



人字闸门背拉杆的结构特性分析

邢述炳¹, 丁峰²

(1. 江苏省交通规划设计院股份有限公司, 江苏南京 210014; 2. 北京市水利规划设计研究院, 北京 100048)

摘要: 背拉杆是人字闸门必不可少的构件。对比了人字闸门非预应力背拉杆及预应力背拉杆的计算方法, 给出了非预应力背拉杆的改进措施; 通过有限元软件分析不同背拉杆结构形式的人字闸门抗扭刚度, 指出了门体变形控制参数之间的相互关系, 印证了预应力背拉杆对提高人字闸门抗扭刚度、降低门头下垂量等的巨大作用。

关键词: 人字闸门; 背拉杆; 预应力; 扭转; 张弦理论

中图分类号: U 641.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)11-0157-05

Analysis of the structure characteristics of miter gate back tie rods

XING Shu-bing¹, DING Feng²

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

2. Beijing Institute of Water, Beijing 100048, China)

Abstract: Back tie rods are essential components of miter gate. In this paper, computing methods of non-prestressed back tie rods are compared to that of prestressed back tie rods in miter gate, and improvement measures of the non-prestressed back tie rods are given. By the finite element software, torsional stiffness of different structure types of miter gates is analyzed. The relationships of the control parameters of the gate deformation are pointed out, and the huge role prestressed back tie rods play in promoting the torsional stiffness and reducing the gate head drooping is confirmed.

Keywords: miter gate; back tie rods; prestress; torsion; string theory

背拉杆是人字闸门必不可少的构件, 对提高门体抗扭刚度、改善门体形态具有重要作用。从结构布置上看, 背拉杆可以分为单根背拉杆、单交叉背拉杆、水平多交叉背拉杆、竖直多交叉背拉杆、米形多交叉背拉杆等结构形式, 见图 1。从受力形式上看, 背拉杆可以分为非预应力背拉杆和预应力背拉杆两种结构形式。非预应力背拉杆在闸门工作之前, 自身无初始应力; 预应力背拉杆在闸门制造安装过程中, 预先施加应力, 使门体绷紧。

背拉杆的布置形式跟人字闸门宽高比有关, 单交叉、水平多交叉或竖向多交叉应用较多。主、副背拉杆的数量跟门扇尺寸的大小有关, 一般门扇越大作用在其上的荷载也越大, 相应背拉杆数

量也越多。平原地区低水头的中小型人字闸门上常用非预应力背拉杆, 而山区中高水头的大中型人字闸门大多采用预应力背拉杆。为充分说明预应力背拉杆与非预应力背拉杆的区别, 现仅以单交叉背拉杆为例进行对比分析。

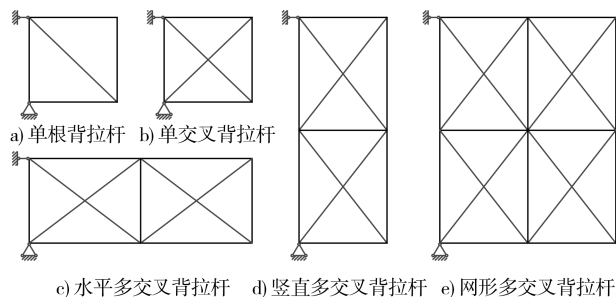


图 1 背拉杆布置形式

收稿日期: 2016-04-01

作者简介: 邢述炳 (1984—), 男, 硕士, 工程师, 从事钢结构及机械设计。

1 人字闸门背拉杆计算方法

1.1 非预应力背拉杆计算方法

人字闸门非预应力背拉杆计算方法有多种，目前规范尚未明确，常使用的是苏联背拉杆算法的改进版本。该算法认为：非预应力背拉杆的内力主要为垂直荷载产生的内力和水平荷载产生的内力的叠加^[1-2]。非预应力背拉杆计算见图2，该算法采取以下假定：

1) 超静定的交叉式背拉杆结构，在垂直荷载作用下只有受拉的主背拉杆起作用，进而简化为静定结构。

2) 副背拉杆 BD 的上端支承在刚性顶梁上，下端的支点为底枢。副背拉杆 BD 按简支梁进行计算。

3) 主背拉杆 AC 的上支点为 A 点，下支点为副背拉杆中点 M ，主背拉杆 AC 按一端悬臂的简支梁进行计算，悬臂端承受由斜接柱 DC 与底横梁 BC 传来的荷载。

