

# 浮船坞船舶进坞时的强度简化计算方法

王京齐, 黄祥兵

(海军工程大学 舰艇安全技术系, 湖北 武汉 430033)

**摘要:** 文章介绍了一种简化的、用于在浮船坞中船舶进坞时的强度计算方法。传统的强度计算方法, 因其考虑因素较多, 计算方法复杂, 在实际进坞操作中不可能加以采用。文中介绍的使用浮船坞本身的“辅助辐射图线”, 能较快地计算出船舶进坞时浮船坞关键截面的弯曲力矩, 并可计算出当进坞船舶具有较大首尾端外悬伸出时, 作用在首尾墩上的压力强度, 从而可简单、快速地评估浮船坞的强度储备。

**关键词:** 浮船坞; 强度; 计算方法

**中图分类号:** U673.332 **文献标识码:** C **文章编号:** 1001-8328 (2005) 03-0013-03

**Abstract:** In this paper, a simplified method of calculating strength of floating dock with docking ships presented. Because of its complicacy, it's impossible to adopt traditional method to calculate strength in practice. In this paper, the method with "supplementary radiation pattern" is used to calculate the meandering moment in the key sections of the floating dock and the intensity of pressure in the first and last pier base in case of rather large extending parts of stem and stern. By this method, strength reserve of the floating dock may be evaluated simply and quickly.

**Key words:** floating dock; strength; calculating method

## 1 前言

浮船坞作为漂浮在海上的大型船舶修理设施, 本身既具有船舶的一般性能 (浮性、稳性、抗沉性、机动性等), 又具有与其功能相适应的使用特点。一般的浮船坞可分为船坞 (包括墩船平台、坞墙、坞塔等) 和坞底浮箱组 (含注、排水系统) 两大组成部分, 船坞作为船舶进坞后的修理、保养工作平台, 而坞底浮箱组, 则是用来通过对其进行注、排水操作, 来实现船坞的吃水改变。

与陆基干船坞不同, 浮船坞在实际使用中必须考虑其强度问题。在下列进坞情况下必须进行浮船坞的总强度计算<sup>[1]</sup>: 大排水量的单船进坞; 几条较大排水量的船舶同时进坞; 进坞船舶具有较大的首尾端外悬伸出; 事故船舶进坞。当船坞具有足够的承载能力储备时, 船坞人员可采用调整压载的方式, 来平衡作用在坞底浮箱 (平底水箱) 上的载荷, 从而

尽可能地减少作用在浮船坞上的弯曲力矩。

## 2 总强度简化计算方法

浮船坞在有船舶进坞时所受到的弯曲力矩, 可用 Б. Л. Николаи 和 А. А. Селиверстов<sup>[2]</sup> 连续近似法计算确定, 或者用船舶建造机械手册中的能量法<sup>[3]</sup> 进行计算。然而, 在实践中, 因为上述计算方法的复杂性, 船坞管理人员不可能在船舶进坞前用上述方法对浮船坞强度进行及时的计算。

А. А. Курдюмов 和 В. В. Козляков 在实践的基础上编制出一套计算浮船坞船舶进坞时总强度的简化计算方法。使用以下公式计算浮船坞不同截面处的弯曲力矩:

$$M_D(X) = I_D(X) M_C(X) / [I_C(X) + I_D(X)] + \Delta M(X), \quad (1)$$

式中:  $I_D(X)$ ,  $I_C(X)$  为浮船坞及进坞船舶的横截面惯性矩;  $M_C(X)$  为在坞—船系统中作用的

弯矩； $\Delta M(X)$  为附加弯矩（根据作用在弹性基座梁上的虚假载荷计算确定）。

为了简化计算坞—船系统中的弯矩  $M_c(X)$  和附加弯矩  $\Delta M(X)$ （其值与作为弹性基座的龙骨墩的刚度分布有关），采取以下假设：船舶看成是棱柱形梁，其横截面惯性矩沿长方向为常量，即， $I_c = \text{const}$ ， $I_D = \text{const}$ ；弹性基座（龙骨墩，坞桁架）的刚度沿坞长方向为常量；当船舶载荷分布成二阶抛物线分布时，作用在浮船坞上的弯矩图线按墩船龙骨道的首尾端及其中点（在船坞端面  $M_D = 0$ ）三点构建。

