

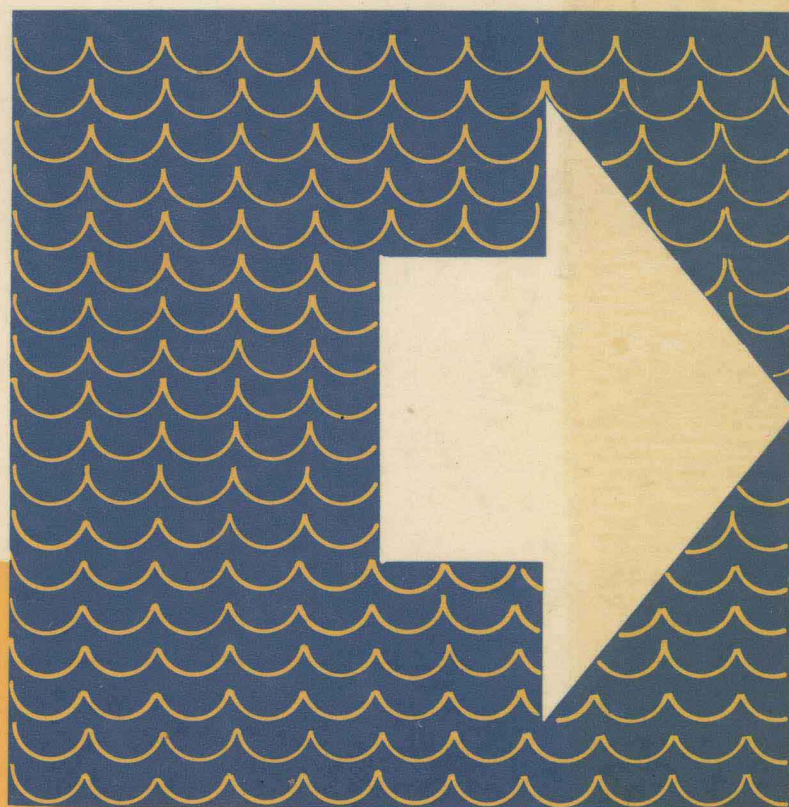
列日大学教授

比利时皇家科学院通讯院士

N. M. 德乌斯 著

通航船闸

陈士荫 金煜 译



大连工学院出版社

通 航 船 闸

列 日 大 学 教 授

比利时皇家科学院通讯院士

N. M. 德乌斯 著

大 连 工 学 院

陈士荫 金煜 译

大连工学院出版社

1988年

内 容 提 要

西欧(包括比利时)是世界上内河航运网最发达的地区。本书译自比利时列日大学 N. M. 德乌斯教授著的《Les écluses de navigation》。书中集中地介绍了西欧的船闸建设经验,对船闸的闸室、闸门、输水系统等的设计方法有较详尽的说明,对高水头船闸及升船机也用较多的篇幅进行讨论。本书可作为水道及港口专业学生的重要教学参考书,也可作为有关的设计、施工及科研单位的参考书。本书译稿经大连工学院钱令希教授审阅。

通 航 船 闸

Tonghang Chuanzha

(比) N. M. 德乌斯 著

陈士荫 金 煜 译

大连工学院出版社出版(大连市甘井子区凌水桥)

大连船舶生产服务公司印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 17 字数: 398 千字

1988年5月第1版 1988年5月第1次印刷

印数: 0001—1500册

责任编辑: 王世连 封面设计: 葛 明 责任校对: 孙心伟

ISBN 7-5611-0068-X/U·1 定价: 3.58元

前 言

内河通航船闸(及海船闸)是土木工程中最复杂的工程建筑物之一。其涉及面相当广泛,需要多种专业知识作为基础。

可以设想把对船闸的研究工作细分为:基础、闸墙稳定、上下闸门、阀门、灌泄水等五个部分,把它们分别交给有关的专家去研究。采用这样的工作方式,可能永远得不到一个优化的设计。我们应从全局的观点出发,总体地把握所研究的问题。例如:船闸型式的修改可能导致对闸门、输水系统的型式作另一种选择;反之,输水型式的变更也会影响到船闸的结构构造上的修改。

