阶段性规划方法对长江干线航道整治进度的优化

刘　明，金日初
（长江武汉航道工程局，湖北 武汉 430010）

摘　要：航道整治是航运的首要内容，不仅可以提高长江干线的运行能力，而且可以保护周围的生态，对于航道的持续运营，具有十分重要的意义。目前，航道整治项目的实施，缺乏科学的治理规划，致使整治进度无法满足实际要求，大幅降低航道整治的效率。为了保证整治项目的顺利完成，以武汉至安庆之间的戴家洲河段为研究对象，依据干线航道的整治要求，进行阶段性规划方法分析。首先，将航道整治内容依据进度分为不同的节点，在不同节点中增加整治要求、整治时间和整治重点等内容。其次，依据节点的重要性，进行阶段性规划，将节点划分到不同的阶段，并求解出不同进度的进度时间最短概率。最后，用实际案例进行方法的有效性验证。结果显示，阶段性规划方法依据整治要求，对整治的内容进行规划，分阶段进行整治工作的实施，并在整治成本一定的情况下，缩短施工进度。

关键词：阶段性规划方法；武汉；安庆；长江干线航道；整治优化
中图分类号：U617　　文献标识码：A　　文章编号：1006-7973（2023）01-0066-03

武汉至安庆是长江主干线的重要航道，水深 6m，是本次整治工程的 II 标段。整治河段上距武汉市约 99km，上起鄂州，与沙洲水道相连，下迄迴风矶，与黄石水道相接，全长约 34km；左岸为黄冈市，有支流巴河、兰溪河汇入，右岸为鄂州市，岸边存在龙王矶、燕矶等山矶。该整治工程的完工时间如表 1 所示。

表 1　工程开完工时间一览表

序号	工程名称	开工时间	完工时间
1	疏浚工程	2019 年 11 月 7 日	2020 年 6 月 5 日
2	乐家湾边滩控制工程	2018 年 11 月 8 日	2020 年 12 月 12 日
3	池湖港边滩护滩带工程	2019 年 6 月 28 日	2020 年 12 月 12 日
4	已建鱼骨坝延长工程	2019 年 9 月 15 日	2020 年 11 月 28 日
5	航标工程	2020 年 5 月 7 日	2021 年 2 月 26 日
6	生态专项工程	2019 年 11 月 4 日	2021 年 2 月 26 日

武汉至安庆河段处于长江流域中段，多回流和停泊水域，整治难度较大，工期相对较长，需要复杂的进度管理。同时，原有河段周围的淤泥较多，河堤杂草丛生，致使整治效率低[5]。如何对武汉至安庆河段进行整治进度优化，提出更加合理、科学的方案[6]，降低整治成本，是目前亟待解决的问题[7]。文中在此背景，提出一种阶段性规划方法，对武汉至安庆河段进行进度优化，旨在提高航道整治的效率，减少整治成本。

一、阶段性规划方法模型

1. 武汉至安庆河段整治问题的描述

武汉至安庆河段整治的目的是提高航道的运载能力，加固边滩、护滩，实现航道的疏浚、生态建设。其中，滩涂生态整治工程中利用卫星定位，疏浚工程利用卫星测量等技术，获得相关参数[9]。武汉至安庆河段整治涉及的内容包括：机械分配、成本管理、人员安排、薪资计算、物流优化、机械折旧等[10]。阶段性规划方法对航道整治进行阶段划分（设计阶段、实施阶段和验收阶段），整治节点内容设定（整治成本、整治要求、整治重点），并计算整治进度的最短。

2. 阶段性规划方法

阶段性规划方法是一种动态的分析方法，对整治内容进行综合分析，解决生态治理、疏浚等实际的整治问题[11]。依据整治的要求，以及整治的条件，设置开始整治节点、过程整治节点、最终节点，并对各个节点进行概率分析。在诸多整治方案中，选择成本符合要求，整治进度时间最短的方案[12]。依据阶段性规划方法，武汉至安庆河段整治的进度，要满足一定的条件。