作用在坞—船系统的墩船龙骨道中点的总弯矩  $M_c(X)$  同样由 3 部分组成，它们可用表格形式单独计算确定。

(1) 空船坞因固定压载产生的弯矩。这部分的弯矩总量由船坞装置重量的纵向分部不均匀性程度确定。在船坞本身的出厂文件中，应含有因船坞自重产生的弯矩的纵向分布曲线。

(2) 进坞船舶影响产生的弯矩。

(3) 变动压载影响产生的弯矩。

为了确定以上弯矩，必须查明所有作用在平底水箱上力的组成及其分布。当已知分布在每个平底水箱上的进坞船舶重量、压载量和船坞自重时，可用辅助辐射图线确定出作用在平底水箱间各横截面上的弯矩和剪切力。

辅助辐射图线是根据作用在每个平底水箱重心上的载荷而产生的在水箱间截面上的弯矩及剪切力计算值预先构建的。对某一具体的浮船坞，在构建辅助辐射图线时，可参考使用典型辐射图线，典型辐射图线是对 4、5、6、7、8 个平底水箱组成的浮船坞的各水箱间横截的无量纲计算曲线。横坐标为载荷重量与水箱支撑力的比  $P_i/P_n$ ，纵坐标为相应的弯矩值  $m_i$  和剪切力  $n_i$ 。

使用辅助辐射图线可以确定因作用在任意水箱上的载荷（其值反映在横坐标上）而产生的在水箱间各截面上的弯矩和剪切力。通过载荷标识点作一与横坐标的垂线，其与辅助辐射线的交点的纵坐标值，则是所有作用在水箱上的力产生的在各水箱对接点处的弯矩和剪切力，见图 1。

辅助辐射图线的数量与浮船坞的平底水箱组成数相等。图线对各弯矩和剪切力单独构建。图线也可以在典型计算的基础上，用表格形式代替。

将从所有辅助辐射图线上量取的  $m_i$  和  $n_i$  值代

入计算表格以便计算总的作用在浮船坞上的弯矩及剪切力。为了构建船舶进坞时的作用在船坞上的弯矩曲线，必须准确地确定在墩船龙骨道中横截面上的弯矩。在将曲线进行光滑时，需计及到龙骨道首尾端的弯矩。如果进坞船舶相对于龙骨道长具有首尾端伸出，则必须从龙骨道首尾端的总弯矩计算值  $M_c'$  及  $M_c''$  中减去相对于龙骨道船舶首尾端外悬伸出部分产生的弯矩  $L_1$  和  $L_2$ ，来作为船坞的龙骨道端面弯矩：

$$M_D' = M_c' - L_1; M_D'' = M_c'' - L_2. \quad (2)$$

为了确定作用在船坞中横截面上的弯矩，还需要确定弹性基座梁的补充弯矩  $\Delta M(0)$ 。该弯矩依赖于龙骨墩的刚性系数、船坞横向构件的刚性系数、墩船龙骨道长度以及船舶横截面的惯性矩。

