



# 引江济淮工程派河口复线船闸建设规模

陈 艳, 黄 涛

(安徽省交通勘察设计院有限公司, 安徽 合肥 230011)

**摘要:** 针对引江济淮工程派河口复线船闸的建设规模问题, 根据工程建设区域船型特点, 运用随机过闸排挡仿真方法计算不同闸室尺度方案的船闸通过能力指标。结合闸室尺度对船舶组合的适应性因素, 初步筛选闸室尺度方案。进而从船闸建设场地条件、通过能力需求、过闸船型适应性以及运营调度策略等角度进行对比分析, 对船闸建设规模进行综合论证。

**关键词:** 闸室尺度; 船闸通过能力; 建设规模

中图分类号: U 641.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)11-0105-06

## Construction scale of Paihe second-line ship lock of the Yangtze-to-Huaihe water diversion project

CHEN Yan, HUANG Tao

(Anhui Transport Survey & Design Institute Co., Ltd., Hefei 230011, China)

**Abstract:** Aiming at the construction scale of Paihe second-line ship lock in the Yangtze-to-Huaihe water diversion project, according to the ship characteristics in engineering construction area, the ship lock passing capacity indexes of different chamber dimension schemes are calculated by using the stochastic simulation method of ship arrangement. In combination with the adaptability factors of chamber dimension schemes to ship combinations, the design schemes of chamber dimension are initially selected. Furthermore, comparative analysis is carried out from the perspectives of ship lock construction site conditions, passing capacity requirements, ship type adaptability and operation scheduling strategy, to comprehensively demonstrate the ship lock construction scale.

**Keywords:** chamber dimension; lock passing capability; construction scale

引江济淮工程是安徽省基础设施“一号工程”, 沟通江淮两大水系, 联通长江经济带、合肥经济圈、中原经济区三大战略区域, 是跨流域、跨区域重大战略性水资源配置和综合利用工程, 建成后将促进形成平行于京杭运河的我国第 2 条南北水运大通道<sup>[1]</sup>。引江济淮工程全线分为引江济巢段、江淮沟通段和江水北送段, 江淮沟通段航道等级为 II 级, 是安徽境内沟通淮河流域和长江流域航运的唯一线路, 交通战略地位极其重要。根据运量预测, 2030 年江淮沟通段航道起点派河口枢纽单向年过闸运量为 4 550 万 t, 而船闸设计

单向年通过能力仅 2 480 万 t (闸室有效尺度为 280 m×23 m), 难以满足航运需求; 此外, 船闸检修时的断航问题也将在航运繁忙时凸显。因此, 有必要启动派河口复线船闸建设规划工作, 并对船闸规模进行科学论证。

本文基于巢湖流域、淮河流域船型现状, 合理预测设计水平年过闸船型及组合; 运用随机过闸排挡仿真方法, 分析不同闸室尺度对预测过闸船舶组合的适应性, 定量计算船闸通过能力; 结合建设场地条件和运营调度策略对待建复线船闸建设规模进行论证, 为项目决策提供科学依据。

收稿日期: 2021-02-02

作者简介: 陈艳(1991—), 男, 硕士, 工程师, 注册土木工程师(港航), 从事港口航道工程设计咨询工作。

1 过闸船型及组合预测

综合引江济淮工程毗邻合裕线航道和淮河干流航道的船舶现状，对过闸船型及组合进行分析预测。合裕线航道裕溪船闸现状过闸船型分布见图 1，千吨级以上过闸船舶占比逐年增加，载质量 1 000 t 以上船舶比例从 2017 年的 49.09% 增至 2019 年的 84.22%，载质量 2 000 t 以上船舶比例从 2017 年的 5.84% 增至 2019 年的 29.15%；淮河干流航道蚌埠船闸现状过闸船型分布见图 2，载质量 1 000 t 以上船舶比例从 2016 年的 31.69% 增至 2019 年的 61.79%，船舶大型化发展速度明显。

