

拥堵收费下考虑船主心理期望成本的过坝策略研究

高攀¹, 刘顺¹, 赵旭^{1*}, 胡斌²

(1. 三峡大学 经济与管理学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 华中科技大学 管理学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 本文针对内河航运中水利枢纽通航拥堵问题, 在拥堵收费下引入心理期望成本, 以探寻面向双过坝模式(通航建筑物过坝和翻坝转运)的优化策略。首先, 应用非抢占式 M/M/1 排队系统, 构建了以综合过坝成本为参考点的决策模型, 提出了三种情形(无心理期望成本、通航建筑物过坝的心理期望成本、双过坝模式的心理期望成本)下的船舶过坝优化策略, 并对比分析了通航建筑物过坝比率、船舶平均等待时间和过坝系统总成本; 然后, 引入对翻坝转运的补贴策略, 通过调整心理期望成本水平, 来影响船舶过坝策略选择; 最后, 以三峡工程为例, 验证了上述模型的有效性。结果表明: 在拥堵收费下, 考虑船主心理期望成本, 可以促进过坝方式的转移, 降低船舶过坝平均等待时间, 且双过坝模式中均考虑该因素更有利于提升通航效率; 同时, 实施翻坝转运补贴策略, 能充分发挥心理期望成本的调节作用, 从而有效缓解水利枢纽通航拥堵问题。

关键词: 水路运输; 心理期望成本; 排队论; 过坝策略; 拥堵收费

中图分类号: U116.1; C93 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-6062(2024)01-0217-011

DOI: 10.13587/j.cnki.jieem.2024.01.016

0 引言

大中型水利枢纽的兴建, 使各流域通航条件得到极大改善, 通航需求逐年递增。2019 年三峡船闸货运通过量达到创历史新高的 1.46 亿吨, 超过设计通过能力 46%; 2020 年受疫情和汛情双重影响, 通过量仍达 1.37 亿吨。船舶过坝需求和船闸过坝能力的不匹配、翻坝体系和船闸的货运分担不均衡, 导致水利枢纽通航拥堵成为常态^[1], 造成“万里长江堵在宜昌”的窘境。另外据测算, 5000 吨级散装船日均待闸成本在 1 万元左右, 若按千余条船计算, 10 天待闸成本将超过 1 亿元。船主对过坝成本的感知, 成为影响过坝模式选择的重要心理决策因素。因此, 从过坝成本出发, 探寻过坝方式的转移路径及双过坝模式的货运分担机制, 是解决水利枢纽通航拥堵问题的有效途径之一。

在解决陆路交通拥堵问题上, 拥堵收费机制受到诸多学者的关注。为研究拥堵收费的潜在效果, 对北京市多种拥堵收费方案进行了评估^[2]。并进一步考虑道路瓶颈处的拥堵状况, 构建了动态收费的瓶颈模型^[3]。通过将系统动力学和灰色系统相结合, 构建了城市交通拥堵收费模型^[4]。利用累积前景理论分析出行行为^[5], 通过设置合理的拥堵收费和返还机制, 有效引导出行方式选择^[6]。另外, 排队等待时间和污染排放会影响最优拥堵收费水平^[7]。拥堵收费是通过增加成本来影响人们的出行决策, 当收费水平超出

心理承受能力时, 出行方式将会发生转变。

同时, 也有学者从心理因素出发, 引导出行方式选择。以计划行为理论为基础, 探寻了心理因素对城市公交出行决策的重要作用^[8]。基于前景理论, 在不同付费比例和交通拥堵率影响下, 分析了出租车合乘决策的心理变化^[9]。另外, 对影响学校出行行为的心理因素进行实证研究, 评估了其对中小学生对出行行为选择的影响路径^[10]。心理因素在调节交通出行决策中发挥着积极作用, 而其中的心理期望成本在各服务选择决策中也得到了广泛应用^[11]。人们会在决策选择过程中考虑心理期望成本, 来衡量对服务成本的接受底线和偏好程度^[12-13]。通过建立智能服务调度机制, 管理客户心理期望成本, 以引导消费行为选择^[14]。进一步结合顾客心理期望等待时间和成本效用, 运用差异化定价策略, 引导顾客的服务策略选择^[15]。

上述文献多聚焦于拥堵收费和心理因素对陆路交通和服务决策的影响, 货运及水运的探索鲜有涉及。因此, 本文以三峡工程的船舶通航为例, 尝试在拥堵收费下引入心理期望成本, 来刻画船主对过坝成本的接受底线, 并分析其对过坝策略选择的影响规律; 同时, 考虑对翻坝转运的补贴策略, 通过调整心理期望成本水平, 来探寻过坝方式转移的优化路径, 以形成“船闸过坝+翻坝转运”协同运作的货运分担机制, 从而缓解大中型水利枢纽通航拥堵难题。

收稿日期: 2021-09-11

基金项目: 国家社会科学基金重大项目(19ZDA089); 湖北省教育厅哲学社会科学研究项目(19Q033)

*** 通讯作者:** 赵旭(1982—), 男, 湖北宜昌人; 三峡大学经济与管理学院教授, 博士生导师; 研究方向: 内河航运与船舶调度。

<https://www.academax.com/doi/10.13587/j.cnki.jieem.2024.01.016>

1 模型构建

1.1 问题描述

通航建筑物过坝和翻坝转运是货物通过三峡工程的两种模式。前者由通航管理局统一调度,免费过坝;后者依托“水-陆-水”翻坝,须支付服务费。这使绝大部分船舶选择通航建筑物过坝,导致拥堵现象频发;翻坝运力则被闲置,导致过坝资源浪费。因此,如何实现双过坝模式的均衡,以缓解通航拥堵,是本文关注的重点问题。

过坝成本是影响过坝模式选择的关键因素,船主会根据对过坝成本的心理感知来改变过坝决策。当过坝成本突破心理接受底线时,过坝模式将会发生转移。因此,可尝试引入过坝拥堵费用(浙江富春江、江苏海安等船闸征收过闸费),利用船主心理期望成本,来调节双过坝模式的选择决策。

图1为心理期望成本影响下的船舶过坝决策流程。在通航建筑物过坝中引入拥堵收费,促使过坝模式向翻坝转移,以调节两种模式的过坝比例;当拥堵收费达到相对最优时,引入心理期望成本,分析其对过坝策略选择的影响规律,进一步考虑补贴翻坝转运的调节作用,以改善通航环境。

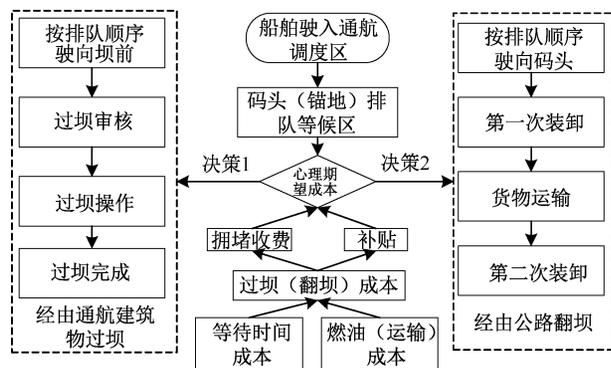


图1 过坝决策流程

Figure 1 The decision-making process for crossing the dam

1.2 变量设定

以双过坝模式的过坝系统总成本为参考点,借助静态拥堵定价理论,构建船舶过坝决策模型。为便于决策分析,设定如下变量:

(1) 基于过坝方式的异质性,将船舶(货物)分

为经通航建筑物过坝和翻坝转运两类,所有船舶都必须在由“锚地-码头”构成的队列系统中排队,此时存在锚地和码头两个差异化的服务台,采用非抢占式双 M/M/1 排队系统来反映其过坝规律。

根据船舶到达、接受服务、离开的三个特征,可建立先到先服务(FCFS)的排队模型:①船舶源源不断地到达“锚地-码头”服务系统,等待经由通航建筑物过坝或翻坝转运;②船舶到达过坝服务系统的到达率为 λ ($\lambda > 0$),即一个决策期内的过坝需求量,服从泊松分布,系统的服务率为 μ ,则服务强度为 $\rho = \lambda/\mu$ ($0 < \rho < 1$);③船舶按照先到先服务(FCFS)的规则接受排队服务,船舶可在两个服务台间进行相互转移。

(2) 通航建筑物过坝和翻坝转运的比例分别为 ξ, ψ 。参考相关研究^[15],在非抢占式 M/M/1 排队系统中,船舶经通航建筑物过坝的平均等待时间 W_1 为

$$W_1 = \frac{\rho(\xi + \psi)}{\mu(1 - \rho(\xi + \psi))(1 - \rho\xi)} \quad (1)$$

经翻坝转运的平均等待时间 W_2 为

$$W_2 = \frac{\rho(\xi + \psi)}{\mu(1 - \rho\xi)} \quad (2)$$

(3) 通航建筑物过坝和翻坝转运的成本分别为 C_1 和 C_2 ,对船舶经通航建筑物过坝收取拥堵费用 P ,船舶获得的服务价值为 V ,通航建筑物过坝和翻坝转运的效用分别为 U_1, U_2 ,则船主在过坝服务系统中所获总体效用^[15]分别为

$$\begin{cases} U_1 = V - C_1 - P \\ U_2 = V - C_2 \end{cases} \quad (3)$$

本文还需要使用到的参数符号如表1所示。

1.3 通航建筑物过坝成本计算

在通航建筑物过坝模式中,船舶过坝成本由时间成本和燃油成本构成。

1.3.1 时间成本计算

通航建筑物过坝的时间包括排队、航行及过坝时间,则时间成本可表示为

$$C_1^t = \tau \left(T_1 + \frac{L_1}{v_1} + W_1 \right) \quad (4)$$

表1 相关参数说明

Table 1 Description of related parameters

符号	符号意义(单位)	符号	符号意义(单位)
λ_1	决策期内经由通航建筑物过坝的需求量(艘/h)	λ_2	决策期内经由翻坝转运的需求量(艘/h)
τ	单位时间费率(元/h)	T_1	平均过坝时间(h)
L_1	锚地到通航建筑物的距离(km)	v_1	船舶平均航行速度(km/h)
A	调整低船速油耗常数项	B	船舶通航耗油量模型速度项
r_{\max}	最大补贴费用(元)	P_r	当前燃油价格(元/kg)
ω	船舶载重量(吨)	χ	平均装卸效率(吨/h)
L_2	翻坝运输距离(km)	v_2	翻坝运输平均速度(km/h)
γ	翻坝运输单位费率(元/吨·千米)	s	平均装卸费率(元/吨)

1.3.2 燃油成本计算

船舶从锚地出发,至完成过坝操作,燃油消耗成本是其主要成本;同时,影响船舶燃料消耗的因素很多,如船舶低速航行或者怠速,这里以船舶平均航速来表示油耗,航行过程中的耗油量与平均航速 v_1 的立方成正比^[16],则油耗成本由式(5)计算:

$$C_1^t = \frac{1}{24} \left(\frac{L_1}{v_1} + T_1 \right) (A + Bv_1^q) P_r \quad (5)$$

式(5)中, A, B, q 皆为常数, $A \geq 0, B > 0, q \geq 3$ 。

1.4 翻坝转运成本计算

在翻坝转运模式中,货物过坝成本由时间成本和服务(装卸和运输)成本构成。

1.4.1 时间成本计算

在货物翻坝转运过程中,受码头服务能力的制约,也会面临排队问题。因此翻坝时间包括排队、两次装卸及运输时间。则翻坝时间成本由式(6)计算:

$$C_2^t = \tau \left(2 \frac{\omega}{\chi} + \frac{L_2}{v_2} + W_2 \right) \quad (6)$$

1.4.2 服务成本计算

翻坝转运的服务成本包含两次装卸成本和运输成本,可由式(7)计算:

$$C_2^s = \gamma L_2 \omega + 2s\omega \quad (7)$$

1.5 决策模型

本文从提升水利枢纽通航效率的整体角度出发,综合考虑水利枢纽和船主两个决策主体。水利枢纽通过决策拥堵收费额度和提供翻坝转运补贴,来影响船主心理期望成本水平,进而影响船主对两种过坝策略的选择,以实现过坝策略均衡状态下的货运分担,从而缓解水利枢纽通航拥堵。为进一步优化过坝系统的货运分担结构并节省过坝成本,通过最小化系统总成本,以得到合理的拥堵收费额度及过坝船舶的货运分担比率,并以此分析船主心理期望成本对过坝决策的影响机理,参考现有研究^[6],构建式(8)所示的过坝决策模型:

$$\text{Min } Z = \lambda_1 C_1 + \lambda_2 C_2 \quad (8)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} C_1 = \tau \left(T_1 + \frac{L_1}{v_1} + W_1 \right) + \frac{1}{24} \left(T_1 + \frac{L_1}{v_1} \right) (A + Bv_1^3) P_r \\ C_2 = \tau \left(2 \frac{\omega}{\chi} + \frac{L_2}{v_2} + W_2 \right) + \gamma L_2 \omega + 2s\omega \\ 0 < \psi \leq 1 \\ 0 \leq \xi < 1 \\ \lambda_1 = \lambda \cdot \xi \\ \lambda_2 = \lambda \cdot \psi \\ \lambda = \lambda_1 + \lambda_2 \\ \lambda, \lambda_1, \lambda_2 \geq 0 \end{cases} \quad (9)$$

2 基于心理期望成本的过坝策略

2.1 不考虑心理期望成本

由于其他成本相对固定,因此排队时间成本是影响过坝决策的主要因素,为方便分析,将 C_1 和 C_2 表示为

$$\begin{cases} C_1 = \tau W_1 + C_T \\ C_2 = \tau W_2 + C_F \end{cases} \quad (10)$$

其中, C_T 和 C_F 分别表示除排队时间成本之外的通航建筑物过坝成本和翻坝转运成本。参考相关研究^[15],在系统达到均衡状态时,可得

$$\begin{cases} \xi = \frac{1}{\rho} - \frac{\tau}{\mu(1-\rho)(V-P-C_T)} \\ \psi = 1 - \frac{1}{\rho} + \frac{\tau}{\mu(1-\rho)(V-P-C_T)} \end{cases} \quad (11)$$

