



# 基于神经网络的新通道施工期三峡—葛洲坝枢纽通航保障方案研究

胡志芳, 江舟, 王锐锋, 张勃, 王前

(长江三峡通航管理局, 湖北 宜昌 443002)

**摘要:** 三峡新通道和葛洲坝航运扩能工程是解决三峡—葛洲坝枢纽船舶拥堵问题的根本途径, 本文建立基于神经网络的预测模型, 从实施货物翻坝转运、优化船闸设施和水库调度等方面模拟计算施工期葛洲坝船闸货运通过量, 探讨缓解施工期船舶过闸压力的可行性通航保障方案。实测结果表明: 通过实施翻坝转运能降低约 5.2% 的船舶过闸需求; 通过优化设置葛洲坝一号闸上游靠船设施和优化枯水期及洪水期三峡库区下泄流量, 能够增加三峡—葛洲坝枢纽约 5% 的货运通过能力。

**关键词:** 新通道; 神经网络; 船闸设施; 通航保障; 流量调度

中图分类号: U 612

文献标识码: A

文章编号: 1002-4972(2022)09-0147-05

## Navigation guarantee scheme for Three Gorges-Gezhouba hydrojunction during new channel construction based on neural network

HU Zhi-fang, JIANG Zhou, WANG Rui-feng, ZHANG Bo, WANG Qian

(Three Gorges Navigation Authority, Yichang 443002, China)

**Abstract:** The Three Gorges new channel and the Gezhouba shipping capacity expansion project are fundamental ways of solving the problem of ship congestion at the Three Gorges-Gezhouba hydrojunction. This study develops a prediction model based on neural network to simulate and calculate the freight throughput of the Gezhouba ship lock during the construction from the aspects of implementing cargo transfer over the dam and optimizing ship lock facilities and reservoir scheduling. Then, it explores a feasible navigation guarantee scheme for alleviating the pressure of ships passing through the lock during the construction. The example calculation results show that implementing transfer over the dam reduces the need of ships to pass through the lock by about 5.2% and that optimizing the berthing facilities upstream the Gezhouba No. 1 lock and the discharge of the Three Gorges Reservoir area in dry and flood seasons increases the freight throughput capacity of the Three Gorges-Gezhouba hydrojunction by about 5%.

**Keywords:** new channel; neural network; ship lock facility; navigation guarantee; flow scheduling

三峡枢纽地处长江黄金水道承东启西的重要区位, 是贯通长江物流的重要通道, 每年大量物资和产品通过三峡枢纽, 在中、东、西部地区之间流通<sup>[1]</sup>。三峡船闸自 2003 年开始运行以来, 年通过量不断攀升。2011 年, 三峡船闸和葛洲坝船闸通过量均首次突破亿吨, 三峡船闸更是提前 19

年达到设计水平。2021 年, 三峡枢纽航运通过量首次达到 1.5 亿 t, 同比 2020 年增长 9.29%, 创历史新高。近年来, 随着交通强国战略的稳步推进和长江经济带的不断发展, 三峡—葛洲坝枢纽过闸需求逐年增长。根据现有船闸运行数据可知, 船闸年通航天数、闸室面积利用率、单闸次货运

量以及船闸相关设备运行保障率等指标均达到设计水平,部分设备超设计参数运行,通过能力指标接近极限。在现有通航设施不发生根本性变化的条件下,枢纽通航效益已得到较充分的发掘,进一步挖潜扩能的空间已十分有限。在国家战略背景下,推进三峡水运新通道和葛洲坝航运扩能工程建设,从根本上解决三峡—葛洲坝枢纽过闸船舶拥堵问题,成为长江黄金水道建设的当务之急<sup>[2]</sup>。

三峡水运新通道和葛洲坝航运扩能工程影响范围广泛、涉及行业众多,施工期间将会给既有过闸船舶交通组织带来重大影响。本文拟在三峡—葛洲坝枢纽已采取的挖潜措施外,进一步探索相关措施以减小施工对通过能力的影响,以现有运行数据为基础,建立基于神经网络的预测模型,对施工期葛洲坝船闸货运通过量进行模拟计算,探讨从实施集装箱和商品车翻坝转运、优化船闸设施和水库调度等方面缓解施工期船舶过闸压力的可行性通航保障方案,确保施工期三峡—葛洲坝枢纽通航的安全与稳定。