4) 作用在门扇上的全部荷载平均分配给两组背拉杆，即各承受总荷载的一半。

5) 背拉杆角钢与闸门面板组成虚工字梁，共同承担主、副背拉杆中的叠加弯矩。

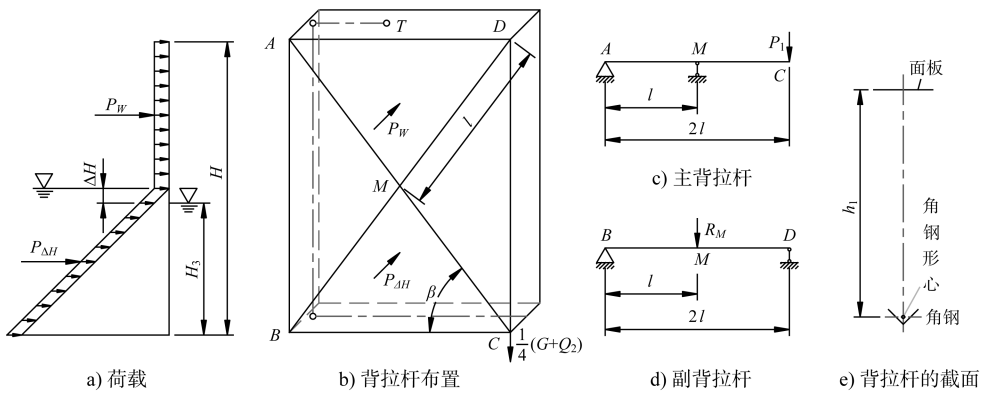


图2 非预应力背拉杆计算简图

垂直荷载主要由门重 G 和工作桥上的荷载 Q_2 组成，水平荷载主要由壅水荷载 $P_{\Delta H}$ 和风荷载 P_w 组成。闸门在运转状态下，由顶、底枢支承，作用在门背上的 $1/2$ 垂直荷载 $G+Q_2$ 中的一半经由门轴柱传给底枢，另一半则分别由面板和背拉杆承受后，再传递给顶、底枢。背拉杆的总内力为垂直内力和水平内力之和。

1.2 预应力背拉杆计算方法

人字闸门预应力背拉杆计算方法有多种，目前规范尚未明确，通常采用的是美国陆军工程师兵团 SHERMER C. L. 提出的理论^[3]。该理论认为：当人字闸门扭转变位 Δ 时，其背拉杆的长度也将变化 δ (主背拉杆 AC 伸长或缩短至 $A'C'$ ，副背拉杆 BD 缩短或伸长至 BD' ，见图3)， Δ 与 δ 成线性

关系。假定外荷载(门体自重 G 、壅水荷载 $P_{\Delta H}$ 和风荷载 P_w 等)扭矩所作功 ΣTZ 完全且刚好被背拉杆预应力所作功 ΣQD 平衡，可得门体扭转变位的基本方程式：

$$\Delta = (\Sigma TZ + \Sigma QD) / (Q_0 + \Sigma Q) \quad (1)$$

式中： Q_0 为不包括背拉杆的门体抗扭弹性常数； ΣQ 为每根预应力背拉杆的抗扭弹性常数之和。

若门体在静荷载(自重 G)下能竖直悬挂，即 $\Delta=0$ ，则背拉杆的预应力刚好平衡门体自重所产生的扭矩面积，即 $\Sigma TZ + \Sigma QD = 0$ 。基于此，门体旋转时的扭转变位均由动荷载(壅水荷载 $P_{\Delta H}$ 、风荷载 P_w)产生。根据扭转变位 Δ 与 δ 的线性关系式，可计算出人字闸门背拉杆在开门及关门过程中的预应力^[4]。

