



大型浮箱式坞门工作状态下的横稳性分析

蒋梦嫣

(中船第九设计研究院工程有限公司, 上海 200063)

摘要: 用于现代修造船坞的钢质浮箱式坞门从早期的小型趋向大型、超大型。为了更好地进行浮箱式坞门的设计工作, 根据浮箱式坞门的工作原理、结构形式和沉浮过程, 结合实例分析, 针对大型浮箱式坞门工作状态下的横稳心高度变化趋势进行总结, 给出了横稳心高度变化的一般规律, 发现坞门沉浮过程中横稳心高度的突变点及最危险的时刻, 最后提出设计优化措施。

关键词: 钢质浮箱式坞门; 工作状态; 横稳性分析; 设计优化

中图分类号: U 656.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)08-0121-05

Analysis of transverse stability of large floating caisson under working condition

JIANG Meng-yan

(China Shipbuilding NDRI Engineering Co., Ltd., Shanghai 200063, China)

Abstract: The steel floating caisson used in modern ship building and repairing tends to be large and ultra-large. In the design of the floating caisson, this paper describes the general variation law of the transverse meta-centric height according to the working principle, structural type and up-down process and in combination with the real case analysis, finds out the abrupt variation point and the most dangerous moment of the transverse metacentric height in the up-down process of the dock wall, and proposes the optimization measures of design.

Key words: steel floating caisson dock gate; working condition; analysis of transverse stability; design optimization

钢质浮箱式坞门是现代修造船坞的重要组成部分。关闭时它可以挡住坞外的水, 并利用船坞配套的排水系统, 将坞室内的水排净, 营造出修造船作业所需的基本干燥的环境。开启后坞室内的水与坞外的水域连成一片, 船舶就能方便地进出。根据船坞所在地的水文、水质、水象、泥沙淤积情况以及使用要求、制造和维修等条件差异, 出现了多种类型的坞门。而浮箱式坞门由于其环境适应性强、制造相对简单、使用时不占坞长等优点, 成为干船坞上采用最多的坞门形式。

1 浮箱式坞门的工作原理、结构形式和沉浮过程

1.1 工作原理

收稿日期: 2013-03-18

作者简介: 蒋梦嫣(1982—), 女, 双学士, 工程师, 从事船舶行业专用特种设备研究与设计。

浮箱式坞门的工作过程是: 开门时, 利用坞门内的排水系统将压载水舱内的水排出, 坞门便逐渐浮起, 像船舶一样漂浮在水面上, 拖移停靠在码头等泊位处。关门时, 先把坞门拖移至坞口适当位置, 然后向坞门压载水舱内注水, 使得门体垂直下沉直到水底。浮箱式坞门关门时注水一般靠重力, 开门时排水用电动水泵居多。

1.2 结构形式

浮箱式坞门的门体横截面是矩形, 它的外形简单, 组成门体外形的6个面都是矩形, 外板是平面的, 大多数构件是直线形, 容易制作。其上甲板宽度与门体宽度一致, 有利于承受水压力。其底部宽阔, 便于采用低密度压载且压载堆积高度

小，对降低坞门的重心有利。

随着我国造船业的蓬勃发展，国内造修船坞的体量趋向大型和超大型化，坞口宽度也随之增大，大型和超大型的浮箱式坞门已不是个案，所以坞门的分舱设计也发生了较大改变。设计人员需综合考虑浮箱式坞门的漂浮稳性、沉浮时的安全性和平稳性、构件和材料的合理分布、设备配置和安装、维护、操作空间及经济性等，来决定合理的分舱设计。