整治条件 1：依据武汉至安庆河段情况，综合分析，设置开始阶段：整治节点 $x_i \forall z_i \left| p_i = 0 \right.$；实施阶段整治节点：$x_j \forall z_j \left| p_j = 0 \right.$；验收阶段整治节点：$x_k \forall z_k \left| p_k = 0 \right.$，并构建整治进度优化方案集合 S，任意整治方案 $y_{ijk} \forall z_{ijk} \left| p_{ijk} = 0 \right.$ 组成，计算如公式 1 所示。

$$S = \sum_{i,j,k=1}^{n} y_{ijk}(x_{ijk} \forall z_{ijk} \left| p_i \right.) \tag{1}$$

p_{ijk} 为任意节点的概率，y_{ijk} 为任意进度优化方案，x_{ijk} 为任意节点，y_i 为任意节点。在相同整治成本下，任意优化方案的成本 C，计算结果如公式 2 所示。

$$C_i = \min[\frac{\max(y_{ijk} \forall x_{ijk} \forall z_{ijk})}{\sum y_i} \left| p_{ijk} \right.] \tag{2}$$

其中，$\max(\cdot)$ 是整治进度中成本最低，$\sum y_{ijk}$ 为所有整治进度方案，p_{ijk} 为任意整治进度的优化概率，$\min(\cdot)$ 是整治进度中时间最短。上述公式的初始值，由航道整治标准、卫星定位测量获得，并得到具体参数[8]。

假设 B：最优整治进度方案的集合为 S_{set}，整治进度方案与整治节点之间的关系，如公式 3 所示。

$$S(x_{ijk} \forall z_{ijk}) = Op(\frac{x_{ijk} \xleftrightarrow[\text{阈值}]{} y_{ijk} \left| p_{ijk} \right.}{\sum p_{ijk}}) \tag{3}$$

收稿日期：2022-04-26
作者简介：刘　明，男，长江武汉航道工程局，中级工程师，从事港口与航道工程。

其中，$op(\cdot)$ 是阶段整治进度与整治方案之间的关系函数，主要是找出最优的整治方案；$x_{ijk} \xleftrightarrow[\text{阈值}]{} y_{ijk}$ 为不同节点与方案之间的关系；p_{ijk} 为方案的可行性概率[13]。

假设 C：C_i 是整治的成本，包括各种，人工成本、机械成本、薪资成本等；U_i 为不同整治内容的成本；w_i 为附加成本，诸如，油耗、租赁和折损等[14]。其中，Δw_i 为附加成本的改变量。

二、阶段性规划方法求解

对整治进度优化，分为 3 个阶段，各阶段的分析过程如下。

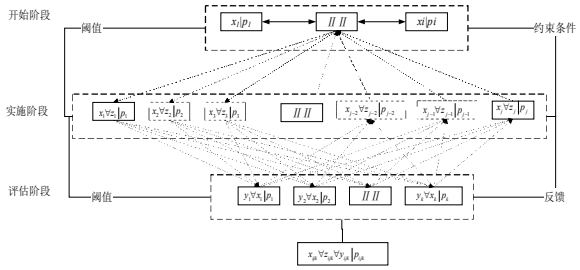

图 1　武汉至安庆河段整治阶段性规划方法

由于 i、j、k 为不同的航道整治项目，所以用 x 表示整治内容（整治成本、整治要求、整治重点），P 表示 x、y 的整治概率，y 代表整治进度。在 i、j、k 均=1 的时候，进行航道整治的参数值输入，分别为 $(x_{ij}\forall z_{ij}\,|\,p_{ij})$、$(y_k\forall x_k\,|\,p_k)$、$(x_{ijk}\forall z_{ijk}\forall y_k\,|\,p_{ijk})$ 的概率计算，如图 1 中的 $S=\sum_{i,j,k=1}^{n} y_{ijk}(x_{ijk}\forall z_{ijk}\,|\,p_i)$、$C_i=\min[\frac{\max(y_{ijk}\forall x_{ijk}\forall z_{ijk})}{\sum y_i}\,|\,p_{ijk}]$ 的概率过程。整个概率过程，要不断进行阈值、条件、反应等验证，保证整治成本符合预期、进度时间符合要求。依据整治成本一定的要求，进行整治进度时间最短分析，分别进行 $Op(\frac{x_{ijk}\xleftrightarrow[\text{阈值}]{} z_{ijk}\,|\,p_{ijk}}{\sum p_{ijk}})$ 和 $Op(\frac{z_{ijk}\xleftrightarrow[\text{阈值}]{} y_{ijk}\,|\,p_{ijk}}{\sum p_{ijk}})$ 的进度优化分析，具体结果如表 2 所示。

表 2 整治成本一定的条件下 $Op(\frac{x_{ijk}\xleftrightarrow[\text{阈值}]{} z_{ijk}\,|\,p_{ijk}}{\sum p_{ijk}})$ 计算

