

## 12.5 m 深水航道测量船配备

徐言民\*, 杨柯, 关宏旭, 刘强, 王岩  
(武汉理工大学 航运学院, 武汉 430063)

**摘要:**针对深水航道工程建成后航道测量船艇配备问题,分析深水航道建成后航道测量工作变化规律,得出现有测量船在性能和数量上无法满足深水航道维护需求的结论.针对测量船数量问题,采用整数规划理论建立测量船配备模型,运用 MATLAB 软件对模型进行求解,并分析深水航道测量船应具备的性能,提出南京以下 12.5 m 深水航道测量船配备方案.

**关键词:**深水航道;测量船配备;测量船性能;整数规划  
**中图分类号:**U674.28 **文献标志码:**A

### Collocation for survey boat in the 12.5 meters deep waterway

XU Yan-min\*, YANG Ke,  
GUAN Hong-xu, LIU Qiang, WANG Yan  
(School of Navigation, Wuhan University of  
Technology, Wuhan 430063, China)

**Abstract:** To solve the problem of the collocation for survey boat in deep-water, the characteristic of the measurement task in deep waterway was analyzed and it concluded that the quantity and quality of actual survey boats restricted the deep waterway maintenance task. Based on integer programming theory, a collocation model for survey boats was established so as to determine the quantity of survey boats. The software MATLAB was used to solve the model, and the performance of deep-water survey boats was analyzed. The collocation plan is proposed for survey boats in 12.5 meters deep waterway from Nanjing.

**Key words:** deep waterway; collocation for survey boats; performance of survey boats; integer programming

## 0 引言

近年来,中部崛起计划、建设长江新经济支撑带等重大战略的实施,标志着长江水道建设新高潮的到来.按照航道建设规划,12.5 m 深水航道将上延至南京市.12.5 m 深水航道建成后,5 万 t、10 万 t 海轮将乘潮直达南京,航道水深变化将对乘潮船舶安全造成极大影响.但目前航道水深实时采集尚未实现,航道水深更新率较低<sup>[1]</sup>;长江下游航道维护管理测绘工作量大、任务重;加之桥区流场变化较为频繁<sup>[2-4]</sup>,深水航道建成后江苏沿江港口数量将增多<sup>[5]</sup>,航道维护难度增大,现有测量船在数量和性能上难以保障航道测绘工作的顺利完成,需对航道测量船配备问题开展专题研究,旨在为航道管理部门提供理论指导,确保航道测量工作能够适应深水航道建设带来的新需求.

## 1 深水航道测绘特点

随着 12.5 m 深水航道的建成,航道测量工作将呈现航道测绘项目增多、测绘工作量增大、测绘难度增大和实时测绘需求提高等特点.

### 1.1 测绘项目增多

目前,长江下游航道测绘项目主要包括常规水下地形观测和桥区航道流速流向测量.航道整治建筑物将会影响流速,引起航道冲淤变化<sup>[6]</sup>.为保障其整治功能能够持续有效发挥,需要定期对航道整治建筑物本身的技术状况进行观测,为日后航道整治建筑物维护提供依据,因此在现有测绘项目基础上可能会新增整治建筑物水深测量、

收稿日期:2014-05-21;修回日期:2014-07-18.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51109173);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2013-II-019);内河航运技术湖北省重点实验室.

作者简介:徐言民\*(1976-),男,博士,教授,E-mail: whyanmin@163.com.

沉降位移观测和潜水探摸查等测绘项目.同时,为验证航道整治建筑物建成后的整治效果,还需要新增整治工程区域河势变化跟踪监测、整治建筑物周边地形测量、水文泥沙测验等测绘项目.因此,深水航道建成后将会新增较多测绘项目.

### 1.2 测绘工作量增大

随着 12.5 m 深水航道的建成,航道水深由 10.5 m 提升至 12.5 m,航道维护标准提高,航道维护管理工作量相应增加,而航道维护管理需要航道测绘资料作为依据<sup>[7]</sup>,因此测量工作量也随之加重.航道整治工程竣工后,为掌握整治河段新的河势变化趋势,势必要在现有测绘计划的基础上增加重点河段的测量频次.

