



微山三线船闸工程闸室平面尺度分析*

姜兴良, 宋振宁

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 微山三线船闸工程位于京杭运河干线通道和南水北调工程东线输水线路上, 需平衡高效通航与节约用水的目标。针对闸室平面尺度与船闸通过能力、过闸用水量计算的问题, 在分析设计水平年过闸艘次比、船型尺度的基础上, 根据主力船型尺度, 提出不同的闸室平面尺度方案, 开展船闸通过能力和用水量计算, 得出船闸通过能力、用水量与闸室平面尺度的定量关系。结论是微山三线船闸的通过能力随闸室平面尺度增大而增大, 但增幅不同, 船舶过闸用水量不随闸室平面尺度增大而增大, 因此有必要开展闸室平面尺度论证, 微山三线船闸工程闸室平面尺寸宜取 34 m×280 m。微山三线船闸工程闸室平面尺度确定方法对类似工程建设及规范修编具有积极借鉴意义。

关键词: 船闸; 通过能力; 用水量; 平面尺度; 有效尺度

中图分类号: U643.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)06-0159-05

Plane scale analysis of lock chamber in Weishan Third Line Ship Lock Project

JIANG Xingliang, SONG Zhenning

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007)

Abstract: The Weishan Third Line Ship Lock Project is located on the main channel of the Grand Canal Link and the eastern water transmission line of the South to North Water Diversion Project, and needs to balance the goals of efficient navigation and water conservation. To the problem of calculating the plane scale of lock chamber and the capacity of ship lock chamber and the water consumption of lock chamber, based on the analysis of the ship-to-ship ratio and ship-type scale in the design level year, this paper puts forward different lock chamber plane scale schemes according to the main ship-type scale, and carries out the calculation of the lock carrying capacity and water consumption to obtain the quantitative relationship between lock carrying capacity, water consumption and lock chamber plane scale. The conclusion is that the passing capacity of Weishan Third Line Ship Lock increases with the increase of the lock chamber plane scale, but the increase is different. The water consumption does not increase with the increase of the lock chamber plane scale. Therefore, it is necessary to conduct a plane scale demonstration of the lock chamber. The plane size of the lock chamber for Weishan Third Line Ship Lock Project should be 34 m × 280 m. The method for determining the plane scale of the lock chamber in the Weishan Third Line Ship Lock Project has positive reference significance for similar engineering construction and standard revision.

Keywords: ship lock; capacity of ship lock; water consumption; plane scale; effective scale

通过能力是建设船闸工程的核心指标, 用水量是开展水资源论证的关键指标, 这两个指标都和闸室平面尺度密切相关。交通行业标准 JTJ 305—2001《船闸总体设计规范》^[1]中给出船闸通过能力和耗

水量的计算方法, 未明确有关论证方法和要求。国家标准 GB 50139—2014《内河通航标准》^[2]给出设计船型尺度和闸室平面尺度的建议值, 未明确通过能力和耗水量的计算要求。王伟等^[3]基于排

收稿日期: 2023-10-19

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB2600183); 北京市科学技术委员会、中关村科技园区管理委员会科技服务品牌机构发展基金项目(20230467193); 中交集团特大科技项目(2019-ZJKJ-06)

作者简介: 姜兴良(1983—), 男, 正高级工程师, 从事港航工程咨询设计及项目管理工作。

队理论建立随机仿真模型,对不同尺度船闸设计方案通过能力进行计算,提出基于计算机仿真模型的通过能力计算方法。廖鹏^[4]引入船闸服务水平概念描述和衡量船闸通过能力的量质结合,提出基于服务质量的船闸通过能力研究新方法。王振喜^[5]针对开通闸的船闸通过能力提出新思路。陶桂兰等^[6]提出基于单位船型法计算船闸一次过闸平均吨位的方法。商剑平等^[7]、吴澎等^[8]基于计算机仿真分析方法,提出了多级多线船闸通过能力计算方法。袁和平等^[9]对京杭运河台儿庄三线船闸不同闸室尺度的通过能力进行计算,提出闸室尺度的合理化建议。关于通过能力、用水量与船闸闸室平面尺度相关性的研究案例较为有限。

