

· 航道及通航建筑物 ·

船闸口门区不良流态改善措施



王云莉^{1,2}, 孙国栋¹, 向美焘¹

(1. 重庆交通大学 内河航道整治技术交通行业重点实验室, 重庆 400074;
2. 重庆交通大学 西南水运工程科学研究所, 重庆 400016)

摘要: 水利枢纽船闸上、下游引航道口门区的通航水流条件是制约枢纽通航能力的关键因素之一。基于船闸口门区不良流态的形成机理, 结合口门区水流条件安全通航标准, 阐述口门区不良流态的形成因素及改善措施, 对枢纽口门区水流条件的研究进行展望。

关键词: 通航条件; 船闸; 口门区; 水流条件; 改善措施

中图分类号: TV 61

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)03-0083-06

Improvement measure for adverse fluid flow in lock entrance area

WANG Yun-li^{1,2}, SUN Guo-dong¹, XIANG Mei-tao¹

(1. Key Laboratory of Inland Waterway Regulation Engineering of Ministry of Transport, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Southwest Hydraulic Institute for Waterways, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400016, China)

Abstract: The flow condition of upstream or downstream water conservancy hub which locates at the entrance of the approach channel is one of the key factors restricting the navigation capacity. Based on the formation mechanism of the adverse flow pattern and combining with the safety standards of the navigable flowing condition at the entrance zone, we expound the formation causes of the adverse flow pattern and corresponding improvement measures, and put forward prospect for the research on the flow condition at the entrance zone.

Keywords: navigation condition; ship lock; entrance area; flow condition; improvement measure

天然河道在修建水利枢纽后, 为了满足通航要求, 经常要设置船闸或者升船机等过船建筑物。在过船建筑物的进出口, 是船闸引航道与连接段之间的口门区(图1)。口门区是船闸进出口与河道自由航行河段起纽带作用的区域^[1], 是船舶(队)出入引航道的必经之路。该区域处于引航道静水与河道动水的交汇处, 受分、泄水建筑物等边界条件的影响, 航道断面在下游口门处放宽、在上游处变窄。因此河道水流处在扩大(对下游)和收缩(对上游)的情况下, 易发生弯曲变形, 从而有流速梯度产生, 最终形成斜向水流。斜向水流会使进出口门区的船舶产生扭转和横向漂移,

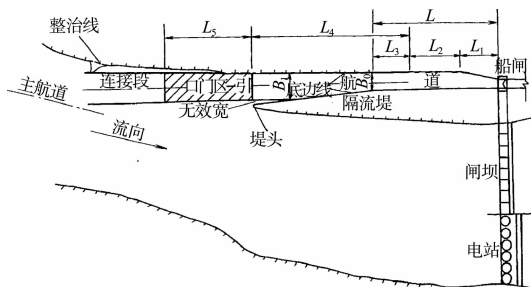


图1 船闸引航道口门区位置

偏离航线。当斜向流过大且与航线方向夹角较大时, 将造成船舵驾引操纵失控, 甚至会发生冲撞翻船等事故。另据统计, 引航道的工程投资占通航建筑物总投资的30%~55%。因此, 基于口门

收稿日期: 2015-09-19

作者简介: 王云莉(1974—), 女, 博士, 副研究员, 从事水利水运工程专业方向的研究。

区不良流态的形成机理,结合口门区水流条件安全通航标准,对口门区不良流态的形成因素及改善措施进行阐述并总结经验,具有重要的工程实际意义。

1 引航道口门区水流条件的影响因素

船闸引航道口门区水流条件极其复杂,常常难以满足规范限值的要求。引航道口门区水流条件的影响因素很多,但主要有如下3点^[2-5]:

1) 河道特性,包括河道的类别、地形及走势等因素。张绪进^[6]在岷江犍为航电枢纽试验中研究了河床左高右低对下引航道影响。原工程中,由于船闸引航道布置在右岸深槽,河床左高右低,水流从左侧泄洪闸及上游电站尾水下泄,会向河道右岸深槽集中,在上游来流量 $Q \geq 4\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 时该处的流速超出规范限值,并在引航道口门区产生强度和范围均较大的回流区域。周家俞^[7]在赣江石虎塘航电枢纽中研究了赣江的通航水流特征,该类河流河道宽浅、滩槽分布明显,水流条件顺畅,上、下游引航道通航条件良好。即便对外导航墙适当缩短,仍能较好地满足通航要求。