### 1.3 测绘难度提高

12.5 m 深水航道建成后,随着航道维护尺度的提升,其间接的经济效益及社会效益将逐步体现,沿岸码头数目也会逐步增多,水域内交通流密度进一步增大,测量船舶在航行和工作时,需要经常穿越航道,测量船需及时避让航道内其他航行船舶,测量船操纵难度将大幅增加;同时,测量船还需在洪水期或者恶劣天气下开展局部河段测绘工作,测绘工作难度较大.

### 1.4 实时测绘需求提高

12.5 m 深水航道建成后,部分海轮需乘潮航行,航道水深敏感性进一步提高.为满足深水航道维护需求,航道测量工作必须具备精确性、快速性和实时性.根据快速测量需要,航道测量手段必须是全天候的,对出现险情、达不到维护水深要求、回淤变化较为频繁的重点水道,要每天测量,快速出图,以便及时采取措施,避免阻航,确保船舶航行安全.

12.5 m 深水航道建成后,随着通航船舶尺度、载货吨位的提升,航道突发事件对航道测绘应急反应提出了更高的要求.

综上所述,12.5 m 深水航道建成后,航道测绘项目增多、测量工作量增大、测绘难度增大、航道实时测绘需求提高,对航道测量船艇数量和性能均提出了新的需求.

## 2 测量船配备建模

随着 12.5 m 深水航道的建成,现有航道测量船艇在数量方面将难以满足深水航道维护需求;部分早期建造的航道测量船艇在性能方面将难以适应航道维护需求,需及时增配和更换部分测量

船艇.

测量船配备问题可以抽象为配备一定数量的测量船,在满足测量要求基础上,使包括测量船打造成本、维护成本和测量成本在内的航道测绘成本达到最小,这就是典型的最优化问题<sup>[8]</sup>.测量船数目只能是整数,因此可以将上述问题建模为工程优化中的整数规划问题.

整数规划问题的一般形式:

$$\begin{aligned} & \min f(x) \\ & \text{s. t. } g_i(x) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, m \\ & \quad x_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \\ & \quad x_j \text{ 为整数} \end{aligned} \quad (1)$$

$f(x)$  和  $g_i(x)$  为线性函数时,称为线性整数规划; $f(x)$  或  $g_i(x)$  或二者取非线性函数时,称为非线性整数规划,本文只用到线性整数规划理论.

本文以测绘成本为优化目标函数,包括测量船打造成本、维护成本和测量成本.测量成本包括用工的人工费用、测算所需材料及费用、测算使用的仪器设备及费用和测算间接费用,其中测算使用的仪器设备及费用所占比重最大.40 m 级和 30 m 级测量船上所搭载测量设备及其测算所需材料无法确定,因此单艘测量船具体的测绘成本难以精确计算.本文测量成本按照 2013 年每 100 km<sup>2</sup> 扫测面积进行估算.根据调研及分析,12.5 m 深水航道建成后,航道测量船主要以 40 m 级和 30 m 级为主,航道边缘扫测或浅水测量主要由快艇搭载测量设备进行测量,故本文只研究 40 m 和 30 m 级航道测量船艇配备.设 40 m 级、30 m 级测量对应测量船数量分别为  $x_1$  和  $x_2$ ,则优化目标函数为

$$f(x_1, x_2) = c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_1 + c_4x_2 + \frac{m_1}{100k_1}x_1 + \frac{m_2}{100k_2}x_2 \quad (2)$$

其中: $c_1$ 、 $c_2$  分别为 40 m、30 m 级测量船打造成本; $c_3$ 、 $c_4$  分别为 40 m、30 m 级测量船维护成本; $m_1$ 、 $m_2$  分别为 40 m、30 m 级测量船平均每年测量面积; $k_1$ 、 $k_2$  分别为 40 m、30 m 级测量船每 100 km<sup>2</sup> 换算扫测面积扫测成本.

深水航道的建设会使航道测绘工作量增多,测量船艇一年之内的测绘能力应大于辖区内的航道测绘工作量.因此测量船数目应满足约束条件:

$$m_1x_1 + m_2x_2 \geq Q \quad (3)$$

其中: $Q$  为辖区内每年航道测量工作量.