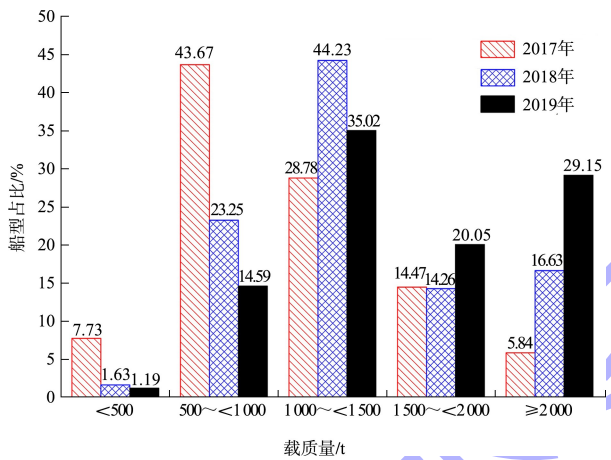


图 1 裕溪船闸现状过闸船型分布

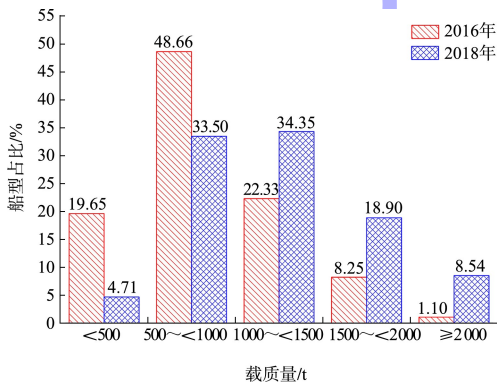


图 2 蚌埠船闸现状过闸船型分布

图 1、2 表明裕溪河航道和淮河干流航道存在一定比例的载质量 2 000 t 以上船舶通航。引江济淮工程江淮沟通段航道为运河航道，航道断面尺度和船闸尺度均按 2 000 吨级船舶设计，且该航道水位受泵站和节制闸联合控制，正常情况

下达不到载质量 2 000 t 以上船舶正常通航要求，故本文不考虑载质量 2 000 t 以上船舶的过闸需求。基于以上分析，结合安徽省高等级航道船型现状及发展趋势，并参考京杭运河、长江水系内河标准船型尺度，预测设计水平年过闸船型尺度及组合(表 1)。

表 1 设计水平年过闸船型尺度及组合

船型	总长/m	型宽/m	艘次占比/%		
			2030 年	2040 年	2050 年
500 吨级	44.0	8.8	7.5	5.0	2.5
	45.0	8.9	7.5	5.0	2.5
1 000 吨级	60.0	10.8	30.0	27.5	25.0
	63.0	11.0	30.0	27.5	25.0
2 000 吨级	67.6	13.8	8.0	11.0	15.0
	85.0	13.8	8.0	12.0	15.0
	73.0	13.8	9.0	12.0	15.0

2 闸室尺度适应性分析

2.1 闸室尺度拟定

船闸建设规模的选择应当满足：1) 闸室尺度能够适应预测船型合理组合过闸的需要，利于保持闸室较高的平均利用率；2) 船闸通过能力能够满足设计水平年各期运量需求。依据运量预测，2040 年派河口枢纽单向通过能力缺口高达 2 738 万 t，复线船闸闸室尺度标准应高于一线船闸，见图 3。结合前文过闸船型现状分析和船型预测结果，一线船闸 23 m 宽闸室无法满足 2 艘 2 000 吨级船舶(13.8 m+13.8 m)、1 艘 2 000 吨级船舶和 1 艘 500 吨级船舶(13.8 m+8.8 m) 并排过闸的需要，较低的闸室利用率严重影响船闸的通过能力。在未来船舶大型化继续发展、2 000 吨级船舶占比逐年增长的趋势下，23 m 宽闸室的适应性问题将更加凸显，复线船闸应选择合理的闸室有效宽度。根据规范 JTJ 305—2001《船闸总体设计规范》<sup>[2]</sup> 建议，结合船舶大型化趋势，将复线船闸闸室有效宽度定为 34 m；一线船闸闸室有效长度为 280 m，经测算拟定 280 m 和 340 m 闸室有效长度作为比选，形成 L1(280 m×34 m) 和 L2(340 m×34 m) 闸室尺度方案；同时，为验证 23 m 宽闸室的适应性问题，增加 L3(280 m×23 m) 和 L4(340 m×23 m) 方案作为对比。

