

· 航道及通航建筑物 ·



船闸的门槛水深（二） ——船舶过闸所需的小门槛水深

吴 澄

(中交水运规划设计院有限公司，北京 100007)

摘要：目前国内针对“船舶过闸时所需的小门槛水深”的研究还没有形成系统性的成果。通过分析已有的研究成果，提出“船舶过闸时所需的小门槛水深”由船舶吃水和富裕水深组成，富裕水深由船舶航行下沉量和最小安全富裕水深组成；影响船舶过闸时的航行下沉量的主要因素是船舶的阻塞系数、航行速度和水深。根据已有的研究成果的适用条件，介绍一种估算船舶过闸时的航行下沉量和极限航速的计算方法。最小安全富裕水深主要用于补偿航行下沉量估算的可能误差和枢纽运行中的推移波产生的水面波动，枢纽运行中产生的非恒定流是推移波的主要来源，一般情况下最小安全富裕水深可取 30 cm，当预计推移波对门槛水深的影响比较显著时，应开展专门研究。

关键词：船闸门槛水深；船舶航行下沉量；船舶的极限航速；推移波；最小安全富裕水深

中图分类号：U612

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2023)07-0101-04

Water depth on sill of locks, part 2: Minimum water depth on sill for vessels passing through locks

WU Peng

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: There is lack of systematic studies to the minimum water depth on sill needed by vessels passing through locks in China. By analyzing existing studies results, the minimum water depth on sill needed by vessels passing through locks shall be composed of draft of the vessel and additional water depth. The additional water depth is composed of squat of the vessel and the minimum clearance. Main factors influencing the squat of vessels passing through locks are blockage coefficient, speed of vessel and water depth. From application conditions of existing studies, formulas to estimate the squat through locks and limit speed of vessels are presented. The minimum clearance is used to compensate biases of the squat estimation and to take fluctuations of translatory waves into account. The main source of translatory waves is the unsteady flow from the operation of hub. In normal case the minimum clearance could be 30cm. When the influence of translatory waves will be significant on the water depth on sill, a special study shall be needed.

Keywords: water depth on sill; squat of vessels; limit speed of vessels; translatory waves; minimum clearance

本文第一部分“规范相关规定解读”，分析了现行行业规范 JTJ 305—2001《船闸总体设计规范》对船闸门槛最小水深的规定，表明按规范规定确定的船闸门槛最小水深是一个设计指标，并非船

舶过闸时需要的最小水深。关于船舶过闸时在水动力作用下的运动特性，国外已有较丰富的研究成果^[1-3]。国内三峡船闸对船舶过闸时的最小富裕水深开展了现场试验^[4]，同类研究还有采用物理

收稿日期：2022-09-06

作者简介：吴澄（1956—），男，硕士，正高级工程师，从事港航咨询研究和设计工作。

模型对船舶进出升船机承船厢需要的富裕水深开展的试验，而系统试验基本空缺。本文通过分析总结已有的研究成果，提出船舶过闸时所需的小门槛水深由船舶吃水和富裕水深组成，其中的富裕水深由船舶航行下沉量和最小安全富裕水深组成，见图 1。在分析影响船舶航行下沉量和最小安全富裕水深的因素后，提出确定船舶过闸时的航行下沉量和最小安全富裕水深的建议方法。

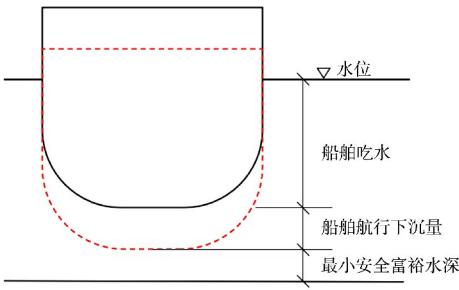


图 1 船舶所需最小门槛水深

1 船舶航行下沉量

船舶进出船闸时的运动性能以及有关的水动力问题，在船闸设计时应特别关注。研究方法主要是物理模型试验和现场试验。

采用物理模型进行研究时，由于模拟操作过程的复杂性，模型试验得到的船舶运动结果转换为原型数据将产生一定偏差，特别是船舶采用牵引方式试验时，偏差可能更为显著。

从理论上分析，描述船舶进出船闸的物理现象的差分方程、描述水流运动的方程(圣维南方程)和描述船舶运动的有关方程对一般情况都不能在分析的基础上得到理论解。对特定问题的近似解只能通过简化假定得到。也就是说，要准确预测船舶进出船闸时的下沉量是非常困难的。

