



最小元素法在吹填排距优化管理中的应用

王凯¹, 陈惠君², 郭彬²

(1. 中国水电建设集团港航建设有限公司, 天津 300467; 2. 中国水利电力对外公司, 北京 100011)

摘要: 运筹学中产销平衡的运输问题在疏浚吹填工程的管线合理布置方面有很大的借鉴意义。通过适当调整产销平衡问题的数学方程, 将其运用到疏浚吹填工程中为现场的管线布置提供理论指导, 从而达到降低疏浚吹填成本的目的。

关键词: 疏浚吹填; 排距; 绞吸船; 最小元素法

中图分类号: U 616

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)11-0188-05

Application of minimum-element method in optimization of pipeline arrangement for dredging & reclamation works

WANG Kai¹, CHEN Hui-jun², GUO Bin²

(1. Sinohydro Harbor Co., Ltd., Tianjin 300467, China; 2. China International Water & Electric Co., Beijing 100011, China)

Abstract: The theory of transportation problem in the balance of production and sales in the operational research has great meaning for the optimization of pipeline arrangement in dredging & reclamation works. After the adjustment of the mathematic formula of the transportation problem in the balance of production and sales, the new formula can be adopted as theoretical guidance for the pipeline arrangement at site to reduce the cost of the dredging and reclamation work.

Keywords: dredging & reclamation; distance of pipeline; cutter suction dredger; minimum-element method

在疏浚吹填工程中, 如何合理安排绞吸船的疏浚区域和吹填区域之间的土方调配, 即如何合理安排排泥管线进行土方调配的问题对降低疏浚吹填成本、减少现场管线安拆工作量有较大工程意义。目前国内外对疏浚吹填中合理布置吹填管线尚无权威的理论依据, 大多是凭借现场施工经验进行管线布置和安拆工作。运筹学中的产销平衡的运输问题同疏浚吹填中的土方调配问题有很多相同点, 运用运筹学的一些理论可以为疏浚吹填工程中的管线布置提供一定的理论指导。本文旨在运用运筹学中的最小元素法, 通过工程实例对某疏浚吹填工程中的管线合理布置进行探讨。

1 疏浚吹填工程中土方调配的数学模型

在物资调运问题中, 希望运输费用最少总是人们最为关心的一个目标。在各种设定条件的约束下, 寻找使得总运输费用最少的最优运输方案是运输问题的核心^[1]。单一品种物资的运输调度问题, 其典型情况是: 设某种物资有 m 个产地 A_1, A_2, \dots, A_m , 各产地的产量分别是 a_1, a_2, \dots, a_m ; 有 n 个销地 B_1, B_2, \dots, B_n , 各销地的销量分别为 b_1, b_2, \dots, b_n , 假定从产地 $A_i (i=1, 2, \dots, m)$ 向销地 $B_j (j=1, 2, \dots, n)$ 运输单位物品的运价是 C_{ij} , 问如何调运这些物资才能使总运费达到最小?

收稿日期: 2016-04-03

作者简介: 王凯 (1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港口和航道工程的施工管理工作。

表 1 运筹学中运输问题的单位运价

产地	销地				产量
	B_1	B_2	...	B_n	
A_1	c_{11}	c_{12}	...	c_{1n}	a_1
A_2	c_{21}	c_{22}	...	c_{2n}	a_2
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
A_m	c_{m1}	c_{m2}	...	c_{mn}	a_n
销量	b_1	b_2	...	b_n	

注: c_{mn} 表示由产地 A_m 运输至销地 B_n 所需要的费用。

当表 1 中 $\sum_{i=1}^m a_i = \sum_{j=1}^n b_j$ 时, 即运输问题的总产量等于其总销量, 这样的运输问题称为产销平衡的运输问题^[2]。

疏浚吹填工程中, 利用排泥管线将绞吸船在疏浚区域开挖的材料运输至指定的吹填区域, 当疏浚量等于吹填量时, 这一过程可以看作一个产销平衡的运输问题。这里需要将原来的模型做适当的修改: 疏浚材料的总运费和排泥管线的长度(排距)存在一定的数学关系, 管线越长单位材料的运输费用越大。这个关系也是比较容易理解的, 因为排距大, 同样的情况下运输一个单位的材料经过的管线长度(根数)就多, 磨损的管线也就多, 管线损耗也就大, 同时为了形成这个长距离的管线, 管线的连接、管线的运输、管线的拆除工作量都随之增加, 摊到一个单位的材料的运输上也会增加运费。疏浚材料的运费修改后的模型见表 2。