京杭运河是《国家综合立体交通网规划纲要》中“四纵四横两网”高等级航道网的一条纵向通道,也是《国家水网建设规划纲要》中南水北调工程东线输水线路,在航运通过能力和水资源节约利用方面要求都非常高。微山三线船闸工程是京杭运河微山湖二级坝水利枢纽上的通航建筑物,是通航的控制性工程,用水量也较大。通过闸室平面尺度优化论证,实现高效通航与节约水资源的目标,取得良好的经济效益,其论证方法对类似工程建设和规范修订具有借鉴意义。

1 工程概况

微山湖二级坝水利枢纽位于山东省微山县南四湖中部,将南四湖分为上级湖和下级湖。二级

坝自东向西依次布置左岸连接土石坝、溢流坝、南水北调二级坝泵站、微山二线船闸、一闸、二闸、三闸、四闸和微山一线船闸、右岸连接土石坝,坝轴线长 7 360 m。拟建微山三线船闸位于南水北调二级坝泵站与二线船闸之间,与二线船闸平行布置,轴线间距为 180 m。微山一线船闸、二线船闸闸室有效尺寸为 230 m×23 m×5.0 m(有效长度×净宽×槛上水深)。

根据京杭运河东平—济宁段、济宁—二级坝段货物生成量分析,结合各支线航道整治、沿线港口发展现状及布局规划,预测 2035、2050 年微山梯级过坝货运量分别为 1.11 亿和 1.20 亿 t,其中,下行量分别为 8 330 万和 8 650 万 t^[10]。

2 设计船型及过闸艘次比

近些年,国家和苏鲁浙等省份实施系列京杭运河航道提级扩能工程,落地了系列鼓励船舶标准化发展的政策。2020 年以前,微山梯级过闸货种基本为煤炭、粮食等散货,船型以货船和拖带船队为主。根据统计,微山梯级 2010、2015、2019 年货运船舶平均载质量分别为 353、900、1 050 t/艘,百吨以下船舶基本消失,500 吨级以下船舶占比越来越少,千吨级及以上船舶占比增速较快,过闸船舶大型化趋势明显。预测 2050 年平均载质量可达 1 450 t/艘。根据运量预测、航道网连通情况、船型现状及发展趋势,预测 2050 年过闸船型尺度及船型艘次比例,见表 1。

表 1 特征年船型尺度与船舶艘次比

| 船舶吨级 | 船舶 总长/m | 船舶 型宽/m | 艘次比/% | | | |
|--------------------------|-------------|------------|--------|--------|--------|--------|
| | | | 2010 年 | 2015 年 | 2019 年 | 2050 年 |
| 300 吨级及以下(100~400 t) | 35~42 | 7.8 | 76.00 | 0.80 | 0.40 | 0.19 |
| 500 吨级(401~750 t) | 42~45 | 8.8 | — | — | — | 10.53 |
| 500 吨级集装箱(401~750 t) | 45~49 | 9.8 | 23.00 | 45.80 | 30.20 | 0.42 |
| 1 000 吨级(751~1 250 t) | 47~58 | 10.8 | — | — | — | 35.69 |
| 1 000 吨级集装箱(751~1 250 t) | 65~68 | 13.8 | 1.00 | 36.20 | 42.50 | 1.43 |
| 1 500 吨级(1 251~1 750 t) | 57~63 | 13.0 | — | 11.70 | 18.50 | 12.99 |
| 2 000 吨级(1 751~2 500 t) | 63~68 | 13.8 | — | 5.50 | 8.40 | 23.20 |
| 2 000 吨级及以上(>2 500 t) | 68~75 | 15.8 | — | — | — | 8.35 |
| 1 拖 8×1 000 t | 223.7~251.7 | 21.6 | — | — | — | 1.40 |
| 1 顶 2×1 000 t | 119.4~133.4 | 10.8 | — | — | — | 3.48 |
| 1 顶 2×2 000 t | 152.7~174.5 | 15.8 | — | — | — | 2.32 |
| 合计 | | | 100 | 100 | 100 | 100 |