目前通行的做法是分析船舶进出船闸时影响航行下沉量的主要因素，通过现场试验，建立估算航行下沉量的经验公式。国内外的研究均表明，当水深相同时，船舶出闸时的触底风险要比进闸时大。目前已有的文献中有多种方法可以计算船舶在船闸和运河中航行时的船舯下沉量和船首、船尾局部下沉量。但不同方法得到的结果有明显

差异，特别是用于断面系数很小的船闸和升船机时结果的差异更大，说明各公式均有各自的适用条件，仅在各自确定的范围内是有效的。

Spitzer 等通过总结大量以往的研究成果，采用回归分析得到估算船舶出闸时的下沉量公式：

$$\frac{\Delta d_{\max}}{h} = 2.03(n-1)^{-1.15} C_B^{-0.31} Fr_h^{1.63} \quad (1)$$

其中： $C_B = \Delta / (LBT)$ (2)

$$Fr_h = v / (gh)^{1/2} \quad (3)$$

式(1)~(3)表明船舶出闸时船尾相对最大下沉量 Δd_{\max} 由下述参数确定：断面系数 n 、船舶方型系数 C_B 、船舶排水量 Δ 、船长 L 、船宽 B 、船舶吃水 T 、水深 h 、水深弗劳德数 Fr_h 、出闸速度 v 。计算公式的适用范围为： $1.17 \leq n \leq 3.26$ 、 $0.018 \leq Fr_h \leq 3.26$ 、 $0.83 \leq C_B \leq 0.96$ 。

式(1)~(3)还表明影响船舶出闸时的主要因素是断面系数和出闸速度，船舶方型系数影响较小。我国新建船闸的闸室宽度多为 23 和 34 m，而船舶宽度一般不大于 16.3 m，这种情况下的断面系数相对较大。例如，闸室宽度为 23 和 34 m，船闸门槛水深为 4.5 m；船舶宽度为 16.2 m，船舶吃水分别为 2.6 m(2 000 吨级)和 3.0 m(3 000 吨级)，出闸速度分别取 1 和 2 m/s，采用式(1)估算出闸时的最大下沉量见表 1。

表 1 船闸门槛水深 4.5 m 时船舶出闸最大下沉量估算结果

闸室宽/ m	B/ m	吃水 D/m	n	v/ (m·s ⁻¹)	Fr_h	$\Delta d_{\max}/$ m	$D+\Delta d_{\max}/$ m
23	16.2	2.6	2.46	1	0.15	0.28	2.88
23	16.2	2.6	2.46	2	0.30	0.86	3.46
34	16.2	3.0	3.15	1	0.15	0.18	3.18
34	16.2	3.0	3.15	2	0.30	0.55	3.55

表 1 的结果表明，断面系数一定时，出闸速度增加，船舶下沉量将快速增加；船舶航速一定时，断面系数减小，船舶下沉量也将增加。自航船舶过闸时在航宽和水深的限制下，航行速度将受到显著影响，因此自航船舶存在一个极限航速。

2 极限航速

自航船舶的极限航速(也称临界航速)是船舶

的阻塞系数和水深的函数。船舶在行驶时要排开部分水体，船首推开的水体被不断推到船体周边，同时相同数量的水体被补充到船尾。这种从船首到船尾的水体替换过程中产生的水流，被称为沿船体两侧和底部的回流，回流的方向与船舶行驶的方向相反。回流引起船舶周边水位的下降，导致船舶与静水面相比有一个下沉量。

当回流达到最大值时，船舶也达到了在航道内的极限航速。回流的最大值是水位下降的函数，与弗劳德数有关。船舶周边水流达到临界水深后，回流流速将不再增加，回流的流量达到最大值，船舶的航速也达到最大值。