表 2 疏浚吹填工程排距

疏浚区	吹填区				疏浚量
	B_1	B_2	...	B_n	
A_1	c_{11}	c_{12}	...	c_{1n}	a_1
A_2	c_{21}	c_{22}	...	c_{2n}	a_2
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
A_m	c_{m1}	c_{m2}	...	c_{mn}	a_n
吹填量	b_1	b_2	...	b_n	

注: c_{mn} 表示由疏浚区域 A_m 通过排泥管线运输材料到吹填区域 B_n 所需要的排距。

若用 x_{ij} 表示从 A_i 到 B_j 的运量, 那么在疏浚量与吹填量相等的条件下, 要求得总运费(加权总排距)最小的调运方案, 数学模型为:

$$\min z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} (r_1 + r_2) \quad (1)$$

约束方程为

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j & j = 1, 2, \dots, n \\ \sum_{j=1}^n x_{ij} = a_i & i = 1, 2, \dots, m \\ x_{ij} \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: z 在运筹学中称为总运费, 这里暂且称之为加权总排距, 所谓加权排距是指疏浚材料的方量乘以其通过的管线长度得到的一个数值, 称这个数值为这些方量的材料的加权排距, 加权总排距即将不同区域的材料通过不同排距的管线输送至不同区域的各个加权排距之和; x_{ij} 为从疏浚区域 A_i 向吹填区域 B_j 的吹填量; r_1 为单位长度管线的占用费; r_2 为单位长度管线的架设费。

将式(1)中的约束方程展开有如下方程:

$$\begin{cases} x_{11} + \dots + x_{1n} & & & & = a_1 \\ & x_{21} + \dots + x_{2n} & & & = a_2 \\ & & \ddots & & \vdots \\ & & & x_{m1} + \dots + x_{mn} & = a_m \\ x_{11} + & x_{21} + \dots & x_{m1} & & = b_1 \\ & x_{12} + & x_{22} + \dots & x_{m2} & = b_2 \\ & & \ddots & & \vdots \\ & & & x_{1n} + & x_{2n} + \dots & x_{mn} & = b_n \end{cases} \quad (3)$$

由此可见, 约束方程式中共 mn 个变量、 $m+n$ 个约束。由上面的描述可以看出, 在疏浚吹填工程中, 如何规划管线使其达到总运费(加权总排距)最小的问题可以套用运筹学中线性规划问题来解决。疏浚吹填工程中的土方运输问题也可以用单纯形法来解决, 手工计算时, 表上作业法是求解运输问题的常用方法^[3]。表上作业法, 实质上还是单纯形法^[4]。其步骤如下: 1) 确定一个初始可行调运方案。可以通过最小元素法、西北角法、Vogel 法来完成, 本文将采用最小元素法^[5]。2) 检验当前可行方案是否最优, 常用的方法有闭回路法和位势法, 用这两种方法计算出检验数, 从而判别方案是否最优。3) 方案调整, 从当前方案出发寻找更好方案, 常采用闭回路法。

2 工程实例运用

2.1 工程背景介绍

某疏浚吹填工程, 疏浚区域和吹填区域的

分布见图 1。

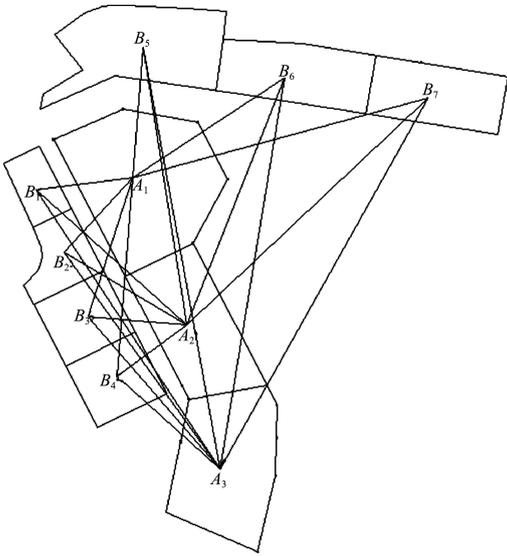


图 1 疏浚吹填区域分布分块

图 1 中 A 为水上疏浚区域, B 为陆上吹填区域。根据设计要求, A_1 、 A_2 、 A_3 区域需开挖至设计水深-16 m, 预计疏浚总量 900 万 m^3 。吹填 1 区是未来的码头堆场区域共 4 个区, 分别为 B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 , 和未来的 4 个码头泊位相对应, 设计吹填高程为 5 m, 预计可容纳 400 万 m^3 材料; 吹填 2 区为备土区, 划分为 B_5 、 B_6 、 B_7 共 3 个区, 是考虑将来港口的建设而提前进行材料储备, 设计吹填高程也是 5 m, 预计能够容纳 500 万 m^3 。