2) 枢纽运行方式(泄水闸不同开启方式、电站日调节时,水流单位质量的动量迅速变化等)。戈龙仔等^[8]结合贵港、大源渡航电枢纽等工程,研究了闸门不同开启方式对口门区水流条件的影响。他们认为:流量相同时,不同的闸门开启方式在闸下产生的流场也不相同;合理确定闸门开启方式可以有效地改善口门区的通航水流条件。他们提出了分散均匀开启为主、分区段联合开启为辅等行之有效的闸门开启原则。

3) 引航道形式(包括引航道口门位置、堤头形式等)及枢纽布置(枢纽的整体布局等)。李焱等^[9]结合工程经验和物理模型,研究了引航道与河道斜交存在不同夹角时,水流条件对口门区通航产生的影响。试验表明:在夹角 $\leq 25^\circ$ 时,河道流速能控制在 $1.5\ \text{m/s}$ 左右;流速在 $2.0\ \text{m/s}$ 与 $2.5\ \text{m/s}$ 之间时,夹角不能大于 20° 。陈永奎等^[10]指出:口门位置是主要的边界条件影响因素,口门尺度、堤头形式等可作为进一步优化措施。毛

新仪^[11]在长方形堤头引起流态紊乱、流速超出通航标准的情况下,改为光滑曲线堤头,大大改善了水流流态。

2 不利水流流态的形成机理

水利枢纽船闸上、下游引航道主要的不利水流流态为回流和斜流(图2)。

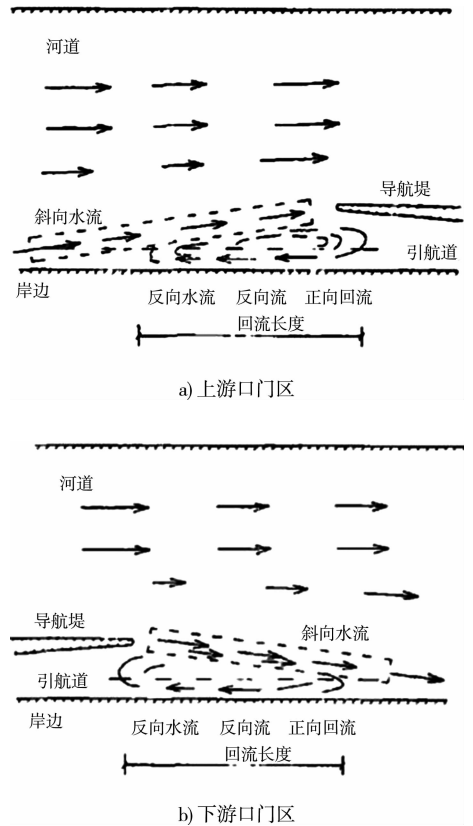


图2 船闸引航道口门区斜流与回流流态

2.1 回流

河道水流在口门区斜流的作用下会产生分离性小漩涡^[12],俗称漩流,美国通称为涡流,我国工程界习惯称回流。其产生机理是:水流发生局部收缩或扩大时,会产生水体分离的现象,在分离面上摩擦力的作用下,分离面附近的水体将随着主流一起向下游运动,为了填补空隙,边壁附近的水体必将流进来补充,从而形成一个封闭的水流系统。船闸引航道口门区回流流速不能太大,否则将对船舶安全进出船闸带来较大影响,据国内《船闸总体设计规范》^[13]的规定,船闸引航道口门区的回流流速不应大于 $0.4\ \text{m/s}$ 。

2.2 斜流

斜流是指口门区处在引航道静水与河流动水的交汇处,受到导航分水建筑物和泄水建筑物的影响,形成的一种作用在船舶侧面,与航迹线存在一定夹角^[14],不利于船舶航行的复杂流态。国内很多同仁对实际工程进行了物理模型试验,得出了斜流与船舶作用的相对关系:斜流流速越大,航道内的纵向流速(斜流沿航线方向上的分量)也就越大,下行船舶(队)的航速亦越大;同理,随着斜流、交角的增大,影响船舶正常航行的横流(斜流在航线上的垂直分量)也就越大,偏移的速度越快,从而使船舶扭转,偏离航线,甚至造成事故,影响通航^[15-16]。国内外相关规范对引航道口门区斜流航对于航线的纵向流速和横向流速进行了专门的规定:在I-IV级航道中,船闸引航道口门区的横向流速应 ≤ 0.3 m/s,纵向流速应 ≤ 2.0 m/s;在V-VII级航道中,船闸引航道口门区的横向流速应 ≤ 0.25 m/s,纵向流速应 ≤ 1.5 m/s。

