

船闸设计的新进展

吴 澎¹, 宣国祥²

(1. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 简要介绍了即将出版的国际航运协会船闸工作组(PIANC WG29)的报告“船闸的创新设计”, 概述了近20年来船闸设计在理念和方法等方面发生的变化, 介绍了船闸输水系统和水工结构等方面值得关注的一些进步。船闸设计是一个多目标优化的复杂过程, 在设计中必须解决好多目标的综合优化。在设计方法方面, 确定性方法正在被风险分析方法所取代, 最低建设成本标准将被全寿命周期成本优化替换。

关 键 词: 船闸设计; 设计理念; 设计方法; 输水系统; 整体式船闸

中图分类号: U641

文献标识码: A

文章编号: 1009-640X(2009)04-0122-06

随着我国内河水资源综合开发进程的不断加快, 船闸建设也进入快速发展的阶段。航运开发是天然河流水资源综合利用的重要组成部分。在内河航运梯级渠化开发中, 船闸是十分重要的建筑物。

1986年国际航运协会(PIANC)发表了《船闸研究国际委员会最终报告》^[1]。这份报告一直是国际公认的船闸设计的重要指南。为了反映近20年来船闸建设的新成就, 国际航运协会于2006年组织了工作组(WG29), 笔者受交通部的委派, 作为中国代表参加了该工作组的工作。通过近3年的工作, 完成了工作组的报告《船闸的创新设计》^[2]。本文选取该报告的一些主要内容, 结合参加工作组工作的一些收获, 主要介绍世界船闸在设计理念、设计原则和设计方法方面的进步。

1 科学的设计理念

船闸设计是一个多目标优化的复杂过程, 科学的设计理念是船闸设计的指南针。与其他土木工程相同, 船闸设计追求安全、可靠、适用、经济和美观。同时, 由于资源紧缺和环境的压力, 船闸设计还追求资源节约和环境友好。

船闸设计的目标可归纳为以下10个方面, 设计中必须解决好多目标的综合优化。

(1) 创新与技术进步。在工程实践中, 成熟的技术往往是有效的, 但在降低造价、提高可靠性、满足新的营运需求等的驱动下, 或在相关行业技术进步的推动下, 我们不应止步于成熟的技术, 而应追求创新, 推动技术进步;

(2) 保证船闸营运的可靠性。尽可能降低船闸非作业时间, 即尽可能减少因船闸意外损坏停止作业, 维护要求停止作业, 洪水、冰凌、污物、泥沙淤积等引起的停止作业时间。这里需注意的是, 减少维护要求停止作业的时间, 并不意味着低维护率, 也不意味着低维护成本;

(3) 全寿命管理。追求全寿命周期内的最优质量和最低成本, 这里说的成本既包括直接成本, 也包括间接成本。对船闸设计而言, 追求全寿命成本最优, 意味着确定船闸可靠性的最优水平和高效的维护方案;

收稿日期: 2009-04-13

作者简介: 吴 澎(1956-), 男, 北京人, 教授级高级工程师, 硕士, 主要从事港口航道的规划、设计、管理研究。

E-mail: wupeng@pdiwt.com.cn

(4)尽可能缩短船舶过闸时间.合理确定船舶过闸时间,应权衡船舶延误的经济损失和缩短船舶过闸时间引起的投资增加,还应该综合考虑航运系统,如航道上的交通密度、航线长度等;

(5)保证船舶在闸室内的泊稳条件.理想船闸的输水过程中,船舶只有垂直运动,不受水平向的荷载作用.而在实际船闸中,船舶在输水过程中受水流和倾斜水面的作用产生水平向的运动.输水系统设计应使船舶在输水过程中的水平荷载保持在一定水平以下;

(6)水源问题.在水资源相对匮乏的河流特别是运河上建设船闸,节省船闸耗水是设计的重要目标.欧洲规定(EEC,1997)^[11]中指出必须从环境友好性上研究最佳方案,甚至可不考虑经济问题.因此,当船闸的水头较高时,即使技术经济性最佳的方案是普通船闸,也必须研究其他省水方案.如采用多级船闸或省水船闸.在受潮汐影响的河段上建设船闸,防止或减少海水入侵也是船闸设计的重要目标;

(7)节能.尽管内河航运较其他运输方式相比具有明显的节能优势,船闸设计仍然要研究降低船闸自身能耗的问题,尽可能利用太阳能和风能.也许将来还会有利用船闸输水时的水力资源的方案;

(8)环境影响评价.环境保护的重要性已日益深入人心,其含义也不再限于自然环境,而已扩展到健康、社会和视觉环境;

(9)降低施工影响.施工方案的选择应尽可能降低对施工期通航和周边环境的影响;

(10)安全.船闸设计必须考虑各种安全问题,包括可能的恐怖袭击和故意破坏,并采取相应的措施,保证公共安全.在允许公众参观、游览的地方,应设置必要的安全设施.为营运和维修人员设置必要的安全设施和制订必要的防范措施.危险品过闸应有特殊的安全措施.其他安全问题还有防洪安全和防止船舶撞击的保护等.

