



船闸口门区布置及其通航安全判别标准^{*}

王 定

(湖南省水运建设投资集团有限公司, 湖南 长沙 410011)

摘要: 针对应用《船闸总体设计规范》进行船闸引航道口门区及制动段布置时遇到的问题, 从船舶通航安全角度阐述了船闸引航道制动段、口门、口门区和连接段的内涵。介绍了国内外现有船闸口门区通航安全判别标准并指出其存在的问题, 分析引航道口门区的水流特性及船舶舵效原理, 提出一种切实可行的船闸通航安全制动段水流条件判别方法, 对船闸整体模型试验及船闸总体布置具有一定借鉴意义。

关键词: 船闸引航道; 口门区; 连接段; 舵效; 通航安全判别标准; 制动段水流条件标准

中图分类号: U641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)03-0087-05

Layout of gate area of ship lock and criterion of navigation safety

WANG Ding

(Hunan Provincial Water Transportation Construction & Investment Group Co., Ltd., Changsha 410011, China)

Abstract: In view of the problems encountered in the layout of gate area and brake section in the approach channel of lock by applying the general design code of lock, the connotation of brake section, entrance, entrance area and connection section of the approach channel of lock are expounded from the perspective of shipping safety. This paper introduces the existing standards of navigation safety at home and abroad and points out the existing problems, analyzes the water flow characteristics in the entrance area of the approach channel and the principle of ship rudder efficiency, and puts forward a feasible method of judging water flow conditions in the brake section for lock navigation safety, which has certain reference significance for the whole model test and the overall layout of the lock.

Keywords: lock approach channel; entrance area; connecting section; rudder efficiency; navigation safety criterion; flow condition standard of brake section

船闸引航道口门区布置及通航水流条件限值标准关系到船闸的船舶通航安全及投资规模, 是船闸设计中的关键问题。《船闸总体设计规范》^[1]规定引航道口门区通航水流条件为横流不超过 0.3 m/s。周华兴等^[2-3]对通航水流条件限值进行深入探讨, 强调只有实船试验才能检验口门区水流条件限值及布置的合理性。郑宝友等^[4]结合实践工程提出山区船闸引航道可缩短, 口门可不加宽, 停泊段可布置在口门区等建议。然而, 鲜有学者结合工程实践从原理上阐述应用现行《船闸总体设计规范》进

行船闸总体布置和模型试验时遇到的问题。例如, 引航道不可能涵盖制动段, 引航道口门宽度难以达到 1.5~2.0 倍引航道直线段宽度, 连接段水流条件也不可能达到口门区的要求。本文旨在解释上述问题并提出一种制动段通航安全判别方法。

1 船闸总体布置

1.1 船闸引航道

船闸引航道是指引导船舶从航道进入闸室的限制性航道, 是隔流堤(墙)掩护的水域。现行《船

收稿日期: 2023-06-27

*基金项目: 湖南省交通科技项目 (201544)

作者简介: 王定 (1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事水运工程设计和管理。

闸总体设计规范》规定,引航道应由导航段、调顺段、停泊段和制动段等组成,其平面布置应保证通航期内过闸船舶、船队畅通无阻,安全行驶。引航道导航段和调顺段内宜为静水区,制动段和停泊段的水面最大流速纵向不应大于0.5 m/s、横向不应大于0.15 m/s。制动段长度应满足船舶、船队制动的需要,并根据口门区流速大小、设计最大船舶及船队的长度和性能确定。

根据规范条文,引航道长度包含制动段,意味着隔流堤(墙)应延伸至制动段末端。同时,为满足其水流条件,引航道制动段和停泊段河侧需设隔流堤(墙),制动段末端即隔流堤(墙)端部。引航道制动段和停泊段并不要求为静水区,可在隔流堤(墙)制动段开孔并采取适当透空率,改善口门区水流流态。

