5	±0.150 7	21 120	3 863.7	6 000	0.117 4	3.38×10 ⁶	1.84×10 ⁶	2.07×10 ⁴	2.27×10 ⁵
	副背拉杆						2 261.3	4 000	-0.127 0				1.63×10 ⁵

$$\sigma = \frac{RE}{L}(D - \Delta) \quad (14)$$

式中：Δ为门扇在斜接柱端的总扭转变位，即斜接柱顶部相对于底部的侧向（门厚方向）偏移，偏向上游定为正；Δ_开为开门时门扇的变位；Δ_关为关门时门扇的变位；D为背拉杆预应力的变位，即把预应力减小到零的门扇变位。

预应力变形在表3中确定，D的最小值就是门

扇运转时的最大变位Δ，由式（13）确定D的最大值，D值在上述两个范围之间选择，以满足公式TZ_竖+ΣQD=0。根据规范要求，为了保证背拉杆总处于张拉状态，D值应使由式（14）算得的背拉杆最小拉应力不小于10 MPa，且最大拉应力不大于背拉杆材料的容许应力。参考相关文献^[3-4]，进行D值确定。闸门正常运转期间背拉杆中的应力见表3。

表3 正常运转期间背拉杆中的应力

闸首	拉杆	门扇扭转变位Δ/m		D的最小值/m	(D-Δ)的最大值/m	D的最大值/m	D(选择的值)/m	QD/(kN·m ²)	应力σ/MPa		
		闸门开启	闸门关闭						闸门静止	闸门开启	闸门关闭
上闸首	主背拉杆	0.025 2	-0.025 4	0.025 2	0.120 0	0.094 9	0.059	13 769.6	93.38	53.54	133.55
	副背拉杆			-0.025 4	-0.111 2	-0.085 8	-0.051	-8 566.8	87.15	130.17	43.79
下闸首	主背拉杆	0.033 2	-0.036 1	0.033 2	+0.137 6	0.104 4	0.074	16 770.0	102.18	56.39	152.00
	副背拉杆			-0.036 1	-0.127 5	-0.0914	-0.051	-8 318.6	76.03	125.46	22.24

2.4 预应力的施加

该闸门采用旋紧花兰螺母的方法来施加背拉杆的预应力。因为施工在无水状态下，浮力无法产生，应通过顶拉等有效措施进行等效替代。在使背拉杆松弛以后，在现场测定门扇的变位。此时这个实际的初始变位Δ是未知的，使用理论值（背拉杆松弛），将Q=0代入式（1）进行计算。

首先对主背拉杆施加预应力，仅从这根背拉杆上消除松弛并将背拉杆固定，然后旋紧花兰螺母得到所需要的预应力。为增大传力扭矩，花兰螺母左右旋螺纹均采用梯形螺纹。旋紧螺母需要的圈数N按式（15）计算，旋紧所需的扭矩M按式（16）计算，由此产生的门扇变位Δ按式（1）计算。

$$N = \frac{nR_0(D - \Delta)}{2} \quad (15)$$

$$M = \frac{0.18REAd(D - \Delta)}{L} \quad (16)$$

式中：n为每米的螺纹数；d为螺纹的中径。

再对副背拉杆施加预应力，门扇的理论初始变位是在主背拉杆施加预应力后的Δ的最终门扇变位。为了给副背拉杆施加所需要的预应力，必须将螺母旋紧相应的圈数，圈数按式（15）计算，旋紧所需最大扭矩按式（16）计算，最终门扇垂直悬挂，Δ=0。预应力施加技术参数见表4。

3 结语

1) 人字闸门背拉杆计算方法虽然很多，但相关规范中并没有明确交代如何计算。本文结合下坝复线船闸，采用SHERMER C L提出的理论对人字闸门预应力背拉杆进行设计计算，给相关工程的计算、施工及维护提供了参考。

表4 预应力施加技术参数

闸首	拉杆	理论初始变形 Δ/m	旋紧圈数 $n/\text{圈}$	最大旋紧扭矩 $M/(\text{kN}\cdot\text{m})$
上闸首	主背拉杆	-0.248	2.2	4.1
	副背拉杆	0.034	0.6	6.0
下闸首	主背拉杆	-0.408	3.0	5.7
	副背拉杆	0.034	0.5	5.2

2) 人字闸门下游面必须设置背拉杆。从表2中可以看出, 门扇的抗扭弹性常数远小于背拉杆的抗扭弹性常数, Q_0 仅占总抗扭刚度的5%左右, 可忽略不计, 此进一步证实了背拉杆对门体抗扭的重要性。

3) 由表3及推导过程可以看出, 主、副背拉杆中的应力幅值主要由 D 的选取值、雍水阻力矩及背拉杆截面面积决定。因为能使闸门垂直悬挂的 D 值不唯一, 而雍水阻力矩主要取决于雍水水头; 所以合理地确定 D 值、雍水水头及背拉杆的截面面积将影响背拉杆中的循环变应力, 进而影响其使用寿命。

4) 在无水条件下调试预应力, 因浮力无法产生, 需借顶拉等措施进行等效替代。如何优化顶拉施工工艺, 仍需要进一步研究。如不采取等效浮力措施, 门扇按技术参数表施加预应力, 无水状态下门扇将不再垂直悬挂。

5) 考虑到计算中的门体截面尺寸与实际门体稍有出入, 荷载计算中也没有考虑淤泥荷载、工作桥面荷载及顶底枢摩阻力等, 设计的背拉杆的预应力值仅作为施工指导的参考。

参考文献:

- [1] Department of the Army U.S. Army Corps of Engineers. Engineering and Design of Lock Gates and Operating Equipment EM 1110-2-2703[R]. Washington DC : Department of the Army U.S. Army Corps of Engineers, 1984.
- [2] JTJ 308—2003 船闸闸阀门设计规范[S].
- [3] 陈家伟. 船闸人字闸门背拉杆预应力实验和研究[J]. 武汉水利电力学院学报, 1986(4): 104-114.
- [4] 何文娟, 杨国平, 宋一乐, 等. 大源渡人字门背拉杆预应力计算与调试[J]. 中国港湾建设, 1999(5): 50-53.

(本文编辑 武亚庆)

· 消 息 ·

绥中港通用码头基槽疏浚完工

日前, 辽宁葫芦岛绥中港区通用码头基槽疏浚完工并通过验收。

该码头计划建成2个5万吨级通用泊位, 天航局承担了码头基槽疏浚任务, 疏浚总量约25万 m^3 。项目部与“天达”船克服频繁避风和土质坚硬等困难, 提前30天优质完工, 受到业主好评。

摘编自《中国交通报》