2 更趋合理的设计方法

与其他土木工程相同,传统的以技术方案和工程造价为主要目标的设计方法已不可行.工程的可行性分析主要包括:环境影响评价、风险分析、公众意见调查和分析、经济分析等.

对环境的影响分析,目前已从关注水、空气和噪声等的污染,扩展到关注对鱼类、鸟类、其他动物、植物和地下水等的影响.

在风险分析中,风险被看作是破坏的结果和造成破坏的事件概率的乘积.必须考虑和评估重要的偶然事件.采取任何降低风险水平的措施,必须基于风险分析.如是否需要事故闸门等.

公众对工程建设的意见已变得越来越重要.有些工程中技术和经济最优的方案,可能因环境、公众的意见或其他因素而受到否决.因此,在设计的前期阶段就应关注公众的意见.

设计方法方面发生的另一个变化是确定性方法向半概率方法发展.确定性方法即单一安全系数法,也是我国船闸设计目前采用的方法.欧洲规范已规定采用半概率法,即分项系数法,这也是我国港口工程设计采用的方法.

确定结构在使用期可能遭受的荷载水平,对船闸设计是至关重要的.确定船舶撞击、水位、地震等随机荷载,通常采用重现期或年概率描述.美国对这类随机荷载已采用三水平设计方法:正常、非常和极端情况.正常情况通常是指年超越概率为50%的情况,在这种情况下,结构应不出现损坏,船闸保持正常营运.非常情况通常是指在100年使用期内超越概率为50%的情况,出现非常情况时,结构的受损应易于修复,且船闸营运不中断.极端情况是非常罕见的情况,例如最大可能洪水、最大可能地震等.极端情况下可能出现中等或较大的损坏,但结构不能完全倒塌,即结构仍然可修,船闸的营运可以中断.美国将极端情况的出现频率定义为100年使用期内超越概率为10%的情况.

表1为美国考虑船舶撞击荷载的重现期,相应于设计年限为50年,使用年限至少为100年^[3].

欧洲采用的方法与我国港口工程设计方法基本一致,即将作用分为永久、可变和偶然作用,采用分项系数和组合系数定义不同工况.

设计方法方面的变化还有全寿命周期成本优化^[4]. 结构的全寿命成本可分为四大类: 建设成本、营运成本、维护成本和拆除成本. 船闸的维修成本与建设成本同等重要. 在设计阶段仅仅考虑降低初期投资是远远不够的, 还必须考虑结构的耐久性和维护的经济性. 营运成本不仅包括直接成本, 如电能消耗和人工成本, 也包括间接成本, 如船舶过闸花费的时间、船闸停止营运引起的船舶延误成本等. 成本不应成为方案比选的唯一准则, 还应考虑质量、可靠性和环境等方面的因素.

表 1 船舶撞击荷载重现期(美国)

Tab. 1 Return periods of vessel collision load

荷载分类	年超越概率	重现期/ a
正常	≥ 0.1	1 ~ 10
非常	0.00333 ~ 0.1	10 ~ 300
极端	< 0.00333	> 300

还应注意的是, 结构的全寿命成本是指结构使用期的全成本, 不同的结构方案, 可能对应不同的结构使用期. 因此, 方案比较时, 应比较使用期内的平均年成本. 在船闸设计阶段就应考虑降低营运成本和维护成本的措施. 例如, 建立船闸远程遥控营运系统, 以降低人工成本; 以全寿命管理的理念, 选择合适的材料; 设计方案必须考虑方便维护和维修; 建立完善的检测系统; 要重视构件的标准化以有效降低维修成本.

3 船闸输水系统

船闸输水系统一般分为集中输水系统和分散输水系统两大类.

集中输水系统目前仅在中国研究较多, 在闸首短廊道系统中, 近些年出现了倒口消能、复式消能工等复杂的消能系统, 扩大了该类输水系统的适用范围, 提高了输水效率. 集中输水系统的主要优点是闸室结构相对简单. 在我国京杭运河泗阳三线船闸的设计中, 为尽可能降低工程造价, 曾根据分散输水系统可大幅度提高船闸输水效率的基本原理, 开发了局部分散输水系统, 即将短廊道适当地延长至闸室墙内, 并在帷墙后至廊道末端的长度内设置一系列横支廊道, 在横支廊道两侧设置侧向出水孔, 出水孔外设置相应的消力槛等消能工. 模型试验研究证明这种布置具有减弱初始波浪力的作用. 这种型式的特点是输水系统与闸室结构相结合, 不设镇静段, 开挖深度亦不大. 在赣江石虎塘航运枢纽船闸初步设计中, 又对这类输水系统的布置进行了较为深入的研究^[5]. 这种不设镇静段的短廊道输水系统是近些年集中输水系统的主要进步.

