



# 巴拿马运河船闸省水技术综述<sup>\*</sup>

季晓堂，苏静波，何良德，徐伟杰

(河海大学 港口海岸与近海工程学院，江苏 南京 210098)

**摘要：**针对船闸设计中的水资源利用问题，从省水技术角度出发，总结了国内外发展趋势。重点围绕巴拿马运河船闸中运用到的省水技术展开概念性分类论述，并结合船闸多目标优化设计理念研究各省水技术的应用特点。巴拿马运河船闸省水技术依靠重力实现，且省水效益与省水技术及运行方式直接相关，本质上是水的空间存储的优化设计。采用多因素分析方法，探讨相应船闸运行方式下不同省水技术的耗水率公式，从而计算出省水率。对于水资源综合开发利用、水运节能减排及今后船闸省水技术发展具有重要借鉴意义。

**关键词：**省水技术；巴拿马运河船闸；水资源利用；省水率；多目标优化设计

中图分类号：U 642

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2021)01-0111-06

## Overview of water-saving technology of the Panama Canal locks

JI Xiao-tang, SU Jing-bo, HE Liang-de, XU Wei-jie

(College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** In view of the problem of water resources utilization in the design of ship locks, this paper summarizes the development trends at home and abroad from the perspective of water-saving technology. It focuses on the conceptual classification of water-saving technologies used in the Panama Canal locks and studies the application characteristics of each water-saving technology in conjunction with the lock's multi-objective optimization design concept. The water-saving technologies used in the Panama Canal locks is realized by gravity, and the water-saving benefit is directly related to the water-saving technology and operation mode, which is essentially the optimal design of the spatial storage of water. The multi-factor analysis method is used to discuss the water consumption rate formulas of different water-saving technologies under the corresponding ship lock operation modes, so as to calculate the water-saving rate. It has important reference significance for the comprehensive development and utilization of water resources, energy-saving and emission reduction of water transportation and the future development of water-saving technology of ship locks.

**Keywords:** water-saving technology; the Panama Canal locks; water resources utilization; water-saving rate; multi-objective optimization design

随着我国船闸建设的发展，设计中需要考虑的因素日趋复杂，面临着诸多难题，如创新技术的运用、减少船闸非作业时间、平衡全寿命周期

内的最优质量和最低成本、缩短船舶过闸时间、保证船舶在闸室内的泊稳条件、解决建闸地区水资源匮乏问题、降低船闸自身能耗、解决环境影

收稿日期：2020-04-12

\*基金项目：山东省交通运输科技项目(2017B79)；国家自然科学基金项目(51679081)

作者简介：季晓堂(1997—)，男，硕士研究生，从事港口、航道及海岸工程结构方面的研究。

响问题、降低施工影响及考虑安全问题等。这也意味着船闸设计成为一个多目标的综合优化过程<sup>[1]</sup>。

高水头船闸已成为当今世界船闸发展的趋势之一，而一般船闸仅适用于中低水头枢纽，这是因为阀门工作水头超出一定范围以后，在灌、泄水初期巨大的势能转化而来的高速水流极易诱发空蚀、空化，从而导致阀门段廊道产生破坏并频繁检修<sup>[2]</sup>。同时，由于水资源分布不均衡、很多地区水源匮乏，尤其在枯水季节通航困难，船闸耗水量引起广泛重视。因此出现了一些省水形式或措施，如采用低坝渠化、多级船闸，双线互通船闸(孪生船闸)，带省水池船闸，带中间闸门、带中间渠道或带泵站船闸等，其中带省水池的船闸是最普遍采用的省水形式。这些形式或措施既可以节省船闸运行时的用水量，又可降低船闸的工作水头，避免复杂的水力学问题，简化高水头船闸设计<sup>[3]</sup>。