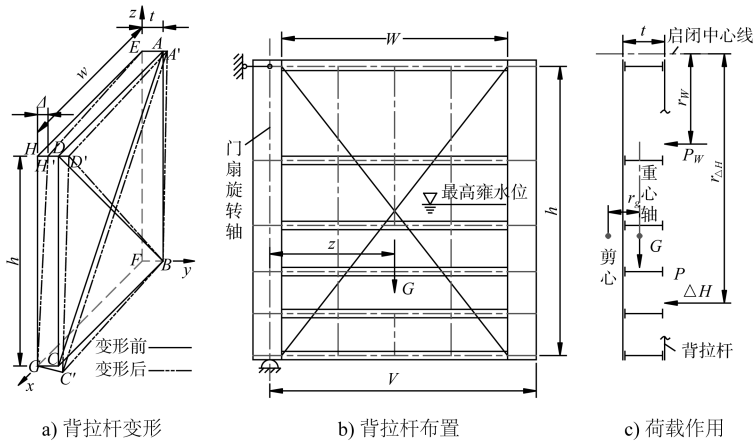


图 3 预应力背拉杆计算简图

1.3 背拉杆计算方法比较

比较人字闸门非预应力背拉杆与预应力背拉杆的计算方法, 可以发现: 两种算法的门体水平外荷载及竖直外荷载基本一致, 两者最大的差别是预应力背拉杆中的应力为主动施加的预应力, 门体随之变形, 而非预应力背拉杆中的应力是门体变形后产生的被动应力。根据算法假设, 竖直荷载作用下非预应力背拉杆压力被忽略, 仅拉力起作用; 此外, 背拉杆角钢和门体主梁后翼缘焊接, 与门体面板形成虚工字梁, 此时背拉杆紧贴闸门门体, 很难提高门体抗扭刚度, 张弦效果不佳^[5], 见图 4。针对此种差别, 非预应力背拉杆的改善措施是: 1) 增加截面面积并形成可靠承压抗弯截面, 如采用槽钢外加扣板结构形式; 2) 减少与门体中间连接点数, 扩大张弦跨度。需要补充说明的是第 2) 条不可独立运用, 若不增大截面单独运用, 非预应力背拉杆受压时计算长度变长, 相对刚度反而降低。

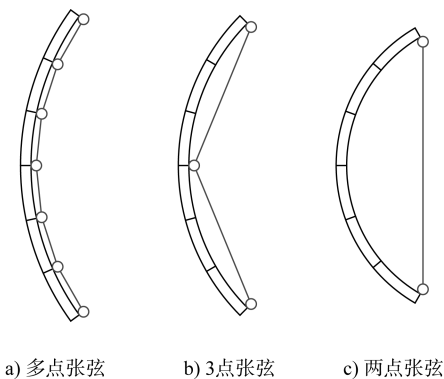


图 4 背拉杆张弦示意图

2 人字闸门的抗扭刚度

2.1 静止工况下的抗扭刚度

人字闸门门体重心不通过门体剪心, 在静止工况下自重将使门体发生扭转变形, 门体扭转变形的幅度取决于门体的抗扭刚度。以某 III 级船闸为例, 人字闸门尺寸为 $14.26 \text{ m} \times 13.584 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ (高×宽×厚), 通过 Ansys 建立人字闸门有限元模型, 总体坐标系原点为底梁门轴柱侧支承点, x 轴沿压力轴线指向斜接柱, y 轴为垂直于面板朝上游侧方向, z 轴沿门轴柱竖直向上, 见图 5。在外力作用下门体发生扭转, 以闸门斜接柱上部、中部、下部及门轴柱中部作为门体位移测量控制点, 将门体扭转变形时斜接柱上部 x 、 y 、 z 向位移分别以 u_{xs} 、 v_{xs} 、 w_{xs} 表示, 斜接柱中部 y 向位移以 v_{xz} 表示, 斜接柱下部 x 、 y 、 z 向位移分别以 u_{xx} 、 v_{xx} 、 w_{xx} 表示, 门轴柱中部 y 向位移用 v_{mz} 表示^[6]。