分散输水系统中, 德国近些年开发了闸底压力室输水系统, 这种输水系统既可用于省水船闸, 也可用于普通船闸. 闸底压力室通过主廊道与省水池或进水口相连, 在压力室顶部分 3 个区段布置总数达 150 ~ 350 个喷嘴, 使水流均匀进入闸室. 这种输水系统设计的关键是合理确定喷嘴的数量和直径与闸底压力室体积、主廊道断面面积之间的关系, 避免输水时在闸室内出现不良流态.

闸室消能方面出现一种新的布置型式——复合式廊道双明沟消能(见图 1), 即在廊道侧向出水孔外设两道明沟进行消能. 这样使明沟消能的体积增大了 1 倍, 同时在平面上扩大了水流扩散的面积, 从而改善水流条件, 提高了停泊在

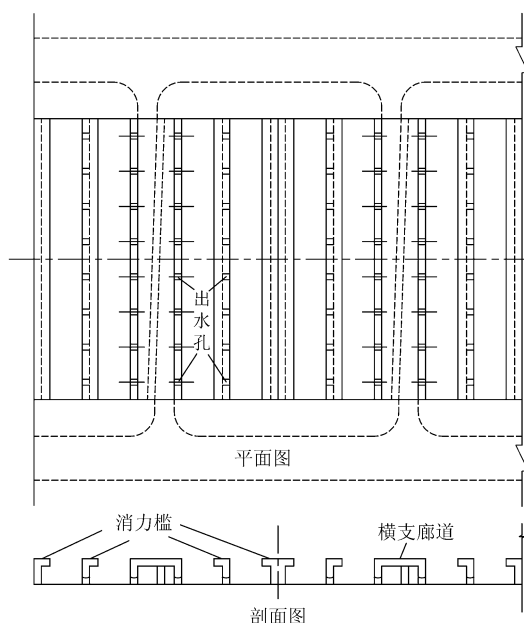


图 1 闸室复合式廊道双明沟消能示意图

Fig. 1 Double open furrow dissipater in chamber having composite culvert

廊道顶自然通气”,该技术的核心是利用门楣及廊道顶联合通气充分抑制空化.其优点是阀门段廊道体型简单且廊道埋设深度浅、施工方便、工程量省.这些技术已应用于 30.0 m 的单级船闸(红水河大化及乐滩船闸).

表 2 船舶允许系缆力
Tab. 2 Allowed mooring force

船舶吨位 / t	中国规范		船舶等级	荷兰规范	
	纵向水平分力 / kN	横向水平分力 / kN		系缆力准则	
				灌水	泄水或灌水时有浮式系船柱
3000	46	23	CEMT Class III(500 ~ 700t)	1.50W/1000	2.00W/1000
2000	40	20	CEMT Class IV(1000 ~ 1500t)	1.10W/1000	1.50W/1000
1000	32	16	CEMT Class Va(1500 ~ 3000t)	0.85W/1000	1.15W/1000
500	25	13			
300	18	9			
100	8	4			
50	5	3			

注:W 为船舶排水量.

空蚀问题仍然是船闸水头进一步提高需要解决的主要问题.采用省水池也是解决空蚀问题的有效措施,但造价较高.省水船闸在欧洲已有近百年的历史,在我国还没有工程实践.省水船闸大致可分为分离式和整体式两大类.已开工建设的巴拿马三线船闸,采用分三级、每级设 3 个分离式省水池的方案,使省水率高达 87%.德国在 2006 年建成的乌城(Uelzen)二线船闸中,采用整体式省水池,结合整体式闸室结构,有效地提高了船闸营运的可靠性.

在水资源日益昂贵的今天,开展省水船闸的研究,是十分必要和迫切的.

4 船闸水工结构

近些年船闸水工结构方面的新进展,值得关注的是整体式船闸结构的逐步成熟.新近建成的德国 Uelzen 二线船闸和 Hohenwarthe 双船闸,均采用整体式结构.常规船闸的闸室均设置伸缩缝,伸缩缝的间距一般为 15 ~ 20 m^[1,10].伸缩缝的设置可降低由于地基不均匀和温度变化引起的结构附加应力.缝间需设置止水,以形成完整的挡水面.在设计阶段,需通过计算分析结构的位移,确定伸缩缝的缝宽.如果计算的缝间差异位移过大,一般止水难以适应时,可采用无伸缩缝的整体式船闸.整体式船闸能够适应不均匀沉降,耐久性好,消除了止水维护问题.整体式船闸可设置施工缝,缝间用钢筋连接.