## 1 省水技术的发展

国外有较多船闸省水技术的应用经验。1)美国拥有 4.1 万 km 的内河航道，建设有 219 座船闸；田纳西河是美国最重要的内河航运通道，其干流全长 1 046 km，落差 513 m，已建成 9 座梯级船闸。2)德国境内有 7 300 km 的内河航道，共建设有 335 座船闸，在莱茵河—多瑙河运河上，从莱茵河的班贝格到多瑙河的凯尔海姆全长 171 km，水位高达 243 m，共建造了 16 座船闸，其中 13 座为省水船闸<sup>[4]</sup>。3)巴拿马在船闸建设中的省水技术运用尤为典型，在全长约 82 km、水位高出海平面 26 m 的运河上先后建造了 3 座双线船闸和 2 座单线三级船闸；双线船闸采用带中间闸门、带中间渠道、多级船闸及双线互通船闸等形式；单线船闸每个闸室带有 3 级省水池，省水效益十分突出<sup>[5]</sup>。4)此外，俄罗斯的卡马河

卡马枢纽建有世界上级数最多的双线 6 级船闸；巴西的图库鲁伊建设有最大水头为 70 m 的带中间渠道船闸。

我国的应用经验相对较少，代表性的工程有 1962 年通航的湖南双牌船闸，采用了具有中间渠道船闸的形式；1995 年投入运行的湖南沅水干流五强溪单线三级船闸；2003 年建成的三峡双线连续五级船闸，其规模和水头差举世无双，是世界上建造技术难度最大的船闸；2015 年建成的西江长洲三、四线船闸，采用了双线互通船闸形式等。

从国内外发展趋势看，各国都十分重视水资源的综合利用。航运又是最环保的运输方式之一，对各国经济发展都具有重大意义。世界上众多的河流都有枯水季节，流域水源匮乏，难以满足全年的通航需求，因此船闸省水技术的研究很有意义。

## 2 巴拿马运河船闸中的省水技术

巴拿马运河是连接太平洋和大西洋的重要航运通道，被誉为世界七大工程奇迹之一。老船闸于 1914 年竣工，第三线船闸于 2016 年竣工。图 1 中巴拿马运河采用了船闸运河方案，这是因为太平洋侧潮差高达 6 m，大西洋侧潮差仅 0.6 m，不利于船舶安全通航。该运河通过修建大坝拦截河流和湖泊来维持通航所需要的水位，其水源主要来自查格雷斯河和加通湖。查格雷斯河上游流域面积约占该运河流域总面积的 1/3，它为运河通航提供了几乎一半的用水量<sup>[6]</sup>。巴拿马运河还对流域植被生长、物种多样性具有重要作用，同时承担着为当地居民提供日常用水的功能，因此巴拿马政府十分重视运河的水资源管理，已建成的三线船闸采用了多种省水技术，均体现出巴拿马的节水理念。