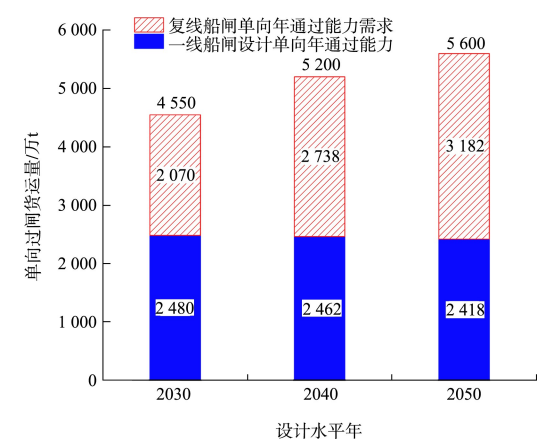


图 3 派河口枢纽预测单向过闸货运量分布

2.2 随机过闸排挡仿真方法

船舶过闸整体流程可划分为船舶航行至锚地报备、接受指令到指定锚地锚泊、申报过闸计划、接受安检、等待过闸计划发布、按计划过闸等环节。而现行规范中一次过闸平均吨位是计算船闸通过能力的关键性指标，本文保留了过闸流程中影响一次过闸平均吨位计算的重要环节，建立了简化船舶单向过闸模型，见图 4。

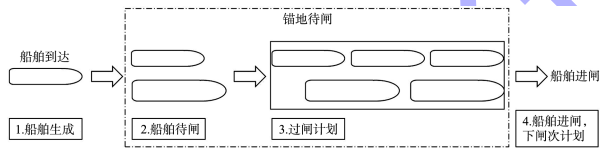


图 4 简化船舶单向过闸模型

船舶到闸在时间历程上表现出随机性、船舶尺度表现出离散性<sup>[3]</sup>，传统列举法组合过闸船舶主观性强，无法全面反映到闸船舶的时间特性和尺度特性，进而影响一次过闸平均吨位的合理性，缺少闸室平均利用率指标，难以衡量闸室尺度对过闸船舶组合的适应性。本文根据预测过闸船型比例数据，以到达船型为随机变量，采用蒙特卡洛方法(随机模拟法)生成到达船型，重复随机数发生过程形成到达船舶序列。

船舶进入锚地等待过闸计划。船舶平面轮廓类似矩形，且船舶在闸室中的排列需满足船与船之间不重叠、船舶不能超出闸室内侧壁，属于矩形物体不可旋转的二维装箱问题<sup>[4-5]</sup>。船舶过闸计

划策略一般分为两类：1) 先到先服务，按船舶到达先后次序进闸，一般适宜在过闸船舶数量少、排满一闸次船舶时间长的情况下采用，属于“在线装箱问题”；2) 先到先服务策略下的优选服务，保障先到船舶优先过闸的权益，适当调度尺度合适的后到船舶提前过闸，提高单次过闸船舶总吨位和闸室利用率，属于离线装箱问题。本文旨在研究论证船闸最大通过能力，基于第二类过闸计划策略，采用启发式算法求解离线装箱问题中的船舶排挡方案，形成过闸计划，即表示完成一次过闸，可获得每闸次过闸吨位、过闸船舶艘数和闸室利用率等指标。

2.3 一次过闸平均吨位和闸室平均利用率

针对前文拟定方案 L1、L2、L3 和 L4，采用预测 2030、2040 和 2050 年过闸船型尺度及组合进行过闸排挡仿真计算，对计算结果进行统计分析得到各方案一次过闸平均吨位、闸室平均利用率和一次过闸平均船数，见图 5。