3 引航道口门区不利流态的改善措施

一般说来,口门区不利流态的改善措施有工程措施与非工程措施两种。工程措施^[17]主要包括堤身开孔、修筑丁坝潜坝、改变导航堤长度、导流墩及泄水闸导流等方式;非工程措施指无需修建工程建筑物,仅通过调节泄水闸的不同开启方式、机组发电台数等措施来达到改善水流条件的目的。

3.1 工程措施

1) 导航堤开孔。

导航堤开孔是最常用的工程措施。在船闸上、下游导航堤开孔后,能有效减弱口门区回流强度与泥沙淤积,从而获得较好的航行条件。

对于导航堤开孔的研究,德意志联邦水工所、美国工程兵团水道试验站、荷兰^[18-19]等国家与机构起步较早。应用实例有美国奥扎克枢纽船闸、贝利维尔枢纽船闸、德国Krnzenburg船闸等。在布置形式上^[17],德国透空墙长度在15~60 m,多数工程采用变高度、等间距;美国透空导航堤则多布置为等高度、等间距的形式,长度在70~200 m

之间。在工程实践中,美国水道试验站^[20]进行了较多的尝试。例如:1)阿肯色河奥扎克枢纽船闸,在导航堤上开11个高度为7.6 m的开孔。同时,在端部前方筑3道潜坝,减小了斜流强度,获得了较好的水流条件;2)俄亥俄河上的贝利维尔枢纽船闸,为减少口门区的横向流速,将船闸右移的同时调整了导航堤透水孔面积,使流速较好地满足了安全要求。另外,德国美因河上的Krnzenburg船闸也比较有代表性。由于河道流量、流速不同,堤头处与堤末端横流相差较大,因此,船闸上游引航道导堤延长段采用非连续透空堤,堤长56 m,孔宽相同,堤头处孔高2.56 m,孔高顺河道方向顺延减小,堤末端孔高1.56 m。最终使横向流速达到规范要求。

近年来,我国对导流堤开孔也进行了一些研究,并在实际工程中得到了应用。20世纪80年代,南京水利科学研究院结合JTJ 261—266《船闸设计规范》^[21]相关规定,对堤头3种开孔形式进行了研究,结果表明口门区堤头附近横流最大,堤头开孔可以有效改善横向流速,流速减小到0.3 m/s。此外,堤头开孔使得部分流量从底部孔口流出,减小了水流偏角,从而进一步减小横流流速。凌贤宗^[22]曾在铜鼓滩工程对导航堤堤头形式进行探究。结果表明,在堤头形式上流线型堤头要优于圆柱型堤头。同时,在开孔形式上,每隔3 m开一孔,每孔宽7.0 m,孔高2.5 m,能有效改善口门区的水流条件,获得较好的流速流态。风洞子枢纽工程^[23]将船闸下游94 m长的引堤的实体结构改为透空式板桩结构,消除了 $5\ 000\text{ m}^3/\text{s}$ 以上流量的泡漩不良流态,使回流流速降低到0.4 m/s左右,有效减弱了口门区回流水流。

大量工程实践表明:在导航堤开孔后,引航道内外水域相通,从而有效减弱堤头附近水体的波动,加速波动的扩散与衰减,减弱回流的强度与范围,进而获得较好的通航条件。另外,还要选取合理的开度以最大限度地改善通航水流。

一般说来,导航堤的长短对下游水流流态影响较大,而对上游影响甚微。当下游导航堤较长

时,口门区离泄水闸较远,可以帮助船舶避开泄水闸泄水,从而对安全通航有利。在大江一号船闸工程研究^[24]中,人们对下游导航堤进行了长度为1 250 m和400 m的试验研究。试验表明,长堤具备足够的制动距离,可以停靠、会让船只,可以起到良好的防沙冲淤的作用,可以有效减弱口门区下泄水流的波高和波浪区域,而堤短不具备上述优点。综上,从大江一号船闸的实际情况来看,导航堤长比短效果好。

由上可知,多数情况下,导航堤长比短更能改善口门区的水流条件。但京杭运河韩庄枢纽通航水流条件试验结果表明,口门区的横向流速与堤长成正比。原因在于试验中口门位于弯道段,堤头伸向弯道,占据了河床宽度,使得过流断面缩窄,从而使堤头位置横流速度偏大。所以,隔流堤长度并非越长越好,导航堤的长短与具体工程相关,要具体分析,最好通过物理模型和数学模型进行优化。