根据能量守恒原理，Schijf (1949)、Jansen 和 Schijf (1953) 推导得出特定船舶在尺度确定的限制性航道内最大可能航速 v_{\lim} 的计算方程（该方法适用于浅水条件）^[5]：

$$\frac{v_{\lim}}{\sqrt{gh}} = \left(\frac{2}{3} \right)^{3/2} \left[1 - \frac{A_s}{A_c} + \frac{1}{2} \left(\frac{v_{\lim}}{\sqrt{gh}} \right)^2 \right]^{3/2} \quad (4)$$

式中： A_s 为船舯水下断面面积； A_c 为未扰动运河的水下断面面积； h 为矩形断面的水深，非矩形断面为虚构水深，其值为 A_c/W_c ，其中 W_c 为未扰动水位的水面宽度。

将式(4)的极限速度 v_{\lim} 和阻塞系数(断面系数的倒数) A_s/A_c 的函数关系绘成曲线，见图2。

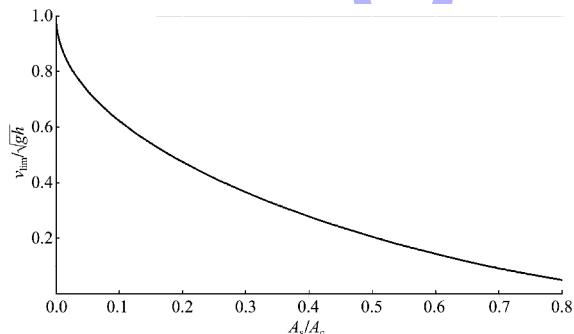


图2 以阻塞系数 A_s/A_c 为函数的极限航速

文献[3]中还有关于式(4)的不同表达方式。后续的研究表明由于推导过程的简化假定，计算结果会有一定偏差，在考虑回流的不均匀性后，提出了校正系数 $\alpha = 1.4 - 0.4v/v_{\lim}$ 。船舶通过船闸时，水下断面为矩形，船舶一般居中航行，与上

述简化假定比较接近，即 $\alpha \approx 1$ 。

由于达到这个极限速度所需的动力将非常大，通常这个速度是达不到的。但在某些情况下，例如当船舶从断面较大的引航道进入断面小得多的船闸或船舶从水深较大的闸室驶向水深较小的上闸首时，由于船舶的惯性，这个极限速度可能被短暂地超过。

根据实际观察，满载船舶进出闸的速度要低于空载船舶；船舶通过宽船闸的进出闸速度要明显高于通过窄船闸的情况；有横风作用时，进出闸速度也会提高。在较高的阻塞系数条件下，增加宽度而不增加水深会增大船舶触碰门槛或闸室底板的风险。这可归结于船舶通过较宽的船闸时航行速度可能较快，从而增加了航行下沉量的缘故。

分析表1的情况，在断面系数为 2.46 时，对应的船舶极限速度约为 1.8 m/s；断面系数为 3.15 时对应的船舶极限速度约为 2.3 m/s。若减小门槛水深，则断面系数将减小，船舶航行下沉量将增加，船舶的极限航速将减小。

船舶过闸时的航速有可能在惯性的作用下短时间内超过极限航速，例如在较宽阔的闸室内的船舶向上游出闸时，闸室内的水深较大(远大于上游门槛水深)，对应的极限航速也较大，当闸室较长时船舶行驶至上游门槛时的航速已经较快，可能会超过门槛处的船舶极限航速。这是在分析论证门槛水深时应注意的一个方面。

3 最小安全富裕水深

在确定船舶过闸时所需的最小门槛水深时，富裕水深除船舶的航行下沉量以外，还应适当考虑最小安全富裕水深，用于补偿航行下沉量估算的可能误差和枢纽运行中的推移波产生的水面波动。恒定流动的水体，其水面也是恒定的。当流量发生变化时，在达到新的恒定状态之前水面发生的波动称为推移波。枢纽运行中的推移波的主要来源是船闸灌泄水、电站和泄水建筑物运行时的非恒定流。

推移波与振荡波不同，推移波与水流的净流入或流出相关。推移波实际上是恒定的水面发生

变化的过渡阶段，水流的净流入导致水面的上升，称为正的推移波；水流的净流出导致水面的降低，称为负的推移波。典型的推移波水面扰动的长度(波长)远大于水深，因此可以用浅水波理论进行描述。