## 1 通航运行现状

三峡—葛洲坝枢纽通航建筑物包含三峡南北线船闸、三峡升船机及葛洲坝一、二、三号船闸,自投入运行以来,三峡库区的形成明显改善了长江上游的通航条件,三峡—葛洲坝航运枢纽成为沟通西南云贵川渝地区和华中、华东地区的重要节点。三峡船闸是目前世界上总设计水头和级间工作水头最高、上下游水位变幅最大,变率最高、连续运行级数和运行方式最多、控制技术最为复杂的多级连续式船闸。近年来,由于过闸需求的不断增长,三峡通航管理部门实施了多项工程和管理措施来挖潜三峡—葛洲坝枢纽通过能力<sup>[3-6]</sup>。

工程措施主要包括:1)开展两坝间航道整治工程,对航道条件较差的水域进行了改善;2)建设葛洲坝大江下游江心隔流堤,降低二江电站尾水对葛洲坝一号船闸下游航道的影响,改善了水流条件;3)运用虚拟闸室技术优化导航靠泊设施,

缩短船舶进闸时间;4)购置和存储船闸检修装备和备用设施,缩短船闸停航检修时间;5)建设并完善三峡通航调度系统、数字航道、北斗系统和航标航测遥控系统工程,提高通航交通组织效率;6)推进应急救助基地、船舶交通管制系统和船舶污染防治工程建设,提升三峡通航安全监管和应急反应能力。

管理措施主要包括:1)积极推进船型标准化,引导示范船型应用,提高船闸利用效率;2)提高过闸船舶准入门槛,逐步限制货运能力小的船舶过闸;3)实行罗静排档法和三峡船闸四级下行运行时一闸室待闸、同步移泊等举措,缩短过闸船舶进闸时间和移泊时间;4)不断优化船舶排挡技术,提高闸室面积利用率;5)优化船闸运行工艺,尽可能缩短闸室输水时间;6)协调水库调度部门,优化船闸运行模式,提高过闸船舶吃水控制标准,为大型船舶过闸创造条件。

通过以上工程和管理措施,三峡枢纽年货运通过量见图1。2019年三峡枢纽货运通过量达到1.48亿t,葛洲坝船闸自1981年通航以来累计通过量更是突破18亿t,一定程度缓解了三峡—葛洲坝枢纽的货运通航压力,但无法根除通过能力不足与船舶过闸需求增长之间的矛盾。工程建设虽然对三峡船闸和升船机运行总体影响不大,但工程涉及葛洲坝三号船闸改建及三江下游航道疏挖,施工期间对葛洲坝枢纽航运通过能力有较大影响,导致通过能力不平衡,进而对过坝船舶交通组织带来新的挑战。因此,有必要在现有通航条件下,利用先进的人工智能方法预测施工期三峡—葛洲坝枢纽通航相关指标,减小施工期对既有通航的影响,确保施工期三峡—葛洲坝枢纽通航的安全与稳定。

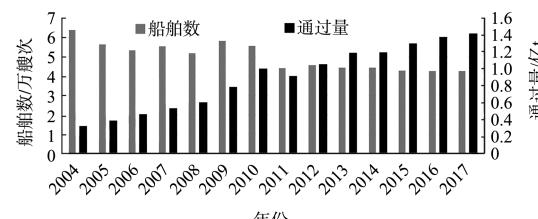


图1 三峡枢纽年货运通过量

## 2 基于神经网络的预测模型

神经网络来源于自然界的某种启发式算法或者函数的逼近, 也是对一种逻辑策略的解析式表达, 从观测到的先验数据“学习”, 使神经网络成为一种高度非线性的回归模型, 其本质是一种多层前馈网络。众多国内外学者基于机器学习和深度学习等智能算法, 结合多元回归方法, 在诸多领域的预测方面取得了多种多样的成果<sup>[7-10]</sup>。

设函数因变量为  $z$ , 各自变量为  $x_i$ , 自变量共有  $n$  个。依据多元非线性回归理论, 建立因变量与各自变量的回归模型, 即  $z=f(x_i)$ 。

对于本文采用的神经网络框架, 假设有  $l$  层神经网络, 第  $l$  层任意神经元的输出为  $a^l$ ,  $f$  为激活函数, 任意层神经元输出的计算公式为:

$$\begin{cases} a^l = f(w^l \cdot y + b^l) \\ z = \sum_{l=2}^{n'} f(w^l \cdot a^{l-1} + b^l) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $w^l$  和  $b^l$  为第  $l$  层的权重和偏差;  $z$  为神经网络的最终输出值;  $n'$  为隐藏层神经元个数;  $y$  表示神经网络的输入。