2) 布置导流墩。

导流墩具有结构新颖、节省造价、方便实用等优点,为消弱口门区斜流问题开辟了新的方向,因此导流墩或导流墩与其他工程措施相结合应用将是今后主研方向。

朱红^[25]通过水槽试验和数学模型对导流墩改善口门区水流条件进行了研究,试验分为有、无导流墩2种情况,分别研究了导流墩对口门区水流条件的影响、回流随水流条件的变化趋势。结果表明:加墩后,口门区的回流长度、横流流速、流速均匀分布的恢复距离、斜流夹角均减小,并且在导流墩数目、长度等其他条件相同时,最佳间距为1倍墩长。

在株洲航运枢纽工程^[26]中,口门外连接段与主航道斜交,泄水闸和电站的出流斜穿下引航道口门区,使口门区有较强的横流作用,影响船舶的安全通航。为改变这种不利流态,在口门区均匀布置5座菱形导流墩。试验结果表明:1)布置导流墩之前,在流量为 $Q = 15\ 200\ \text{m}^3/\text{s}$ 时,下引航道口门区最大回流流速 $v_{\text{回}} = 0.52\ \text{m/s}$,堤下

100 m处水流以偏右 $22^\circ \sim 35^\circ$ 的角度向口门区航道内扩散,最大横流流速 $v_{\text{横}} = 0.48\ \text{m/s}$;2)口门区布置5座菱形导流墩后,在相同流量下,口门区最大回流流速 $v_{\text{回}} = 0.30\ \text{m/s}$,堤下200 m处水流以 $10^\circ \sim 30^\circ$ 的方向通过最后一个导流墩扩散到航道内,最大横流流速 $v_{\text{横}} = 0.32\ \text{m/s}$ 。通航条件较好地满足了要求。

导流墩自成功研发以来,得到了广泛的应用。目前研究主要采用概化模型试验,通过方案比选优化,最终找到适合某一河流的导流墩尺寸、角度及摆放位置。但是目前对导流墩的研究机理涉及较少,对不同水流条件下的导流墩还有待进一步研究。

3) 修筑丁潜坝。

丁坝是一端深入水中,另一端与岸边相接,与堤岸成“丁”字型的最为常用的整治建筑物,它能够减小水流与航迹线之间的角度,使口门区水流变得平顺,从而阻碍和削弱引航道口门区斜向波,减少了不良流态。

贵港航运枢纽^[17]是应用丁坝比较有代表性的水运工程之一。该工程由 $12 \times 10^4\ \text{kW}$ 电站、18闸孔溢流坝及千吨级船闸等组成。船闸闸室长度与宽度分别为190、23 m,起始水深3.5 m,船闸设计水头14.5 m。在原设计方案中,受水位、流量、闸孔开启方式的影响,当泄水闸闸孔泄流时,水流直冲口门区,上游水流流向与航线的夹角 $\beta \geq 30^\circ$,导致口门区的横向流速与回流强度偏大。为此提出调整流量分配,使主流偏向河道左侧的方案,措施之一是修筑丁潜坝:丁坝与潜坝为相同轴线,仅高程、长度不同,试验中采用的最佳潜坝长60 m,丁坝为58 m,丁潜坝的迎水坡度以0.5:1或直角为佳,背水坡度为1:3。最终结果表明,经丁潜坝的挑流作用^[27],口门区流速得到明显改善,满足了通航水流条件要求。

纵观国内外,丁坝作为较为成熟的整治建筑物,应用比较广泛,相关研究也很多。但由于测量技术的限制以及水流、丁坝和河床三者之间作用的过程非常复杂,因此关于丁坝回流区范围、局部

冲刷机理和丁坝附近水流结构等方面的研究,尚待深入研究。另外,由于数学模型经常需要物理模型提供计算条件和验证,所以二维及三维数模与物理模型结合成混合模型,是值得重视的研究方向。