整治进度方案	$x_i \xleftrightarrow[0.5]{} z_i\,\|\,p_i$	$x_i \xleftrightarrow[0.7]{} z_i\,\|\,p_i$	$Op(x_i\forall z_i\,\|\,p_i)=\sum x_i\forall z_i \xleftrightarrow{0.6} p_i+0.46$	概率
$Op(\frac{x_1\xleftrightarrow[\text{阈值}]{} z_1\,\|\,p_1}{\sum p_1})$	$5c_i+0.82u_i+9.2w_i+0.42$	$3c_i+1.22u_i+1.2w_i+0.32$	$4c_i+4.62u_i+2.4w_i+2.22$	0.52
$Op(\frac{x_2\xleftrightarrow[\text{阈值}]{} z_2\,\|\,p_2}{\sum p_2})$	$3c_2+1.28u_2+10.3w_2+9.2$ $w_i+0.62$	$2c_i+1.32u_i+1.2w_i+0.22$	$4c_i+2.43u_i+1.4w_i+1.16$	0.53
…..	$4c_i+0.28u_i+6.32w_i$	$2c_i+1.12u_i+2.2w_i+0.52$	$3c_i+1.62u_i+1.3w_i+3.43$	0.56
$Op(\frac{x_i\xleftrightarrow[\text{阈值}]{} z_i\,\|\,p_i}{\sum p_i})$	$1+0.32$	$2c_i+1.32u_i+1.2w_i+2.22$	$2c_i+1.02u_i+1.6w_i+1.72$	0.61

由 $Op(\frac{z_{ijk}\xleftrightarrow[\text{阈值}]{} y_{ijk}\,|\,p_{ijk}}{\sum p_{ijk}})$ 的概率得出最优解，结果如表 3 所示。

表 3 整治成本一定的条件下 $Op(\frac{z_{ijk}\xleftrightarrow[\text{阈值}]{} y_{ijk}\,|\,p_{ijk}}{\sum p_{ijk}})$ 概率

整治进度方案	$z_{ijk}\xleftrightarrow[\text{阈值}]{} y_{ijk}\,\|\,p_{ijk}$	$Op(x_n\,\|\,p_{n-1},s_{n-1})=Op(\frac{z_{ijk}\xleftrightarrow[\text{阈值}]{} y_{ijk}\,\|\,p_{ijk}}{\sum p_{ijk}})+0.65$	概率
$Op(\frac{z_{jk}\xleftrightarrow[\text{阈值}]{} y_{jk}\,\|\,p_{jk}}{\sum p_{jk}})$	$5c_i+2u_i+0.12w_i+0.52$	$5c_i+1u_i+2w_i+0.22$	0.37
$z_{1k}\xleftrightarrow[\text{阈值}]{} y_{1k}\,\|\,p_{1k}$	$5c_i+2u_i+0.22$	$7c_i+2u_i+0.23$	
$z_{2k}\xleftrightarrow[\text{阈值}]{} y_{2k}\,\|\,p_{2k}$	$3c_i+0.67$	$4c_i+1.2u_i+0.72$	
$Op(\frac{z_{ij}\xleftrightarrow[\text{阈值}]{} y_{ij}\,\|\,p_{ij}}{\sum p_{ij}})$	$2c_i+2.2u_i+1.7w_i+0.27$	$2c_2+0.15u_2+0.72$	0.25
$z_{i1}\xleftrightarrow[\text{阈值}]{} y_{i1}\,\|\,p_{i1}$	$6c_i+3u_i+0.12$	$2.1c_2+1.8u_2+0.23$	
$z_{i2}\xleftrightarrow[\text{阈值}]{} y_{i2}\,\|\,p_{i2}$	0.67	$3c_2+2.2u_2+0.38w_2+0.21$	
……	……	……	
$\min Op(\frac{z_{jk}\xleftrightarrow[\text{阈值}]{} y_{jk}\,\|\,p_{jk}}{\sum p_{jk}})$	$7c_i+2u_i+0.22$	$3c_i+2.6u_i+0.62$	0.12
$\min(z_{ij}\xleftrightarrow[\text{阈值}]{} y_{ij}\,\|\,p_{ij})$	0.56	$2.1c_i+1.12u_i+1.11w_i+0.11$	
$\min(z_{jk}\xleftrightarrow[\text{阈值}]{} y_{jk}\,\|\,p_{jk})$	0.32	$1.3c_i+0.23u_i+0.12$	0.92