由于 $\xi + \psi = 1$,且 $0 < \xi \leq 1, 0 < \psi < 1$,则 $C_2 - C_F = (1-\rho)(C_1 - C_T)$,可得

$$\text{拥堵定价 } P \in \left(0, V - C_T - \frac{\tau\rho}{\mu(1-\rho)} \right)$$

$$\text{基础效用 } V \in \left(C_T + P + \frac{\tau\rho}{\mu(1-\rho)}, C_T + P + \frac{\tau\rho}{\mu(1-\rho)^2} \right)$$

$\cap \left(C_F + \frac{\tau\rho}{\mu}, C_F + \frac{\tau\rho}{\mu(1-\rho)} \right)$,即对于给定的通航建筑物过坝成本,当服务效用足够大时,所有船舶都不会离开排队系统,只会发生过坝方式转移,这一现象可通过不同方式的过坝比例呈现^[6]。因此,将讨论如何降低通航建筑物过坝比例,来缓解通航拥堵。

在系统达到均衡状态时,可得

$$Z = \lambda \left[\frac{1}{\rho} - \frac{\tau}{\mu(1-\rho)(V-P-C_T)} \right] (V-P) + \lambda \left[1 - \frac{1}{\rho} + \frac{\tau}{\mu(1-\rho)(V-P-C_T)} \right] V \quad (12)$$

$$\text{由 } \frac{d^2 Z}{dP^2} = \frac{2\lambda\tau(V-C_T)}{\mu(1-\rho)(V-P-C_T)} > 0 \text{ 可知,}$$

(12) 式存在极小值。令 $\frac{dZ}{dP} = 0$,可得未考虑心理期望成本时的最优策略如下:

$$\begin{cases} P_0^* = V - C_T - \sqrt{\frac{\rho\tau(V-C_T)}{\mu(1-\rho)}} \\ \xi_0^* = \frac{1}{\rho} - \sqrt{\frac{\tau}{\lambda(1-\rho)(V-C_T)}} \\ Z_0^* = \lambda \left[\frac{1}{\rho} - \sqrt{\frac{\tau}{\lambda(1-\rho)(V-C_T)}} \right] \\ \times \left(C_T + \sqrt{\frac{\rho\tau(V-C_T)}{\mu(1-\rho)}} \right) \\ + \lambda \left[1 - \frac{1}{\rho} + \sqrt{\frac{\tau}{\lambda(1-\rho)(V-C_T)}} \right] \\ \times \left(C_F + \sqrt{\frac{\rho\tau(1-\rho)(V-C_T)}{\mu}} \right) \end{cases} \quad (13)$$

此时,双过坝模式的成本分别为

$$\begin{aligned} C_1^* &= C_T + \sqrt{\frac{\rho\tau(V - C_T)}{\mu(1 - \rho)}} \\ C_2^* &= C_F + \sqrt{\frac{\rho\tau(1 - \rho)(V - C_T)}{\mu}} \end{aligned} \quad (14)$$

针对未考虑心理期望成本的拥堵定价进行研究,发现拥堵定价的增加,会对过坝策略起到一定的调节作用。但由于受拥堵收费水平的制约,使其对过坝策略选择的调节作用有限。心理期望成本能有效刻画船主对过坝策略的接受底线,对策略选择具有明显的调节作用。本文将心理期望成本作为船主过坝决策选择的参考点,当一种过坝策略的实际成本小于其心理期望成本时,船主倾向于选择该策略;反之,船主会选择放弃该策略,进而考虑另一种策略;而当两种策略下的心理期望成本都较小时,船主会依据心理损失成本大小,做出过坝决策选择(见 2.3.2 节)。因此,在船舶过坝排队中,充分考虑船主心理期望成本,通过探索其对过坝决策的影响规律,有助于进一步挖掘通航拥堵问题的解决思路。

2.2 考虑通航建筑物过坝的心理期望成本

由于过坝方式的异质性,心理期望成本反映了船主对该项策略的接受程度,由过坝策略本身决定。因此,该项过坝策略的心理期望成本,与自身实际过坝成本息息相关。设经通航建筑物过坝的心理期望成本为 \bar{C}_1 ,若 $\bar{C}_1 \geq C_1^*$,即实际过坝成本低于心理可接受的成本,这不会影响过坝决策。因此,将关注 $\bar{C}_1 < C_1^*$ 的情况,重点分析心理期望成本的变化对过坝决策的影响规律。

2.2.1 过坝成本分析

由式(3)可知,当系统达到均衡时, $V = C_2, P = V - C_1$, 则有:

$$\xi = \frac{1}{\rho} - \frac{\tau}{\mu(1 - \rho)(C_1 - C_T)} \quad (15)$$

此时过坝系统总成本可表示为以 C_1 为决策变量的函数:

$$\begin{aligned} Z_1 &= \lambda \left(\frac{1}{\rho} - \frac{\tau}{\mu(1 - \rho)(C_1 - C_T)} \right) C_1 \\ &+ \lambda \left(1 - \frac{1}{\rho} + \frac{\tau}{\mu(1 - \rho)(C_1 - C_T)} \right) V \end{aligned} \quad (16)$$

定理 1 当 $C_1 < C_1^*$ 时, Z_1 单调递减;当 $C_1 > C_1^*$ 时, Z_1 单调递增。其中: $C_1^* = C_T + \sqrt{\frac{\rho\tau(V - C_T)}{\mu(1 - \rho)}}$

证明: 由 $\frac{d^2 Z_1}{dC_1^2} > 0$ 可知, Z_1 存在极小值。令

$\frac{dZ_1}{dC_1} = 0$, 即可得到 $C_1^* = C_T + \sqrt{\frac{\rho\tau(V - C_T)}{\mu(1 - \rho)}}$, 定理 1 得证。

在系统达到均衡时,若通航建筑物过坝成本满足 $C_1 = C_1^*$, 则过坝服务系统的综合过坝成本达到最小。当考虑 $\bar{C}_1 < C_1^*$ 时,原有拥堵定价策略将不再使综合过坝成本最小,需重新进行拥堵定价。因此,将基于 \bar{C}_1 , 分析拥堵定价、双过坝模式通航比例及综合过坝成本的变化。

2.2.2 心理期望成本分析

在系统达到均衡时,则有

$$\bar{C}_1 = \frac{\tau\rho}{\mu(1 - \rho)(1 - \rho\xi_1^*)} + C_T \quad (17)$$

由式(17)可知,当 $\bar{C}_1 > \frac{\tau\rho}{\mu(1 - \rho)} + C_T$ 时,可得

$$\begin{cases} P_1^* = V - \bar{C}_1 \\ \xi_1^* = \frac{1}{\rho} - \frac{\tau}{\mu(1 - \rho)(\bar{C}_1 - C_T)} \\ Z_1^* = \lambda \left(\frac{1}{\rho} - \frac{\tau}{\mu(1 - \rho)(\bar{C}_1 - C_T)} \right) \bar{C}_1 \\ \quad + \lambda \left(1 - \frac{1}{\rho} + \frac{\tau}{\mu(1 - \rho)(\bar{C}_1 - C_T)} \right) V \end{cases} \quad (18)$$

而当 $0 < \bar{C}_1 \leq \frac{\tau\rho}{\mu(1 - \rho)} + C_T$ 时, $\xi_1^* = 0$, 即通航