本书阐述了所有与船闸建设有关的基本概念,目的是帮助读者能作出安全合理的优化船闸设计。

本书是作者二十年对于通航船闸研究思索、模型试验及设计经验的结晶。它是列日大学土木工程系通航船闸课程的基础教材,也是该系土木工程建筑专业毕业设计的必备参考书。

书中归纳了比利时和其他欧洲国家的船闸建设经验。

书中采用了近几年来在列日大学水工实验室完成的船闸模型实验研究的插图和照片。

N. M. 德乌斯

1985年 1 月

目 录

绪论	(1)
第一章 闸室	(8)
I.1. 概述	(8)
I.2. 闸室式船闸	(9)
I.3. 闸室式船闸的有关术语	(13)
I.4. 承重底板式船闸闸室的总体稳定	(14)
I.5. 承重底板下地基反作用力的分布图形	(17)
I.5.1. 全底板	(17)
I.5.2. 分开浇筑的底板与闸室墙	(19)
I.5.3. 具有承重底板的闸室内力分析	(21)
I.6. 坚实地基上承重底板的计算方法	(26)
I.6.1. 弹性地基梁法	(26)
I.6.2. 德·比尔法	(30)
I.7. 其他类型的闸室结构	(45)
I.7.1. 非承重底板式闸室	(45)
I.7.2. 高桩式闸室墙	(45)
I.7.3. 板桩式闸室墙	(46)
I.7.4. 斜坡式闸室	(47)
I.8. 闸室式船闸的构造	(48)
I.8.1. 闸首	(48)
I.8.2. 闸室	(49)
I.9. 建筑材料的选用	(54)
I.10. 船闸的基础和施工	(54)
I.11. 船闸的辅助设备	(57)
I.12. 节水池	(58)
I.13. 船闸的维护	(58)
第二章 船闸闸门	(59)
II.1. 人字闸门	(59)
II.2. 人字闸门的受力分析	(60)
II.2.1. 处于开启位置时的人字闸门	(60)
II.2.2. 处于关闭位置时的人字闸门	(61)

II.3. 人字闸门的构造及尺寸的初步选定	(64)
II.3.1. 横梁式闸门	(66)
II.3.2. 立柱式闸门	(66)
II.4. 人字木闸门的构造	(67)
II.5. 金属闸门的构造	(68)
II.6. 混合式闸门	(70)
II.7. 底枢	(70)
II.8. 顶枢的颈轴、轴套及锚固	(75)
II.9. 人字闸门的优缺点	(77)
II.9.1. 优点	(77)
II.9.2. 缺点	(77)
II.10. 单扇旋转门	(78)
II.11. 扇形顶靠闸门及三角闸门	(78)
II.12. 浮力平衡闸门及浮式闸门	(81)
II.12.1. 浮力平衡的旋转闸门	(81)
II.12.2. 浮式闸门	(81)
II.13. 平面闸门	(81)
II.13.1. 概述	(81)
II.13.2. 提升式闸门	(83)
II.13.3. 滑移式、滚移式及悬移式横拉闸门	(85)
II.14. 其他类型的闸门	(87)
II.15. 平面面板的计算	(89)
II.15.1. 作为板的受力	(89)
II.15.2. 有效宽度	(91)
II.15.3. 应力的组合	(94)
II.16. 平面闸门的初步尺寸计算方法	(94)
II.17. 考虑结构抗扭刚度的闸门尺寸计算方法	(96)
II.18. 平面闸门不考虑抗扭刚度的计算方法	(100)
II.19. 人字闸门不考虑抗扭刚度的计算方法	(103)
II.19.1. 垂直作用于面板上的压力的影响	(103)
II.19.2. 顶靠	(103)
II.20. 应力的精确计算方法	(104)
II.20.1. 概述	(104)
II.20.2. 无肋板微分方程的建立	(104)
II.20.3. 有肋板微分方程的建立	(106)
II.20.4. 有肋板微分方程的求解思路	(109)
II.21. 结构的优化	(113)

II.22. 容许应力.....	(114)
II.23. 关于单扇闸门的选型、尺寸计算和应力验算的讨论.....	(114)
II.23.1. 概述.....	(114)
II.23.2. 单扇闸门的分析.....	(115)
II.23.3. 材料最佳使用分析.....	(115)
II.24. 曲面面板闸门的计算.....	(118)
II.25. 大型横拉门的计算.....	(118)
II.26. 事故闸门.....	(122)
II.27. 闸门的安放与维护.....	(122)
第三章 输水设备与输水过程	(123)
III.1. 概述	(123)
III.2. 老式输水设备	(124)
III.3. 现代输水设备	(131)
III.4. 灌泄水的一般方程	(132)
III.4.1. 伯诺里方程	(133)
III.4.2. 连续方程	(133)
III.5. 水头损失的确定	(133)
III.6. 对称布置的环形短廊道灌泄水研究	(138)
III.6.1. 总的限制条件	(138)
III.6.2. 灌泄水的基本方程——准恒定流假定	(139)
III.7. 灌泄水基本理论	(140)
III.7.1. 方程式及其解	(140)
III.7.2. 阀门瞬间开启	(142)
III.7.3. 缓慢开启: $\omega = K' t$	(143)
III.7.4. 缓慢开启: $\omega = K'' t^2$	(146)
III.7.5. 上述三种情况的图表对照比较	(148)
III.7.6. 实例	(149)
III.7.7. 常量	(150)
III.7.8. 讨论	(151)
III.7.9. 瞬时功率	(151)
III.8. 准恒定流灌泄水方程 (3) 的精确求解.....	(152)
III.8.1. 线性开启方式	(152)
III.8.2. 最短输水时间的开启方式	(153)
III.8.3. 实用开启方式	(156)
III.9. 准恒定流假定的灌泄水方式计算实例	(157)
III.9.1. 一些计算结果	(157)
III.9.2. m 值的影响	(165)