3 闸室有效尺度

3.1 闸室有效长度

闸室有效长度可按以下步骤进行论证: 1) 分析预测船型组成中的主力船型, 即艘次比占优的船型, 按照主力船型排满闸室拟定初步的闸室有效长度; 2) 以此为基准, 拟定多个闸室长度, 分别计算船闸通过能力; 3) 根据船闸通过能力满足货运量预测的情况确定最终闸室长度。

根据表 1, 微山三线船闸工程 1 000 和 2 000 吨级货船艘次比接近 60%, 为主力船型。闸室内船舶排档应满足式 (1):

$$L_x = l_c + l_f \quad (1)$$

式中: L_x 为闸室有效长度, m; l_c 为闸室内船舶计算长度, m, 即纵向排列的船舶长度之和; l_f 为富余长度, m。当 $L_x \leq 120$ m 时, l_f 取 6 m; 当 120 m $< L_x \leq 180$ m 时, 取 8 m; 当 180 m $< L_x \leq 280$ m 时, 取 10 ~ 12 m; 当 280 m $< L_x \leq 400$ m 时, 取 12 ~ 15 m。

根据设计代表船型的长度和所占比例, 初拟以下长度方向的排船组合: 1) 3 排 1 000 t 货船: $L_x \geq 184$ m; 2) 3 排 2 000 t 货船: $L_x \geq 214$ m; 3) 4 排 1 000 t 货船: $L_x \geq 244$ m; 4) 4 排 2 000 t 货船: $L_x \geq 284$ m; 5) 3 排 1 000 t 货船+1 排 2 000 t 货船: $L_x \geq 254$ m; 6) 2 排 1 000 t 货船+2 排 2 000 t 货船: $L_x \geq 264$ m; 7) 1 排 1 000 t 货船+3 排 2 000 t 货船: $L_x \geq 274$ m。闸室有效长度取整为 230、260、280、290 m 进行比选。

3.2 闸室有效宽度

闸室有效宽度不应小于计算所需宽度, 宜采用 12、23、34 m。当采用其他宽度时, 应根据过闸主要船型宽度和所占比例分析确定, 闸室有效宽度可按式(2)计算:

$$B_x = \sum b_c + b_f \quad (2)$$

式中: B_x 为闸室有效宽度, m; $\sum b_c$ 为同一闸次过闸船舶并列停泊于闸室的最大总宽度, m, 当只有单列船舶过闸时, 则为设计船型和兼顾船型中宽度最大的船舶宽度 b_c ; b_f 为富余宽度, m, 当 $b_c \leq 11$ m 时, 取

1.0 m; 当 $b_c > 11$ m 时, 取 1.4 m。

根据设计代表船型的宽度和所占比例, 初拟以下宽度方向的排船组合: 1) 2 列 1 000 t 货船: $B_x \geq 22.6$ m; 2) 3 列 1 000 t 货船: $B_x \geq 33.4$ m; 3) 2 列 2 000 t 货船: $B_x \geq 29.0$ m; 4) 2 列 2 000 t 船队: $B_x \geq 33.0$ m; 5) 1 列 1 000 t 货船+1 列 2 000 t 货船: $B_x \geq 26.0$ m。为有利于船舶过闸及提高闸室利用率, 闸室有效宽度取 23 和 34 m 进行比选。