建筑物过坝的心理期望成本很小(拥堵定价 P_1^* 非常大), 导致过坝模式完全向翻坝转移。

定理 2 $P_1^* > P_0^*, \xi_1^* < \xi_0^*, Z_1^* > Z_0^*$

通过比较(13)式和(18)式,即可得到定理 2。分析可知,通过提高通航拥堵定价,使通航建筑物过坝成本等于心理期望成本,可实现过坝模式转移,降低通航建筑物过坝比例,从而缓解通航拥堵。此时,受拥堵定价提高和过坝模式转移的双重影响,过坝系统总成本有所增加。

当面临双过坝模式均存在心理期望成本时,过坝决策会产生新的变化。因此,将进一步分析双过坝模式都存在心理期望成本时,过坝策略的变化规律。

2.3 考虑双过坝模式的心理期望成本

由于过坝模式的异质性,船主在双过坝模式中的心理期望成本也存在差异。设翻坝转运的心理期望成本为 \bar{C}_2 , 且 $C_2^* > \bar{C}_2 > \bar{C}_1$ (由于翻坝转运需收取服务费,因此翻坝转运的心理期望成本大于通航建筑物过坝的心理期望成本)。

2.3.1 过坝成本分析

当系统到达均衡时,则有

$$\begin{cases} C_1 = \frac{\tau\rho}{\mu(1-\rho)(1-\rho\xi)} + C_T \\ \bar{C}_2 = \frac{\tau\rho}{\mu(1-\rho\xi)} + C_F \\ \xi = \frac{1}{\rho} - \frac{\tau}{\mu(1-\rho)(C_1 - C_T)} \\ Z_2 = \lambda \left[\frac{1}{\rho} - \frac{\tau}{\mu(1-\rho)(C_1 - C_T)} \right] C_1 \\ \quad + \lambda \left[1 - \frac{1}{\rho} + \frac{\tau}{\mu(1-\rho)(C_1 - C_T)} \right] \bar{C}_2 \end{cases} \quad (19)$$

定理3 当 $C_1 < C_1^{**}$ 时, Z_2 单调递减; 当 $C_1 >$

C_1^{**} 时, Z_2 单调递增, 且 $C_1^{**} = C_T + \sqrt{\frac{\rho\tau(\bar{C}_2 - C_T)}{\mu(1-\rho)}} < C_1^*$ 。

证明: 由 $\frac{d^2Z_2}{dC_1^2} = \frac{2\lambda\tau(\bar{C}_2 - C_T)}{\mu(1-\rho)(C_1 - C_T)^3} > 0$ 可

知, Z_2 存在极小值。令 $\frac{dZ_2}{dC_1} = 0$, 即可得到 $C_1^{**} = C_T +$

$\sqrt{\frac{\rho\tau(\bar{C}_2 - C_T)}{\mu(1-\rho)}} < C_1^*$, 定理3 得证。

由定理3 可知, 在系统达到均衡时, 若双过坝模式均存在心理期望成本且满足 $\bar{C}_1 < \bar{C}_2 < C_2^*$ 和 $\bar{C}_1 < C_1^{**}$, 通过再次进行拥堵定价, 使通航建筑物过坝成本为 \bar{C}_1 , 综合过坝成本达到相对最小。因此, 基于双过坝模式的心理期望成本, 进一步分析拥堵定价、双过坝模式的通航比例及综合过坝成本的变化。

2.3.2 心理期望成本分析

当系统达到均衡时, 则有

$$\begin{cases} \bar{C}_1 = \frac{\tau\rho(\xi_2^* + \psi_2^*)}{\mu(1-\rho(\xi_2^* + \psi_2^*))(1-\xi_2^*\rho)} + C_T \\ \bar{C}_2 = \frac{\tau\rho(\xi_2^* + \psi_2^*)}{\mu(1-\xi_2^*\rho)} + C_F \end{cases} \quad (20)$$

当 $\frac{\tau\rho^2}{\lambda(1-\rho)} + C_T < \bar{C}_1 < \frac{\tau\rho^2}{\lambda(1-\rho)^2} + C_T$ 时, $0 < \xi_2^* < 1$, 由于同时考虑了两种心理期望成本, 且要求均小于实际过坝成本, 船主的过坝决策极为敏感, 一旦无法满足船主的心理预期, 部分船主会离开排队系统, 进而随机选择过坝模式, 此时满足 $\xi_2^* + \psi_2^* \leq 1$ 。由此可得:

$$\begin{cases} P_2^* = V - \bar{C}_1 \\ \xi_2^* = \frac{1}{\rho} - \frac{\tau(\bar{C}_1 - C_T - \bar{C}_2 + C_F)}{\lambda(\bar{C}_1 - C_T)(\bar{C}_2 - C_F)} \\ \xi_2^* + \psi_2^* = \frac{1}{\rho} \left(1 - \frac{\bar{C}_2 - C_F}{\bar{C}_1 - C_T} \right) \\ Z_2^* = \lambda \left[\frac{1}{\rho} - \frac{\tau(\bar{C}_1 - C_T - \bar{C}_2 + C_F)}{\lambda(\bar{C}_1 - C_T)(\bar{C}_2 - C_F)} \right] \bar{C}_1 \\ \quad + \lambda \left[\frac{\tau(\bar{C}_1 - C_T - \bar{C}_2 + C_F)}{\lambda(\bar{C}_1 - C_T)(\bar{C}_2 - C_F)} - \frac{\bar{C}_2 - C_F}{\rho(\bar{C}_1 - C_T)} \right] \bar{C}_2 \end{cases} \quad (21)$$

由式(21)分析可知:

(1) 当 $0 \leq \bar{C}_1 \leq \frac{\tau\rho^2}{\lambda(1-\rho)} + C_T$ 且 $\bar{C}_2 \geq$

$\frac{\tau\rho^2}{\lambda(1-\rho)} + C_F$ 时, $\xi_2^* = 0$, 即通航建筑物过坝的心理期望成本很小, 而翻坝转运很高, 导致船主均选择翻坝转运。

(2) 当 $0 \leq \bar{C}_1 \leq \frac{\tau\rho^2}{\lambda(1-\rho)} + C_T$ 且 $0 \leq \bar{C}_1 < \bar{C}_2 \leq$

$\frac{\tau\rho^2}{\lambda(1-\rho)} + C_F$ 时, $0 \leq \xi_2^* < 1$, 即通航建筑物过坝和翻坝转运的心理期望成本均比较小, 未满足船主的过坝预期。针对该情形, 船主如果放弃过坝, 货物未准时到达而导致的货物总价值损失远大于实际过坝成本, 意味着船主将承受更大的成本损失^[17]。因此, 该情形下船主不会放弃通航, 会选择心理损失最小的策略完成过坝。价值函数能有效衡量盈利或亏损对人们主观满足的影响^[6], 以两种过坝策略的心理期望成本为参考点, 通航建筑物和翻坝转运的心理损失价值函数分别表示为 $g_1(C_1) = \eta(C_1 - \bar{C}_1)^\theta, g_2(C_2) = \eta(C_2 - \bar{C}_2)^\theta, \theta(0 < \theta < 1)$ 表示船主损失情况下的风险偏好程度, $\eta(\eta \geq 1)$ 表示损失厌恶系数。因此, 在心理期望成本均很低的情形下, 船主会根据 $g_1(C_1), g_2(C_2)$ 的大小关系来选择过坝决策:

①当 $g_1(C_1) > g_2(C_2)$ 时, 翻坝转运的心理损失成本较小, 船主选择翻坝运输策略;

②当 $g_1(C_1) = g_2(C_2)$ 时, 两种过坝策略的心理损失成本相同, 船主依据自身偏好选择过坝策略;

③当 $g_1(C_1) < g_2(C_2)$ 时, 通航建筑物过坝的心理损失成本较小, 船主选择通航建筑物过坝策略。

(3) 当 $\frac{\tau\rho^2}{\lambda(1-\rho)} + C_T < \bar{C}_1 < \frac{\tau\rho^2}{\lambda(1-\rho)^2} + C_T$

时, $0 < \xi_2^* < 1$, 即通航建筑物过坝和翻坝转运的心

理期望成本相差不大,船主会在双过坝模式中反复权衡,以作出合理的过坝决策。

(4) 当 $\bar{C}_1 > \frac{\tau\rho^2}{\lambda(1-\rho)^2} + C_T$ 时, $\xi_2^* = 1$, 即通航

建筑物过坝的心理期望成本足够大,而翻坝转运很小,导致船主均选择通航建筑物过坝。

定理 4 $P_2^* = P_1^*, \xi_2^* < \xi_1^*, Z_2^* > Z_1^*$

通过比较式(18)和(21),即可得到定理 4。分析可知,不同心理期望成本下的拥堵定价相同,而通航建筑物过坝比例在两种心理期望成本共同作用下进一步降低,从而实现双过坝模式的均衡,有效缓解通航拥堵问题。结合定理 2 和定理 4,可得表 2 所示的决策结果。

表 2 不同心理期望成本下的决策结果
Table 2 The results of decision-making in different psychological expected cost cases

	不考虑心理期望成本	考虑单一心理期望成本 (通航建筑物过坝)	考虑两种心理期望成本
拥堵收费	P_0^*	$P_0^* < P_1^*$	$P_0^* < P_1^* = P_2^*$
通航建筑物过坝比例	ξ_0^*	$\xi_0^* > \xi_1^*$	$\xi_0^* > \xi_1^* > \xi_2^*$
过坝系统总成本	Z_0^*	$Z_0^* < Z_1^*$	$Z_0^* < Z_1^* < Z_2^*$

2.4 补贴策略对心理期望成本的调节

由 2.2 和 2.3 分析可知,充分利用船主在不同过坝模式时的心理期望成本水平,可以有效缓解由过坝分担不均衡、过坝资源利用不充分而导致的通航拥堵问题。因此,如何调节船主的心理期望成本水平,使其在过坝决策中发挥最大效用,是需要思考的又一重点问题。

由于翻坝转运相较于通航建筑物过坝的成本更高,船主对翻坝转运成本较为敏感,为提高翻坝转运效率,可考虑对其给予一定程度的补贴,来调节船主对翻坝转运的心理期望成本水平,从而影响其选择偏好。因此,水利枢纽通过拥堵收费调节通航建筑物过坝决策的同时,对翻坝转运给予适度补贴,将有利于促进过坝策略向翻坝转移,从而提高翻坝货运量,进一步缓解通航拥堵。在原心理期望成本 \bar{C}_2 保持相对稳定状态下,水利枢纽的补贴为 $r(0 \leq r \leq r_{\max})$,此时翻坝转运的心理期望成本 \bar{C}_2^{ξ} 满足 $\bar{C}_2^{\xi} = \bar{C}_2 + r$,则在系统达到均衡时有

$$\begin{cases} \bar{C}_1 = \frac{\tau\rho(\xi_3^* + \psi_3^*)}{\mu(1-\rho(\xi_3^* + \psi_3^*))} + C_T \\ \bar{C}_2^{\xi} = \frac{\tau\rho(\xi_3^* + \psi_3^*)}{\mu(1-\xi_3^*\rho)} + C_F \end{cases} \quad (22)$$

由式(22)可得,考虑水利枢纽补贴后的最优策略为

$$\begin{cases} P_3^* = V - \bar{C}_1 \\ \psi_3^* = \frac{\tau(\bar{C}_1 - C_T - \bar{C}_2^{\xi} + C_F)}{\lambda(\bar{C}_1 - C_T)(\bar{C}_2^{\xi} - C_F)} - \frac{\bar{C}_2^{\xi} - C_F}{\rho(\bar{C}_1 - C_T)} \\ \xi_3^* + \psi_3^* = \frac{1}{\rho} \left(1 - \frac{\bar{C}_2^{\xi} - C_F}{\bar{C}_1 - C_T} \right) \\ Z_3^* = \lambda \left[\frac{1}{\rho} - \frac{\tau(\bar{C}_1 - C_T - \bar{C}_2^{\xi} + C_F)}{\lambda(\bar{C}_1 - C_T)(\bar{C}_2^{\xi} - C_F)} \right] \bar{C}_1 \\ + \lambda \left[\frac{\tau(\bar{C}_1 - C_T - \bar{C}_2^{\xi} + C_F)}{\lambda(\bar{C}_1 - C_T)(\bar{C}_2^{\xi} - C_F)} - \frac{\bar{C}_2^{\xi} - C_F}{\rho(\bar{C}_1 - C_T)} \right] \bar{C}_2^{\xi} \end{cases} \quad (23)$$

定理 5 $P_2^* = P_3^*, \xi_2^* > \xi_3^*, Z_3^* > Z_2^*$

通过比较式(21)和(23),即可得到定理 5。分析可知,水利枢纽通过对翻坝转运给予一定程度的补贴,来调整其心理期望成本水平,可增加翻坝转运的总体效用。此时,拥堵收费仍保持不变,而通航建筑物的过坝比例得到进一步优化。

3 案例分析

3.1 数据来源

研究团队于 2021 年 3 月~5 月赴三峡工程坝前最大的沙湾、仙人桥锚地,对来自于上海、江苏、江西、湖北、重庆等地的待闸船舶进行随机抽样,由长江三峡通航管理局锚地处协助对船员进行深度访谈,收集关于通航建筑物服务效率、翻坝转运效率、拥堵收费、过坝成本等相关数据。其中,3000 吨级和 5000 吨级船舶的过坝基础效用 V 分别为 44608 元和 71390 元,单位时间费率 τ 分别为 500 元/h 和 800 元/h,平均航速 v_1 为 6 km/h 和 8 km/h,平均过坝时间 T_1 为 1 h 和 1.5 h,以及装载量 ω 分别为 1200 吨和 2000 吨,其他参数经整理后如表 3 所示。

表 3 相关参数
Table 3 Related parameters

符号	λ	μ	L_1	r_{\max}	A	B	P_r	γ	χ	s	L_2	v_2	η	θ
参数值	3.42	3.56	60	5000	0	19.8	5.96	0.3	1000	2	100	45	2.25	0.35