Ⅲ.10.	阀门后压强的计算	(167)
Ⅲ.11.	灌泄水时的能量耗散	(169)
Ⅲ.12.	闸室内的水体运动	(171)
Ⅲ.13.	河段内的水体运动	(172)
Ⅲ.14.	长廊道与侧支管输水	(172)
Ⅲ.15.	灌泄水时水体的实际运动	(174)
Ⅲ.16.	非恒定流灌泄水方程的积分特例(闸室灌水)	(175)
Ⅲ.17.	由两条纵向廊道和一系列侧支管构成的对称输水系统的水力研究——非 恒定流假定	(185)
Ⅲ.18.	带节水池的灌泄水	(191)
Ⅲ.19.	活门	(193)
Ⅲ.20.	输水廊道的阀门	(194)
Ⅲ.20.1.	概述	(194)
Ⅲ.20.2.	提升式平面阀门	(195)
Ⅲ.20.3.	弧形阀门	(196)
Ⅲ.20.4.	圆筒形阀门	(198)
Ⅲ.20.5.	蝶形阀门	(199)
Ⅲ.20.6.	对各类阀门都应注意的一点	(200)
Ⅲ.20.7.	阀门的缓慢开启	(200)
Ⅲ.21.	虹吸输水	(200)
第四章	闸门启闭设备	(202)
Ⅳ.1.	旋转式闸门的启闭	(202)
Ⅳ.2.	旋转式闸门的启闭阻力	(202)
Ⅳ.2.1.	顶枢阻力矩 M_c	(202)
Ⅳ.2.2.	底枢阻力矩 M_p	(202)
Ⅳ.2.3.	摩擦系数值	(203)
Ⅳ.2.4.	水体阻力矩 M_e	(203)
Ⅳ.2.5.	水面变动产生的阻力矩 M_w	(203)
Ⅳ.2.6.	惯性阻力矩 M_i	(204)
Ⅳ.2.7.	对阻力的深入研究	(204)
Ⅳ.2.8.	η 的大小	(205)
Ⅳ.2.9.	总阻力矩的计算	(205)
Ⅳ.3.	用推拉杆或缆索启闭闸门	(205)
Ⅳ.4.	用杠杆或扇形块启闭闸门	(209)
Ⅳ.5.	用摇杆启闭闸门	(210)
Ⅳ.5.1.	概述	(210)
Ⅳ.5.2.	齿盘半径 r 与摇杆长度 L 的确定	(211)

IV.6.	液压启闭机	(214)
IV.7.	下卧门	(215)
IV.8.	滑移式与滚移式横拉门	(217)
IV.9.	提升式闸门的启闭	(220)
第五章	高水头船闸	(224)
V.1.	单级船闸	(224)
V.1.1.	概说	(224)
V.1.2.	水头高度	(224)
V.1.3.	下部结构	(224)
V.1.4.	闸门	(226)
V.1.5.	灌泄水	(228)
V.1.6.	无节水要求时的灌泄水问题	(228)
V.1.7.	有节水要求时的灌泄水问题	(234)
V.1.8.	灌泄水阀门的特点	(234)
V.1.9.	气蚀问题	(235)
V.1.10.	掺气问题	(238)
V.2.	多级船闸	(238)
V.3.	几座高水头船闸的特征尺寸	(240)
第六章	跨越特高水头的特殊手段	(241)
VI.1.	活动船厢	(241)
VI.2.	液压升船机	(242)
VI.3.	缆索升船机	(244)
VI.4.	浮筒升船机	(248)
VI.5.	垂直升船机的优缺点	(251)
VI.6.	斜面升船机	(251)
VI.7.	水坡	(256)
VI.8.	干式升船机	(257)
VI.8.1.	斜面升船机	(257)
VI.8.2.	垂直升船机	(258)
参考文献		(259)

绪 论

大家都知道，古代人类的文明起源于幼发拉底河、印度河、尼罗河及黄河流域。这些河流不仅提供了农业灌溉用水，它们还提供了一种理想的运输手段——很早以前就有了利用河流顺流而下、靠牵引逆流而上的航运方式。

古代的腓尼基人与希腊人生活在海边，但他们已学会利用各自帝国内的天然河流通航。不过，直到距今 2500~2700 年以前，人类还没有开掘人工运河的想法。

最早开掘的人工运河极可能是在埃及和中国。关于连接地中海与红海的运河的起源，从有关文献尚无法确切查证。希罗多特在他的《第二卷》书中曾记载在埃及平原上有一条“从尼罗河引出”的运河，它自西向东远远延伸，然后折向中部进入红海。按他的说法，这项工程是普萨默蒂居斯的儿子动工兴建的，后来曾被中途放弃，工程最后是达里尤斯（公元前 520 年）完成的。运河全程需要航行四天，可并行两艘战舰。