在弯曲河道或扩建船闸工程中,规范已经明确引航道导航、调顺和停泊段长度,而制动段长度的确定是一个关键而复杂的问题。制动段越长,船舶进入引航道口门时的允许航速越大,克服不良流态的能力越强,但也意味着隔流建筑物的长度增加,工程投资增大。另外,当船闸主体结构平面位置确定的情况下,制动段长度直接影响引航道口门的位置及其水流条件,进而影响为改善口门区水流条件而增加的工程措施及投资。为改善口门区的水流条件而需调整引航道口门位置时,制动段长度有时会远远超过船舶常规的制动距离,甚至有可能在保证合理的制动段长度的情况下调整船闸主体平面布置。

船舶进入上、下游引航道的制动段有所区别。船舶从上游顺流而下,为保持一定的舵效穿过口门区,需维持合理的静水航速,叠加水流纵向流速后,进入上游引航道口门时的对岸速度较大,所需的引航道制动段较长;船舶从下游逆流而上,其静水航速叠加水流纵向流速后,进入下游引航道口门时的对岸速度较小,所需的引航道制动段较短。

工程中为节省投资,当口门区水流条件相对较好时,可适当降低船舶通过口门区的静水航速,降低引航道制动初始速度,减小制动段长度,缩

短隔流堤(墙)长度。船舶进入船闸引航道是从正常航速调整为口门区航速而减速的过程。实际上,船舶制动段应包含引航道外和引航道内的制动段。根据实船试验,船队航速2.5~4.5 m/s时,制动距离一般为船队长的2.0~5.0倍,而实际工程中引航道内的制动段往往难以满足。

1.2 船闸口门区

船闸口门指船闸引航道隔流堤(墙)端部,也就是引航道的末端。船闸引航道口门内受到隔流堤(墙)的掩护,基本为静水区。口门外一定范围水域的水流边界条件发生突变,形成斜流和回流,使船舶产生横漂和扭转。船舶进入引航道后即制动停靠引航道停泊段的靠船建筑物,制动段的长度会限制船舶进入引航道口门时的航速。船闸引航道口门内为限制性航道,船舶失控撞上口门区建筑物或漂出引航道外撞上枢纽闸坝的后果严重,也不允许船舶以很大的航速进入引航道。船舶在引航道口门区因航速受限,相比一般航道,其克服不良流态的能力更差,因此需提出口门区的概念并规定其范围,以区别于一般航道和连接段航道。

综上,船闸口门区可定义为船闸引航道口门外船舶航行速度受限的区域。

现行《船闸总体设计规范》对船闸口门区的范围作出了明确规定,其宽度与引航道口门有效宽度相同,其长度应按设计最大船舶(队)确定,顶推船队采用2.0~2.5倍船队长,拖带船队采用1.0~1.5倍船队长。引航道口门有效宽度不宜小于1.5倍引航道宽度,当受水流、风、浪的影响较小时,可适当减小。

工程上,口门区的概念仅用于船闸的整体模型试验。通过模型试验测得口门区范围内的斜流和回流是否满足规范要求,并进行口门区优化布置或增加工程措施。

一般而言,船闸口门区的起始端为制动段的末端,口门区与引航道制动段是连续的。但一些山区河流受地形限制,船闸引航道长度很难包含制动段,甚至不包含停泊段。例如,嘉陵江的新政、金溪坊、凤仪、青居枢纽和湘江的湘祁二线船闸上

游引航道。对于这些停泊段和制动段布置在引航道外的布置形式，引航道口门区位于引航道外停泊段或制动段，口门区水流条件不仅需要满足安全进入口门的要求，还应满足船舶安全停靠停泊段和制动的要求，即流速纵向不应大于0.5 m/s，横向不应大于0.15 m/s。通常情况下，在较大的流量下，船闸引航道口门区的水流条件是难以满足上述要求的，只能采取减小最大通航流量、降低船闸通航保证率等管理措施。因此，现行《船闸总体设计规范》规定“对山区Ⅲ~Ⅶ级和平原Ⅳ~Ⅶ级的船闸，当受地形等条件限制，引航道不能满足直线段长度要求时，可在满足安全进、出闸和通过能力要求的条件下，通过技术经济论证进行布置”。