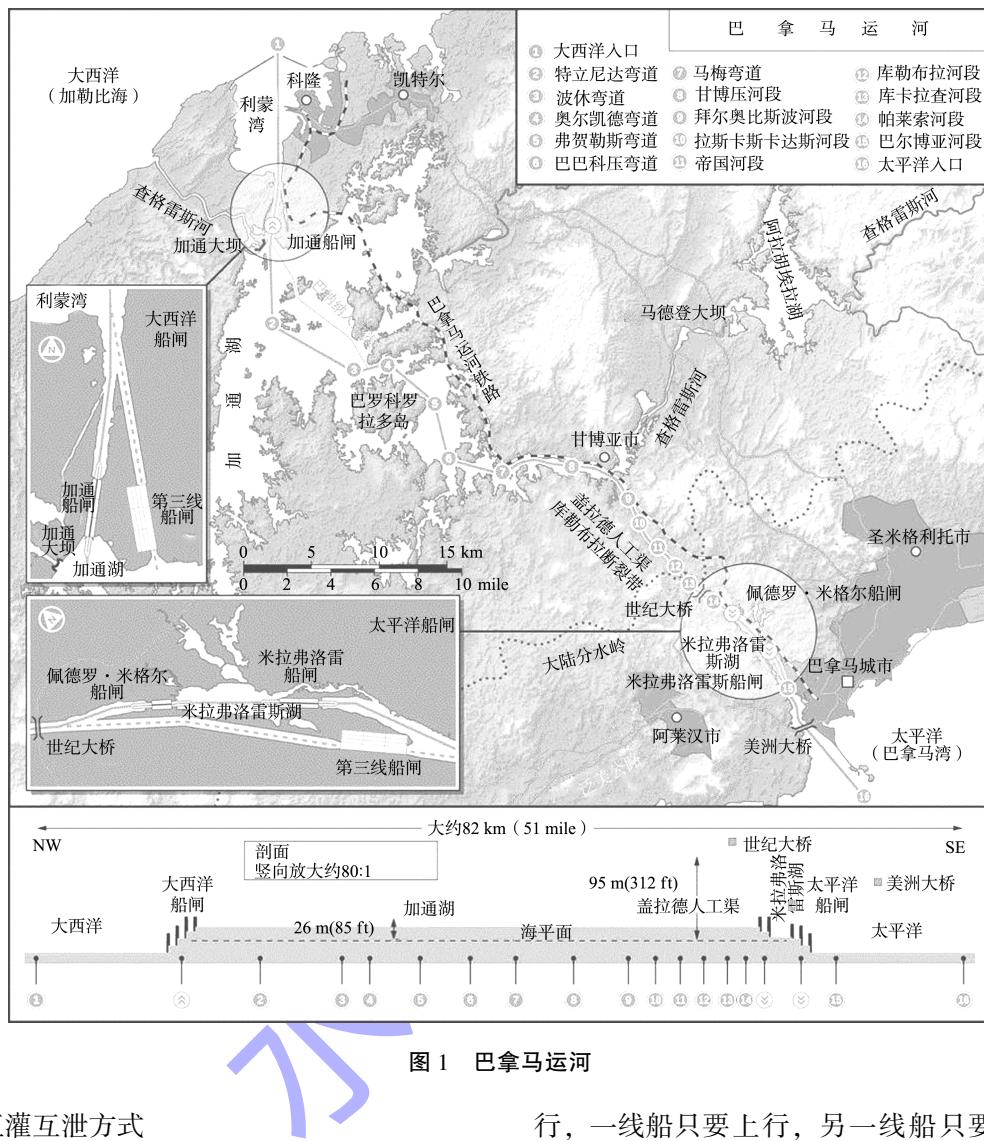


图 1 巴拿马运河

## 2.1 双线互灌互泄方式

巴拿马的佩德罗·米格尔船闸(图2)为双线互通单级船闸形式,设计有效尺度为 $305\text{ m} \times 33.53\text{ m} \times 12.56\text{ m}$ (闸室长×宽×门槛水深),设计水头差9.4 m,选用人字闸门,允许通过的最大船型为巴拿马型,采用穆拉斯机车辅助通航<sup>[7]</sup>。



图 2 佩德罗·米格尔船闸

行,一线船只要上行,另一线船只要下行。当两线船只进入闸室后,需下行船只所在闸室可以通过中心墙的涵洞<sup>[8]</sup>向需上行船只所在闸室供水。待两线闸室水位齐平或者有一定的水位差时,通过关闭阀门结束横向供水。然后需上行船只所在闸室通过上游供水完成通航,需下行船只所在闸室向下游排水完成通航。

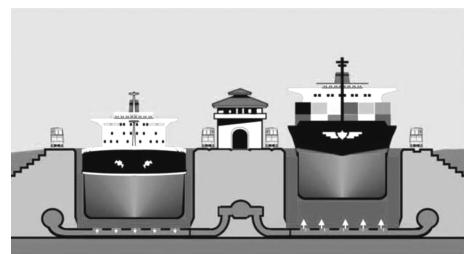


图 3 互灌互泄原理

省水原理。如图3所示两条线分别作单向通

单级双线互通船闸可将工作水头减半,为船

闸通航省下最大 50% 的耗水量。其特点是运行方式灵活，两线船舶既可以同向通行，也可以反向通行，甚至一线可以作为另一线的省水池等。巴拿马运河老船闸可以互灌互泄，但现在实际运行基本不采用这种方式，其主要缺陷<sup>[9]</sup>是操作复杂、会增加船舶过闸时间、影响通过能力，而且要求两线反向运行等。