是否真是达里尤斯开通了这条运河还是个疑问，因为红海高出地中海，海水会淹没整个国家。

人们从有关著作中还会看到普多利美·腓拉迭尔菲这个名字，说是他第一个使用挡潮的应变闸门，防止海水突然侵入陆地。

至于中国，它的西部海拔很高（喜马拉雅山），自西向东、向南有四条大河横贯国土，自北而南依次为：

- 黄河
- 淮河
- 长江
- 珠江

黄河和长江是中国古代灿烂文化的摇篮，从这里出发，这一文化在中国大地上传播开来。

公元前很久，中国就开掘了很多条人工运河，其中有：

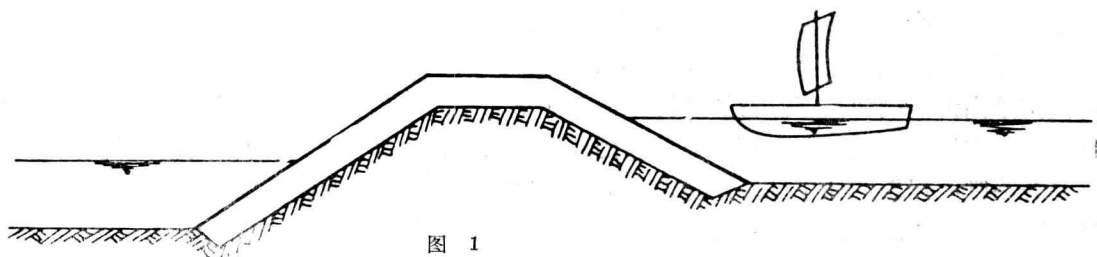
- 连接黄河与淮河的运河（鸿沟），开掘于公元前 722 年~481 年之间的春秋战国时期。
- 南京、长江和淮河之间的运河，开掘于公元前 506 年的周朝。
- 长江与淮河之间的邗沟，建于公元前 485 年的周朝，它是大运河的第一段，中世纪的大运河自北京到杭州绵延 3000 公里，它将首都与四大流域连接起来。
- 连接长江与珠江的灵渠，建于公元前 219 年的秦朝。

古罗马人也有一些规模宏大的运河工程。在尼禄帝国时代，他们通过莱茵河把北海与地中海连接起来，南部有一段是由卡尤斯-马里尤斯（公元前 100 年）完成的，即马利亚娜运河，它斜插罗纳三角洲的一部分，其起点大约在现今的滨海福斯大油港附近。北部还有连接

艾瑟尔河与须德海之间的运河。还有一个叫凡都斯的古罗马大将军曾试图打通索恩河与摩泽尔河之间的通道，但这样巨大的工程是不可能完成的。因为负责修建这条具有政治和军事意义的运河的将领们彼此不和，在皇帝面前相互攻击；此外还有一个很主要的原因，根据有关古罗马文明史的文献记载，那时候的人似乎还没有掌握克服河道上水位差的技术。

关于这一问题，还是看看中国的情况，对那里海拔较低的地区，在连接各条河流的运河上也许不存在很严重的水头差问题。但据文献记载，在公元初年曾有一个技术官员发明了一种可以控制水位的工事，每隔 5 km 设置一个，他使用的极可能是用两端嵌在侧槽内的叠置圆木而形成的挡水结构，显然这种结构起源于水利灌溉系统。

此外，早从公元 4 世纪起，在中国的运河上就已出现了过船的双向坡道（图 1），通过这种坡道可以将船只从一个河段牵引到另一河段内。



后来，中国人很可能用由绞盘操纵的提升门取代了上面所说的叠梁。公元 1000 年，他们在大运河上建造了两座这种闸门以取代两个过船坡道。两闸门相距 75m，这是船闸的最早雏形。由于闸门构造简单、间距很大，要达到水位齐平需要花费很多时间，消耗大量的水，常常不等到水面完全齐平，船只就过闸了。

奇怪的是，虽然中国人一度在这一工程领域处于领先地位，后来却没有看到这方面的实际应用。船闸此后的发展是由欧洲人完成的。尽管如此，在以后的年代里，中国人还是用上述提升门和过船坡道逐段沟通了大运河，最后几段是在 13 世纪的元朝完成的。

关于中国的大运河，麦哲伦（~1515 年）发现这是一条不太容易航行的运河，他写道：“把缆索系在船首上，用 400~500 人在鼓声的指挥下一齐拉纤，另一部分人则用力推动绞盘，开始时很慢，到船只升到坡道的中部，水流变急，鼓声的节奏越来越快，纤夫们使尽浑身力气拉纤，一下子把船拉到上游河段内。”同一年代的另一名旅行家这样写道：“在地形条件不可能将两段运河直接连接起来的地方，人们修建双向坡道，即石砌的斜坡，它能使船只越过高达 4.57m 的水位差从一个河段进入另一河段。当船只驶到下游河段的尽端时，人们用绞盘把船拉到坡道顶部，然后借自重滑入上游河段。”

这里作者难以想象的是中国古代的船只长且载重量大，当船只拉出水面，在最高点处时怎么不会折为两段！

法国国王路易十四在 1685 年派到中国去的传教士的游记中有这样的记载：当他们在大运河上乘船旅行时，曾不得不在两道石砌的直墙之间通过，那里的水流是这样的急，倘若不是船夫们竭尽全力，乘客们可能早已连同船只一起粉身碎骨了。