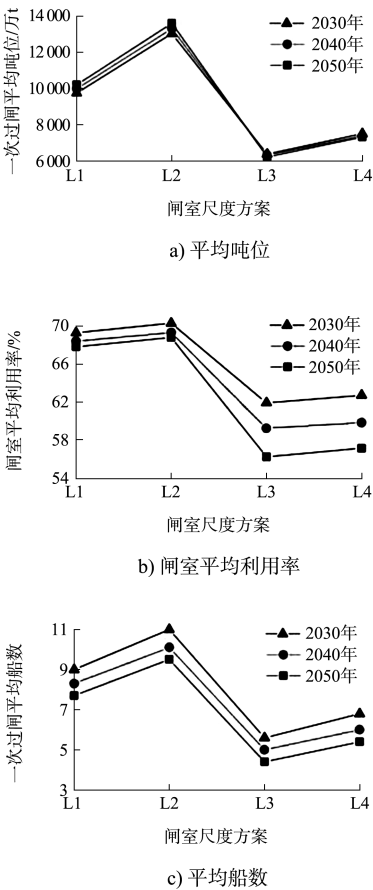


图 5 一次过闸平均吨位、闸室平均利用率和平均船数

如图 5 所示,在上述闸室尺度方案中:1) L2 的一次过闸平均吨位、闸室平均利用率和一次过闸平均船数均最高, L3 和 L4 的指标较低;2) 相同闸室长度下, 34 m 宽闸室方案的平均利用率较 23 m 宽闸室方案大幅提高;相同闸室宽度下, 340 m 长闸室方案的平均利用率较 280 m 长闸室提升较小;3) 各方案闸室平均利用率和一次过闸平均船数随时间降低, 闸室尺度对过闸船舶组合的适应性随船舶大型化发展而呈变差趋势, 但 L1、L2 的一次过闸平均吨位呈升高趋势, L3 和 L4 则呈下降趋势, 34 m 宽闸室对预测过闸船舶组合的适应性优于 23 m 宽闸室。

因此, 34 m 宽闸室对船舶大型化发展趋势的

适应性好, 可将 L1 和 L2 作为复线船闸比选方案, 进一步论证选择船闸建设规模。

3 船闸通过能力计算分析

3.1 一次过闸时间

规范综合了船舶进出闸、闸门启闭、灌泄水、船舶进出闸等过程要素, 规定了一次过闸时间的计算方法。在前述仿真过程一次过闸船数的基础上, 考虑船闸运营实际, 确定船舶过闸的一次过闸时间, 计算参数及结果见表 2。由于该航段预测运量大, 船闸在繁忙状态下运行, 双向过闸占比较多, 考虑到过闸的不均匀性, 计算时取双向过闸占比为 80%。

表 2 一次过闸平均时间计算

闸室方案	闸门开启时间 $t_1/\text{min}$	单向进闸时间 $t_2/\text{min}$	双向进闸时间 $t'_2/\text{min}$	闸室灌泄水时间 $t_3/\text{min}$	单向出闸时间 $t_4/\text{min}$	双向出闸时间 $t'_4/\text{min}$
L1	5	12.2	9.8	8.5	5.4	7.0
L2	5	14.8	11.9	10.0	6.4	8.5
进出闸间隔时间 $t_5/\text{min}$	单向一次过闸时间/min $T_1=4t_1+t_2+2t_3+t_4+2t_5$		双向一次过闸时间/min $T_2=4t_1+2t'_2+2t_3+2t'_4+4t_5$		一次过闸时间/min $T=0.2T_1+0.8(T_2/2)$	
8.88/8.48/8.11	72.38/71.58/70.84		105.97/104.37/102.89		56.86/56.06/55.32	
10.87/10.33/10.02	82.98/81.90/81.28		124.13/121.97/120.73		66.25/65.17/64.55	

