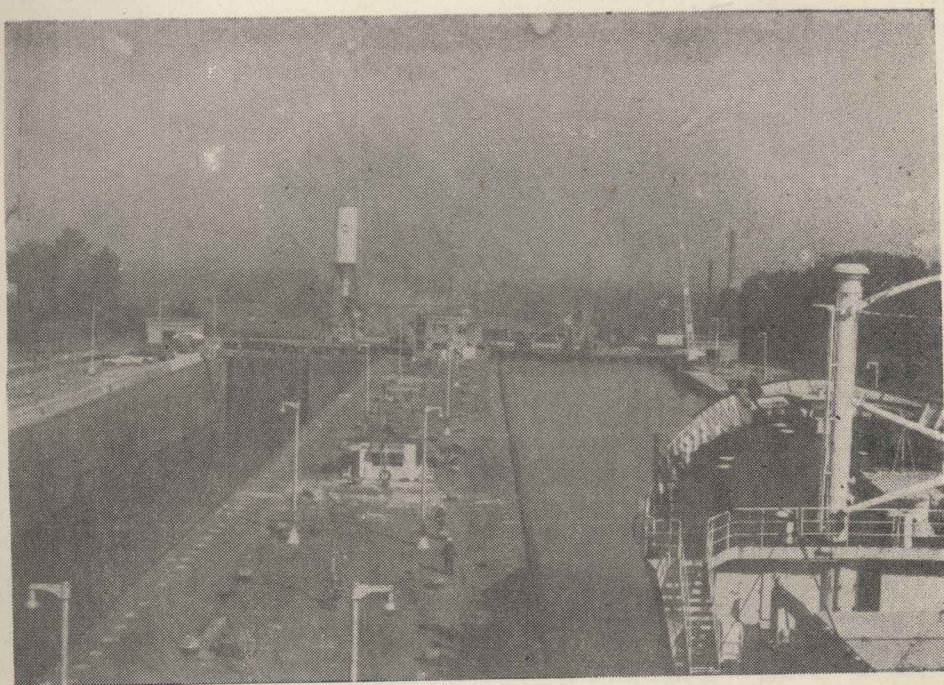


国外通航建筑物

(第一辑)



交通部三峡工程航运办公室

一九八九年四月

前 言

本文集选编了1988年国际高坝水力学讨论会通航水力学方面的论文5篇，美国和加拿大、巴西船闸，高水头船闸水力学原体观测，人字闸门设计手册，河道泥沙淤积等论文12篇。可供船闸规划设计、科研试验参考。

文集由王作高、涂启明审校。责任编辑涂启明。张晓杰参加了文集刊印工作。

由于水平有限。不妥之处，请读者指正。

文集出版得到交通部天津水运工程科学研究所的大力支持，谨致谢意。

目 录

一、国际高坝水力学讨论会通航建筑物水力学——特邀报告	(1)
二、高水头通航船闸	(21)
三、影响高水头船闸设计的因素	(28)
四、阀门非正常启闭引起的船闸输水系统压力变化	(36)
五、阿肯色河航运工程的河流敞泄和排沙	(42)
六、美国和加拿大若干船闸	(59)
七、图库鲁伊船闸	(104)
八、下花岗岩船闸的原体观测	(119)
九、约翰德船闸水力学模型试验和原型观测	(129)
十、美国俄亥俄河上新建船闸泄水廊道出水口的水力学模型试验成果介绍	(146)
十一、人字闸门	(155)
十二、上密西西比河第25号回水区冲积研究	(193)

国际高坝水力学讨论会

航运建筑物水力学

— 特邀报告 —

〔西德〕汉斯—沃纳·帕坦斯基

联邦德国汉诺威大学 富兰苏斯学院院长、 教授

提 要

本文介绍各种通航建筑物系统，借助它们克服在运河和天然河流上建节制闸或水电站而产生的水位差，使河道可以通航。在结尾述及船闸，垂直升船机和运河斜面升船机的运输效率。

1、引言

原则上，在河道上、下游克服集中落差运送各种船舶可以借助船闸或垂直升船机。这两种方法不但过去使用效果好，而且将来还要继续使用。垂直升船机的优点是船舶在过闸期间不浪费水，并且过闸期间平均提高和降低的速度可以达到相同高度等惯性充水系统船闸的四倍。

2、船闸

设计船闸时，其尺度大小（闸室长 L ，宽 B ）由将在该水道通航的船队（拖船、自航船、推船）的尺寸决定。在运河中，船闸的提升高度 H 取决于选定运河的纵剖面，以及在建有拦河坝的河流上取决于发电站的水头。

工程师在设计船闸时，值得注意的问题是：采用哪种形式的充水和泄水系统对于已给的船闸尺度（保证充水和泄水时船舶在闸室里的安全）是最合适的，并且也要考虑建设的成本。

通常，缩短船闸的充水和泄水时间，需要较昂贵的长廊道多出水孔系统、底部出水孔输水廊道和多组出水孔输水廊道。上述充水系统主要用在高水头的船闸，对于低水头的船闸，闸室的充水系统和泄水直接通过上、下闸门或闸门侧输水廊道即可完成。

然而，充水和泄水时，鉴于停于闸室内的船舶和上、下游的船舶，其系缆力都不能超过允许值。因此闸门或阀门开度大小要受到一定限制。在类似的情况下，充水时作用船舶上的力明显地大于泄水的作用力。因此下面仅仅讨论船闸的充水过程。