所以我们赞同贝礼多的观点，中国在 18 世纪还没有通航船闸。

当中国的大运河开掘接近尾声之时，欧洲的水路运输尚处在发展的初级阶段，几乎没有人工开挖的运河，天然河道大多被利用来为磨坊水磨提供动力。在很多河道上，每一磨坊都建有自己的溢流堰以保证水磨有足够的动力，这些溢流堰构成了航运的严重障碍。

直到中世纪末，在荷兰以及其他一些欧洲活跃的小国才在这方面出现较大的改进，人们在溢流堰上修建了一些闸门机构，改善了河道的航行条件。图 2 即为这些闸门机构中的一种，姑且可以把它叫做水闸吧（它还不是船闸）。

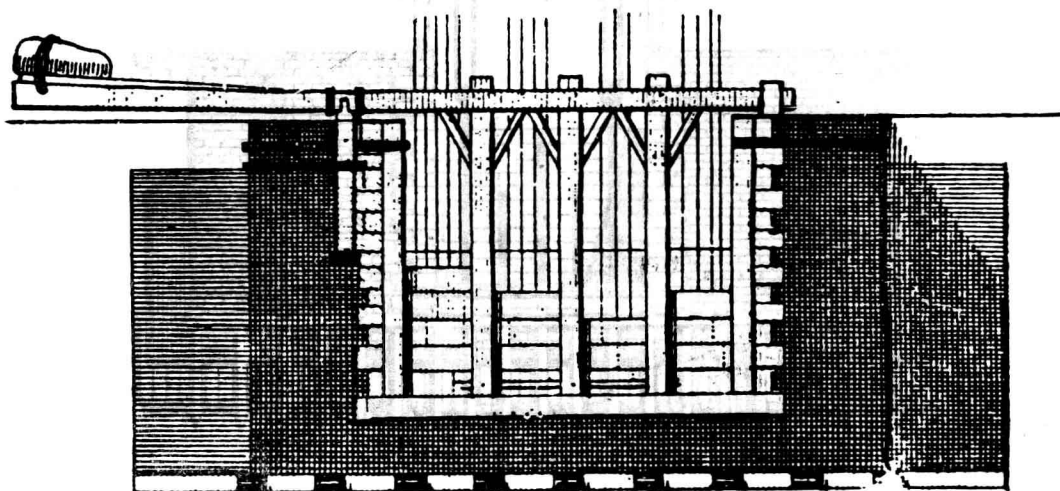


图 2

船只要通过溢流堰时，可以把闸门上的水平插板提起，待上游的水面稍稍下降，下游的水面稍稍上升之后，将闸门绕竖轴旋转开启，船只就可以通行了。船只上行时需要牵引，下行时可顺流漂行，当放流流速很大时，船只可能要向下冲出好长一段距离。

这种闸门起源于何时至今仍不清楚，但早在 18 世纪末以前，它们便已出现在弗朗德勒、德国、英国、法国和意大利。这种闸门在 19 世纪尚可见到，特别是在巴黎与夏龙之间的马纳河上，那里的航行是在有高程差的几个河段上进行的。

大家知道，荷兰的存在离不开海堤以及堤内侧的排水渠，其中有些排水渠得到加宽、整治以利通航。有时需要将货物从海堤的一侧运到另一侧，这时便自然产生了与中国相似的过船双向坡道。第一个坡道很可能是在 1148 年，建于乌德勒支附近新莱茵河上的奥特斯普尔坡道。有时，在当地条件许可的条件下，就在海堤上打开一个较宽的缺口，缺口用闸门调节以容许船只进出，图 3 是荷兰的这种带有门架的提升式闸门。当海湾或河口内的潮水位与堤内侧的水位齐平时，闸门开启，船只就可以通行。在其他时候则航运中断。1184 年纽波特提到的所谓“Magna slusa”和 Gouda 的闸门可能都是这一类型的。

下一阶段的发展是有决定意义的：建造两道闸门，中间形成一水池。有确切证据的第一个这样的闸门建于 1373 年，它在弗雷斯韦克。乌德勒支运河在这里进入莱克河。这个船闸规定每周开放三次。由于过闸时间相当长，只是在向弗雷斯韦克运送给养时才使用。