自适应协方差进化算法(CMA-ES)是一种不依赖于梯度信息和优化目标的连续性优化算法, 通过使用协方差矩阵跟踪分布上得到的样本之间的关系, 不断地调整参数向最优解逼近。算法流程与遗传算法类似: 首先, 根据神经网络输入维度来初始化种群; 其次, 利用交叉、变异等操作产生新的个体; 最后, 根据适应度函数值和收敛准则选择最优解。由于算法与神经网络参数之间没有耦合关系, 故采用 CMA-ES 对神经网络的参数初始化, 并利用 CMA-ES 的变异和选择优化神经网络的权重和偏差, 具体流程如下:

1) 根据神经网络输入层和隐藏层节点数以及权重矩阵和偏置维数初始化种群规模, 假设神经网络输入层和隐藏层节点数分别为  $p$ 、 $q$ , 权重为  $w$ , 偏置维数为  $b$ , 则 CMA-ES 初始种群样本数  $N'$  为:

$$N' = p \cdot q + w + b \quad (2)$$

2) 通过 CMA-ES 进行交叉、重组操作, 对神经网络的输出解集寻优得到更新信号  $S_i$  的最优解,

根据目标函数计算适应度值, 将适应度值最优的解集作为下一次迭代的父本:

$$G_i = O_{i-1} \quad (3)$$

式中:  $G_i$  为第  $i$  次迭代 CMA-ES 的父本;  $O_{i-1}$  为第  $i-1$  次迭代 CMA-ES 输出结果。

3) 采用 CMA-ES 对神经网络参数优化。假设 CMA-ES 第 1 次迭代输出结果为  $O_1$ ,  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$  分别表示依据神经网络输入层和隐藏层节点数确定的迭代次数。则神经网络隐藏层初始权重  $w_1$ 、输出层初始权重  $w_2$  和偏差  $b_1$  计算公式为:

$$\begin{cases} w_1 = [Q_1^{k_1}]^T & (k_1 = 1, \dots, p \cdot q) \\ w_2 = [Q_1^{k_2}]^T & (k_2 = p \cdot q + 1, \dots, p \cdot q + q) \\ b_1 = [Q_1^{k_3}]^T & (k_3 = p \cdot q + q + 1, \dots, \text{end}) \end{cases} \quad (4)$$

为了使神经网络的输出满足约束条件, 神经网络的反向传播由 CMA-ES 执行, 即在优化每一次迭代中采用 CMA-ES 计算误差来调整神经网络的权重和偏差, 直到误差小于指定阈值。如式(5)所示, CMA-ES 的作用近似于神经网络的损失函数, CMA-ES 的选择与重组替代反向传播。

$$\begin{cases} w_i^1 = [Q_i^{k_1}]^T & (k_1 = 1, \dots, p \cdot q) \\ w_i^2 = [Q_i^{k_2}]^T & (k_2 = p \cdot q + 1, \dots, p \cdot q + q) \\ b_i = [Q_i^{k_3}]^T & (k_3 = p \cdot q + q + 1, \dots, \text{end}) \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $w_i^1$ 、 $w_i^2$ 、 $b_i$  分别表示第  $i$  次迭代隐藏层和输出层的权重和偏差。

## 3 新通道施工期三峡—葛洲坝枢纽通航保障方案

### 3.1 货物翻坝转运分流

翻坝转运分水陆转运和水陆水转运 2 种方式。水陆转运即坝上物资通过滚装船运至三峡坝前, 在坝前港口下船上岸, 通过公路或铁路绕过三峡大坝和各州坝运至华中、华东地区, 上行物资则与之相反; 水陆水转运即坝上物资通过滚装船运至三峡坝前, 在坝前港口下船上岸, 通过公路或铁路绕过三峡和葛洲坝运至葛洲坝坝下港口, 重新装船向东运输, 反之亦然。由于水运具有成本低、体量大的特点, 翻坝转运无论采用何种转运模式均会较大程度增加物流成本。因此, 对于集装箱、商品车等附加值较高的货物, 实施翻坝转

运的可行性更高。

为解决施工期船舶过闸难的问题,湖北省大力推进三峡翻坝综合交通运输体系建设。目前,江南、江北2条翻坝高速已建成通车,坝上茅坪港疏港铁路和坝下白洋港疏港铁路也已开工建设,一期工程已完工,年吞吐能力分别达20万TEU、15万辆商品车和600万t、40万TEU。

统计某年集装箱船和商品车船过闸情况为:三峡—葛洲坝枢纽总过闸船舶为4.13万艘,其中:通过集装箱船4 059艘,运送集装箱约90万TEU,约占总过闸船舶艘次的9.83%;通过商品车船1 031艘,运送商品车约70万台,约占总过闸艘次的2.50%。