(1) 现行的充水系统

充水过程大体上可分为两种不同的类型：

- a) 高水位进水的充水（即淹没水深较小的进水口）；
- b) 深水位进水的充水（即淹没水深较大的进水口）。

在第一种情况下，水是经过上闸门进入闸室的，进来的水被折流板挡住（图 1），对于这种充水过程还可利用别的不同形式的闸门完成，图 2 示出一些例子。

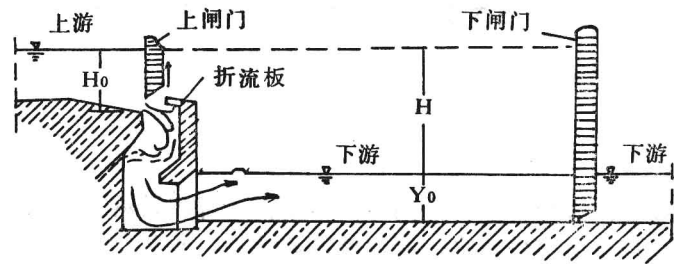


图1 进水口淹没较小的上闸门流水

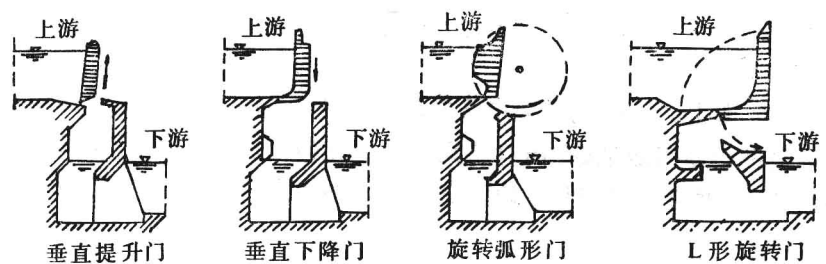


图2 进水口淹没较小的典型闸门

在第二种情况，闸室充水可借助长廊道多组出水孔系统（图 3），底部出水 输水廊道（图 4）或多组出水孔充水廊道（图 12）。泄水闸门或扇形闸门通常都作为阀门用在充水或泄水廊道。

(2) 由上闸门或侧输水廊道充水

当通过高水位上闸门或深进水口（图 1 和图 5）或侧输水廊道向闸室充水时，水面比降 I_w 由上闸首向下闸首增加（图 6）。这就给闸室内的船舶增加了作用力 W 。作用力大小取决于船舶重量 G_s 和水面比降 I_w 。而后者主要受开始充水时进入闸室流量增加值的影响。已知闸室宽度 B 和闸室起始深度 Y_0 ，可导入下式：

$$W = G_s \cdot \sin \alpha \approx G_s \cdot I_w = \frac{G_s}{B \cdot g \cdot Y_0} \cdot \frac{d e}{d t} \quad (1)$$

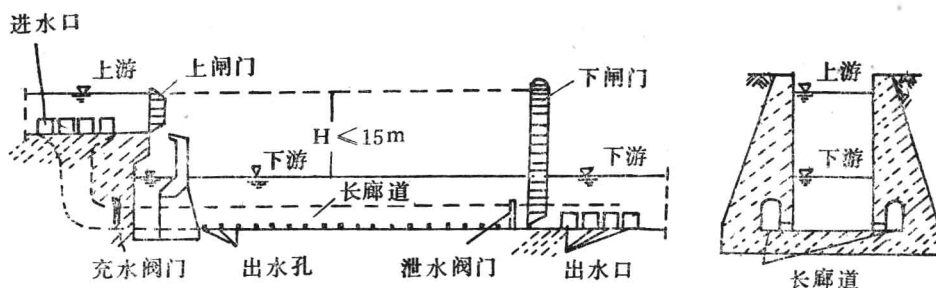


图3 两条支廊道多出水孔的船闸输水系统

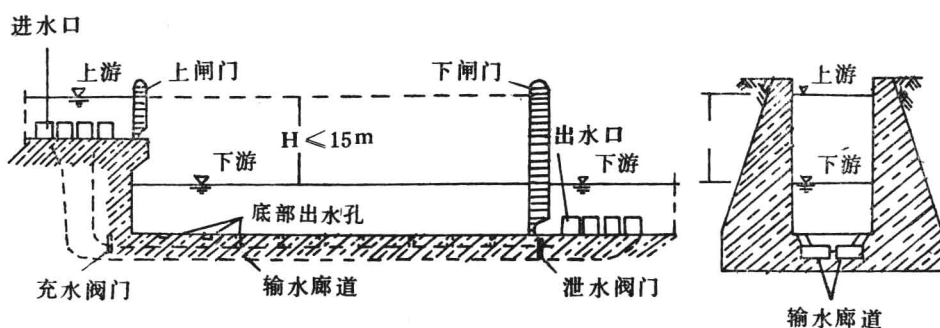


图4 闸室底部出水孔输水廊道系统

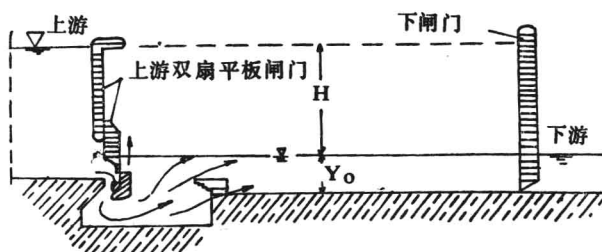


图5 进水口淹没深度较大的上闸门充水

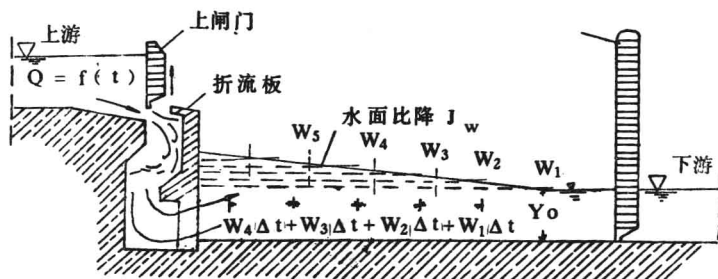


图6 上闸门充水开始时的水面比降

闸室水位第一个不稳定性是作为一个正波传给闸室，到闸门被反射回来，并且在整个充水后的阶段在各方向的水面比降反复迭加（图 8）。这些水面比降给船舶施加了纵、横向交替出现的作用力，这些力必然传给系船缆索。

作为一般规律，在船舶上的纵向作用力不应超过船舶总重量的 $1/600$ ，而横向力则保持在该值的 $1/3$ 以下。

（3）长廊道多出水孔和底部廊道输水系统充水

在用长廊道多出水孔系统（图 3）或底部出水孔输水廊道系统（图 4）向船闸充水时，第一个充水水流进入靠近闸室的上闸首。出水孔口连锁反应向下闸首开始充水。这又引起开始充水期间向闸室末端下游倾斜的水面比降。

然而，一旦出水孔口全部工作时，长廊道多出水孔口和底部廊道输水系统的压力分配结果（图 9），形成了反方向的水面比降 I 。船舶过闸时，这些比降引起作用在船舶上的纵向作用力，力的大小受出水孔口的布置和尺寸的影响较少，主要由充水阀门的开度决定。