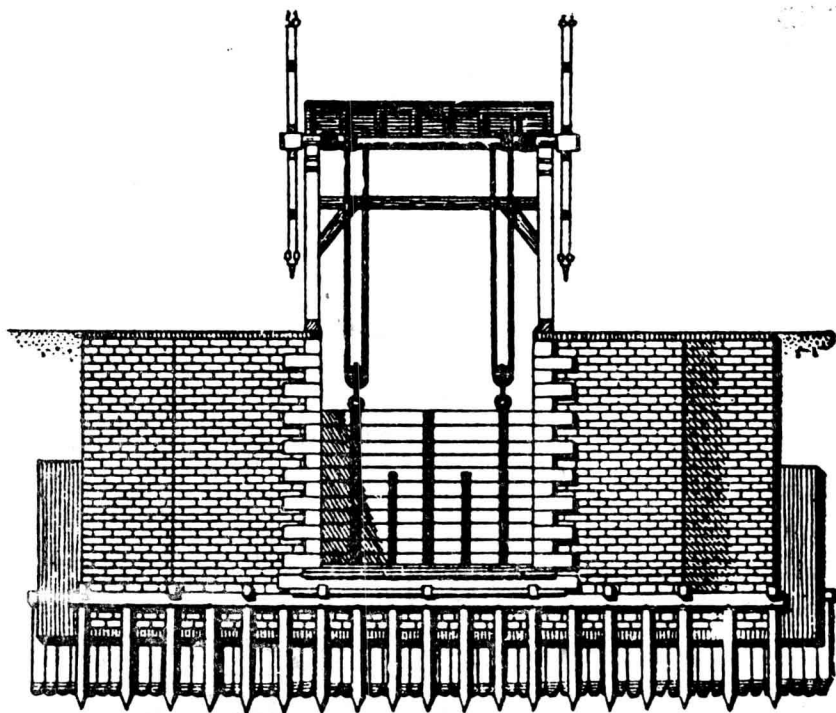


图 3

在 1394~1396 年之间，在利厄河上的达梅建造了一座由石砌的闸室和两道提升式闸门构成的船闸，它长 30 m，宽 10 m。与弗雷斯韦克船闸相比，达梅船闸平面尺寸较小，可能是由于航运频繁的要求而出现的，它可能是有史以来第一个（或那些最早出现中的一个）在现代航运意义上的船闸。

最初，船闸都是为克服海水位与运河水位之间的水头差而建造的。此后的进一步发展看来要归功于汉萨同盟内部的商品贸易往来，归功于米兰的古建筑师们。

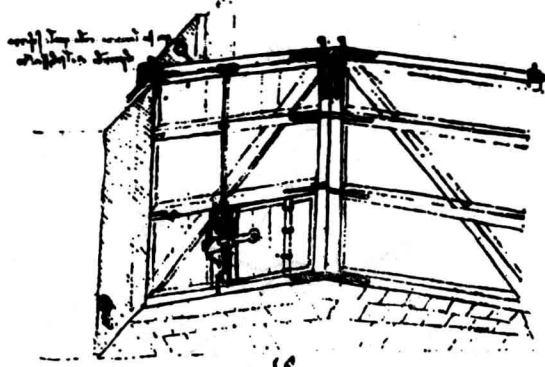
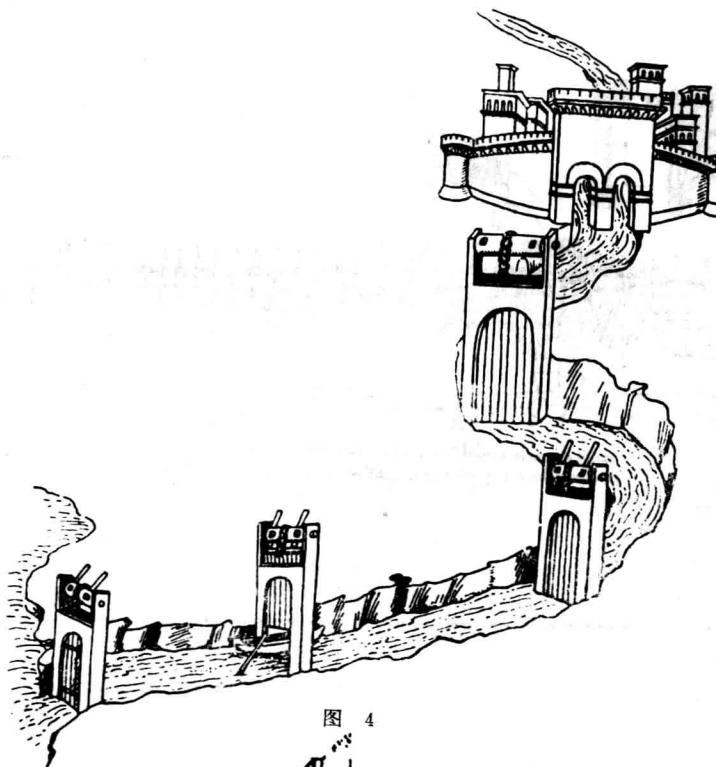
14 世纪初，船只已可从卢卑克（特拉沃河）通过斯坦尼克河直达南面 25km 以外的默尔恩湖，好几座简单的船闸被用来克服 12m 的水头差。

1391 年，人们为打通默尔恩湖通向更靠南的易北河的航线，开掘了一条分水岭式的运河，为减少耗水量，在运河上建造了两座与弗雷斯韦克船闸相类似的船闸。

米兰大教堂的建设是与连接护城河和“大运河”（后者是米兰与马求湖之间的一条运河）的船闸的建设分不开的。因为教堂的建筑材料主要来自马求湖畔的采石场。后来在 14 世纪末与 15 世纪初，人们又在伦巴第修建了多座船闸。

1485 年出版了一本名为“De Re Aedificatoria”的书，作者是阿尔伯特。书中描述了一座大约建于该世纪初的船闸，它有两道提升式闸门，中间留出一只船长的距离。“Codice Laurenziano”一书（出版于 15 世纪末）中的一幅插图证实了这点（图 4）。