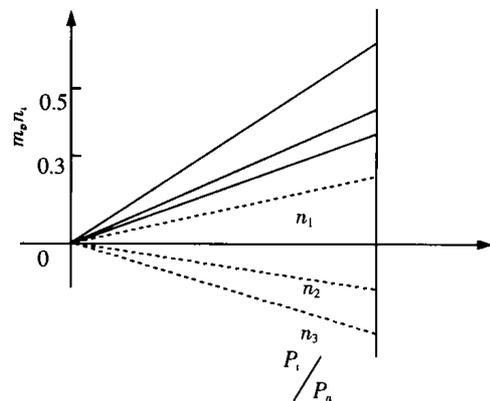


图 1 辅助辐射图线示意图

在确定龙骨墩的刚性系数时，必须考虑到其材质（金属基座，橡胶或松材方木）。该系数值为 10 kN 的力作用在墩距  $S$  的龙骨墩压缩率的倒数：

$$k_2 = \frac{1}{\Delta h s} = E \frac{ca}{hs}, \quad (3)$$

式中： $c$  为进坞船舶龙骨宽度； $a$  为龙骨墩宽度； $h$  为木质垫材高度（ $\Delta h = h/Eca$ ，其中， $E$  为弹性模量，对松材  $E = 50 \text{ MPa}$ ，橡胶  $E = 50 \text{ MPa}$ ）。

船舶桁架的刚性系数  $k_2$  为分布作用在桁架间距上 1 t 力所产生的弯曲量的倒数。

按所有的组成量确定的结果，对以下 5 点构建弯矩计算关系：墩船龙骨道中点  $M_D(0)$ 、龙骨首尾端  $M_D'$  及  $M_D''$ 、船坞首尾端（ $M_D = 0$ ）。

当船坞作用弯矩的最大值  $M_D \leq M_0$ （ $M_0$  为弯矩许可值）时，表明船坞具有足够强度，可进行该船进坞。而当  $M_D > M_0$  时，必须进行船坞可变压载的重新配载或审查加装补充方木或支架的可能性，包括在进坞船舶首尾伸出处加装补充方木或支架，以便将船舶压力转移到更大的船坞墩船平台

上。

当进坞船舶长大于船坞长度, 或船舶具有较长的、不便放置龙骨墩的首尾端伸出构件时, 船舶首尾端将具有较大的外悬伸出 (有时达船长的 15%~20%)。这类船舶的进坞要求进行专门的计算, 包括船舶和船坞的强度计算、龙骨墩首尾端的压力强度计算、船坞的可变压载计算等。在存在船舶首尾端外悬伸出, 可能会引起船体或墩船平台局部变形时, 应对龙骨首尾墩进行补充压载试验。为了减轻首尾端作用, 应合理地进行船坞配载, 在确定首尾龙骨墩的压力强度和在计算总弯矩和剪切力时, 应当考虑到压载载荷的影响。

首尾龙骨墩的压力强度  $r_1$ 、 $r_2$  可近似地用下列公式计算:

$$\begin{aligned} r_1 &= q_1' \frac{1}{1+\alpha} + \frac{\alpha}{1+\alpha} q_2' + \frac{4\mu}{l_k} (P_1 - \frac{\alpha}{1+\sigma} N_c') + \\ &\frac{8\mu^2}{l_k^2} (L_1 - \frac{\alpha}{1+\alpha} M_c' + W_0); \\ r_2 &= q_1'' \frac{1}{1+\alpha} + \frac{\alpha}{1+\alpha} q_2'' + \frac{4\mu}{l_k} (P_2 + \frac{\alpha}{1+\sigma} N_c'') + \\ &\frac{8\mu^2}{l_k^2} (L_2 - \frac{\alpha}{1+\alpha} M_c'' + W_0). \end{aligned} \quad (4)$$

式中:  $q_1'$ 、 $q_1''$ 、 $q_2'$ 、 $q_2''$  为墩船龙骨道首尾端的船舶载荷强度。  $q_1' = D_c'/l_n$ ;  $q_1'' = D_c''/l_n$ ;  $\alpha = I_c/I_D$ 。  $D_c'$ 、 $D_c''$  为进坞船舶重量在首尾水箱上的分配量;  $l_k$  为水箱长度;  $\mu$  为无量纲系数, 按下式确定<sup>[3]</sup>:

$$\mu = \frac{l_k}{2} \sqrt{\frac{k(I_c + I_D)}{4EI_c I_D}}, \quad (5)$$

对钢质船坞,  $E = 2.1 \times 10^5$  MPa, 且  $\mu = 0.00524l_k$

$\sqrt{\frac{k(1+\alpha)}{I_c}}$ , 其中,  $k = \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2}$  为综合刚性系数 (船坞桁架刚性系数  $k_1$  由船坞出厂文件查取, 龙骨墩刚性系数  $k_2$  按公式 (3) 计算确定)。