深水航道建成后,测量船应满足快速测量、当天出图的要求,因此,在配备测量船时,应考虑所

配备测量船理论上应保证在 24 h 内辖区航道任意部位均可测量的要求. 测量船在航行和工作时速度数值相差较大, 为满足本文提出的快速性测量需求并使模型计算易于实现, 可假设测量船从所在配备点开始测量工作, 即以测量船工作时平均速度代替其航行速度和工作速度, 这样既避免了航行速度对模型的影响, 也使得模型计算结果具有一定的富余量. 因此约束条件可建立为

$$24(v_1x_1 + v_2x_2) \geq L$$

(4)

其中:  $v_1$ 、 $v_2$  分别为 40 m、30 m 级测量船工作时平均速度;  $L$  为辖区航道里程.

综上所述, 本文建立如下的测量船规划模型:

$$\min f(x_1, x_2) = c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_1 + c_4x_2 +$$

$$\frac{m_1}{100k_1}x_1 + \frac{m_2}{100k_2}x_2$$

(5)

$$\text{s. t. } \begin{cases} m_1x_1 + m_2x_2 \geq Q \\ 24(v_1x_1 + v_2x_2) \geq L \\ x_1, x_2 \geq 0 \\ x_1, x_2 \text{ 为整数} \end{cases}$$

关于整数规划问题的求解, 目前比较常用的方法是分支定界法. 分支定界法的基本思想是不断将可行域分割成小的集合, 然后在小的集合上寻找整数最优解, 在分割可行域时, 整数解并不会丢失. 分支定界法求解整数规划问题的基本步骤是: 寻找替代问题并求解—分枝与定界—剪枝三大步骤<sup>[9]</sup>. 算法框图如图 1 所示.

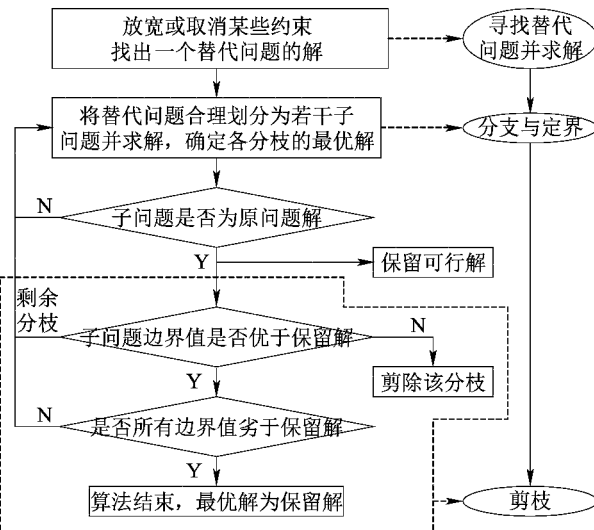


图 1 分支定界法算法框图

Fig. 1 Block diagram of branch and bound method algorithm

本文以长江南京航道局下属上海、镇江和南

京航道管理处为例, 对求解模型所需数据进行实地调研, 部分数据统计结果如表 1 所示.

表 1 基础数据统计

Tab. 1 Statistics table of the basic dates

航道管理处	维护里程/km	换算扫测面积 预测/km <sup>2</sup>
上海	97.7	2512
镇江	136.6	3281
南京	131	7236

根据南京航道局调研数据, 以其下属南京、镇江、上海航道管理处数据为例, 带入所建立的计算模型中, 运用 MATLAB 进行求解, 最终可求得模型的最优解, 如表 2 所示.

表 2 测量船配备数量优化计算结果

Tab. 2 The optimization results of the number of the survey boats

航道管理处	测量船类别	
	$x_1$ (40 m 级)	$x_2$ (30 m 级)
上海	4	1
镇江	2	2
南京	1	2

### 3 测量船性能

#### 3.1 抵御风浪性能

长江南京以下航段, 以江阴大桥为界分为 A、B 航区, 江阴段以下为 A 区, 在该区域航行和工作的船舶应具备一定的抵御风浪的能力.

##### 3.1.1 自然条件

南京以下 12.5 m 深水航道工程区域属于亚热带湿润气候, 受季风影响, 冬冷夏热, 四季分明, 雨水充沛, 无霜期长. 根据江阴 (1957—1990 年)、扬州、镇江、南京等气象站多年实测资料, 与测量船性能相关的气象条件如下.