早期的小型浮箱式坞门在设计中多采用无潮汐舱的分舱设计（图1），用甲板从高度方向把坞门分成2层或3层，固定压载在最底层，泵阀舱和

操作室设在底层或中层，上层都是压载水舱兼潮汐舱，中层和底层的一部分也是压载水舱。这样的分舱设计，在坞门沉浮时浮力始终处于坞门的最上层，可以很容易地满足坞门沉浮稳性要求是它最大的优点。缺点是起浮时需排出大量的压载水，电能消耗量很大，起浮时间很长。如要满足起浮时间要求，就须增大水泵的能力或增加水泵的数量。对于大型和超大型浮箱式坞门，用无潮汐舱的分舱设计来满足坞门对稳性的要求，是不可取的，因为它将造成坞门排水系统的设备数量多、装机容量大、管路复杂，不仅增加了投资还增加了日后的运营费和维护费，很不经济。

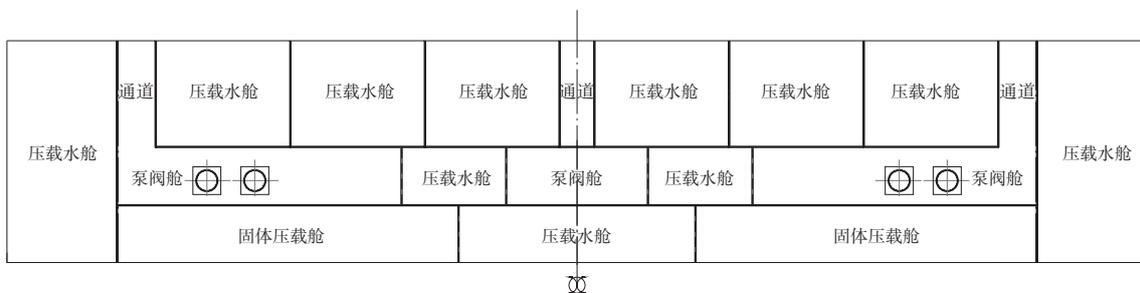


图1 无潮汐舱的浮箱式坞门

现代坞门长度基本都超过30 m（图2），采用的分舱设计是用甲板将坞门高度分成3层，固定压载都在下甲板以下，中甲板以上是潮汐舱，泵阀舱和操作室设在中下甲板之间，门体两端为压载

水舱。这样的分舱设计克服了无潮汐舱坞门起浮时需消耗大量电能以排出大量的压载水的缺点，但需注意避免因潮汐舱出水不畅而影响坞门起浮的平稳性。

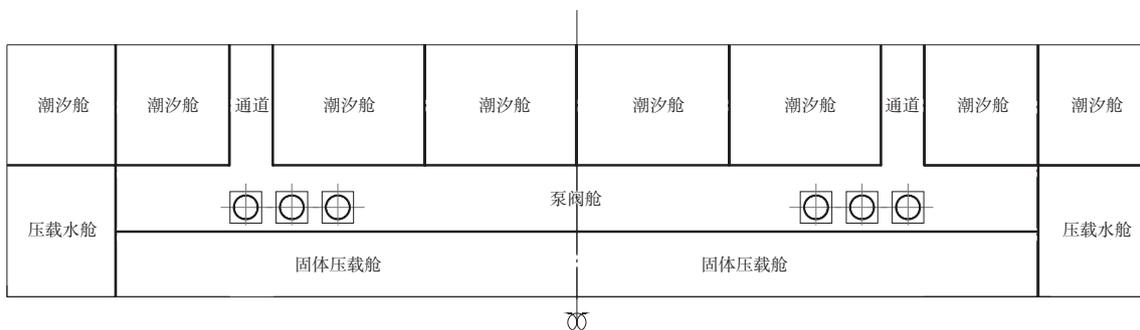


图2 现代浮箱式坞门

本文所作的浮箱式坞门稳性分析实例采用现代大型坞门。

1.3 沉浮过程

浮箱式坞门下沉时，先打开压载水舱注水阀使压载水舱进水，坞门开始下沉，坞门坐稳后关闭坞门内侧压载水舱阀，打开外侧两端的压载水

舱阀，将坞门上部两端的压载水舱变为潮汐舱。

浮箱式坞门只能在内外水域面高度一致时起浮。起浮时，先关闭压载水舱与外界的连通阀，打开排水泵进水管处的阀，启动水泵排水，坞门上浮，同时潮汐舱内的水通过潮汐舱与外界连通的管道排出。