多级船闸一般单向运行，一条线上行，一条线下行，是为了提高通过能力；如果采用互灌互泄方式，可以同时上行或下行，关键是要求两侧闸室一灌一泄，而相应的上、下级闸室对应为泄、灌，操作程序多，对通过能力的影响甚于单级船闸。因此多级船闸不宜采用互灌互泄方式。

## 2.2 纵向梯级灌泄方式

巴拿马的米拉弗洛雷斯船闸、加通船闸、第三线的两个船闸均为多级船闸形式。老船闸均选用人字闸门，第三线船闸选用了横拉闸门。以加通三级船闸（图 4）为例，设计水头差 25.9 m，其设计有效尺度最大能通过巴拿马型船舶。



图 4 加通船闸

省水原理。如图 5 所示，将总水头差纵向划分为 3 个梯级，船舶依次通过 3 个闸室。以下行为例，先要从上游向第 1 个闸室供水，待水位齐平时方可打开闸门使船只通行；然后第 1 个闸室向第 2 个闸室供水后，使船只通过；同理，第 2 个闸室向第 3 个闸室供水后，船只进入第 3 个闸室；最后，第 3 个闸室向下游排水后，船闸完成通航。

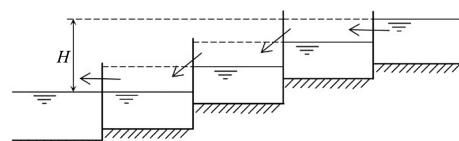


图 5 纵向梯级灌泄原理

多级船闸适用于水头差很大的地区，加通船闸划分了 3 个水级，使得每个闸室的水头均为原来的 1/3，从而可达到简化输水系统设计的目的，同时用水量可为单级船闸的 1/3。但这种形式的缺陷是建造成本大、过闸时间长，且闸室利用率往往较低，故船闸级数不宜太多。

带中间闸门形式具有类似于多级船闸形式的特点，它是将一个闸室一分为二，在不使用全部水的情况下运输较小的船只，例如运河拖船和游览船。但随着船舶大型化发展，这种形式很少使用，在早期巴拿马运河船闸建设中有较多辅助闸门的运用。

## 2.3 省水池灌泄方式

巴拿马运河第三线的两个船闸均为带省水池船闸形式，每个船闸分 3 个连续梯级，每一级设置 3 个省水池（图 6），均布置在闸室一侧，其输水系统布置见图 7。设计有效尺度为 426.72 m × 54.86 m × 18.29 m，最大允许超巴拿马型船舶通航，采用拖船辅助通航<sup>[10]</sup>。



图 6 巴拿马运河第三线船闸

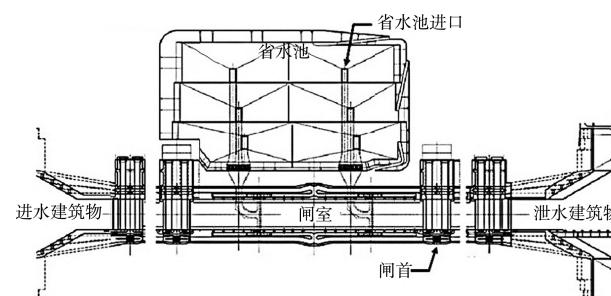


图 7 带省水池船闸输水系统布置

省水原理。以该船闸一个闸室为例, 如图 8 所示将水头分为 5 等份。当船只下行时, 将闸室内的水部分从上往下依次存储到省水池中, 各级省水池存储完毕后关闭阀门方可继续下一级存储, 其中无法存储的水流向下游; 当船只上行时, 再将省水池中储存的水从下往上依次放出, 各级省水池排放完后要关闭阀门方可继续上一级排放, 其中无法由省水池提供的水需从上游供应。