考虑到引航道隔流堤(墙)端部局部流态不好，而设置隔流堤(墙)和口门区建筑物的意义在于保证船舶安全停靠至引航道停泊段，仅需保证船舶航行区域的水流条件满足要求，并不需要口门宽度内的水流条件全部满足规范限值。即口门宽度为口门有效宽度和无效宽度之和。

根据规范，单线船闸引航道宽度为设计最大船宽、等候过闸船舶总宽、船舶之间富余距离、船与岸的富余距离之和。对于常见的Ⅲ级(1 000吨级)船闸，2列船舶等待过闸，引航道宽度为48.6 m。同时，为满足船闸灌泄水时引航道水流条件，Ⅲ级单线船闸的引航道宽度一般达到55 m。引航道口门有效宽度按规范取82.5 m，如果考虑口门无效宽度7.5 m，则口门宽度达到90 m。一般Ⅲ级航道宽度为60 m。按规范要求，船舶从60 m宽的主航道进入82.5 m宽的连接段航道和口门区，再进入55 m宽的引航道，甚为不合理。

在实际工程中，口门区宽度很难达到规范要求。工程上，船闸引航道制动段多为50~100 m，需要从55 m宽过渡到90 m宽，制动段隔流堤(墙)与引航道轴线的夹角达到28°~42°，布置不协调，也不利于口门区的水流流态。对于扩建船闸工程，当隔流墙布置在一、二线船闸之间时，隔流墙制动段外扩太宽，对一线船闸进出闸非常

不利；当隔流墙布置在一一线船闸河侧时，隔流墙制动段外扩太宽，占用河道泄洪断面，对防洪非常不利。弯曲河道或扩建船闸工程中，口门区及连接段水流流态较差，如果笼统地要求其宽度达到1.5倍引航道宽度，宽度范围内水流不超规范限值，是不现实的。

理论上，引航道口门区及连接段航道水流条件较差，船舶航行漂角较大，航迹带较宽，应通过设定的航线、设计船型、最大漂角及安全距离确定。引航道宽度的影响因素主要是船型、引航道并排停靠待闸船舶的总宽及引航道水流条件，与引航道口门区宽度没有必然联系。规范规定引航道口门区宽度取1.5倍引航道宽度没有理论依据。引航道口门区及连接段航道水流条件较主航道差，其宽度应大于主航道直线段宽度，但《内河通航标准》对I~Ⅲ级航道直线段宽度的要求是依据顶推船队确定的，而湘江等内河船闸的设计船型为货船，需要的航行宽度小于规范要求。对于Ⅲ级船闸，口门区及连接段航道宽度取《内河通航标准》规定的主航道宽度60 m，在制动段过渡到引航道宽度55 m，是较为常规的布置方式，满足船舶安全通航要求。

关于口门的无效宽度，规范未进行说明，有文献提出取0.5倍引航道宽度，笔者认为这一提法不切实际。实际上，口门的无效宽度指由于隔流堤(墙)的边界效应而导致其内侧水流条件难以满足规范要求的宽度范围，应通过模型试验确定。

1.3 船闸连接段

现行《船闸总体设计规范》规定，当口门区不能与主航道直接平顺衔接时，应设置连接段。连接段应与口门区及主航道平顺衔接，确保船舶、船队安全通畅行驶。连接段的宽度和水深应与口门区相同，长度视条件而定，通航水流条件可参照口门区水流限值要求。引航道口门至主航道严禁采用反曲线连接。

工程上一般认为船闸引航道外水流条件好、基本不存在斜流的位置是主航道，而主航道与口门区末端之间存在斜流等不良流态的航道是连接

段航道。实际上，连接段航道与主航道没有本质区别，主航道在弯曲河段和支流口也需要克服斜流等不良流态。连接段越接近平顺的主航道水流条件越好，自然满足规范要求的水流限值要求，因此，连接段长度就显得毫无意义了。