4) 其他工程措施。

口门区水流条件工程改善措施还有很多^[28],如优化堤头形式、修建浮堤、浚深和拓宽河道过流断面、调整水流与航线的夹角、清淤、修建二线船闸等。

3.2 非工程措施

非工程措施^[28]是指通过优化泄水闸的开启方式、调节发电机组台数来改善水流条件等方式来改善口门区水流条件,而不是按照传统的修建工程建筑物的方法。

规范^[13]规定:枢纽中船闸与电站、泄水闸均并列布置。口门区的水流条件受泄水闸的开启方式及电站下泄水流影响。在张声鸣的研究^[29]中,万安水利枢纽最大泄洪 $37\ 700\ \text{m}^3/\text{s}$,4台机组最大过流量 $2\ 200\ \text{m}^3/\text{s}$,泄洪设施泄量为0到 $35\ 500\ \text{m}^3/\text{s}$ 。机组洪水位与枯水位变幅高达 $18.7\ \text{m}$ 。由于流量大、库容小、洪枯水位变幅大等特点,为维持一定的水位和有利于下游消能防冲,泄洪表孔和底孔需要进行频繁的调度。因此,在整体模型上研究了泄洪调度的基本原则,观测了各种运行工况下控制水跃位置的上下游水位关系,最终得出合适的闸门开启顺序和运行方式,减弱了口门区回流、横流等不良流态,使水流条件得到改善。

对引航道口门区通航水流条件的改善,使用单一的措施只能解决某一问题。为了更好地解决这个问题,往往需要考虑多种方法相互配合,才能得到令人满意的结果。

4 结论与展望

国内外船闸口门区通航水流条件的研究表明:

1) 引航道口门区不利通航水流条件,主要是由于上游来流流向与船闸引航道轴线方向夹角较大而引起引航道口门区水流纵、横向流速及回流流速超过规范要求。上游引航道口门区隔流堤堤头的

斜流主要是由上游的河势条件与船闸布置引起的,而下游口门区的不利流态,主要与下引航道布置、河势条件及枢纽泄洪闸有关;2) 引航道口门区不利流态的改善措施主要有工程措施和非工程措施2种。工程措施主要包括引航道隔流堤堤身开孔、修筑丁坝潜坝、通过导流墩及泄水闸导流等方式;非工程措施是指通过改善枢纽的运行方式来达到改善水流条件的目的。

船闸引航道口门区的水流条件关系到船舶能否安全通畅的进出引航道口门,有关研究虽有进展但却远未达到成熟应用阶段,尚需在以下方面进一步研究:

1) 许多学者^[30-32]认为以下几个方面还存在争议:横向流速是瞬时性质还是平均概念,回流流速的确切定义,通航水流条件的限值等。他们普遍反映规范^[33]的限值要求偏高,有一定的操作难度。因此,需要对规范存在争议的地方进行修订,规范的修订有一劳永逸的效果,只有规范的修订跟上了建设实践的需要才能更好地推进行业的发展,但是作为标准推行,还需要试验和理论的进一步论证。

2) 前人在研究口门区通航水流条件改善措施时,基本上是针对具体河流工程提出的改善措施,虽然有很好的借鉴性但缺乏通用性;同时,随着经济的发展以及对水路交通运输需求的增长,船闸改扩建工程得到了蓬勃发展,已建枢纽通航能力大多不满足经济增长的要求。因此,在改善口门区通航水流条件方面,不仅要沿用已有的工程措施,还要研究出通用性较强、紧密联系新建二、三线船闸等新方向的改善措施。

3) 正确估计回流长度对工程效果的预估有重要的意义。李伟等^[34]对此进行过研究,并得到了回流长度公式,但是相关研究是利用边界较规则的水槽试验来进行的,而天然河道的边界条件要复杂得多,因此得到的公式有一定的局限性,公式相关参数还有待船模及实船航行试验数据的修正。但是实际水流条件复杂,影响因素较多,有关口门区回流条件的研究似乎遇到了一个瓶颈,

在无切实可行的方法及先例的情况下,建议参考李国斌等^[35]关于绕丁坝水流、盲肠河段回流区^[36-37]、单侧突扩水流等相近领域的研究成果,从中借鉴一些适用的方法来展开研究。

参考文献:

- [1] 周代鑫. 水利枢纽船闸引航道口门区流态改善措施[J]. 人民珠江, 1997(5): 29-31.
- [2] 周华兴. 船闸通航水力学研究[M]. 哈尔滨: 林业大学出版社, 2007.
- [3] 郑宝友, 陈波. 船闸上游口门区连接段为弯道的通航水流条件[J]. 水道港口, 2005, 26(2): 99-102.
- [4] 陈作强. 通航建筑物口门区及连接段通航水流条件研究[D]. 成都: 四川大学, 2006.
- [5] 王庆龙. 无闸低坝枢纽引航道通航水流条件研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014.
- [6] 王蝶, 张绪进, 周玉洁. 岷江犍为航电枢纽下引航道口门区通航条件研究[J]. 水运工程, 2012(2): 113-118.
- [7] 周家俞, 尹崇清, 王召兵, 等. 赣江石虎塘航电枢纽船闸引航道口门区通航水流条件试验研究[J]. 红水河, 2010, 29(6): 57-61.
- [8] 卢文蕾, 戈龙仔. 枢纽泄水闸开启方式对通航条件的影响[J]. 水运工程, 2011(4): 126-131.
- [9] 李焱, 郑宝友, 卢文蕾, 等. 引航道与河流主航道的夹角对通航条件影响试验[J]. 水道港口, 2009, 30(1): 42-48.
- [10] 陈永奎, 王列, 杨淳, 等. 三峡工程船闸上游引航道口门区斜流特性研究[J]. 长江科学院院报, 1999, 16(2): 1-6.
- [11] 毛新仪. 高坝洲水利枢纽下游航道通航水流条件试验研究[J]. 人民长江, 1997(9): 39-40.
- [12] 朱红, 郝品正. 导流墩改善船闸引航道口门区水流条件试验研究[J]. 水道港口, 2005, 26(2): 109-112.
- [13] JTJ 305—2001 船闸总体设计规范[S].
- [14] 田辉. 船闸引航道口门区通航水流条件研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2013.
- [15] 蔡素文. 枢纽口门区通航水流与船舶航行条件研究[D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2009.
- [16] 蔡创, 蔡汝哲. 嘉陵江沙溪枢纽引航道船模通航预报试验研究[J]. 水道港口, 2009, 30(3): 191-196.
- [17] 周华兴, 郑宝友. 船闸引航道口门区通航水流条件改善措施[J]. 水道港口, 2002, 23(2): 81-86.
- [18] De Jong R J, Vrijer A. Mathematical and hydraulic model investigation of longitudinal force on ships in locks with door filling systems[R]. Delft: Delft Hydraulic Laboratory, 1980.
- [19] Casulli, Vincenzo. Numerical simulation of three-dimensional free surface flow in isopycnal co-ordinates[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 1997, 25(6): 645-658.
- [20] Stockstill R L. Modeling navigation conditions at lock approaches [R]. Engineering Research and Development Center Vicksburgs Coastal and Hydraulics Lab, 2001.
- [21] JTJ 261—266 船闸设计规范[S].
- [22] 凌贤宗. 铜鼓滩枢纽通航条件的试验研究[R]. 武汉: 长江科学院, 1987: 317-325.
- [23] 陈桂馥, 张晓明, 王召兵. 船闸导航建筑物透空形式对通航水流条件的影响[J]. 水运工程, 2004(9): 56-58.
- [24] 赵连白, 刘万利, 张秀琴. 葛洲坝大江船闸下游航道通航水流条件试验研究分析[J]. 泥沙研究, 2001(6): 14-20.
- [25] 朱红. 导流墩改善船闸引航道口门区水流条件的试验研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2006.
- [26] 徐国兵. 株洲航电枢纽平面布置研究[J]. 水运工程, 2008(6): 108-111.
- [27] 韩玉芳, 陈志昌. 丁坝回流长度的变化[J]. 水利水运工程学报, 2004(3): 33-36.
- [28] 胡旭跃, 李彪, 徐立君. 水利枢纽通航水流条件研究综述[J]. 水运工程, 2005(11): 59-64.
- [29] 张声鸣. 万安水利枢纽泄洪建筑物调度运用[J]. 人民长江, 1996(11): 36-38.
- [30] 周华兴, 郑宝友, 李金合. 船闸引航道口门区水流条件限值的探讨[J]. 水运工程, 2002(1): 38-42.
- [31] 周华兴, 郑宝友. 再论《船闸引航道口门区水流条件限值的探讨》[J]. 水运工程, 2005(8): 49-52.
- [32] 李一兵, 江诗群, 李富萍. 船闸引航道口门外连接段通航水流条件标准[J]. 水道港口, 2004, 25(4): 179-184.
- [33] GB 50139—2004 内河通航标准[S].
- [34] 李伟. 透空隔流堤对船闸引航道口门区水流条件影响研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2007.
- [35] 李国斌, 韩信, 傅津先. 非淹没丁坝下游回流长度及最大回流宽度研究[J]. 泥沙研究, 2001(3): 68-73.
- [36] 刘青泉. 港渠口门回流的泥沙淤积特性[J]. 水科学进展, 1995(3): 231-236.
- [37] 刘青泉. 回流饱和挟沙力[J]. 水利学报, 1996(6): 39-47.