3.2 无心理期望成本时的决策分析

在未实施通航拥堵收费时,3000吨级和5000吨级船舶选择通航建筑物过坝的比例分别为90.9%和90.2%,导致通航拥堵严重,而翻坝运力则被闲置。

实施拥堵收费后,通航建筑物过坝比例随着收费水平的提高而降低,如图2所示。当收费水平达到 P_0^* 时,各决策结果如表4所示。此时,通航建筑物过坝比例降到了67.3%和66.2%,这充分表明实施拥堵收费,能够让部分船主的过坝策略向翻坝转移,从而降低通航建筑物过坝比例。同时,3000吨级船舶对拥堵收费更为敏感。

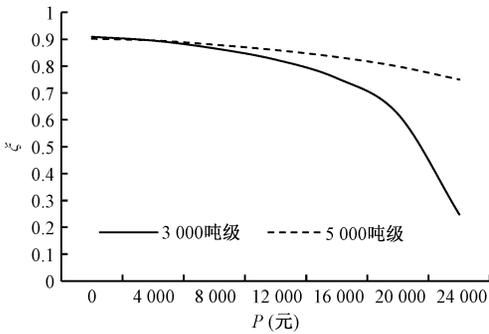


图2 通航建筑物方式过坝比例随P的变化
Figure 2 The ratio of crossing the dam by way of a navigable building varies with P

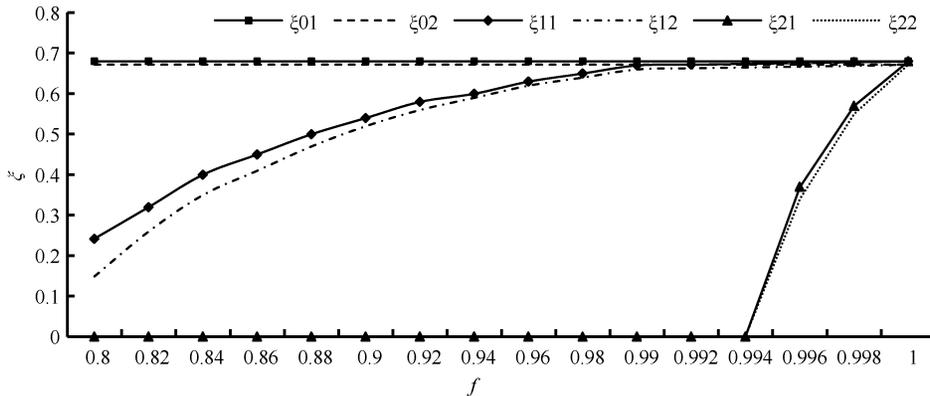


图3 通航建筑物过坝比例随f的变化规律
Figure 3 The changing law of the ratio of navigable buildings passing the dam with f

减小。这表明,考虑船主心理期望成本能有效促进过坝方式向翻坝转运转移;当考虑两种时,船主的敏感性更高,调节作用更加凸显。

图4为船舶的平均等待时间随f变化规律。 W_{01} 、 W_{11} 、 W_{21} 分别表示3000吨级船舶在三种情形下的平均等待时间; W_{02} 、 W_{12} 、 W_{22} 分别表示5000吨级船舶在三种情形下的平均等待时间。分析发现,情形2和情形3中的平均等待时间要明显小于情形1。且随着f的减小,平均等待时间逐渐减小;反之,逐渐增加。这表明,考虑船主心理期望成本,不仅能有效促进过坝模式的转移,还能降低船舶的平均

<https://www.academax.com/doi/10.13587/j.cnki.jjeem.2024.01.016>

表4 无心理期望成本时的决策结果

Table 4 The results of decision-making without the psychological expected cost

船型	ξ_0^*	P_0^*	Z_0^*	C_1^*	C_2^*
3000t	0.673	17725	110529	26883	43492
5000t	0.662	26433	182670	44956	70010

3.3 考虑心理期望成本时的决策分析

在拥堵收费基础上,进一步引入船主心理期望成本,通过分析其对船主过坝策略选择的影响规律,提出解决通航拥堵问题的优化路径。根据 \bar{C}_1 和 \bar{C}_2 的取值约束,可得心理期望成本与实际成本比值为 $f = \bar{C}_1/C_1^* = \bar{C}_2/C_2^* = [0.8, 1]$ 。以f为分析变量,在三种情形(情形1为无心理期望成本、情形2为只考虑通航建筑物过坝的心理期望成本、情形3为考虑双过坝模式的心理期望成本)下进行实验,得到如图3~5所示的仿真结果。

图3为通航建筑物过坝比例随f的变化规律。 ξ_{01} 、 ξ_{11} 、 ξ_{21} 分别表示3000吨级船舶在三种情形下的通航建筑物过坝比例; ξ_{02} 、 ξ_{12} 、 ξ_{22} 分别表示5000吨级船舶在三种情形下的通航建筑物过坝比例。分析发现,情形2和情形3中的通航建筑物过坝比例要明显小于情形1。且随着f的减小,心理期望成本对过坝策略选择的调节作用逐渐增大;反之,逐渐

等待时间;当考虑两种时,平均等待时间的变化更为敏感。

图5为三种情形下的过坝系统总成本差值随f的变化规律。 ΔE_1 、 ΔE_3 分别表示3000吨级和5000吨级船舶在情形2与情形1之间的过坝系统总成本差值; ΔE_2 、 ΔE_4 分别表示3000吨级和5000吨级船舶在情形3与情形1之间的过坝系统总成本差值。分析发现,随着f的减小,过坝系统总成本差值逐渐增加;反之,逐渐减小。这表明,考虑心理期望成本会增加综合过坝成本,而考虑两种时更加凸显。这是拥堵收费增加和过坝方式转移双重影响的结果。

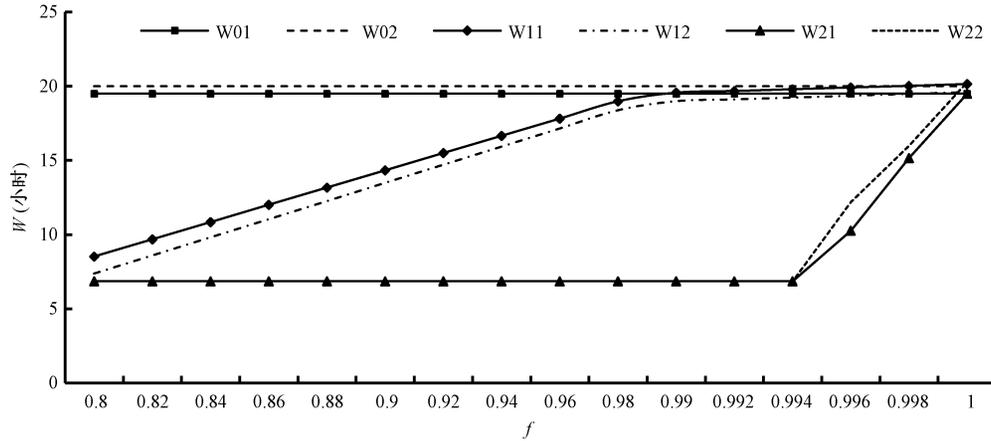


图4 船舶平均等待时间随 f 的变化规律
Figure 4 The average waiting time of ships varies with f

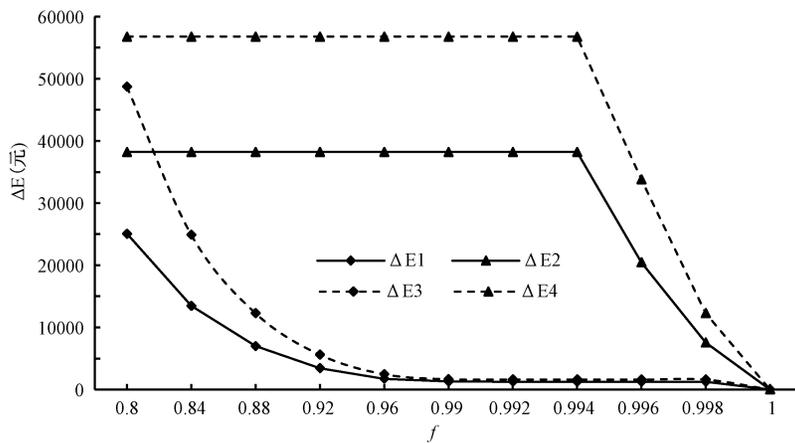


图5 综合过坝成本差值随 f 的变化规律
Figure 5 The changing law of comprehensive dam-crossing cost difference with f