考虑茅坪港和白洋港的货运吞吐能力,通过水陆转运和水陆水转运相结合的方式,最大能够分流66.7%的集装箱船和21.4%的商品车船,按分流50%的集装箱船和20%的商品车船计算,共计能有效降低约5.4%的过坝需求。后期随着茅坪港和白洋港二期工程等项目的陆续建成,有望进一步降低集装箱船和商品车船的过坝需求。

### 3.2 优化船闸设施

由于葛洲坝枢纽设计代表船型以船队为主,一号闸上下游未设置靠船墩,后期为提升通航效率在上游设置了2艘趸船,受趸船条件所限,仅能满足一般船舶停靠,不能满足载运液货、化学品以及其他特殊商品闸次的待闸需求,涉及特殊闸次上行换下行时,下行船舶只能等上行船舶出引航道后,方从引航道进闸。

若增设葛洲坝一号闸上游固定式靠船墩,基于所建立的神经网络预测模型,根据葛洲坝通航运行40年来积累的运行数据进行模型训练,得到一号闸货运提升量计算公式:

$$P = \frac{(t_1 - t_0)n_1 + (t_2 - t_3)n_2 \cdot K}{t} \quad (6)$$

式中:  $t_0$  为一号闸下行通过特殊闸次的闸次间隔时间;  $t_1$  为一号闸特殊闸次间隔时间(部分特殊闸次间隔时间高于一般闸次);  $t_2$  为一号闸原上行换下行闸次间隔时间;  $t_3$  为新增靠船墩后一号闸上行换

下行闸次间隔时间;  $t$  为葛洲坝一号闸平衡闸次间隔时间;  $n_1$  为一号闸年特殊闸次数;  $n_2$  为一号闸年上行换下行次数;  $K$  为一号闸次平均货运量。

统计2019年以来葛洲坝一号闸运行情况,基于神经网络预测模型的计算分析,一号闸平衡闸次间隔时间  $t = 87.1$  min, 下行通过特殊闸次平均间隔时间为  $t_1 = 153.7$  min, 上行换下行平均闸次间隔  $t_2 = 117.4$  min, 年通过特殊闸次数  $n_1 = 273$ , 上行换下行次数  $n_2 = 137$ ;  $K = 1.48$  万t。增加上游靠船墩后的效果以条件类似的三峡船闸作为参考,下行通过特殊闸次的闸次间隔时间为120 min, 上行换下行闸次间隔时间为90 min, 因此取  $t_0 = 120$  min,  $t_1 = 90$  min。

将上述数据代入公式(6), 可得通过新建上游固定靠船墩, 葛洲坝一号闸年货运量能够提高220.1万t, 占葛洲坝船闸年总货运量的1.5%。

### 3.3 优化三峡水库下泄流量调度

自然年度长江干线航道可分为枯、中、洪水期。根据历年通航情况可知,在枯水期,葛洲坝三江下引航道水深较小,导致葛洲坝一号闸无法通行吃水深度较大的船舶;而在洪水期,由于葛洲坝下泄流量较大,导致葛洲坝一号闸因大流量无法通航。

#### 3.3.1 枯水期增加三峡库区下泄流量

在通航组织工作中,基于神经网络预测模型进行模型训练,分析枯水期不同时刻葛洲坝下游水位  $y$ 、三峡出库流量  $x_1$  和葛洲坝出库流量  $x_2$  的最终回归方程关系式:

$$\begin{cases} y = 36.80019 - 1.23e^{-5}x_1 + 0.00048x_2 & (2:00 \text{ 时}) \\ y = 36.88610 + 2.87e^{-5}x_1 + 0.000416x_2 & (8:00 \text{ 时}) \\ y = 37.34481 - 2.26e^{-5}x_1 + 0.000396x_2 & (14:00 \text{ 时}) \\ y = 37.03898 + 1.03e^{-6}x_1 + 0.00042x_2 & (20:00 \text{ 时}) \end{cases} \quad (7)$$

葛洲坝入库流量视作三峡下泄流量与支流黄柏河入库流量之和,由于枯水期黄柏河流量较小,葛洲坝入库流量可基本等同于三峡下泄流量,葛洲坝库容较小,仅能进行日调节,从长期的角度来看,葛洲坝总体入库流量和出库流量基本一致。因此,在枯水期,通过科学调度可增加三峡出库

流量, 提高葛洲坝下游水位, 从而提高葛洲坝二号闸的货运通过能力。

统计枯水期葛洲坝下游水位值及天数, 计算不同水位提升到目标水位后的货运增加量:

$$P = \sum_{i=1}^n (C - C_i) NT_i G \quad (8)$$

式中:  $C$  为过闸船舶目标吃水量;  $n$  为葛洲坝下游目标水位;  $C_i$  为过闸船舶分段吃水量;  $N$  为船舶吃水变化与其装载量变化的关系系数, 按经验值  $N=750 \text{ t/m}$ ;  $T_i$  为分段天数;  $G$  为葛洲坝下游水位低于目标水位时日平均过闸艘次。