本质上，规范是将船舶从水流条件好的平顺主航道进入引航道的航段划分为 2 段，即连接段和口门区，其区别在于船舶通过连接段可采用最大的静水航速和最好的舵效，而船舶通过船闸口门区是从开敞水域进入狭窄水域，需采取合适的航速进入口门。因此，连接段的水流条件要求应低于口门区，规范要求连接段的通航水流条件可参照口门区水流限值要求并不合理。

2 船闸通航安全判别方法

2.1 船闸口门区通航安全判别一般标准

2.1.1 美国标准

美国标准主要依靠船模航行试验判断船闸口门水流情况是否碍航。涂启明^[5]提出船闸口门区回流应小于 0.3 m/s，当回流长度小于船舶长度的一半时，回流应小于 0.61 m/s。

2.1.2 前苏联标准

前苏联《船闸设计规范》规定，I ~ II 级航道上最大纵向流速不大于 2.0 m/s，III ~ IV 级航道上最大纵向流速不大于 1.5 m/s。船闸引航道与水库（河流）的连接段水流条件为：横流不大于 0.4 m/s，纵向流速不大于 2.0~2.5 m/s。

2.1.3 国内模型试验一般标准

国内模型试验研究单位对船闸整体物理模型试验中的安全通航标准均通过水流条件和航模两方面验证。1) 引航道口门区水面流速。在口门区的有效水域范围内，纵向流速 $v_y \leq 2.0 \text{ m/s}$ ，横向流速 $v_x \leq 0.3 \text{ m/s}$ ，回流流速 $v_0 \leq 0.4 \text{ m/s}$ 。另外在引航道口门区宜避免出现如泡漩、乱流等不良流态。2) 引航道内流速。引航道导航段和调顺段内宜为静水区，制动段和停泊段的水面最大流速纵向不应大于 0.5 m/s，横向不应大于 0.15 m/s。3) 参照口门区通航水流条件的基本要求，判别口

门区与主航道之间的连接段水流条件的优劣。

4) 船舶在口门区航行时，舵角不应大于 20°，航行漂角不应大于 10°；连接段舵角不大于 25°。

2.1.4 存在的问题

美国标准采用船模操纵模拟试验判别船闸口门区的通航安全，对船舶操纵精度要求较高。前苏联标准采用纵、横向流速限值判别船闸口门区的通航安全，可操作性更强，但忽略了航速对船舶舵效的影响。我国采用水流条件限值标准和船模操纵模拟试验 2 套标准判别船闸口门区的通航安全，经常出现自相矛盾的判别结论，通常是船模试验满足要求，而水流条件超出规范限值。

2.2 引航道口门区水流特性

船闸口门区是船舶进出引航道的咽喉，此区域水流条件的好坏直接关系过闸船舶的安全。口门区水流受枢纽中导航建筑物等边界条件的影响，在河道断面变化的情况下，水流发生弯曲变形，产生流速梯度，形成斜流和回流。斜向水流作用在船舶上，使船舶产生横漂和转动，影响着船舶的漂角、漂距等航行参数，给船舶操纵带来很大的困难，严重时会使船舶失控发生事故。为保证船舶的航行安全，口门区斜流不宜过大，口门区水流条件若超过一定范围，将对进出船闸的船舶造成严重影响，为此国内外学者对其判别标准作了相关研究和界定。

2.3 船舶舵效

舵效指舵力的转船效果，也就是保持航向和改变航向的效率，该指标决定了船舶的操纵性能，是保证船舶安全航行的主要因素。一般地，舵角越大、航速越高、舵机性能越好、水深越小，舵效越好。在宽度受限的航道中航行时，为确保航向，船员一般会用小舵角纠正船舶的偏离，此时的舵效是指小舵角抑制船舶偏转的效率。因此，船模试验一般要求引航道口门区的操舵角不应大于 20°，连接段舵角不大于 25°。船舶进入引航道前需要减速制动，舵效相应变差。同时，船舶为有效保向，需要保持一个最低船速，即有舵效的最低船速^[6]。