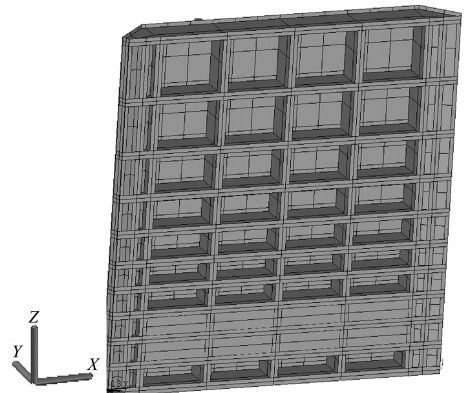


图 5 人字闸门有限元模型及坐标系

经有限元分析计算,无背拉杆门体、非预应力背拉杆门体和预应力背拉杆门体在静止工况下

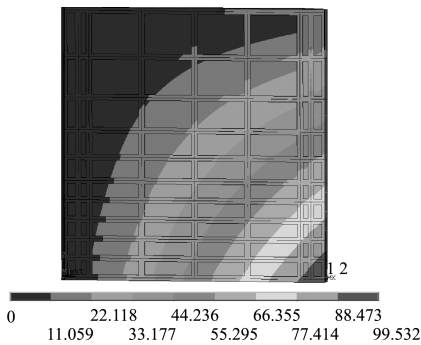
的位移云图见图6,门体各测量控制点的位移见表1。

表1 静止工况下不同背拉杆设置方式的门体测控点位移

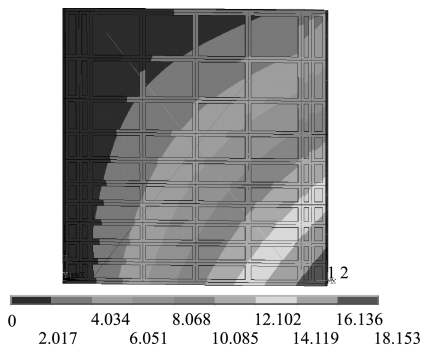
mm

背拉杆设置情况	斜接柱上部			斜接柱中部	斜接柱下部			门轴柱中部
	u_{xs}	v_{xs}	w_{xs}	v_{xz}	u_{xx}	v_{xx}	w_{xx}	v_{mz}
无	4.36	2.04	-15.77	50.25	1.56	96.93	-15.73	-1.91
非预应力	0.41	1.72	-3.49	9.83	0.06	17.61	-3.48	-0.10
预应力	-1.50	-6.63	-1.17	-3.98	-1.66	-6.79	-0.72	-2.96

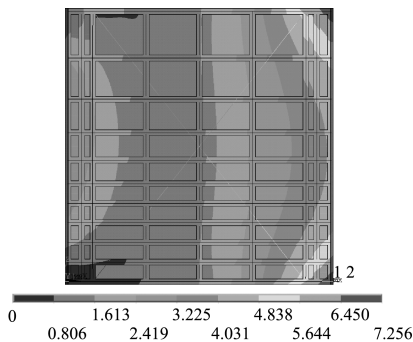
注:表中主、副背拉杆预应力均为20 MPa。



a) 无背拉杆门体



b) 非预应力背拉杆门体



c) 预应力背拉杆门体

图6 各门体静止工况位移云图(单位: mm)

从图6及表1可知:

1) 在静止工况下,非预应力背拉杆门体变形与无背拉杆门体基本一致,位移稍小;无背拉杆的门体的多个测控点 u 、 v 、 w 位移均较大,非预应力背拉杆门体位移次之,预应力背拉杆门体位移较小;说明背拉杆尤其是预应力背拉杆对改善静止时的门体形态具有重要作用。

2) 无背拉杆门体和非预应力背拉杆门体,在静止工况下斜接柱下部位移 v_{xx} 正向较大,而上部位移 v_{xs} 较小,说明门体重心不通过剪力中心,在自重作用下斜接柱底部朝 y 向发生了扭转变形。

3) 无背拉杆门体和非预应力门体的斜接柱上、中、下3处 y 向位移均较大, v_{xs} 、 v_{xz} 、 v_{xx} 基本成等差数列;而预应力背拉杆门体的斜接柱上、下端位移 v_{xs} 、 v_{xx} 较小且同趋于0, v_{xs} 、 v_{xx} 与 v_{xz} 的等差数列不明显,因为在背拉杆预应力作用下,门体发生 y 向微量外鼓变形。

4) 相对于位移 v 、 w ,位移 u 均较小,说明在自重作用下门体 x 方向变形较小;斜接柱上、下端位移 w 变化不大,门体整体变形超过内部变形,斜接柱近似刚体。

2.2 开门工况下的抗扭刚度

开门工况下,作用于门体的荷载除了门体自重,还有门前的壅水压力和风压力。壅水压力和风压力按最高通航水位进行取值,垂直门扇平面作用于面板侧。无背拉杆门体、非预应力背拉杆门体和预应力背拉杆门体在开门工况下各测控点的位移见表2。