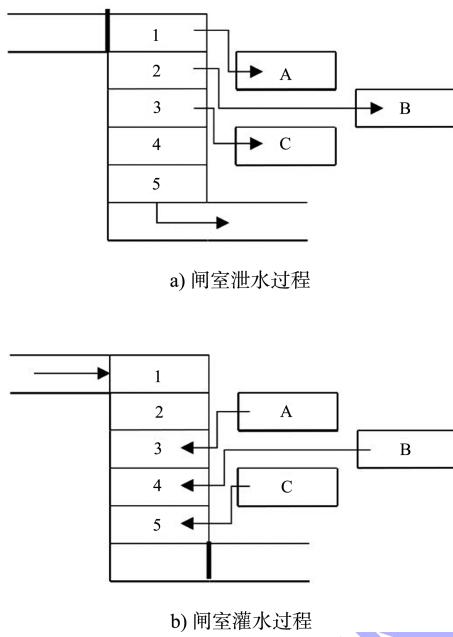


图 8 省水池灌泄原理

带省水池的船闸形式可以对水头差进行分级, 改善闸室内的水流条件。其布置形式主要有两种, 一是在船闸一侧或两侧布置水平分层的省水池, 称为省水池集中布置, 其占地面积小, 但结构复杂; 二是在船闸的一侧错落布置省水池, 称为省水池分散布置, 其占地面积大, 布置困难, 但水级划分相对灵活, 目前建成的带省水池的船闸多采用此种形式。但考虑到通航效率、建设成本、场地空间及省水池的操作复杂性问题, 省水池级数也不宜过多。此外, 这种船闸形式还需要考虑省水池溢水问题, 可设置相应的溢流道。

#### 2.4 其他省水方式

巴拿马运河船闸的建设中还运用了带中间渠道形式, 如米拉弗洛雷斯船闸和佩德罗·米格尔船闸通过渠道连接。特点是由于渠道上水头差较渠

道长度很小, 相当于减少了船闸闸室面积, 因此可以减少船闸用水, 且渠道和相邻闸室中可同时有船舶, 较连续多级船闸通航效率高。

还有一些不是直接省水的措施, 如利用泵将下游的水抽进闸室, 适用于特别缺水地区。

### 3 船闸省水率计算

省水率是衡量船闸省水效益的一个重要指标, 与耗水量有着密切联系。下面结合船闸运行方式探讨不同省水技术理想情况下的省水率计算, 以单线单级船闸完成一次单向运行的耗水量为基准, 其中闸、阀门漏水量部分均不计入船闸耗水量。

省水率与耗水率关系为:

$$E = 1 - F \quad (1)$$

式中:  $E$  为省水率;  $F$  为耗水率。

双线单级船闸采用互灌互泄方式时, 理论耗水率为 50%。

多级船闸单向运行时, 不考虑上、下游水位变幅导致闸室补(溢)水影响, 耗水率  $F_M$  为:

$$F_M = \frac{1}{M} \quad (2)$$

式中:  $M$  为船闸级数。

带省水池船闸省水运行时, 假设省水池设计能够适应上、下游或上、下级闸室水位变幅; 闸室分担水头适合省水运行(效率), 且省水阀门关闭无剩余水头时, 耗水率  $F_N$  为:

$$F_N = \frac{1+\chi}{1+\chi(N+1)} \quad (3)$$

式中:  $\chi$  为省水池与闸室面积之比;  $N$  为省水池级数。

根据式(3)得到省水率与  $\chi$  和  $N$  值相关关系, 见图 9。可见, 增加省水池级数的省水效果比增加省水池面积明显得多, 但超过 3 级以后, 省水效果明显下降<sup>[11]</sup>。综上, 双线单级船闸采用互灌互泄方式理论最大省水率 50%; 三级船闸采用单向运行时理论最大省水率 67%; 省水池与闸室面积相同时, 带 3 级省水池的单级船闸省水运行时理论最大省水率 60%。

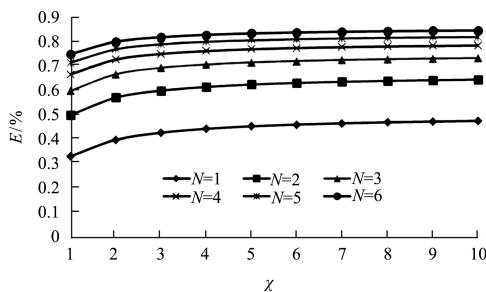


图 9 省水率与省水池级数、面积关系

省水池灌泄方式结合纵向梯级灌泄方式时, 其省水率效果更好。根据式(2)和式(3)可以求出该情况下的综合耗水率  $F_z$ :