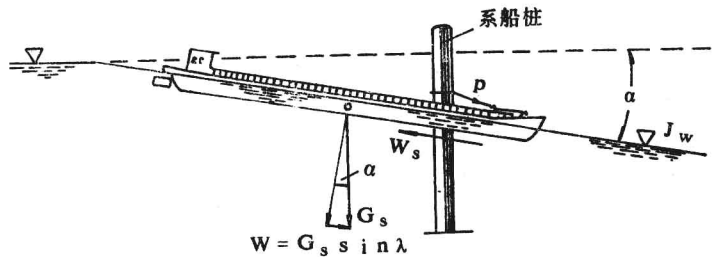


图 7 在波浪斜坡上的船体运动

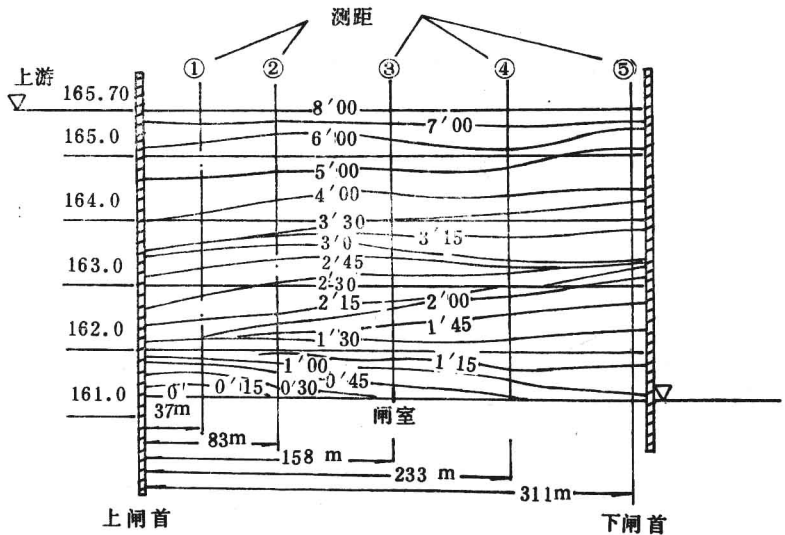


图 8 在不同充水阶段闸室水面比降

(4) 有多组出水孔的供水廊道充水

只有把底部输水廊道和设在船闸底部的多组出水孔(图10)组合使用,才能显出充水作业时船舶安全的优点。这些多组出水孔由供水廊道供水,并且沿着船闸长度的三分之一和三分之二,或四分之一、四分之二、四分之三处排列(图11)。充水的原则是:在闸室长度的不同位置上同时喷出进入闸室的第一股充水水流。这类充水系统称作“等惯性”,其原理见图12。

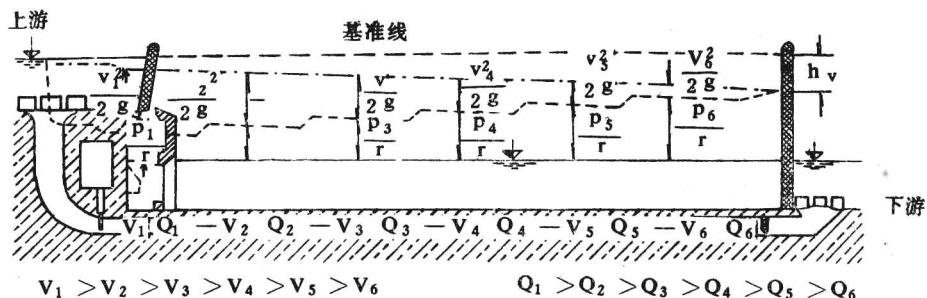


图9 输水廊道系统中的压力变化

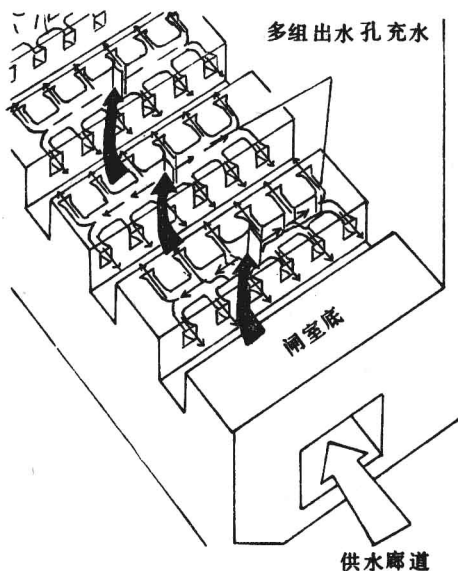


图10 多组出水孔充水原理

(联邦德国于尔岑船闸 $H = 23\text{ m}$)

总之,船舶在闸室内时,局部水面比降的影响或多或少可以消去,结果实际系缆力远远低于其允许值。然而,需要记住的是,这种类型的充水系统造价昂贵,维护费用高。因此仅仅在水头高于20米的船闸上使用。图13示出美国斯内克河上的冰港船闸(水头高31.4 m)的充水系统,图14示出中华人民共和国长江葛洲坝的1号和2号船闸(水头高