##### (1) 风

根据江阴气象站多年气象资料, 年最大风速 27 m/s, 年平均风速 2.9 m/s. 6 级以上大风天数, 年平均 15 d, 历年最多 49 d; 8 级以上大风天数, 年平均 8 d, 历年最多 26 d.

根据镇江站多年气象资料, 全年盛行风向为东南风, 夏季以东南风为主, 冬季以东北风居多, 其次为西北风, 年平均风速为 3.4 m/s, 历年最大风速 16 m/s.

##### (2) 寒潮、台风

寒潮一般在 11 月至翌年 2 月影响或途经工程区域, 持续时间 2~3 d. 工程所在区域受台风影响或途经工程区域一般在 7~10 月份, 持续时间

约 2~4 d, 平均每年约 2~3 次。

可以看出, 该工程区域受风影响较为明显, 尤其是江阴以下航段; 该工程受寒潮和台风影响也较为明显, 大风通过时, 可能会产生风生浪。因此, 在配备测量船艇时, 应考虑测量船艇的抗风浪能力。

### 3.1.2 水文条件

工程河段地处长江下游及河口段, 长江河口潮流界的位置随径流和潮差等因素的变化而变动。福姜沙水道洪季基本为落潮流控制, 枯季为涨落潮流双向控制, 落潮流占优。口岸直水道枯水期会出现涨潮流, 汛期径流量较大, 河段内基本上不出现涨潮流。和畅洲水道属感潮河段, 除枯季大潮有上溯潮流外, 基本为单向下泄流。仪征水道为单向下泄流控制。工程所在河段潮流流速如表 3 所示。

表 3 各水道涨落潮平均流速统计  
Tab. 3 Statistics table of each channel  
average tidal velocity fluctuations

水道	流速/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )			
	枯水期		洪水期	
	涨潮	落潮	涨潮	落潮
福姜沙水道	0.08~0.43	0.24~0.98	0.01~0.25	0.68~1.06
口岸直水道	0.06~0.26	0.46~0.81	0.08	0.66~1.28
和畅洲水道	—	0.48~0.68	—	0.99~1.34
仪征水道	—	0.52~0.72	—	0.96~1.34

如表 3 所示, 工程所在水域受潮汐影响较为明显, 落潮流速较大, 落潮流流速明显大于涨潮流流速。

在枯水期和洪水期, 航道内水流流速变化较大, 各水道内最大流速统计如表 4 所示。

表 4 各水道最大流速统计  
Tab. 4 Statistics table of maximum flow rate  
in each channel

水道	流速/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	
	枯水期	洪水期
福姜沙水道	1.0~1.5	1.23~1.83
口岸直水道	0.91~1.04	1.31~1.68
和畅洲水道	0.45~0.78	0.65~1.57
仪征水道	0.53	0.93

由表 4 可知, 福姜沙、口岸直和和畅洲水道洪水期水流流速较大, 下游仪征水道由于航道放宽, 水流流速有所减缓。

### 3.1.3 测量船抵御风浪性能

由前面分析可知, 该区受潮汐及台风影响较为明显, 江面风浪大、水流急, 航行于该区域的工作船应具备沿海船舶的特征, 更好地适航于长江

下游及防止船首甲板上浪。深水航道建成后, 为保证测量船调配灵活性, 所有新添置测量船均应具有抗 8 级风的能力, 6 级风情况下能够正常完成航道测绘工作, 并均能够在 A 级航区航行。

### 3.2 操纵性能

深水航道建成后, 沿岸码头数量以及航道内交通流密度都会显著增大, 测量船在航道中航行及工作时需及时采取避让操作, 这对测量船的旋回性能、变速性能都提出了较高要求。因此, 新型测量船在打造时应合理配备车舵, 保证测量船具有灵活的操纵性能。

### 3.3 测量设备

深水航道建成后, 航道测绘项目增多, 为了应对 12.5m 深水航道工程带来的多种测绘需求, 新添置测量船舶应配置水下多波束测深系统、侧扫声呐、浅地层剖面仪、磁力仪、全站仪、高精度 GPS、流速流向仪等水下测量系统。