选取某年枯水期 8:00 时葛洲坝下游水位数据进行分析, 见表 1。

表 1 某年枯水期 8:00 葛洲坝下游水位分段统计

水位/m	天数/d	占比/%
39.0~39.2	8	5.30
39.2~39.4	24	15.89
39.4~39.6	29	19.21
39.6~39.8	18	11.92
39.8~40.0	10	6.62
>40.0	62	41.06
合计	151	100.00

根据《三峡(正常运行期)—葛洲坝水利枢纽梯级调度规程》和三峡枢纽水库的运行方式可知, 每年水库消落初期三峡水库一般保持高水位运行, 1—2月在水库日均下泄流量不小于  $6000 \text{ m}^3/\text{s}$  的前提下, 水位一般维持在  $170 \text{ m}$  左右; 4—5月加大下泄流量, 降低至枯水期消落水位  $155 \text{ m}$ 。维持长时间高水位的运行有助于利用高水头实现节水发电, 创造更高的发电效益; 而航运调度的需求则是在较枯时期(1—2月)加大对下游的补水, 提高葛洲坝下游庙嘴水位。但是, 在消落初期过多补水并不科学, 容易导致三峡水库消落过快而出现后期无水可用的局面。因此, 航运调度需在最困难的年份协调发电调度, 在可能的范围内适当加大对下游补水。通过预测, 在正常年份, 通过初期加大补水的方式保障庙嘴水位不低于  $39.6 \text{ m}$  是可行的。取枯水期葛洲坝下游目标水位为  $39.6 \text{ m}$ , 即  $n=39.6$ , 此时葛洲坝二号船闸门槛水深为  $5.6 \text{ m}$ , 三江航道维护水深为  $4.6 \text{ m}$ ,

通过船舶吃水可达  $3.8 \text{ m}$ ; 2018—2019 年枯水期葛洲坝二号闸日平均过闸 58.4 艘次, 即  $G=58.4 \text{ 艘次/d}$ 。经计算可知, 采取增加三峡出库流量措施, 可提升葛洲坝船闸货运量 88.5 万 t, 约占年总货运量的 0.60%。

### 3.3.2 洪水期减小三峡库区下泄流量

三峡水库防洪库容为  $221.5 \text{ 亿 m}^3$ , 随着上游乌东德、白鹤滩、溪洛渡及向家坝等梯级水电站投产运行, 长江上游梯级水库防洪总库容增加了约  $155.9 \text{ 亿 m}^3$ , 上游梯级枢纽水库群防洪调控能力进一步增强, 在汛期可通过梯级防洪调度, 在不出现大洪水的情况下, 降低三峡下泄流量至  $3.5 \text{ 万 m}^3/\text{s}$  以下, 实现洪水期葛洲坝一号船闸不因大流量停航基本可行。

根据《三峡(正常运行期)—葛洲坝水利枢纽梯级调度规程》, 兴利调度应服从防洪调度, 航运调度组织工作不应过多影响防洪调度工作。因此, 仅能在三峡防洪库容充裕且出库流量略高的时段进行微调。根据统计分析, 航运调度工作需求在三峡上游水位不高于  $155 \text{ m}$ , 且三峡出库流量在  $3.50 \text{ 万~}3.75 \text{ 万 m}^3/\text{s}$  的时期进行调整, 则不会影响三峡枢纽防洪效益的发挥。统计 2018—2019 年葛洲坝一号船闸因三峡下泄流量超过此流量范围的停航平均时间为  $2.16 \text{ d}$ , 该时段内三峡上游水位均低于  $155 \text{ m}$ , 有充足的库容应对可能的洪水。按全年葛洲坝一号船闸日均过闸 13.6 闸次、闸次平均货运量 1.48 万 t 计算, 通过降低三峡下泄流量最大可提升葛洲坝船闸货运量 43.5 万 t, 约占年总货运量的 0.3%。

## 4 结论和展望

1) 实施集装箱船和商品车船翻坝转运, 能有效缩减三峡—葛洲坝枢纽过闸需求 5.2%, 但由于配套港口运力不足, 导致集装箱船和商品车船不能 100% 完成翻坝转运, 随着茅坪港和白洋港后期工程陆续完工, 能进一步缓解施工期三峡—葛洲坝枢纽的船舶过闸压力。