27.0 m) (1号船闸不是图14的型式, 作者有误一编注)。这些例子说明现代化高水头船闸的等惯性输水系统。

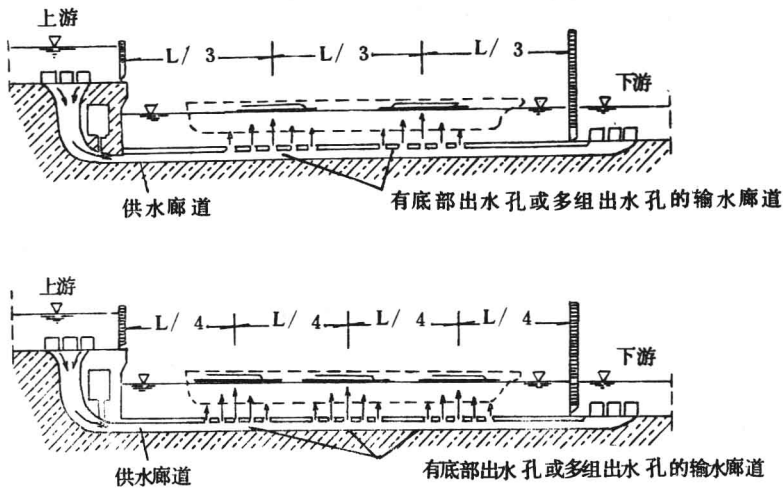


图11 带有多组出水孔的供水廊道充水

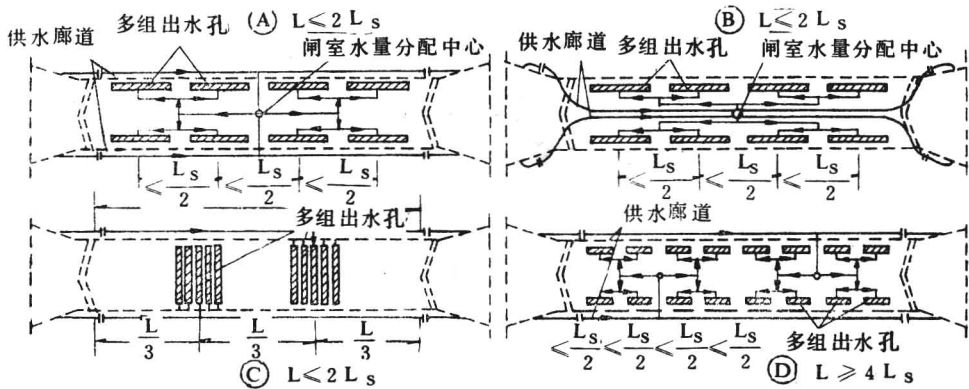


图12 有供水廊道和多组出水孔的等惯性充水系统原理

(5) 充水期间的系统力

根据选定的充水系统, 在充水初期, 作用在船舶的力是闸室初始水面比降和船舶重量引起的, 这些力必定传递给系船缆索。预期的系统力取决于系船缆索的长度和松弛情况, 因为船舶运动的动能要靠系船缆索弹性拉伸来补偿。图15示出直径22 mm系船缆索的拉伸性能。

系船缆索预期承受最大的力由下式得出:

$$S_{max} = G_s \cdot I_w + \sqrt{(G_s \cdot I_w - S_0)^2 + 2E \cdot A_t (G_s I_w - S_0) \cdot \frac{s - l_0}{s}} \quad (2)$$

式中：

- S_0 = 最初系缆力 (t) ；
- E = 系船缆索的弹性模量 (t / cm^2) ；
- A_T = 金属系船缆索的横断面积 (cm^2) ；
- s = 系船缆索的长度 (m) ；
- l_0 = 系船缆索的弦长 (m) 。

图16示出不同长度系船缆索（欧洲标准商船总重量为1776 t） I_w 与 $S_{\max}$ 的函数曲线。

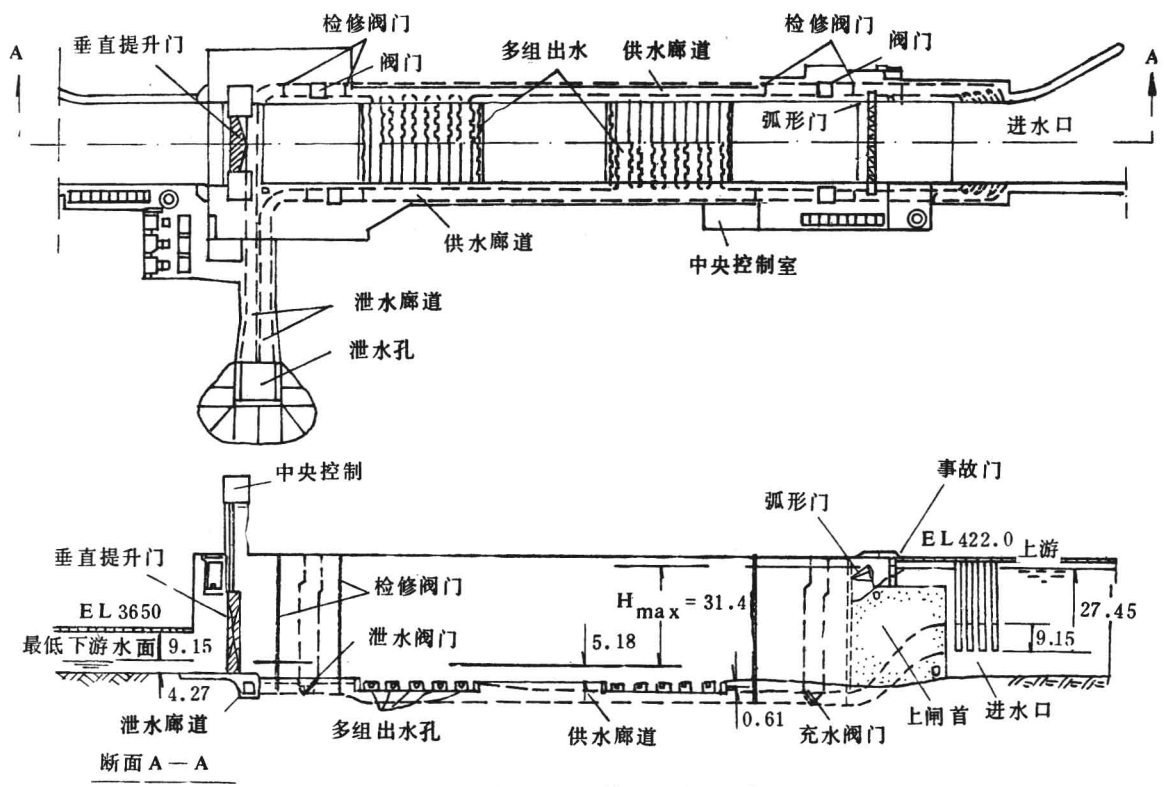


图13 美国斯内克河上的冰港船闸布置图
($H = 31.4\text{ m}$ 有两条供水廊道和多组出水孔)

(6) 闸门或阀门开度的允许比值

当最大系缆力不超过 $G_s / 600$ ，过闸时使用的系船缆索长度为 2 至 6 m 的情况下，闸室充水过程中的水面比降大约可以定为 $I_w \leq 0.40\text{‰}$ 。

在充水过程的第一阶段，根据上述值确定不同充水系统类型流量比 de/dt 的允许增加值。由于 de/dt 初始值主要取决于闸门或阀门开度 n 的比值 (m^2 / s)，各种不同充水系统类型的允许比值列入表 1。