## 4 结 语

深水航道建成后, 航道测绘项目增多、测量工作量增大、测绘难度增大、航道实时测绘需求提高, 现有航道测量船在数量和性能上将无法满足深水航道维护需求。

根据计算, 12.5 m 深水航道建成后, 上海航道管理处应配备 4 艘 40 m 级和 1 艘 30 m 级测量船; 镇江航道管理处应配备 2 艘 40 m 级和 2 艘 30 m 级测量船; 南京航道管理处应配备 1 艘 40 m 级和 2 艘 30 m 级测量船。

新添置测量船应具有抗 8 级风的能力, 6 级风情况下能够正常进行航道测量, 并均能够在 A 级航区航行, 并具有灵活的操纵性能, 还需配备配套的测量设备。

## 参考文献 (References):

- [1] 杨传华. 内河航道智能微型测量船的设计与应用研究[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2013, 37(4): 809-812.  
YANG Chuan-hua. Design and application of intelligent mini-survey boat [J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering, 2013, 37(4): 809-812. (in Chinese)
- [2] 范平易, 邹早建, 汪淳. 基于桥区水流数值模拟的桥墩对通航影响分析[J]. 中国航海, 2010, 33(1): 37-41.  
FAN Ping-yi, ZOU Zao-jian, WANG Chun. Analysis of piers influence on navigation based on numerical simula-

- tion of bridge area flow[J]. Navigation of China, 2010, 33(1): 37-41. (in Chinese)
- [3] SECKIN G, ATABAY S. Experimental backwater analysis around bridge waterways [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2005, 32(6): 1015-1029.
- [4] KIMURA I, HOSODA T, ONADA S. Predictions of turbulent flows around a bridge pier using various numerical models[C]//Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics River Flow. 2006:767-775.
- [5] 张杰. 长江12.5 m 深水航道对南京港物流发展影响及对策研究[D]. 大连:大连海事大学,2012.
- ZHANG Jie. The countermeasures study of Nanjing port logistics with the development impact from 12.5 meters deep waterway of the Yangtze River[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2012. (in Chinese)
- [6] 李冰冻, 李嘉, 李克锋. 丁坝水流的水槽试验及数值模拟研究[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2013, 28(2): 176-183.
- LI Bing-dong, LI Jia, LI Ke-feng. Flume experiment and numerical simulation on flow around a spur dike[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2013, 28(2): 176-183. (in Chinese)
- [7] 丁明雷, 邹艳红, 周冠男, 等. 长江测绘成果管理应用系统研究[J]. 测绘科学, 2013, 38(5): 66-68.
- DING Ming-lei, ZOU Yan-hong, ZHOU Guan-nan, et al. Surveying and mapping information management and application system for Yangtze waterway[J]. Science of Surveying and Mapping, 2013, 38(5): 66-68. (in Chinese)
- [8] IBRAHEEM A. Linear programming with fuzzy objective function[C]// Proceedings of the 2013 10th International Conference on Information Technology: New Generations, ITNG 2013 Tenth International Conference. 2013:777-778.
- [9] VINCENSA T. SEIPPB F. RUZIKAB S, et al. Multiple objective branch and bound for mixed 0-1 linear programming: Corrections and improvements for the biobjective case[J]. Computers & Operations Research, 2013, 40(1): 498-509.

### 关于开通《大连海事大学学报》在线采编系统的通知

为促进本刊编辑工作现代化,规范稿件评审流程,缩短稿件处理周期,《大连海事大学学报》编辑部于2014年5月正式启用"期刊在线采编系统",登陆域名为 <http://xb.dlmu.edu.cn>。该系统包括作者在线投稿/查稿系统、专家在线审稿系统、编辑在线办公系统,可以实现作者投稿查稿、专家审稿、编辑处理稿件的全网络化协同办公。

欢迎广大科研工作者积极投稿,您在撰稿和投稿过程中若有任何疑问,请及时与我们联系,同时欢迎您对编辑部工作提出宝贵意见。

《大连海事大学学报》编辑部

联系电话:0411-84727810

电子邮箱: [xuebao@dlmu.edu.cn](mailto:xuebao@dlmu.edu.cn)

网 址: <http://xb.dlmu.edu.cn>