$$F_z = \frac{1}{M} \cdot \frac{1+\chi}{1+\chi(N+1)} \quad (4)$$

以巴拿马运河第三线的两个新船闸为例, 理论最大省水率 87%。其各闸室中采用 3 级省水池, 各省水池及闸室面积均相等, 各级水头差也相等。其工作原理见图 10, 虚实线分别表示船只通行的两种状态。各闸室省水池均可储存 60% 的用水, 船舶在闸室间通航时, 上级闸室泄水、下级闸室灌水, 仅有 40% 的水由上级补充给下级, 依次互换, 使船舶完成通航, 整个过程中仅使用了约 13% 的用水。

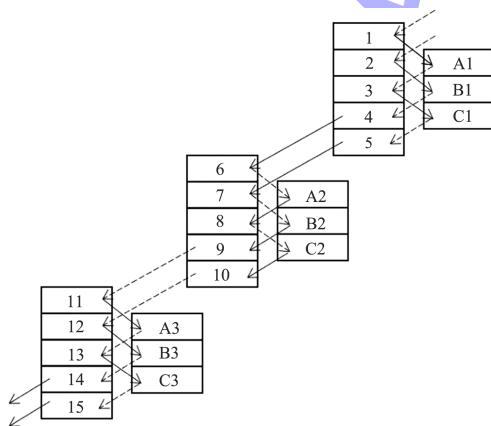


图 10 巴拿马运河第三线船闸原理

#### 4 结语

1) 巴拿马运河船闸中运用到的省水技术十分典型, 可归纳为 3 大类: 双线互灌互泄方式、纵向梯级灌泄方式和省水池灌泄方式, 均是依靠重力作用, 本质上可理解为水的空间存储优化设计问题, 可为我国的船闸建设发展提供宝贵经验。

2) 船闸省水率与采用的省水技术及运行方式

直接相关。在理想运行方式下, 双线互灌互泄方式理论最大省水率 50%, 纵向梯级灌泄方式省水率与船闸级数成正相关关系, 省水池灌泄方式省水率与省水池级数、省水池与闸室面积比成正相关关系。

3) 随着对水资源的重视, 船闸省水技术受到广泛关注。综合各种省水技术的优点及新技术的运用将成为今后省水技术的发展趋势。

#### 参考文献:

- [1] 吴澎,宣国祥.船闸设计的新进展[J].水利水运工程学报,2009(4): 122-127.
- [2] 刘晓平,陶桂兰.渠化工程[M].北京:人民交通出版社,2009.
- [3] 王晓青,刘畅.省水船闸发展及研究现状[J].重庆建筑,2013, 12(10): 52-54.
- [4] 长江三峡通航管理局.船闸运行维护管理实用知识[M].北京:人民交通出版社,2018.
- [5] SPENGLER R, IMEDIO J, PÉREZ R, et al. Panama Canal expansion project-description third set of locks project[C]// IABSE Symposium Report. Zurich: International Association for Bridge and Structural Engineering, 2014: 783-790.
- [6] HARMON R S. The Río Chagres, Panama[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2005.
- [7] ELOOT K, VANTORRE M, VERWILLIGEN J, et al. Lock manoeuvres: practical cases in Europe and Panama[C]// 3rd International conference on ship manoeuvring in shallow and confined water: with non-exclusive focus on ship behaviour in locks. Antwerpen: Flanders Hydraulic Research, 2013: 1-15.
- [8] HUMMER C W. The Panama Canal: A Look Back, A Look Forward[J]. Terra et Aqua, 2003(90): 12-21.
- [9] World Association for Waterborne Transport Infrastructure. Innovations in navigation lock design [M]. Brussels: PIANC, 2009.
- [10] NEWBERY M J, KRAUSE A J. Design of the Panama Canal Third Set of Locks[C]//World Environmental and Water Resources Congress 2012: Crossing Boundaries. Richmond: American Society of Civil Engineers, 2012: 1024-1033.
- [11] 周玉华,刘锋.省水船闸初探[J].水运工程,2006(10): 156-159.

(本文编辑 武亚庆)