2 浮箱式坞门的稳性分析

浮箱式坞门的稳性分析既与船舶的稳性分析有相似的地方，又有很大的区别。在坞门漂浮状态和沉浮过程中的某些阶段，稳心高度的变化和规范要求与船舶有相似处。但最大的区别在于，船舶永远是漂浮在水面上（除特殊的水下船舶），而坞门需要从漂浮状态持续下沉至底，或从沉底状态上升到漂浮状态，整个过程都要求控制好坞门的稳心高度，维持坞门的平稳性，以免发生意外。

现代坞门由于长度较长，纵稳性较好，所以主要分析横稳性。

2.1 初横稳性高度的选取

在《船舶静力学》^[1]中给出了计算初横稳心公式：

$$M_h = Dh\theta \quad (1)$$

式中： M_h 为回复力矩； D 为重力（轻载排水量）； h 为横稳心高度； θ 为横倾角。

由初横稳心公式可知，在一定的排水量，船的横稳心高度越大，船的回复力矩越大，也就是船抵抗倾斜力矩的能力越强，因此横稳心高度是衡量船的初稳性的主要指标。但是具有过大的横稳心高度的船，在海上遇到风浪时会产生剧烈的摇摆，因此横稳心高度值的选取要恰当。

根据CB/T 8524-2011《干船坞设计规范》^[2]对于坞口钢质坞门设计的稳性要求摘录如下：7.2.3.2 对长度不大于30 m，未设潮汐舱或设小潮汐舱的浮式坞门，在轻载吃水时的初稳心高度应不小于0.6 m；当长度大于30 m时，应不小于1 m。

由于浮箱式坞门在轻载吃水时，水舱内几乎没有水，所以计算初稳心高度时不用考虑自由液面的影响。

初稳心高度只是浮箱式坞门稳性计算中需要满足的重要指标之一。坞门需要经历从漂浮状态到沉没状态，这个过程的稳性计算在坞门设计中也是很重要的，它关系到坞门沉浮过程中的安全问题。

2.2 下沉时的横稳性分析

根据前述，坞门下沉是通过打开压载水舱进

水阀，靠重力往压载水舱内注水来实现坞门的下沉。根据阿基米德定律，注入压载水舱内的水的重力等于坞门下沉所增加的排水量。由于在坞门长度方向上，压载水舱所占比例较小，所以压载水舱内水位升高的高度要大于坞门下沉的高度，即压载水舱内水位升高速度要快于坞门的下沉速度。

压载水舱注水后，就会产生自由液面，降低坞门的稳心高度。参考《船舶静力学》^[1]中考虑自由液面影响计算船的实际初横稳性高度的公式：

$$h_1 = h + \delta h = h - \frac{\rho_1 i_x}{\rho V} \quad (2)$$

式中： h_1 为实际初横稳心高度； h 为干舱时的初横稳心高度； ρ_1 为产生自由液面的液体密度； ρ 为外界水域的密度； i_x 为自由液面的面积对其倾斜轴的惯性矩； V 为船的排水体积。

由此可以看出，对普通船舶来说，由于自由液面的影响而导致船的初稳心高度的降低与液体体积的大小无关，而仅与自由表面的大小和船的排水体积有关。但是对浮箱式坞门来说，由于其是通过水舱排水或进水来实现上浮或下沉，水舱内这部分变化的水量与坞门的排水体积有关，而水舱内水量的变化可能会造成自由表面的突变，所以在分析浮箱式坞门工作状态下的横稳心高度时，除了考虑自由液面的表面积，也要考虑坞门排水体积转化成水舱内水量的体积的大小。