由表 2、3 的分析可知，可以得到最终的整治进度方案集合 Set S，并计算在一定的约束下，要在约束条件下 $(x_{ijk}\forall z_{ijk}\forall y_k\,|\,p_{ijk})$ 最优方案，结果如表 4 所示。

表 4 不同约束条件下 $s_i \to y_i$ 概率

约束条件	$x_i\forall z_i \to y_i$	$Op(x_n\,\|\,p_{n-1},s_{n-1})=\sum x_n \xleftrightarrow{p_{n-1}} y_{n-1}+\varsigma$	最优整治进度
$x_i\forall z_i < \sum c_i$			
$x_1\forall z_i \to y_i$	$7c_i+2u_i+0.22$	$2c_i+1.2u_i+0.22$	$x_i\forall z_i < \sum c_i$ $x_1\forall z_1 \to y_2$
$x_2\forall z_i \to y_i$	$3c_i+1u_i+0.23$	$1.1c_i+0.23u_i+0.31$	
…	…	…	…
$x_i\forall z_i \to y_i$	$1c_i+2.2u_i+1.2w_i+0.3$ 1	$2.2c_2+1.3u_2+2.13$ $w_i+0.12$	$x_i\forall z_i < \sum c_i$ $x_1\forall z_2 \to y_2$
$x_{ijk}\forall z_{ijk}\forall y_{ijk} < \sum c_i$			
$x_i\forall z_1 \to y_i$	$2c_i+2.92u_i+0.21$	$3c_i+3.9u_i+0.19\ w_i+1.21$	
$x_i\forall z_2 \to y_i$	$2.1c_i+1.12u_i+2.21$	$1.2c_i+1.32u_i+0.22$	$x_{ijk}\forall z_{ijk}\forall y_{ijk} < \sum c_i$ $x_2\forall z_2 \to y_2$
…	…	…	…
$x_i\forall z_i \to y_i$	$3c_i+2.2u_i+0.61$	$1.6c_i+2.1u_i+0.21$	$x_{ijk}\forall z_{ijk}\forall y_{ijk} < \sum c_i$， $x_2\forall z_2 \to y_3$

由表 2、3、4 概率结果可知，在 $x_i \forall z_i < \sum c_i$ 或 $x_{ijk} \forall z_{ijk} \forall y_{ijk} < \sum c_i$ 条件下，得到整治成本一定，且整治进度计算公式为：$1.6c_4+2.1u_4+0.21$，整治进度方案为 $\{x_1 \rightarrow z_1 \rightarrow y_3$、$x_1 \rightarrow z_2 \rightarrow y_3$、$x_2 \rightarrow z_2 \rightarrow y_3\}$，阶段性规划方法判断矩阵，结果如公式 4 所示。

$$\begin{bmatrix} x_1 \rightarrow z_1 \rightarrow y_1 & & x_1 \rightarrow z_2 \rightarrow y_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_1 \rightarrow z_2 \rightarrow y_2 & \cdots & x_2 \rightarrow z_2 \rightarrow y_2 \end{bmatrix} \bullet \begin{pmatrix} 2 & 2.92 & 2.2 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 3 & \cdots & 1.6 \end{pmatrix} \quad (4)$$

最优整治进度方案为 $\{x_1 \rightarrow z_1 \rightarrow y_3$、$x_1 \rightarrow z_2 \rightarrow y_3$、$x_2 \rightarrow z_2 \rightarrow y_3\}$，最终进度优化结果如表 5 所示。

表 5 最优方案下各整治内容的优化比例

整治内容	约束条件（月） $x_i \forall z_i < \sum c_i$	$x_{ijk} \forall z_{ijk} \forall y_{ijk} < \sum c_i$	$x_i \forall z_i < \sum c_i$ 且 $x_{ijk} \forall z_{ijk} \forall y_{ijk} < \sum c_i$
第 1 阶段进度	2	3.2	2.3
第 2 阶段进度	2.2	3.2	5.2
第 3 阶段进度	10.2	6.3	3.1
总阶段	14.4	12.7	10.6

由表 4 可知，武汉至安庆河段整治工作依据相同的整治成本，进行航道整治进行规划，调整不同的整治进度方案，实现整治优化。而且，整个整治过程符合约束条件下。整个整治进度的最终结果，如图 1 所示。