表 2 开门工况下不同背拉杆设置方式的门体测控点位移

mm

背拉杆 设置情况	斜接柱上			斜接柱中		斜接柱下			门轴柱中
	u_{xs}	v_{xs}	w_{xs}	v_{xz}	u_{xx}	v_{xx}	w_{xx}	v_{mz}	
无	-0.75	-7.62	10.99	-45.94	-1.55	-82.91	10.89	2.20	
非预应力	-0.68	-7.15	1.48	-14.55	-0.36	-21.42	1.39	0.75	
预应力	-1.30	-4.45	1.31	-9.62	-1.08	-13.06	1.44	1.09	

注: 表中主、副背拉杆预应力均为 20 MPa。

从表 2 可知:

1) 在开门工况下, 3 种背拉杆设置形式的门体测控点位移排序与静止工况下基本一致, 预应力背拉杆位移仍然最小, 最大的区别是无背拉杆和非预应力背拉杆位移方向均与静止工况相反, 说明开门时门体朝下游面扭转变形, 背拉杆尤其是预应力背拉杆对改善开门时的门体形态具有重要作用。

2) 在开门工况下, 斜接柱位移大幅增加, $|v| \gg |w| \gg |u|$, 说明开门状态对门体 y 方向变形影响较大, 对门体 z 方向变形影响次之, 对门体 x 方向变形影响较小。

3) 在开门工况下, 3 种门体的斜接柱上、中、下 y 向位移 v_{xs} 、 v_{xz} 、 v_{xx} 均呈近似等差数列, 且 z 向位移基本一致, 说明斜接柱在开门状态下

仍接近刚体; 此外, $v_{xs} - v_{xz} > v_{xz} - v_{xx}$, 说明 3 种门体的斜接柱上部相对刚度均低于下部, 一定程度上印证了闸门主梁等荷载原则布置时上疏下密的特征。

4) 在开门工况下, 3 种门体的斜接柱上部位移 v_{xs} 较接近, 而斜接柱下部位移 v_{xx} 差异较大, 说明相同荷载作用下不同背拉杆设置主要体现在门体斜接柱底部的 y 向位移变化。

2.3 关门工况下的抗扭刚度

关门工况下, 作用于门体的荷载除了门体自重, 还有门后的壅水压力和风压力。壅水压力和风压力按最高通航水位进行取值, 垂直门扇平面作用于门背侧。无背拉杆门体、非预应力背拉杆门体和预应力背拉杆门体在关门工况下各测控点的位移见表 3。

表 3 关门工况下不同背拉杆设置方式的门体测控点位移

mm

背拉杆 设置情况	斜接柱上			斜接柱中		斜接柱下			门轴柱中
	u_{xs}	v_{xs}	w_{xs}	v_{xz}	u_{xx}	v_{xx}	w_{xx}	v_{mz}	
无	1.58	11.31	-42.07	144.61	4.62	273.54	-41.90	-5.93	
非预应力	1.45	10.22	-8.37	33.59	0.47	55.78	-8.27	-0.93	
预应力	-0.36	1.56	-4.97	16.25	-1.02	25.90	-4.50	1.70	

注: 表中主、副背拉杆预应力均为 20 MPa。

从表 3 中可知:

1) 在关门工况下, 3 种背拉杆设置形式的门体测控点位移排序与静止工况下基本一致, 且扩大明显, 预应力背拉杆门体位移仍然最小, 说明关门时门体朝上游面扭转变形, 背拉杆尤其是预应力背拉杆对改善关门时的门体形态具有重要作用。

2) 在关门工况下, 斜接柱位移大幅增加, $|v| \gg |w| \gg |u|$, 说明关门状态对门体 y 方向变形影响较大, 对门体 z 方向变形影响次之, 对门体 x 方向变形影响较小。

3) 在关门工况下, 3 种门体的斜接柱上、

中、下 y 向位移 v_{xs} 、 v_{xz} 、 v_{xx} 均呈近似等差数列, 且 z 向位移基本一致, 说明斜接柱在关门状态下仍接近刚体; 此外, $v_{xs} - v_{xz} > v_{xz} - v_{xx}$, 同样印证了人字闸门上疏下密、斜接柱上部相对刚度均低于下部的特征。

4) 在关门工况下, 无背拉杆、非预应力背拉杆和预应力背拉杆 3 种门体的斜接柱底部 z 向位移 w_{xx} 逐步减小, 说明背拉杆尤其是预应力背拉杆对降低人字闸门门头下垂量具有重要作用。