因此，在计算坞门下沉阶段某个时刻的稳心高度时，可以先算出坞门排水体积的变化量转换成水舱内水面的高度，即可知某个时刻的自由液面的面积，和各个自由液面的面积对其倾斜轴的惯性矩和液体密度及重力加速度的乘积 $\rho g i_{xi}$ ，再求这些乘积之和并除以那个时刻坞门的排水量，即得某个时刻所有自由液面对浮箱式坞门稳心高度的修正值，由此可以得到某个时刻坞门的稳心高度值。

$$\text{其中：稳性半径 } MB = \frac{I_x}{V_{排水}} - \sum \frac{i_x}{V_{排水}} \quad (3)$$

$$\text{水线面惯性矩 } I_x = \frac{1}{12} lb^3 \quad (4)$$

$$\text{自由液面修正值 } i_x = \frac{1}{12} l b_1^3 \quad (5)$$

式中： L 为水线面长度； b 为水线面宽度； l_1 为自由

液面长度； b_1 为自由液面宽度。

以天津某厂的大型浮箱式坞门为例（图

3），来分析坞门在下沉过程中横稳性的变化情况。

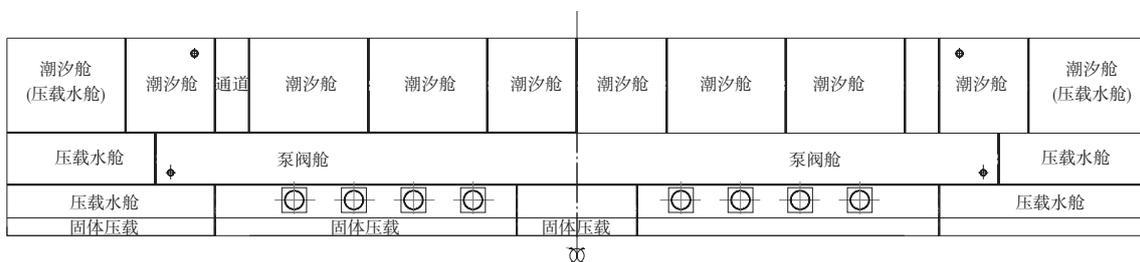


图3 天津某厂大型浮箱式坞门

如图3所示，在坞门下沉过程中，压载水舱内的水在不断升高，此过程主要有4个突变点。

1) 坞门从轻载漂浮状态到开始注水。此时，压载水舱内产生自由液面，对坞门稳心高度产生修正值，坞门稳心高度会突然下降。

2) 开始注水后，坞门吃水线从轻载吃水线达到中甲板处时，即干舷消失，转化成坞门浮心 B 上升。此时压载水舱内的水面还未到达下甲板处，此部分压载水重心低于坞门轻载时的重心，转化成坞门的重心 G 下降。当坞门吃水线未超过中甲板之前， MB 不变， MG 增加。由于中甲板以上有大量的潮汐舱，坞门吃水线超过中甲板后，潮汐舱进水了，假设潮汐舱内水线高度与外界水域高度始终保持一致，此时自由液面的面积虽然没有变化，但是坞门水线面惯性矩大大减小，导致坞门稳心高度突然下降。

3) 坞门吃水继续增加，压载水舱内的水面高度没过下甲板时，压载水舱内的水面面积会突然减小，此时自由液面对坞门稳心高度的修正值也会产生突变，稳心高度会突然上升。

4) 坞门继续下沉，压载水舱内水面继续上升至没过中甲板。压载水舱内的水面面积突然变小，自由液面对坞门稳心高度的修正值产生突变，稳心高度突然上升。

绘制坞门下沉阶段稳心高度随坞门吃水高度变化的曲线（图4），由此可见，当坞门吃水线刚刚没过中甲板时，是坞门下沉过程中最易发生倾覆等危险的时刻。虽然大型浮箱式坞门的分舱设计会根据各个船厂的实际情况有一定区别，即上述分析1)，3)，4)状态的横稳心高度突变点的情