考虑船主心理期望成本虽然增加了过坝系统总成本,但有效促进了过坝模式的转移,缓解了通航建筑物的过坝压力,并降低了船舶平均等待时间,提高了通航效率。

3.4 补贴策略对心理期望成本的调节作用分析

在 f 确定的情况下,分析翻坝转运比例随水利枢纽补贴 r 的变化规律,如图6所示。其中, ψ_{31} 、 ψ_{31}^* 表示当 $f = 0.9$ 时,3000 吨和 5000 吨船舶选择

翻坝转运的比例; ψ_{32} 、 ψ_{32}^* 表示当 $f = 0.95$ 时,3000 吨和 5000 吨船舶选择翻坝转运的比例。分析发现,水利枢纽给予翻坝转运适当补贴,来调整其心理期望成本水平,可有效促进过坝策略从通航建筑物向翻坝转移,从而缓解通航拥堵,提高通航效率。同时,在同等数额补贴下,3000 吨级船舶对补贴的敏感性更强,更容易改变其过坝策略。

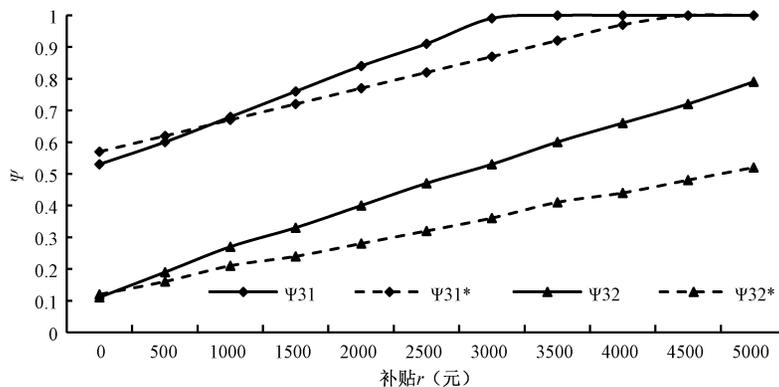


图6 翻坝转运比例随政府补贴 r 的变化规律
Figure 6 The changing law of the ratio of dam-overturning with government subsidy r

4 结论

本文针对水利枢纽通航拥堵问题,在拥堵收费下引入船主心理期望成本,并以过坝系统总成本为参考点,构建了决策优化模型,分析了心理期望成本对过坝策略选择的影响规律。然后,考虑了政府对翻坝转运的补贴策略,通过调整其心理期望成本水平,得出了提升通航效率的优化路径。最后,通过案例分析,验证了结论的有效性。具体结论如下:

(1) 引入心理期望成本,能有效降低通航建筑物过坝比例,实现过坝货物的合理分流,从而缓解通航拥堵问题;而同时考虑两种心理期望成本,其调节作用更加明显。因此,通航部门可在拥堵收费基础上,设计心理期望成本的调节机制,来影响船舶过坝决策,从而缓解通航拥堵问题。

(2) 拥堵费用的增加和过坝策略的改变,会导致过坝系统总成本升高,但船舶总的平均等待时间明显下降,而考虑两种心理期望成本时的变化更为敏感,达到了以成本换时间的目的,提升了通航效率。这为减少通航船舶的平均待闸时间提供了可行的解决方案。

(3) 基于船主对成本的敏感性,水利枢纽可给予翻坝转运一定的补贴,来调整其心理期望成本水平,有效引导过坝策略向翻坝转移,充分发挥心理期望成本对缓解通航拥堵的积极效用。这为通航部门制定合理的翻坝转运补贴策略提供了理论参考。

研究还存在不足之处:(1)未考虑升船机的运营对过坝决策的影响;(2)未考虑不同过坝模式的通过比例限制;(3)未细化影响船主心理期望成本的内外因素。这些问题将在以后进行更深入讨论和研究。

参考文献

- [1] 赵旭,尹熙琛,高攀. 主导权异质性视角下的过坝方式货运量分担率研究[J]. 运筹与管理, 2020, 29(8): 192-201.
ZHAO X, YIN X C, GAO P. Research on the share of freight volume of Via-Dam method under the perspective of dominance heterogeneity[J]. Operations Research and Management Science, 2020, 29(8): 192-201.
- [2] 戴晶辰,李瑞敏. 基于微观仿真的北京市拥堵收费研究[J]. 系统仿真学报, 2019, 31(11): 2458-2470.
DAI J C, LI R M. Microscopic simulation based evaluation of congestion pricing for Beijing urban area[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(11): 2458-2470.
- [3] 郭晓,孙会君. 基于瓶颈模型的异质出行者早高峰出行问题研究[J]. 系统工程理论与实践, 2018, 38(4): 1003-1012.
GUO X, SUN H J. Modeling the morning commute problem with heterogeneous travelers based on the bottleneck model [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2018, 38(4): 1003-1012.
- [4] 贾书伟,严广乐. 基于SD-GM理论的城市交通拥堵收费模型研究[J]. 运筹与管理, 2019, 28(7): 160-168.
JIA S W, YAN G L. Research on traffic congestion charging fee model in urban areas based on SD-GM approach [J]. Operations Research and Management Science, 2019, 28(7): 160-168.
- [5] 宗刚,曾庆华,魏素豪. 基于时间价值的交通出行方式选择行为研究[J]. 管理工程学报, 2020, 34(3): 142-150.
ZONG G, ZENG Q H, WEI S H. Research on traffic mode choice behavior based on commuting travel time value [J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2020, 34(3): 142-150.
- [6] 姜沂兵,孙会君,王伟. 基于方式选择的拥堵收费及返还优化模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2016, 16(1): 142-147, 154.
JIANG Y B, SUN H J, WANG W. Congestion pricing and refund optimization model based on mode choice [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2016, 16(1): 142-147, 154.
- [7] 程铁信,李奇,赵颖. 考虑碳排放的城市交通拥堵定价模型及其仿真分析[J]. 中国管理科学, 2016, 24(增刊1): 932-937.
CHENG T X, LI Q, ZHAO Y. A congestion charging model for the urban central area under the consideration of carbon emission and its simulation analysis [J]. Chinese Journal of Management Science, 2016, 24(Sup 1): 932-937.
- [8] 陈坚,傅志妍,钟异莹. 心理因素影响的公交方式选择行为模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2017, 17(3): 120-126, 142.
CHEN J, FU Z Y, ZHONG Y Y. Choice behavior model of urban public transport considered the psychological factors affecting [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2017, 17(3): 120-126, 142.
- [9] 张薇,何瑞春,肖强,等. 考虑乘客心理的出租车合乘决策方法研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2015, 15(2): 17-23.
ZHANG W, HE R C, XIAO Q, et al. A method of taxi pooling mode decision-making with passenger psychology [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2015, 15(2): 17-23.
- [10] 景鹏,王静,查奇芬,等. 影响学校出行方式选择的心理因素研究综述[J]. 中国公路学报, 2017, 30(2): 107-119.
JING P, WANG J, ZHA Q F, et al. Influence of psychological factors on school travel mode choice: A systematic review [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(2): 107-119.
- [11] KANDA J. Applications of total expected cost concept to