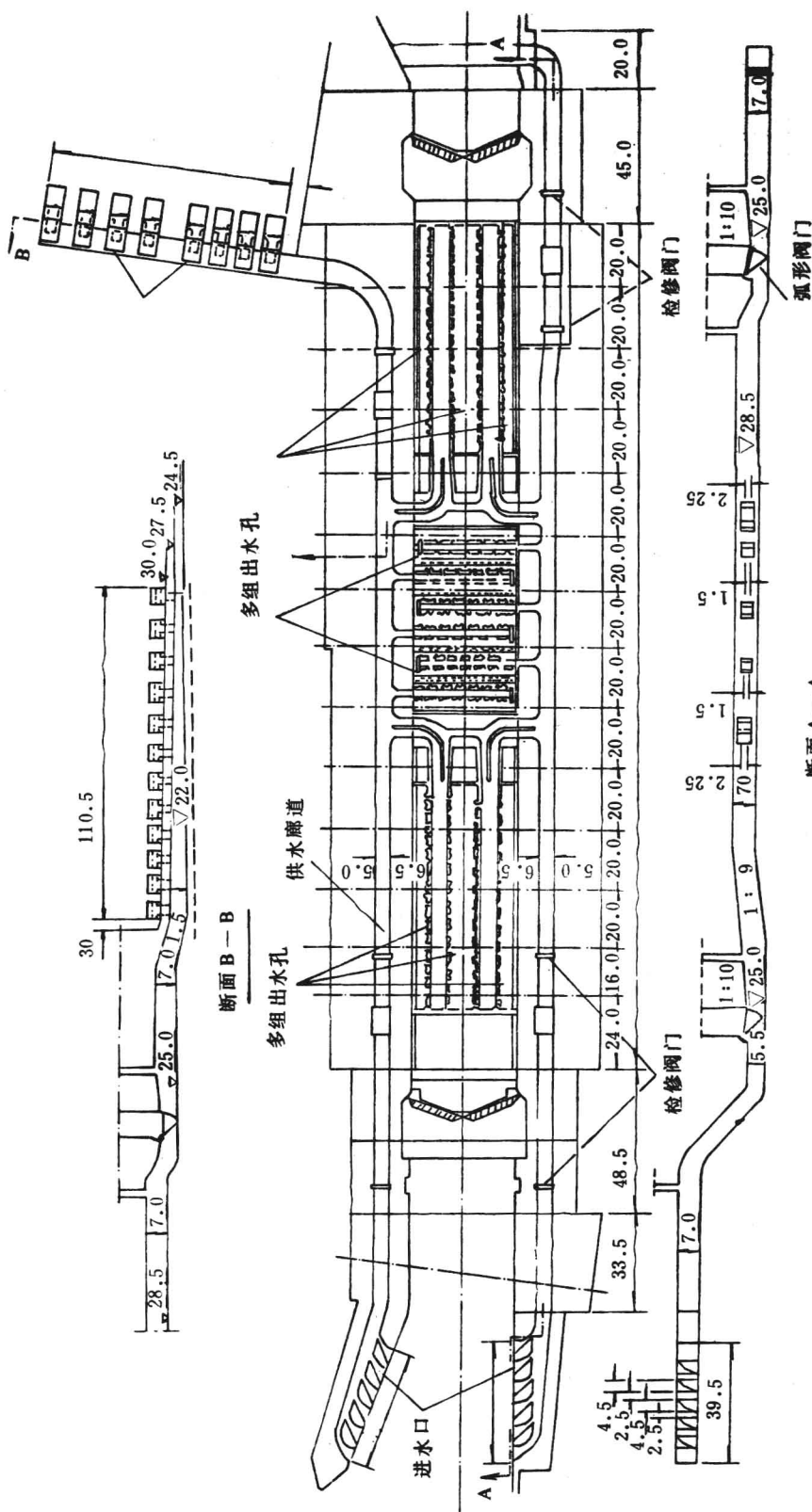


图 14 中国葛洲坝 1、2 号船闸 ($H = 27.0\text{ m}$) 的充水系统
(1 号船闸不是这种型式—编注)

表 1 闸门或阀门开度允许比值

船 闸 充 水 系 统	闸门开度允许比值 (m^2 / s)	
	当闸室宽度为 B (m)	B = 12 m
上闸门充水 (淹没水深较小的进水口)	$n < 0.00295 B$	$n < 0.035$
上闸门或闸门侧输水廊道充水 (淹没水深较大的进水口)	$n < \frac{0.005 B}{\sqrt{H_{tot}}}$	$n < \frac{0.072}{\sqrt{H_{tot}}}$
底部出水口长廊道充水	$n < \frac{0.016 B}{\sqrt{H_{tot}}}$	$n < \frac{0.20}{\sqrt{H_{tot}}}$
有多组出水孔的供水廊道充水	$n < \frac{0.10 B}{\sqrt{H_{tot}}}$	$n < \frac{1.20}{\sqrt{H_{tot}}}$
调节池充水	$n < \frac{0.10 B}{\sqrt{H_{tot}}}$	$n < \frac{1.20}{\sqrt{H_{tot}}}$

上述数值粗略地示出, 闸室已知尺度在不危及过闸船舶安全的情况下, 充水阀门或闸门能够开启多快。

(7) 船闸可能达到的充水时间和平均水位上升度

淹没水深较大进水口船闸的充水时间按下式:

$$T_{tot} = \frac{2 A \cdot \sqrt{H_{tot}}}{\mu \cdot a_1 \cdot \sqrt{2g}} + \frac{t_1}{2} \quad (3)$$

式中:

$A = L \cdot B$ = 闸室面积 (m^2);

$a_1 = n \cdot t_1$ = 充水廊道的横断面积 (m^2);

t_1 = 充水廊道阀门的开启时间 (s)。

已知闸室尺度 (A 和 H_{tot}), 船闸可能达到的充水时间仅受充水廊道断面积 a_1 和充水廊道阀门开启时间 (t_1) 的影响, 而后者又受到闸门或阀门允许开度的限制。