注: “8.88/8.48/8.11” 依次表示 2030、2040、2050 年相应参数, 其他类同。

3.2 船闸年通过能力

船闸年通航天数为全年天数减去停航天数, 停航因素主要包括检修、事故、洪枯水及气象影响等, 扣除上述停航天数, 结合毗邻已建船闸现状实际通航天数情况, 船闸年通航总天数  $N$  取 340 d。

依据规范, 船闸日过闸平均次数  $n=60\tau/T$ , 其中  $\tau$  为日工作时间(h), 按昼夜均通航考虑取 23 h。求得 2030、2040、2050 年 L1 日平均过闸次数分别为 24.27、24.62、24.95, L2 日平均过闸次数分别为 20.83、21.18、21.38。

依据规范, 船闸年通过能力按式(1)(2)计算, L1 和 L2 方案船闸通过能力计算结果见表 3。

$$P_1=\frac{nNG}{2} \tag{1}$$

$$P_2=\frac{n-n_0}{2}\cdot\frac{2NG\alpha}{\beta} \tag{2}$$

式中:  $\alpha$  为船舶装载系数, 取 0.85;  $\beta$  为运量不平衡系数, 取 1.3;  $G$  为一次过闸平均吨位;  $n_0$  为昼夜内非运货过闸次数, 取 0 次/d;  $P_1$  为单向年过闸船舶总载质量(t);  $P_2$  为单向年过闸货运量(t)。

表 3 派河口复线船闸设计水平年各期通过能力

方案	年份	过闸运量/万 t					
		复线船闸 $P_1$	复线船闸 $P_2$	一线船闸 $P_2$	两线船闸 $P_2$ 之和	预测最大单向过闸运量	两线船闸 $P_2$ 富余
L1	2030	4 026.1	2 632.4	2 480.0	5 112.4	4 550	562.4
	2040	4 181.2	2 733.9	2 462.0	5 195.9	5 200	-4.1
	2050	4 334.8	2 834.3	2 418.0	5 252.3	5 600	-347.7



续表3

方案	年份	过闸运量/万 t					
		复线船闸 $P_1$	复线船闸 $P_2$	一线船闸 $P_2$	两线船闸 $P_2$ 之和	预测最大单向过闸运量	两线船闸 $P_2$ 富余
L2	2030	4 616.5	3 018.5	2 480.0	5 498.5	4 550	948.5
	2040	4 797.1	3 136.6	2 462.0	5 598.6	5 200	398.6
	2050	4 949.4	3 236.2	2 418.0	5 654.2	5 600	54.2

3.3 过闸运量

1)若采用 L1 方案, 2050 年复线船闸年单向通过能力为 2 834.3 万 t, 结合一线船闸 2 418.0 万 t 的年单向通过能力, 两线船闸不能满足该水平年 5 600 万 t 的单向过闸运量需求, 通过能力缺口 347.7 万 t。

2)若采用 L2 方案, 2050 年复线船闸年单向通过能力为 3 236.2 万 t, 两线船闸能满足该水平年单向过闸运量需求, 通过能力富余 54.2 万 t。

4 船闸建设规模论证

4.1 建设场地条件分析

派河口门段河面较为狭窄, 枢纽总体采用分散布置方式, 一线船闸布置在现状河槽内, 节制闸平行船闸布置在现状右堤内, 翻水泵站东西向布置于节制闸南侧约 1.6 km 处。复线船闸主体长度以 L1 方案为例, 船闸等级为Ⅱ级、船闸规模尺度大, 上下游引航道直线段长约需 1 280 m, 加上船闸主体工程长(上下闸首+闸室长约 380 m)以及上下游弯曲圆弧段切线长(240 m+470 m)至少约 1 140 m, 因此复线船闸对建设场地直线长度要求不小于 2 800 m。如图 6 所示, 翻水泵站北侧、节制闸南侧、派河河道东侧范围空地纵深约 1 350 m, 不满足复线船闸按东西向或东北—西南向布置需要, 复线船闸宜平行布置于一线船闸西北侧。