再下一步的改进是出自同一世纪的天才莱奥纳多·达·芬奇之手，是他发明了人字闸门（图 5）。



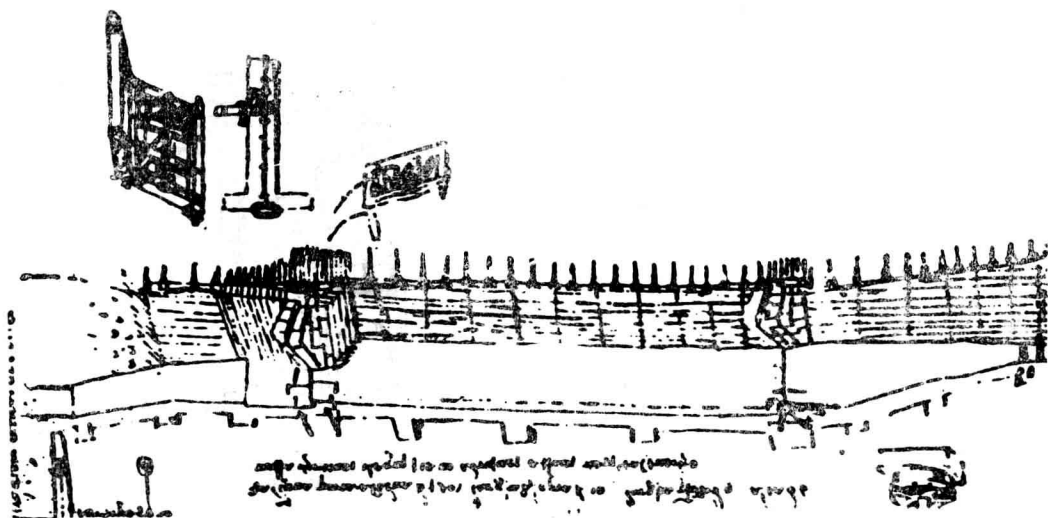


图 6

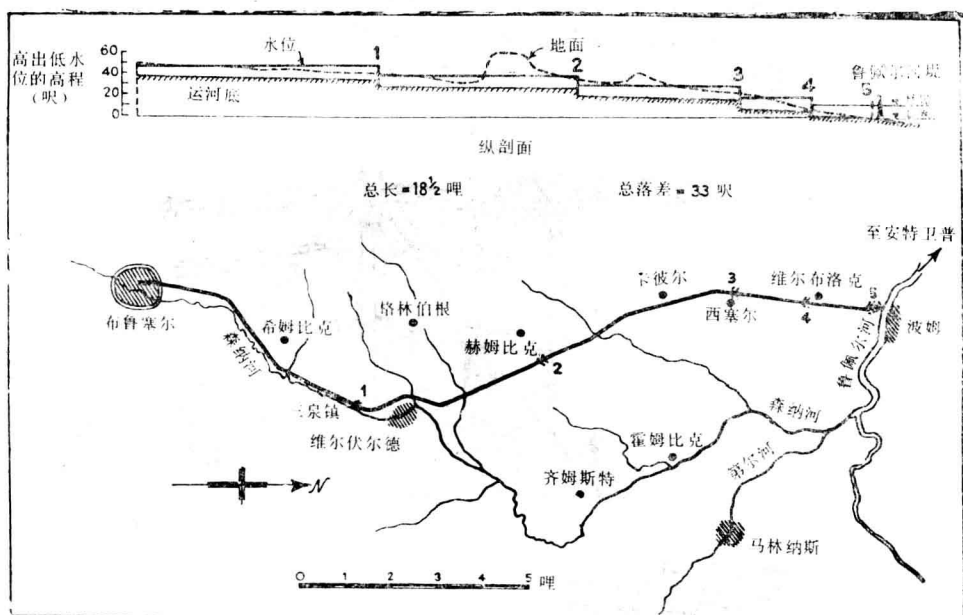


图 7

达·芬奇在 1500 年前后在理论上和细节构造上完善了这种人字闸门，它至今仍是船闸中应用得最广泛的一种闸门型式（图 6）。他在闸门上安装的输水活门，其设计很合乎水动力学原理，这种活门在现代仍是各种输水设备中的一种。

在此后一个世纪里船闸技术又有了新的进步，这一次是在布鲁塞尔通向鲁佩尔河的运河上（图 7）。运河于 1550 年开始开挖，运河上建有 4 座长 60m，宽 20m 的八角形船闸（图 8），船闸的灌泄水是通过闸首输水廊道进行的。

该项工程由冉·洛康吉安完成，它大大改善了布鲁塞尔与安特卫普之间的水运条件，因为在此以前船只要绕道经过森纳河、鲁佩尔河和埃斯科特河。工程并非尽如人意：维尔布洛克船闸出了问题，而赫姆比克船闸由于土体内部发生冲蚀，最后终于倒塌了。