充水廊道断面的尺寸主要由设计工程师确定, 同时受经济和结构形状的控制。然而, 对许多通航船闸的评价表明, 船闸尺度及其最佳充水廊道断面 a_1 之间的基本关系是可以确定的。这标绘在图 17 中。公式 (4) 可作为选择最佳充水廊道断面的设计准则:

$$a_1 = 0.0065 (A \cdot L \cdot H_{tot})^{1/2} \quad (4)$$

在使用表 1 和公式 (4) 设计准则的情况下, 可确定不同类型充水系统的可达到的充水时间和在充水过程中平均水位上升速度 (m / min) (表 2)。

过闸时 (包括采用等惯性充水系统)、最高平均水位上升速度在 $3.5 m / min$ 范围内 (如法国的东泽尔 — 蒙德拉哥船闸和中华人民共和国葛洲坝 3 号船闸)。 作者认为,

如果设计恰当, 平均水位上升速度大约可提高到 $V_m = 5.0 \text{ m/min}$ 。

表 2 不同充水系统可达到的平均水位上升速度 / 1 /

船 闸 充 水 系 统	闸室水位平均上升速度 V_m (m/min)	
	$t_{max} < t_1$	$t_{max} = t_1$
上闸门或闸门侧输水廊道充水 (淹没水深较大的进水口)	$V_m < 4.0 \frac{\sqrt{H_{tot}}}{L}$	$V_m < 3.4 \frac{\sqrt{H_{tot}}}{L}$
底部出水口长廊道充水	$V_m < 5.4 \frac{\sqrt{H_{tot}}}{L}$	$V_m < 3.4 \frac{\sqrt{H_{tot}}}{L}$
有多组出水孔的供水廊道充水	$V_m < 13.0 \frac{\sqrt{H_{to}}}{L}$	$V_m < 10.0 \frac{\sqrt{H_{tot}}}{L}$

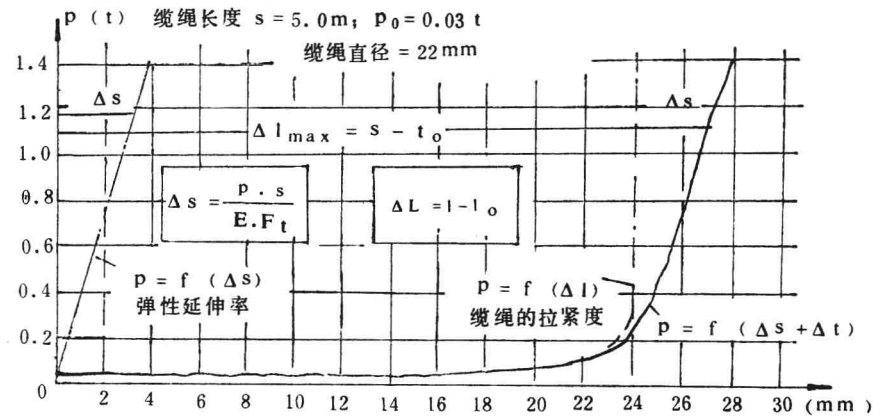


图 15 缆绳作用力与距离的关系曲线

(8) 上、下游引航道的情况

由运河船闸的上游引航道取水充水时, 引起上游运河的负波。负波的断面呈现出流量曲线的映象 (图 18), 它在长度和深度上都变了形 (图 (9))。上游 (或下游) 波速可由下式求得:

$$W \approx \sqrt{g \cdot \frac{A_v}{B_v}} \tag{5}$$

式中:

- A_v = 引航道的横断面积 (m^2) ;
- B_v = 引航道的平均宽度 (m) 。

用上述值可求得波浪通过时引航道的最低水位。

$$Z_{\max} = \frac{Q_{\max}}{W \cdot B_v} \quad (6)$$

式中 $Q_{\max}$ 是充水过程中进入闸室的最大流量。

为了避免上游（或下游）引航道内过大的船舶系缆力，波的前半部和后半部的比降（图19）不超过 $I_w = 0.40\%$ 。

根据上述值求出在充水过程的第一阶段闸室流量比的允许增加值 $1/\epsilon$ ：

$$\frac{de}{dt} < 0.0034 \cdot A_v \quad (7)$$

在把船闸里的水泄到下游引航道时也要发生类似情况。

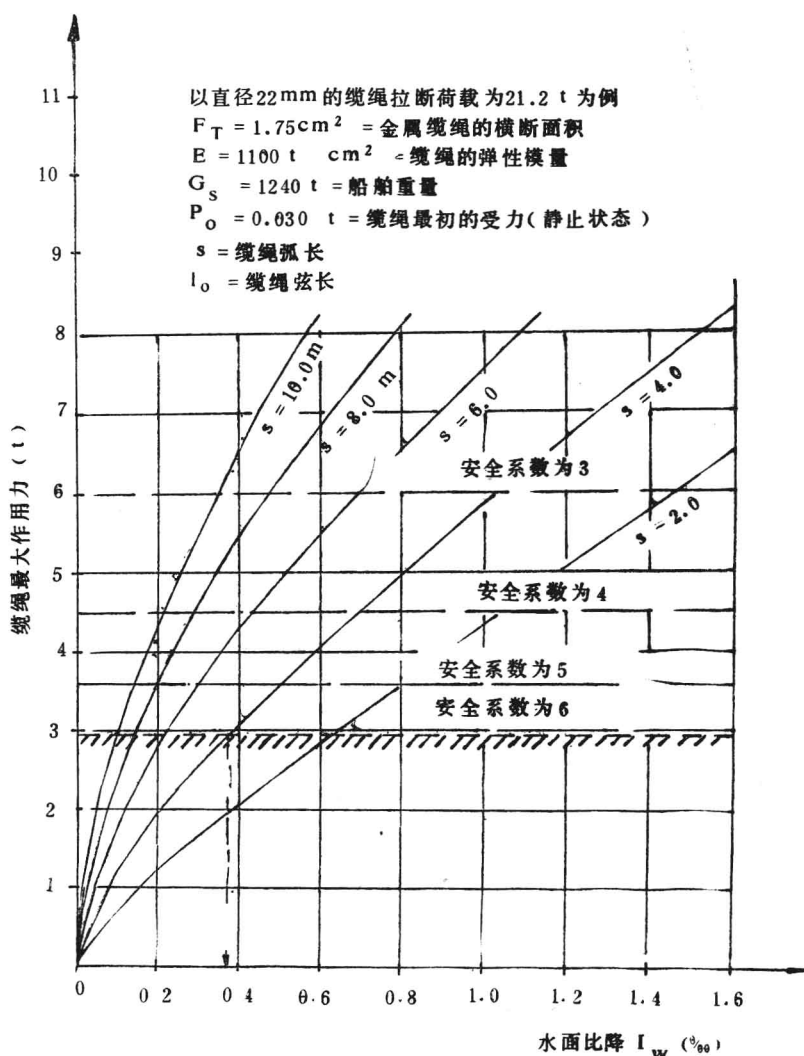


图16 缆绳最大作用力与水面比降和缆绳长度的函数关系

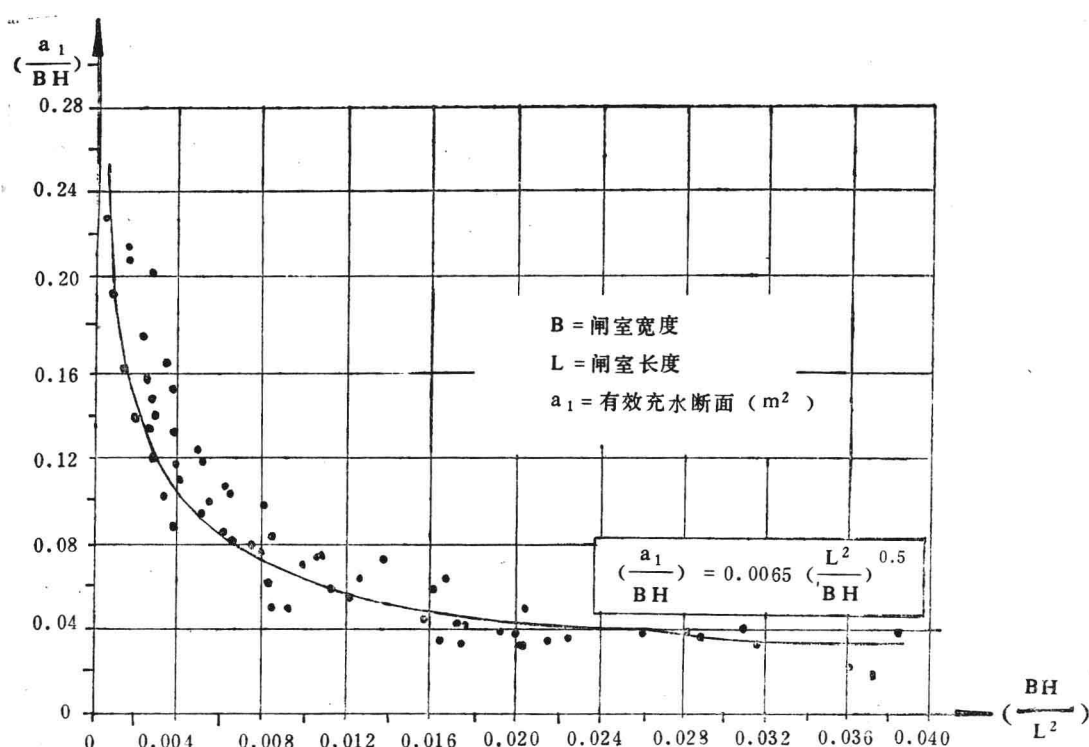


图17 船闸尺寸与廊道有效充水断面的关系曲线

3、垂直升船机和斜面升船机

在过去的200年内，大约有60个垂直升船机和运河斜面升船机建成，然而它们之间的运输原理迥然不同。

早些时候，在水道的上、下游之间，在有轨道或干平台上用带轮子的承船厢运送小的平底船。此类型最新的例子是中华人民共和国汉江上的丹江口升船机（图20）。当今通常把船浮在充水的承船厢里，船舶运输可用垂直升船机、纵向或横向运河斜面升船机

（1）垂直升船机

就升船机而言，往往把浮在承船厢里的船舶垂直升起或降下。充满水的承船厢的总重，由作用在浮筒上的上举力（承船厢在浮筒上）或者由平衡重来平衡。图21示出一些垂直升船机的例子，但其中只有A至C类型在生产中应用，而D和E两种类型从未采用过，仅仅在历史上引起过兴趣。

至于平衡重式垂直升船机（图21，A），满载的承船厢由塔柱顶上滑轮的金属绳吊起，绳的另一端有平衡重。当承船厢升到顶端，为了补偿金属绳的重量，把平衡链由平衡重的下端通过到承船厢的下面，这样在每次运送承船厢时都能使承船厢和平衡重达到平衡。

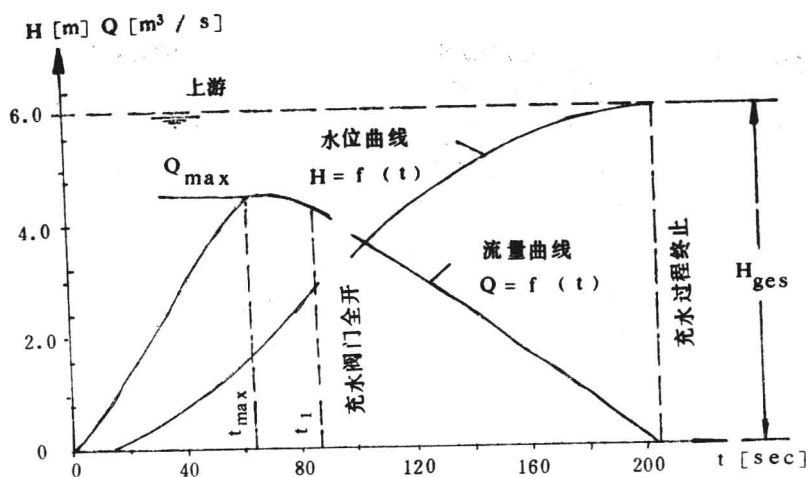


图18 闸室充水特性(水位、流量关系曲线)