为了改善船闸引航道口门附近的不利水流条件、提高船舶的舵效，可采取以下措施：增加引航道制动段长度，提高通过口门区的船舶航速，克服不良流态；增加引航道口门宽度，允许船舶以较大的舵角克服不利的水流条件；采取合适的航线，提高船舶适应水流的能力；采取导流墩等工程措施改善水流条件；适当增加引航道口门区及连接段航道的水深，提高船舶舵效；提高船舶的舵机性能。

然而，船模试验的准确性对船舶操纵模拟的要求极高，船闸口门区及连接段的通航安全判别标准需要用水流条件进行判别。现行《船闸总体设计规划》笼统地将引航道口门外2.0~2.5倍顶推船队(船舶)长定义为口门区并规定了水流条件要求，却忽略了船舶通过口门区的允许航速及舵角。

2.4 制动段通航安全判别方法

笔者认为，若以水流条件限值来判断，船舶是否能安全进出船闸引航道由制动段允许航速和航迹带范围的水流条件决定。允许船舶以正常速度航行的区域通航水流条件标准与一般航道相同，主要根据设计船型克服坡降及航行阻力而确定允许的最大纵向流速限值。所谓引航道内制动段、口门区、连接段航道的通航水流条件标准本质上是船舶需要制动进入引航道口门，静水航速减小、舵效降低，从而提出的保障通航安全的水流条件标准，可称为“制动段水流条件标准”。

制动段水流条件标准判别流程见图1。根据河势及口门附近的限制条件，确定口门内制动段长度及相应的允许对岸航速；根据设计代表船型的船舶操纵性能，确定对应于船舶静水航速的水流条件标准；根据河势及口门附近的限制条件，确定口门内制动段长度及相应的口门允许对岸航速；根据口门处的水流纵向流速，确定口门允许静水航速；综合分析确定设计船型的安全航行最大静水航速；船舶从安全航行最大静水航速开始制动，经引航道口门，靠泊至引航道内停泊段的航程需满足制动段航速水流标准；根据流场及航线，得到制动段各静水航速区段分布；根据各静水航速区段的流场及其水流条件标准判断通航安全性。

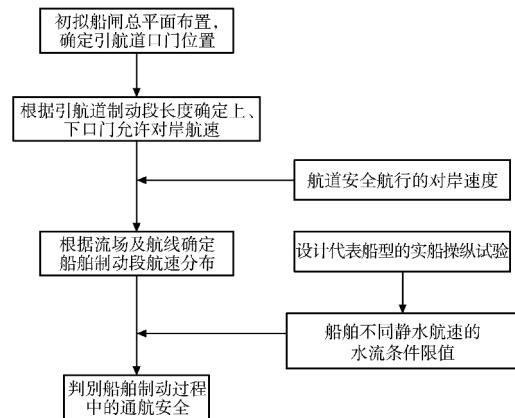


图1 船闸制动段通航水流条件判别流程

3 结论与建议

- 1) 阐述了引航道制动段、口门、口门区、连接段航道的内涵，明确了口门的概念。
- 2) 分析了口门区的水流特性，阐述了船舶舵效原理，提出了制动段水流条件标准判别通航安全的方法。
- 3) 建议：①取消船闸口门区及连接段的范围及水流条件标准，新增制动段的舵角要求及制动段水流条件标准判别通航安全的方法。②新增各等级船闸设计代表船型对应于设计航线、最大允许舵角和各级静水航速的横流等水流条件标准。③明确船闸口门的概念。④取消船闸口门区及连接段的范围规定。

参考文献：

- [1] 中交水运规划设计院. 船闸总体设计规范: JTJ 305—2001[S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 郑宝友, 戈龙仔, 周华兴. 对《船闸总体设计规范》中引航道布置及尺度的讨论[J]. 水利水运工程学报, 2012(4): 44-48.
- [5] 涂启明. 试论船闸引航道平面尺度[J]. 水力学报, 1984(7): 61-66.
- [6] 黄明红, 韩巍巍, 吴澎. 船闸引航道隔流墙的布置[J]. 水运工程, 2016(11): 162-166.

(本文编辑 王传瑜)