复线船闸平行布置于一线船闸西北侧, 须对牛角大圩生态农业园裁弯取直、迁建藻水分离站、改建派河大桥。此外, 复线船闸审批流程涉及闸址关键问题有: 占用永久基本农田、占用巢湖国家级风景名胜區、占用九联圩湿地及派河河口湿地、占用巢湖生态红线, 船闸建设程序协调任务重。场地空间有限、限制因素较多、改建费用高、协调难度大是复线船闸平面布置的主要特点和难

点, 未来三线船闸建设将更加困难, 因此, 复线船闸的建设规模应充分考虑长远发展需要, 留有适当的富余通过能力, 适应未来不确定性发展变化, 宜采用 L2(340 m×34 m)方案。

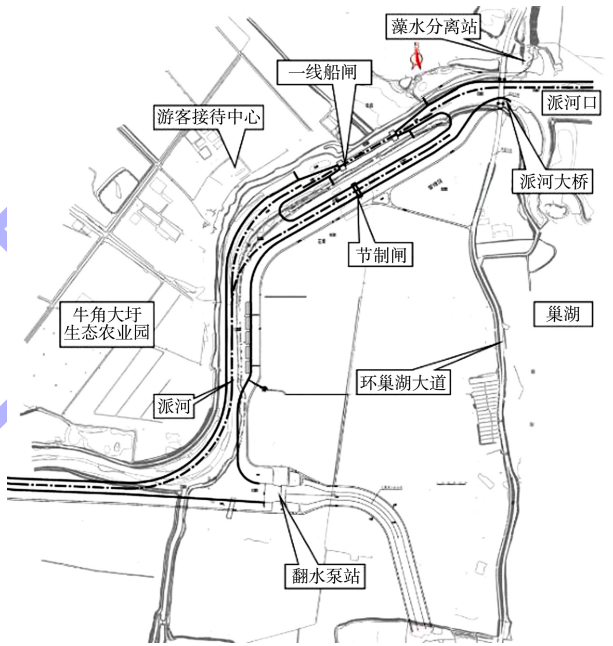


图 6 派河口枢纽建设场地现状

4.2 船闸通过能力匹配分析

派河口枢纽 2050 年预测单向过闸货运量 5 600 万 t, 考虑已建一线船闸 2 418 万 t 的单向通过能力, 要求复线船闸须分担 3 182 万 t 的单向过闸货运量。如采用 L1 方案, 年单向通过能力 2 834.3 万 t, 船闸通过能力不能满足货运量发展需要; 如采用 L2 方案, 年单向通过能力为 3 236.2 万 t, 能够满足预测设计水平年过闸货运量要求。因此, 派河口复线船闸采用方案 L2(340 m×34 m)的建设规模较为合理。

4.3 运营调度策略提升通过能力分析

设计水平年内 500 吨级或 1 000 吨级船舶艘次占过闸船舶总艘次超 50%。一线船闸闸室有效宽

度 23 m，能够停靠 2 艘 500 吨级或 1 000 吨级船舶（型宽不超过 11 m），只能停靠一艘 2 000 吨级船舶（型宽 13.8 m）；复线船闸闸室有效宽度 34 m，满足 2 艘 2 000 吨级船舶、1 艘 2 000 吨级船舶和 1 艘 500 吨级或 1 000 吨级船舶并排停靠。鉴于以上特点，拟定 500 吨级或 1 000 吨级船舶优先利用一线船闸过闸、2 000 吨级船舶优先利用复线船闸过闸的集中调度过闸策略，研究本策略对两线船闸通过能力的影响。利用本文过闸排挡仿真程序和船闸通过能力计算方法，分别求得船闸组合 1（一线船闸+复线船闸 L1）、船闸组合 2（一线船闸+复线船闸 L2）在随机过闸和集中调度过闸两种策略下的年单向通过能力，计算结果见图 7。