况不尽相同，但是，现代大型坞门的特点决定了2)状态为下沉过程中最危险时刻的结论不会改变。

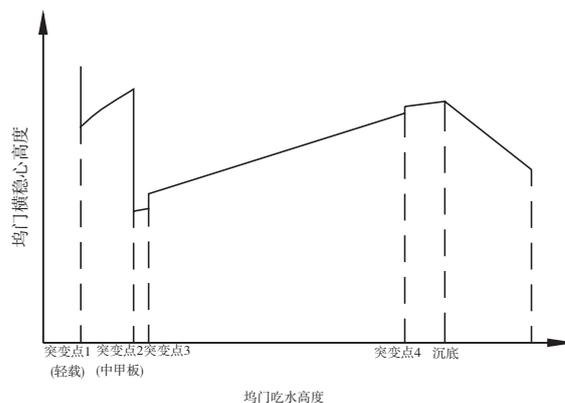


图4 坞门横稳心高度随坞门吃水变化曲线

根据CB/T 8524-2011《干船坞设计规范》^[1]，对于坞口钢质坞门设计的稳性要求是：所有浮式坞门在整个沉浮过程中，经自由液面修正后的稳心高度都应不小于0.3 m。

2.3 起浮时的横稳性分析

根据前述，坞门起浮通过排水泵抽空压载水舱内的压载水来实现。根据阿基米德定律，排出部分的水的重力等于坞门上浮所减少的排水量。由于坞门在长度方向上，压载水舱所占比例较小，所以压载水舱内水位降低的高度要大于坞门起浮的高度，即压载水舱内水位降低速度要快于坞门的起浮速度。

分析坞门在起浮过程中横稳性的变化情况与前述分析下沉时的横稳性方法类似。

3 根据稳性分析考虑设计优化

1) 减少潮汐舱有利于提高坞门的浮心，对

提高坞门沉浮稳性有明显作用。但是潮汐舱的减少意味着压载水舱的增加，水泵的装机容量要增加，投资和日后的维护费用也随之增加。因此，要根据情况分析，不能一味依靠减少潮汐舱来提高坞门稳性。

2) 利用分开安装独立控制两边两个压载水舱抽水泵，控制纵倾。

3) 适当提高下甲板位置，将坞室注水管阀置于下甲板以下，降低了坞门上最大质量的设备重心，有利于降低整个坞门的重心，提高坞门稳心。

4) 压载水舱底部现浇重骨料混凝土固定压载可以根据需要做成斜面和积水井，便于尽可能排尽压载水，减少压载水自由液面对坞门轻载稳性的削弱。

5) 采取措施减少潮汐舱内淤积，防止坞门重心升高威胁坞门沉浮时的安全；潮汐舱进出水管用大直径管，使得潮汐舱的水进出自由通畅，在坞门沉浮时，潮汐舱不会形成实际意义上的装载水舱，即不考虑自由液面影响，消除了在坞门

起浮过程中对稳性的一个很大不利因素。

4 结语

现代大型浮箱式坞门的结构形式与早期的小型坞门不同，造成横稳心高度变化趋势不同，需根据大型浮箱式坞门的结构形式、工作原理和沉浮过程来分析横稳心高度随坞门吃水高度的变化趋势。

设计大型浮箱式坞门时，稳性计算需同时满足规范要求的初稳心高度和沉浮过程中稳心高度的最小值。大型浮箱式坞门沉浮过程中横稳心高度最小时刻为坞门吃水刚刚超过中甲板的时刻，即坞门工作状态下最危险的时刻。

参考文献：

- [1] CB/T 8524-2011 干船坞设计规范[S].
- [2] 杨樵.船舶静力学[M].北京:科学教育编辑室,1963.

(本文编辑 武亚庆)

· 消 息 ·

武汉首条近洋航线10月航

武汉首条近洋航线——“沪汉台航班”有望于2013年10月起航。

沪汉台货运航线从四川第一大港泸州港出发，经武汉新港直达台湾。根据目前设想，“沪汉台近洋航线快班服务”早期采用江海三段式接驳方式进行运输，即泸州至武汉、武汉至上海、上海至台湾三段点对点水路运输，中间不上下货物，通过制定特殊的制度安排，可缩短运输时间，减少物流成本。据测算，航线开通后，四川的集装箱至台湾运输时间可缩短至16天左右，减少4天航程，物流成本也可下降10%左右。

摘编自《中国交通报》