4 船闸通过能力

4.1 船闸 1 次过闸平均吨位

船舶到达船闸具有随机性, 以到达船型为随机变量, 采用二维装箱算法测算不同闸室尺度的 1 次过闸平均载重吨位和排挡情况, 并对一闸次平均船舶数进行取整, 见表 2。

表 2 过闸排挡仿真计算结果

| 船闸 编号 | 闸室尺寸 (净宽×有效长度)/ (m×m) | 1 次过闸 平均载 重吨位/t | 闸室平均 利用率/ % | 一闸次平 均船舶数/ 艘 |
|----------|-----------------------------|-----------------------|-------------------|--------------------|
| 1 | 23 × 230 | 5 065 | 65.75 | 4 |
| 2 | 34 × 230 | 8 778 | 76.78 | 7 |
| 3 | 34 × 260 | 10 052 | 77.39 | 8 |
| 4 | 34 × 280 | 11 350 | 80.40 | 9 |
| 5 | 34 × 290 | 11 630 | 80.07 | 9 |

由表 2 得出: 1) 随着闸室尺度增大, 1 次过闸平均载重吨位和一闸次平均船舶数逐渐增大, 闸室尺寸由 23 m × 230 m 增大为 34 m × 230 m 时, 1 次过闸平均载重吨位增加约 73%; 增大为 34 m × 280 m 时, 1 次过闸平均载重吨位增加约 124%; 2) 34 m 宽船闸随闸室长度的增加, 闸室平均利用率为 76% ~ 81%, 其中 34 m × 280 m 的闸室利用率最高。23 m 宽闸室仅能停泊 1 艘 2 000 吨级船舶, 因此其闸室利用率较 34 m 宽偏低约 15%。

4.2 船舶 1 次过闸时间

双向 1 次过闸时间采用公式(3)进行计算, 计算结果见表 3。

$$T_2 = 4t_1 + 2t_2' + 2t_3 + 2t_4' + 4t_5 \quad (3)$$

式中: T_2 为上、下行各 1 次的双向过闸时间, min;

t_1 为开门或关门时间,min; t_2' 为双向第 1 个船队进闸时间,min; t_3 为闸室灌水或泄水时间,min; t_4' 为双向第 1 个船队出闸时间,min; t_5 为船舶、船队进闸或出闸间隔时间,min。

表 3 双向 1 次过闸时间计算结果

| 闸室有效宽度×有效长度/ (m×m) | 闸门开启时间 t_1 /min | 进闸航行距离/ m | 进闸航行速度/ (m·s ⁻¹) | 进闸时间 t_2' /min | 闸室灌水泄水时间 t_3 /min | 出闸航行距离/ m | 出闸航行速度/ (m·s ⁻¹) | 出闸时间 t_4' /min | 两船间隔 t_5 /min | 双向一闸次过闸时间 T_2 /min |
|-----------------------|----------------------|--------------|---------------------------------|---------------------|------------------------|--------------|---------------------------------|---------------------|--------------------|-------------------------|
| 34×230 | 4 | 470 | 0.8 | 9.79 | 8 | 470 | 1.0 | 7.83 | 2 | 75.24 |
| 34×260 | 4 | 500 | 0.8 | 10.42 | 8 | 500 | 1.0 | 8.33 | 3 | 81.50 |
| 34×280 | 4 | 520 | 0.8 | 10.83 | 8 | 520 | 1.0 | 8.67 | 3 | 83.00 |
| 34×290 | 4 | 530 | 0.8 | 11.04 | 8 | 530 | 1.0 | 8.83 | 3 | 83.74 |
| 23×230 | 3 | 470 | 0.8 | 9.79 | 7 | 470 | 1.0 | 7.83 | 2 | 69.24 |

4.3 船闸通过能力

按照 JTS 305—2001《船闸总体设计规范》计算船闸年单向通过能力;年通航天数按 330 d 计;根据分析现状船闸运行资料,结合远期发展趋势,船舶货物装载系数按 0.75 计;船闸运行不平衡系数按 1.05 计;结果见表 4。已建设一线、二线船闸闸室有效尺寸为 23 m×230 m,两线船闸年单向通过能力为 4 760 万 t。