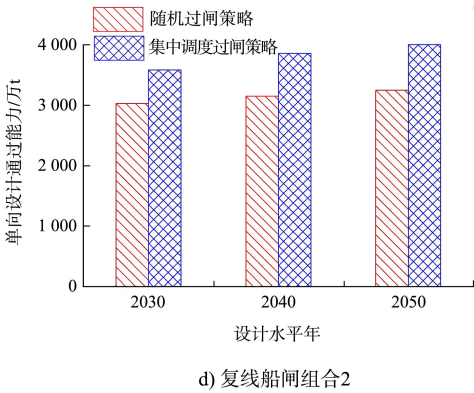
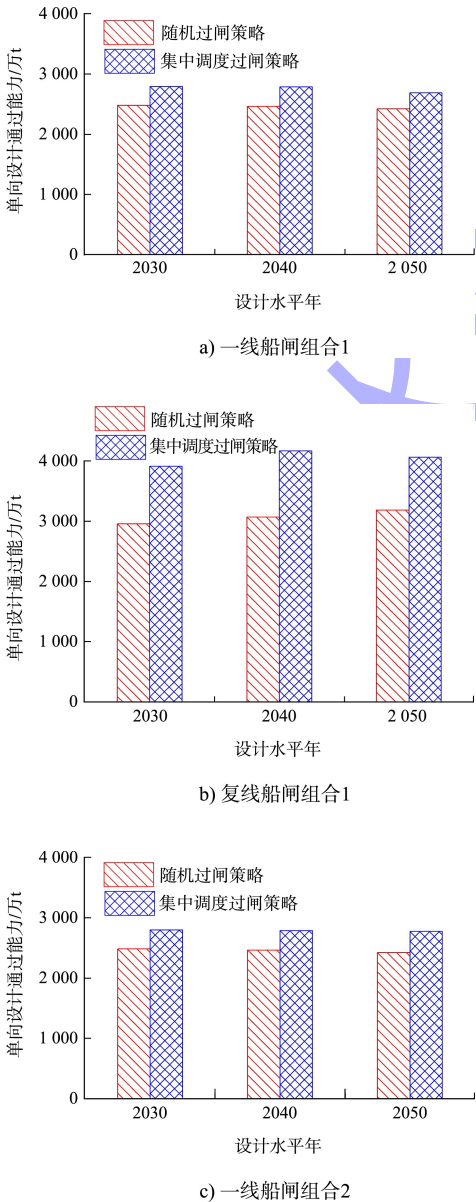


图 7 不同运营调度策略下船闸通过能力对比

过闸仿真采用集中调度运营策略时：1) 两线船闸年单向通过能力均有较大幅度提升；2) 船闸组合 1 中，2050 年一线船闸和复线船闸 L1 方案单向通过能力分别为 2 686.0 万 t 和 3 613.4 万 t，共计 6 299.4 万 t，满足该水平年 5 600 万 t 单向过闸运量要求；3) 船闸组合 2 中，2050 年一线船闸和复线船闸 L2 方案单向通过能力分别为 2 767.9 万 t 和 3 990.3 万 t，共计 6 758.2 万 t，单向通过能力富余 1 158.2 万 t；4) 双线船闸“一小一大”规模配置发挥了 23 m 和 34 m 宽闸室对不同型宽船舶的适应性，有效提升了船闸单向通过能力，经济合理，能够充分适应未来不确定性发展变化。

4.4 船闸建设规模选择

综上所述，派河口复线船闸建设场地空间有限、限制因素较多、改建费用高、协调难度大，未来三线船闸建设难度将更加困难，船闸建设规模应充分考虑长远发展需要；复线船闸采用尺度方案 L2，能够满足各水平年预测单向过闸货运量需求；双线船闸“一小一大”规模配置配合集中调度运营策略，能够充分适应未来不确定性发展变化。因此，派河口复线船闸建设规模采用 L2 方案较为合理，闸室有效平面尺度拟定为 340 m×34 m(长×宽)。

5 结论

1) 应用随机过闸排挡仿真方法，通过对单线或多线船闸的过闸流程进行仿真模拟，得到一次过闸平均吨位、闸室平均利用率和一次过闸平均船数等关键指标。

(下转第 191 页)