- various decision making situations[J]. *Structural Safety*, 2021, 88: 102038.
- [12] PARK Y, YI Y. The dark side of ‘wisdom of crowds’: Consumers’ psychological and behavioral cost of using information of many others’ choice[J]. *Korean Journal of Marketing*, 2019, 34(3): 47-73.
- [13] HU Z H, SHEU J B. Post-disaster debris reverse logistics management under psychological cost minimization[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2013, 55: 118-141.
- [14] HSIEH Y H, YUAN S T, KUO R L. A PSO-based intelligent service dispatching mechanism for customer expectation management [J]. *Expert Systems with Applications*, 2011, 38(10): 12128-12141.
- [15] 刘健,徐勇,张珣,等. 基于异质性顾客心理期望等待时间的优先权服务定价研究[J]. *中国管理科学*, 2022, 30(1): 275-286.
- LIU J, XU Y, ZHANG X, et al. Priority pricing based on the expected waiting time for heterogeneous customers [J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2022, 30(1): 275-286.
- [16] ZHEN L, SHEN T, WANG S A, et al. Models on ship scheduling in transshipment hubs with considering bunker cost[J]. *International Journal of Production Economics*, 2016, 173: 111-121.
- [17] 邓萍,宋莲,黄承锋. 三峡坝区过闸船舶拥堵成本测算及对坝区货物总价值影响研究[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2021, 40(7): 23-30.
- DENG P, SONG L, HUANG C F. Estimation of congestion costs for lockage ship in three gorges dam area and its impact on the total value of goods in the dam area[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2021, 40(7): 23-30.

Research on Dam-crossing strategy considering shipowner’s psychological expected cost under congestion charging

GAO Pan¹, LIU Shun¹, ZHAO Xu^{1*}, HU Bin²

(1. College of Economics and Management, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. School of Management, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In recent years, due to the construction of large and medium-sized hydropower junctions, the navigation conditions of various river basins have been greatly improved, and the gradual improvement conditions has increased the navigation demand. However, there is a mismatch between ship’s dam crossing demand and ship lock’s dam crossing capacity, as well as an imbalance between dam crossing system and ship lock’s freight sharing, which leads to navigation congestion of water control project becoming a normal problem. Therefore, the key to solving the problem of navigation congestion in water control project is to explore the transfer path of the dam-crossing mode and the freight sharing mechanism of the double dam-crossing mode.

This paper manages to introduce the psychological expected cost under the congestion charging, in order to describe the bottom line of the ship owner’s acceptance of the cost of crossing the dam, and analyze the influence of the bottom line on the selection of the dam crossing strategy. First, by applying the non-preemptive M/M/1 queueing system, a decision model based on the comprehensive cost of dam crossing is constructed. Second, the optimal strategy of ship dam crossing is proposed under three conditions (no psychological expected cost, psychological expected cost of navigable building crossing the dam, psychological expected cost of double dam crossing mode), and the ratio of navigable building crossing the dam, average waiting time of ship and comprehensive dam-crossing cost are compared and analyzed. Furthermore, the subsidy strategy of ship crossing dam can influence the choice of ship crossing dam strategy by adjusting the psychological expected cost level. Finally, the freight sharing mechanism of “ship lock passing dam + transfer over dam” is formed, and the navigable congestion problem of large and medium-sized hydropower stations is alleviated.

The results of the case study show that, when the navigation congestion charging is not implemented, the ratio of navigable building crossing the dam are respectively 90.9% and 90.2% for 3000-ton and 5000-ton ships, which lead to serious navigation congestion and waste of capacity in the dam-overturning system. After the implementation of congestion charging, the ratio of navigable building crossing the dam gradually decreases. When the dam-crossing cost is minimized, the passing proportions of navigable building drop to 67.3% and 66.2% respectively, which fully shows that the implementation of congestion charging can make some shipowners’ dam-crossing strategies shift to dam-overturning system. Meanwhile, 3000-ton ships are more sensitive to congestion charging.

When the shipowner’s psychological expected cost is considered in navigable building, the lower it is, the greater the moderating effect is on the dam crossing strategy choice. And when it is introduced in double dam-crossing modes, the sensitivity of the shipowner is higher and the moderating effect is more prominent. The results show that, it can effectively promote the transfer from navigable building to dam-overturning system to consider the psychological expected cost. And the average waiting time has the same changing

law. However, the comprehensive dam-crossing cost is opposite, which is the result of a combination of increased congestion charging and shifting of the dam-crossing way. Finally, the subsidy strategy for dam-overturning system is introduced to adjust the psychological expected cost level, which can effectively promote the transfer of dam-crossing strategy from the navigable building to dam-overturning system, so as to ease navigable congestion and improve navigable efficiency. And, under the same amount of subsidy, 3000-ton ship more sensitivity to the subsidies, it is easier to change its strategy of passing the dam.

The specific conclusions are summarized as follows: First, the introduction of psychological expected cost can effectively reduce the proportion of navigable building crossing the dam, so as to realize the reasonable distribution of goods passing the dam, navigation ease congestion. If consider two psychological expectation costs at the same time, the moderating effect increasingly obvious. Therefore, on the basis of congestion charging, the general navigation department can design the adjustment mechanism of the psychological expected cost to influence the dam-crossing decision. Second, increase in congestion costs and change in the dam-crossing strategy lead to an increase in the comprehensive dam-crossing cost, but the total average waiting time has decreased significantly. And the changes are more sensitive when considering the two psychological expected costs, which help to achieve the purpose of exchanging cost for time and improve the navigation efficiency. It provides a feasible solution to reduce the average waiting time of navigable ships. Finally, based on the shipowner's sensitivity to cost, the water control project can provide certain subsidies for dam-overturning system to adjust the psychological expected cost level and effectively guide the transfer of dam-crossing strategy, so as to give full play to the positive effect of psychological expected cost in alleviating navigation congestion. It provides a theoretical reference to formulate a reasonable subsidy strategy for dam-overturning system.

Key words: Waterway transportation; Psychological expected cost; Queuing theory; Dam-crossing strategy; Congestion charging

Received Date: 2021-09-11

Funded Project: Supported by the Major Project of National Social Science Foundation of China (19ZDA089) and the Philosophy and Social Science Research Project of Hubei Education Department of China (19Q033).

* Corresponding author