表 4 船闸年单向通过能力计算结果

| 船闸编号 | 闸室尺寸/(m×m) | 运行方式 | 货物通过能力/万 t |
|------|------------|------|------------|
| 1 | 23×230 | 双向运行 | 2 380 |
| 2 | 34×230 | 双向运行 | 3 795 |
| 3 | 34×260 | 双向运行 | 4 012 |
| 4 | 34×280 | 双向运行 | 4 448 |
| 5 | 34×290 | 双向运行 | 4 518 |

4.4 输水系统设计

根据 2013 年 1 月—2015 年 8 月的日均资料分析,得到微山船闸上下游水位差保证率,最大水位差 4.0 m 发生于 2013 年 2 月 28 日,对应上游水位 35.3 m,下游水位 31.3 m。根据 2020 年 1 月—2022 年 12 月的月均水位资料分析,船闸运行时上下游水位差为 2.21 m,见表 5。

根据 JTJ 306—2001《船闸输水系统设计规范》^[11],微山三线船闸采用闸首短廊道集中输水系统布置方案。上闸首廊道进水口采用顶面格栅进水方式,格栅进水孔总宽 5.7 m、总长 19 m、总面积 108.3 m²。廊道进口尺寸为 6.5 m×5.0 m,

断面最大平均流速 3.08 m/s,满足规范要求。输水廊道阀门段尺寸为 4.0 m×5.0 m,廊道出口尺寸为 7.5 m×5.0 m。下闸首采用侧面进水方式,廊道进口尺寸为 7.5 m×5.0 m,断面最大平均流速为 2.67 m/s。输水廊道阀门段尺寸为 4.0 m×5.0 m,廊道出口尺寸为 8.7 m×5.0 m。

表 5 近 3 年微山枢纽上下游实测水位差

| 月份 | 水位差/m | | |
|----|--------|--------|--------|
| | 2020 年 | 2021 年 | 2022 年 |
| 1 | 1.96 | 2.41 | 2.32 |
| 2 | 2.05 | 2.37 | 2.44 |
| 3 | 2.00 | 2.27 | 2.45 |
| 4 | 1.85 | 2.39 | 2.53 |
| 5 | 1.84 | 2.66 | 2.40 |
| 6 | 1.70 | 2.59 | 2.51 |
| 7 | 1.54 | 1.95 | 1.83 |
| 8 | 2.00 | 1.94 | 2.06 |
| 9 | 2.20 | 2.24 | 2.28 |
| 10 | 2.19 | 2.19 | 2.40 |
| 11 | 2.21 | 2.13 | 2.45 |
| 12 | 2.33 | 2.31 | 2.52 |

5 船舶过闸用水量

5.1 规划年货运量下的闸次数

预测 2050 年微山梯级过坝货运量为 1.20 亿 t,其中,上、下行货运量分别为 3 350 万和 8 650 万 t。已建两线船闸年单向通过能力为 4 760 万 t,则微山三线船闸需完成的下行货运量为 3 890 万 t。微山三线船闸采用不同闸室尺度的船闸完成 3 890 万 t 货运量所需闸次数,见表 6。

表6 规划年船舶过闸用水量

| 船闸 编号 | 闸室尺寸/ (m×m) | 闸次 数/次 | 1次过闸 用水量/m ³ | 年度过闸 用水量/万 m ³ |
|----------|----------------|-----------|----------------------------|------------------------------|
| 1 | 23×230 | 7 680 | 6 376 | 4 897 |
| 2 | 34×230 | 4 431 | 8 564 | 3 795 |
| 3 | 34×260 | 3 870 | 9 226 | 3 570 |
| 4 | 34×280 | 3 427 | 9 106 | 3 121 |
| 5 | 34×290 | 3 345 | 9 507 | 3 180 |