$l_k$  为大型船舶坐墩的墩船龙骨道长度;  $M_c'$ 、 $N_c'$ 、 $M_c''$ 、 $N_c''$  为龙骨墩船道首尾端处的总弯矩及剪切力;  $W_0$  为为改变在墩船龙骨道首尾端的力矩或减少载荷强度而采用的压载量。

$$\begin{aligned} W_0 &= \frac{0.376}{1+\alpha} \left(\frac{1}{\mu^4}\right) \left(\frac{l_k}{L_c}\right)^3 l_k \left(D_c \frac{1+\varphi_k}{\varphi_k} + \right. \\ &\left. \alpha D_\sigma \frac{1+\varphi_\sigma}{\varphi_\sigma}\right), \end{aligned} \quad (6)$$

式中:  $\varphi_k$  为船舶载荷抛物线分布系数, 依船型确定, 破冰船 0.7、客运船 0.75、货运船 0.8、驳船 0.85;  $\varphi_\sigma$  为压载载荷及其余未计及的小型船舶重量抛物线分布系数;  $P_1$ 、 $P_2$  为船舶首、尾外悬伸出部分重量;  $L_1$ 、 $L_2$  为由  $P_1$ 、 $P_2$  产生的相对于墩船龙骨道首尾端的重量矩。

作用在浮船坞上的载荷由空船坞重量  $D_0$ 、进坞船舶总重量  $\Sigma D_c$ 、压载重量  $D_\sigma$  以及支承力 4 部分组成。当船坞自重沿坞长均匀分布时, 墩船龙骨道首尾端的载荷强度为:

$$\begin{aligned} q_2' &= \frac{D_0 + \Sigma D_c + D_\sigma}{L_D} - \frac{d_0' + d_c' + d_\sigma'}{l_n}, \\ q_2'' &= \frac{D_0 + \Sigma D_c + D_\sigma}{L_D} - \frac{d_0'' + d_c'' + d_\sigma''}{l_n}, \end{aligned} \quad (7)$$

式中:  $d_0'$ 、 $d_0''$  为空船坞重量在墩船龙骨道首尾端处平底水箱上的分配量;  $d_c' + d_\sigma'$ 、 $d_c'' + d_\sigma''$  为其余船舶 (已考虑其刚度的船舶除外) 重量和压载在墩船龙骨道首尾端处平底水箱上的分配量。

在确定出压力强度  $r_1$  和  $r_2$  后, 将它们与浮船坞出厂文件中的龙骨墩许用压力强度  $r_0$  进行比较: 若  $r_{\max} \leq r_0$ , 则龙骨墩及墩船平台的强度得以保证; 若  $r_{\max} > r_0$ , 则必须采取必要的措施, 以便降低  $r_{\max}$  或增加  $r_0$ 。这些措施包括在船舶首、尾外悬伸出区补充布置支承物; 对平底水箱进行补充重新压载; 特别布置龙骨墩或垫加可压缩衬垫。

### 3 结语

使用本简化的浮船坞强度计算方法, 工程技术人员能在必要的时候快速地计算出船舶进坞后的船坞的总强度, 能预先得出浮船坞的强度储备, 通过合理、适当的措施来保证坞—船系统的强度要求, 避免船舶进坞时因强度不足引起的墩船平台和船体的损坏等事故的发生。

#### 参考文献

- [1] Павлов П. Я. Роголин А. Н. Эффективность эксплуатации доков. морской транспорт, 1987.
- [2] Б. Л. Николаи, А. А. Селиверстов. Расчет постановки судов в плавучие доки. Морской транспорт, 1953.
- [3] М. А. Ловягина. Металлические плавучие доки. Судостроение, 1964.

收稿日期: 2005-01