最后想提一下弗朗德勒的鲍辛黑（伊普雷附近）船闸，它可能是第一个带节水池的船闸（图9）。

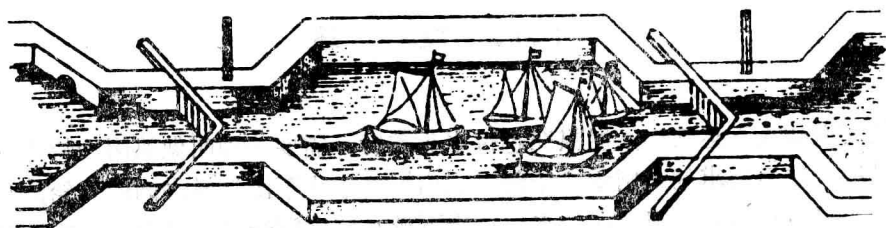


图 8

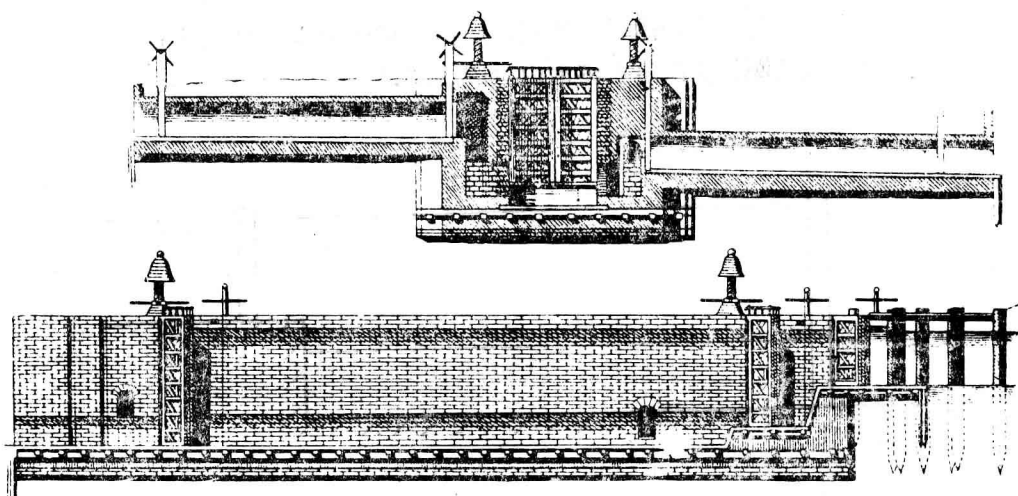


图 9

参 考 文 献

Architecture hydraulique, Belidor, Paris, 1753

Hydraulic Engineering and Sanitation, R. J. Forbes, *A History of Technology*,
Oxford, 1956, Vol. II

Canals and River Navigation before 1750, A.W.S. Kempton, *A History of Technology*
Oxford, 1957, Vol. III

第一章 闸 室

I.1. 概 述

在天然河道和人工运河中，船只在越过水头差时，需要一种叫做船闸的特殊水工建筑物的帮助，最符合航运要求的是闸室式船闸，它由一位于上下游河段之间的、轮流与上下游连通的空间（即闸室）构成。闸室内的水位在上下游水位之间升降，闸室内的船只也随之上升或下降。船闸具有两个闸首和一个闸室，两个闸首实际上就是两座水闸，其闸门称为船闸闸门。

船闸可分为两大类：第一类船闸带有帷墙，内河船闸属于这一类（图 I.1.）。第二类为海船闸，它帮助船只从潮汐河段进入港池内（图 I.2.）。

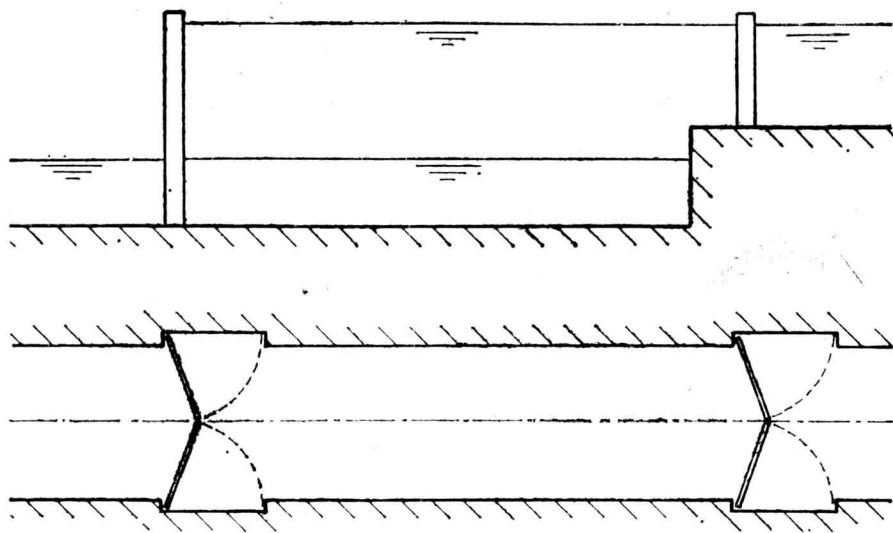


图 I.1.