5.2 1次过闸用水量

双向运行的船闸,每下行、上行1个循环过程向下游泄1次水,即为1次过闸用水量。泄水量按式(4)计算:

$$Q_{\text{双向}} = A \cdot H + (G_2 - G_1) \cdot \eta \quad (4)$$

式中: $Q_{\text{双向}}$ 为双向运行1次过闸用水量, m³; A 为上下闸门间水域面积, m²; H 为船闸运行时上下游水位差, m, 取2.21 m; G_1 为下行过闸1次过闸平均吨位, t; G_2 为上行过闸1次过闸平均吨位, t; η 为船舶总排水量系数, 取1.25。

假定上行货运量全部由一线船闸和二线船闸过闸, 则微山三线船闸上行货运量为0。按此假定测算1次过闸用水量和规划年船舶过闸用水量见表6。

6 闸室尺度的选择

根据表4、5计算结果, 绘制不同闸室尺度对应的船闸通过能力和过闸用水量曲线, 见图1。

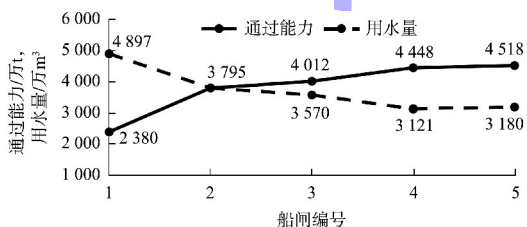


图1 船闸通过能力与过闸用水量曲线

6.1 通过能力与运输需求的匹配性

微山梯级上、下行货物不均衡, 下行需求明显大于上行需求。考虑已建两线船闸下行通过能力后, 微山三线船闸下行货运量为3 890万t。由图1可知, 闸室有效尺寸取23 m×230 m时, 不能

满足货运需求, 需适时再建设一线船闸; 闸室有效尺寸取34 m×230 m时, 通过能力略有不足; 闸室尺寸取34 m×260 m、34 m×280 m、34 m×290 m时, 通过能力满足货运需求。

由图1可知, 当闸室有效宽度取34 m时, 随闸室有效长度增大, 船闸通过能力逐渐增大; 闸室有效长度从230 m增至280 m时, 船闸通过能力增大较明显; 闸室有效长度从280 m增至290 m时, 船闸通过能力增幅放缓。这与过闸船舶艘次比、船舶长度等均密切相关。

6.2 船舶过闸用水量与闸室尺度选择

由图1可知, 闸室有效尺寸取23 m×230 m时, 规划年过闸用水量最大; 当闸室有效宽度取34 m时, 随着闸室有效长度增大, 规划年过闸用水量先逐渐减小后增大; 闸室有效尺寸取34 m×280 m时, 规划年过闸用水量最小。

微山梯级船闸位于南水北调工程东线工程输水线路上, 减少船舶过闸用水量具有非常重要的意义。综合考虑船闸通过能力与运输需求的匹配性、船舶过闸用水量, 微山三线船闸闸室平面尺寸取34 m×280 m。

7 结论

1) 过闸船型艘次比和船型尺度是确定闸室尺度的重要因素, 科学预测设计水平年过闸船型艘次比和船型尺度对合理确定闸室尺度、准确计算船闸通过能力至关重要。

2) 微山三线船闸的通过能力随闸室平面尺度增大而增大, 但非线性关系, 应从通过能力增幅、工程投资变化方面开展闸室平面尺度的论证。

3) 船舶过闸用水量不随闸室平面尺度增大而增大, 在水资源缺乏的地区应计算不同闸室尺度船舶过闸用水量, 合理确定船闸闸室平面尺度。

4) 从船闸通过能力与运输需求的匹配性、船舶过闸用水量方面来看, 微山三线船闸闸室平面尺寸宜取34 m×280 m。

(下转第228页)