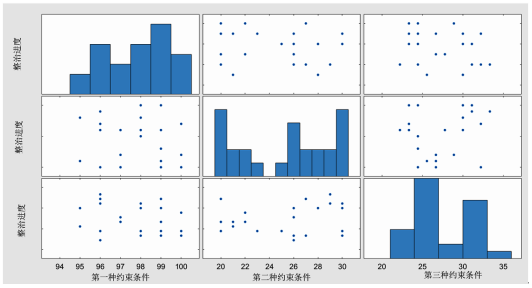

图 2 阶段性规划方法下 整治的进度优化结果

由图 2 可知，在 $x_i \forall z_i < \sum c_i$，进度控制在 11 月以内；在 $x_{ijk} \forall z_{ijk} \forall y_{ijk} < \sum c_i$ 条件下，进度控制在 12.7 月以内；在 $x_i \forall z_i < \sum c_i$ 和 $x_{ijk} \forall z_{ijk} \forall y_{ijk} < \sum c_i$ 条件下，进度控制在 12.6 月以内；由此可知，阶段性规划方法对整治内容的整体优化率为 16.5~26.4%。

三、结束语

进度优化是武汉至安庆河段整治的基础[15]，如何有效地进行进度优化，在成本约束的条件下，实现进度最优，是目前亟待解决的问题。文中提出一种阶段性规划方法，对整治成本、整治要求、整治重点进行综合的概率分析，找出最优的整治进度方案。结果显示：$x_i \forall z_i < \sum c_i$，进度控制在 11 月以内；在 $x_{ijk} \forall z_{ijk} \forall y_{ijk} < \sum c_i$ 条件下，进度控制在 12.7 月以内；在 $x_i \forall z_i < \sum c_i$ 和 $x_{ijk} \forall z_{ijk} \forall y_{ijk} < \sum c_i$ 条件下，进度控制在 12.6 月以内；由此可知，阶段性规划方法对整治内容的整体优化率为 16.5~26.4%。由此说明，阶段性规划方法可以实现武汉至安庆河段整治进度进行优化。

参考文献

[1] 姚霏，吴俊荻，何寰. 武汉城市轨道交通用地控制规划管理与实践[J]. 城市轨道交通研究，2022，25（04）：17-21+36.
[2] 杨秀霞. 基于阶段 Q 学习算法的机器人路径规划[J]. 兵器装备工程学报：1-6.
[3] 薛佳，杨杰，何翔. BIM 技术在航道整治项目目标动态控制中的应用[J]. 水运工程，2022，（03）：146-150+184.
[4] 谢玉杰，周玉洁，何熙. 嘉陵江中游龙爪湾滩航道整治工程方案研究[J]. 水运工程：1-6.
[5] 肖烈兵，孙鹏，贾雨少. 基于滩槽水流交换的通州沙水道航道整治工程布置研究[J]. 中国港湾建设，2022，42(03)：33-37.
[6] 王欣霖 张诚. 仿生型柔性促淤护滩结构在汉江河口段航道整治工程中的试验研究[J]. 水运工程，2022，（03）：129-133.
[7] 王帅. 基于多阶段随机规划的中国未来电源结构研究[J]. 电力建设，2022，43（04）：100-107.
[8] 王守相. 考虑交通网与配电网耦合基于数据包络分析的电动汽车充电设施多阶段规划方法[J]. 电力自动化设备，2022，12（3）：1-7.
[9] 王斐. 基于船舶安全通航的厢廊急弯段航道整治研究[J]. 水运工程，2022，（04）：146-150.
[10] 唐正涛. 航道整治岸坡坍岸区的形成条件及机制[J]. 水运工程，2021，1（23）：1-5.
[11] 彭静. “双碳”目标下配电网多阶段扩展规划[J]. 电力系统保护与控制，2022，50（07）：153-161.
[12] 娄源媛. 兼顾经济性和多阶段抗灾性能的骨干网架多目标规划方法[J]. 南方电网技术，2022，16（03）：32-39.
[13] 李争博. 考虑地理信息聚类分区的配电网多阶段动态规划方法[J]. 电力系统自动化，2020，12（43）：1-13.
[14] 江木春，韩亚民，林剑锋. 无人机机载激光雷达测绘技术在航道整治工程中的应用[J]. 水运工程，2022（04）：157-160+165.
[15] 郭赉佳. 考虑阶段发展的离散制造工业园区优化规划[J]. 能源工程，2022，42（01）：82-89.
[16] 葛少云. 内嵌运行优化与动力电池梯次利用的光储充换电站多阶段规划[J]. 电力自动化设备，2020，12（3）：1-11.