航道某一部分的任何流量变化都可能诱发推移波。发生比较频繁的是船闸灌泄水引起的推移波。其他还有电站增、减负荷的流量变化过程和泄水闸闸门启闭时的流量变化过程等引起的推移波。如果流向航道、引航道或闸室的流量 Q 突然变化，会引起推移波。如果波高或波腹远小于水深、流量的变化发生在一端，流量变化 ΔQ 、水位变化 Δh 和波速 c 的关系如下：

$$\Delta Q = cw\Delta h \quad (5)$$

式中： w 为水体(如航道、引航道或船闸)表面的宽度。用式(5)可估算瞬时流量变化产生的推移波波高：

$$\Delta h = \frac{\Delta Q}{wc} = \frac{\Delta Q}{w\sqrt{gh}} \quad (6)$$

式(6)表明船闸在较窄或较浅的航道(w 和 h 较小)内或有较大的流量变化 ΔQ 时，产生的推移波的波高更大。推移波的水面比降在理论上无限大，但流量的变化不可能是瞬时的，波峰面的坡度与流量增加率成正比。对于多线船闸的情况，船闸产生的推移波会叠加，波高也会相应增加。为了避免这种效应，应制定详细的船闸操作的调度规则。

推移波沿运河传播过程中，其速度和波高都会发生变化。通常可以用一维水动力模型进行模拟。

在矩形航道内，推移波将经历一个典型的变形过程。由于波浪背侧的速度较高，正波在传播中有将自己超越的趋势，因此，正波会变得越来越陡。对于负波，背侧的速度较低，在传播过程中会变得越发平缓。在梯形渠道内，由于推移波在浅水处传播比中间深水处慢，推移波很快就会平滑。

枢纽位置处由于地形的复杂性，枢纽运行产生的推移波很难估算。三峡船闸有过一段时间的观测成果，测得的最大波高约 30 cm，出现的概率是很低的；推移波的一般波高在 10 cm 左右。这

个数据对一般工程有一定参考价值，在没有相关的实测数据或试验结果可供参考时，可取最小安全富裕水深为 30 cm。

当需要分析过闸可能最大吃水船舶所需的小门槛水深时，要注意水下断面面积、水深、过闸航速、极限航速等参数的相互影响。以表 1 的闸室宽 34 m、过闸航速为 2 m/s 的计算情况为例，计算所得的航行下沉量为 0.55 m，取最小安全富裕水深为 30 cm，这时船舶过闸所需的小门槛水深为 3.85 m。应注意这是船闸门槛水深为 4.5 m 的情况，如果把门槛水深减少为 4 m，用式(1)计算可得到航行下沉量将变为 0.66 m，同样取最小安全富裕水深为 30 cm，这时船舶过闸所需的小门槛水深为 3.96 m，这个结果是航速 2m/s 的情况。前面的分析表明，门槛水深为 4.5 m 时的极限航速是 2.3 m/s。门槛水深减为 4 m 后，按式(4)估算得到的极限航速约为 1.9 m/s。上面的计算得到按航速 2 m/s 核算航行下沉量约为 0.66 m，所需的小门槛水深为 3.96 m。这表明门槛水深 4 m 可满足吃水 3 m 的船舶以 2 m/s(略超过极限航速 1.9 m/s)的航速过闸。从现场实测数据看，满载船舶过闸时的航速一般不超过 1.5 m/s，所以船宽 16.2 m、吃水 3 m 的船舶通过 34 m 宽的闸室，门槛水深为 4 m 是略有富裕的。同时，从这个算例可以看到，与船舶过闸最小门槛水深有关的几个关键参数之间是相互影响的。

当由于地形、建筑物布置或流量的增量等有可能会显著增大推移波的影响时，应开展专门研究。推移波除了对船闸门槛水深产生影响外，还会对船闸闸门的运行产生影响。

4 结论

1) 船舶过闸时所需的小门槛水深由船舶吃水和富裕水深组成，富裕水深由船舶过闸时的航行下沉量和最小安全富裕水深组成。影响船舶过闸时的航行下沉量的主要因素不仅仅是水深，更重要的是船舶的阻塞系数和航行速度。

(下转第 119 页)