设计中必须分析整体式结构的内应力.内应力来自混凝土的水化热、不均匀沉降和温度变化.上述三种引起内应力的荷载,与其他荷载组合,共同进行承载能力极限状态和正常使用极限状态分析.结构分析一般采用数值模拟,目前已有成熟的软件可用于整体式船闸的结构分析.常用的是有限元方法,也可采用半无限理论进行分析^[2].

船闸水工建筑物的施工方法一般采用围堰等临时挡水结构,排水后在基坑内干地施工.近些年,船闸水上施工在美国有了显著进展.船闸构件采用陆上预制、水上安装的方式施工.预制构件的运输和安装分为浮运和吊装两类,分别有不同的适用范围.船闸水上施工的进步,缩短了施工时间,减少了施工期对周边环境的影响(包括对通航的影响),大幅降低了施工临时设施的费用,因而减少了工程投资.

5 结 语

船闸设计技术的进步,是在需求的推动下不断创新实现的.这些需求包括降低工程投资和全寿命周期成

本、提高船闸营运的可靠性、提高船闸营运的效率、提高施工效率、降低施工期的影响、降低人工和材料成本、降低环境影响等。

在船闸设计中,需关注以下4个发展趋势:①在满足需求的前提下,投资最低;②维修量最小;③全寿命成本最低;④性能最佳,即营运效率高,可靠性高,非作业时间少,建设和维护成本相对于营运成本已变得不重要。

为满足不断出现的新需求,必须保证创新技术的可靠性。一方面可借鉴其他行业的新技术;另一方面,加强新技术的前期研究、分析和论证工作,包括严格、系统的模型和原型试验。

参 考 文 献:

- [1] PIANC. Final report of the international commission for the study of locks[R]. PIANC, 1986.
- [2] PIANC. Innovations in navigation lock design[R]. PIANC, 2009.
- [3] USACE. Barge impact analysis for rigid walls[R]. USACE, 2004.
- [4] PIANC. Life cycle management of port structures recommended practice for implementation[R]. Report PIANC, 2008.
- [5] 吴 澎,宣国祥. 一种新型闸首短廊道集中输水系统研究[C]//国际航运协会2008年年会暨国际航运技术研讨会论文集. 北京:人民交通出版社,2008. (WU Peng, XUAN Guo-xiang. An innovative short culvert filling and emptying system for navigation locks[C]//Proceedings of the International Navigation Seminar Following PIANC AGA 2008. Beijing: China Communications Press, 2008. (in Chinese))
- [6] JOHN E, HITE. In-chamber longitudinal culvert design for lock filling and emptying system[R]. USACE, 2003.
- [7] 宣国祥,黄 岳,李 君. 桂平二线船闸闸底长廊道输水系统布置研究[J]. 水运工程,2009(3):109-115. (XUAN Guo-xiang, HUANG Yue, LI Jun. Arrangement of lock bottom long-culvert filling and emptying system of Guiping Second-Lane Lock[J]. Port and Waterway Engineering, 2009(3):109-115. (in Chinese))
- [8] JTJ306-2001, 船闸输水系统设计规范[S]. (JTJ306-2001, Design Code for Filling and Emptying System of Shiplocks[S]. (in Chinese))
- [9] LI Yun, ZHANG Rui-kai. Study on preventing and reducing cavitation of filling emptying valves for high-head lock[J]. International Navigation Association Bulletin, 2008(131):11-18.
- [10] JTJ307-2001, 船闸水工建筑物设计规范[S]. (JTJ307-2001, Code for Design of Hydraulic Structures of Shiplocks[S]. (in Chinese))
- [11] EEC, Environment Impact Assessment Directive, 85/337/EEC, 1997.

New advances in navigation lock design

WU Peng¹, XUAN Guo-xiang²

(1. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: The main points of PIANC In-Com WG29 report “Innovations in Navigation Lock Design” are presented. The main changes of lock design concept and methodology in recent 20 years are summarized. Some new advances in the design of filling and emptying systems and lock structures are introduced. Lock design is a multi-objective optimizing process. The design objectives and optimization goals must be assessed in the design. Deterministic approach is now being replaced by risk-based design. And least construction cost will be replaced by life cycle cost optimisation

Key words: navigation lock design; design concept; design methodology; filling and emptying system; lock