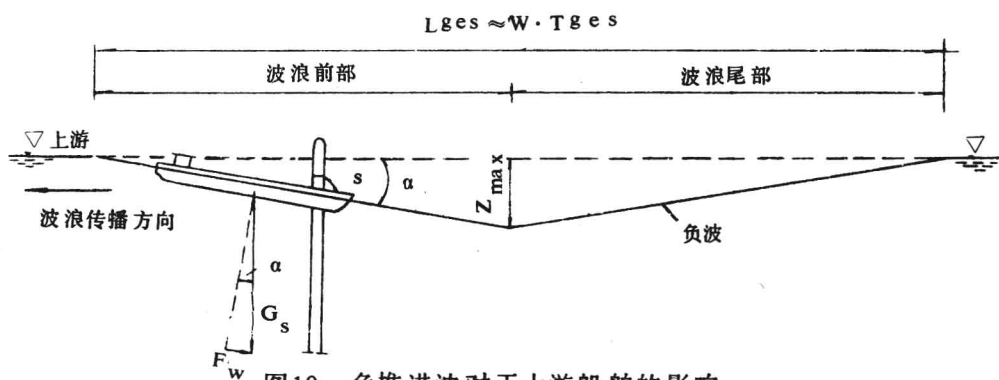


图19 负推进波对于上游船舶的影响

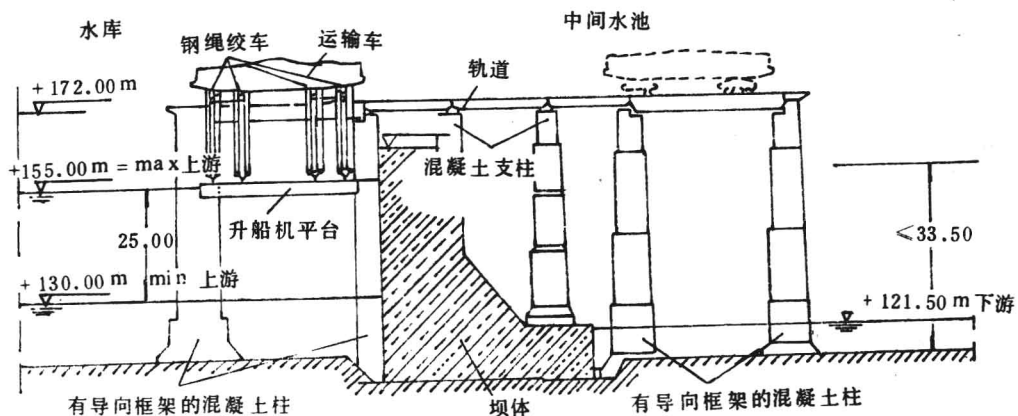


图20 中国丹江口垂直升船机于运原理

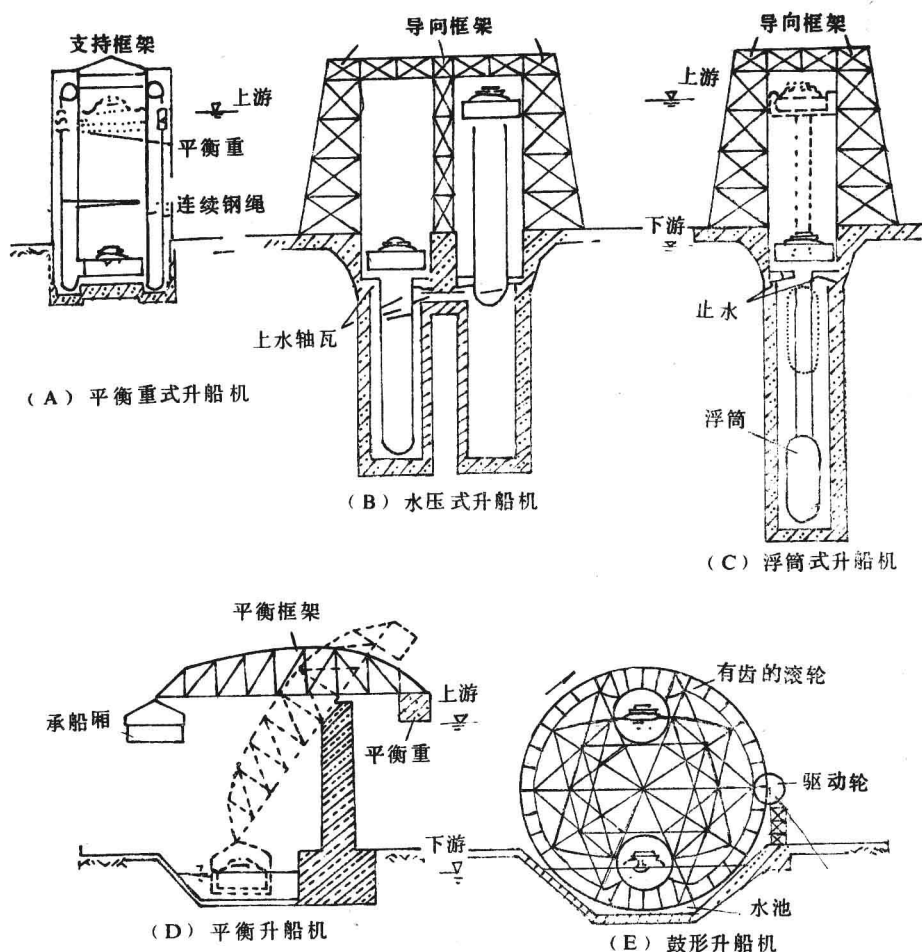


图21 垂直式升船机的方案选择

提升和降落承船厢是借助于小马力的电动机，克服摩擦阻力。

这种类型的升船机最著名的是联邦德国易北支运河上的吕内堡升船机，它有两个独立工作的承船厢，其尺寸为 $100 \times 12 \text{ m}$ ，克服的落差为 38 m （图22）；还有比利时中央运河上的斯特勒比一蒂厄升船机，至今仍在建设中，它是现今最高的升船机，克服的落差为 73.15 m （图23）。

水压式升船机是用两个支撑在圆柱上的平衡承船厢操作。圆柱插入充满水的密封的圆竖井中（图21，B）。两个圆竖井用一根带阀门的管子连通，水流从一个竖井到另一个竖井。两个承受船厢同时工作，在顶端的一个承船厢超载时开始向下运动。

这种形式的垂直升船机最初由英国设计。最近的三个水力升船机，每个水头 $H = 16.9 \text{ m}$ ，是1917年在比利时中央运河上投入运行。

第三种垂直升船机是用一个浮筒式系统（图21，C）。在这种情况下，承船厢支撑在若干个浮筒上，而浮筒浸没在充满水的竖井中。承船厢的总重量靠作用在浮筒上的上