2.2 管线布置的线性规划

由于疏浚量等于吹填量, 因此本质上这也是一个产销平衡的运输问题。确定了问题的本质后就需要套用表 2 和式(1)的数学模型进行线性规划求解,

在进行相应的求解前, 需要将疏浚区域和吹填区域进行合理的分块, 即划分“产地”和“销地”进而得到表 2 中的 A_m 和 B_n , 笔者认为分块原则如下:

1) 疏浚区域的分块即“产地”分块。通常情况下绞吸船施工的管线由岸管、潜管和浮管 3 部分组成。这 3 部分管线构成了绞吸船的排距。在疏浚某一个区域时绞吸船的施工覆盖范围会受制于浮管的长度, 一般以浮管和潜管连接处的呼吸阀为圆心, 浮管长度加上船身长度为该绞吸船施工能覆盖的范围, 进行疏浚区域分块时需要着重考虑这一施工特点。

2) 吹填区域分块即“销地”分块。一般按照未来用途和自然地形条件划分。

3) 排距的确定。这里以疏浚分块的几何中心点到吹填分块的几何中心点的连线距离作为理论排距, 因为根据上文中疏浚区域的分块原则, 这个几何中心点其实与呼吸阀的位置很接近。实际上这个理论排距还应该包括连接在呼吸阀上的浮管的长度, 由于绞吸船浮管的长度一般比较固定, 所以两个几何中心点连线的长度加上这个固定值后并不影响下文中最小元素法的计算顺序, 在讨论究竟用哪条管线吹填哪块区域的问题上可以暂不考虑。

按照上述原则划分后的疏浚区域与吹填区域分布见图 1。

根据水深和高程的测量结果, 利用测量软件可以计算出各个分块的方量信息, 再从图上量取排距信息, 汇总后按照上文中表 2 的形式有表 3。

表 3 某疏浚吹填工程排距

疏浚区	吹填区排距/km							疏浚量/ 万 m^3
	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	B_7	
A_1	0.50	0.54	0.79	1.08	0.71	0.96	1.61	440
A_2	1.08	0.75	0.52	0.45	1.52	1.43	1.76	210
A_3	1.80	1.43	1.08	0.74	2.33	2.15	2.30	250
吹填量/万 m^3	40	70	130	160	210	140	150	900(平衡)

注: 排距未考虑浮管长度。

根据表 3 的信息利用方程 1 求解最小运输费用(最小加权总排距), 跟求解运筹学中的运输问题的方法是一样的, 首先要确定初始方案, 确定

初始基本可行解的方法很多, 一般希望方法既简便又尽可能接近最优解。本文采用最小元素法来进行求解。这里的最小元素法的基本思想是优先

满足排距最小的吹填区域。首先找出排距最小的, 并以最大限度满足疏浚与吹填关系为原则确定管线布置方案。同样的方法反复进行直到确定了所有的管线布置, 得到一个完整的调运方案即初始基本可行解为止。

根据表 3 中信息, 按照最小元素法的求解顺序, 找到最小排距为 A_2-B_4 , 最大限度满足该管线

的疏浚吹填要求即该管线可以运输的材料方量应该使得 B_4 这一列之和小于等于 160 万 m^3 , 同时还要保证 A_2 这一列之和小于等于 210 万 m^3 , 由此可以得到疏浚区域 A_2 向吹填区域 B_4 吹填 160 万 m^3 , 填入表 4 相应位置。然后寻找下一个最短排距为 A_1-B_1 , 依次类推完成表 4。

表 4 某疏浚吹填工程管线布置理论最优方案

疏浚区	吹填区排距/km							疏浚量/ 万 m^3
	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	B_7	
A_1	40 (2)	70 (4)	80 (8)	0 (10)	210 (5)	40 (9)	0 (16)	440
A_2	0 (11)	0 (7)	50 (3)	160 (1)	0 (15)	0 (13)	0 (17)	210
A_3	0 (18)	0 (14)	0 (12)	0 (6)	0 (21)	100 (19)	150 (20)	250
吹填量/ 万 m^3	40	70	130	160	210	140	150	900

注: 单元格内数值分上下两排, 上面的数字代表计划吹填量, 下面的数字代表按照最小元素法的求解顺序。

按照运筹学上运输问题的求解步骤, 在求得基本可行解后需要判断此可行解是否为最优解, 即该可行方案是否为最优方案, 判别的方法主要有闭回路法和位势法两种, 这里不作赘述。假设经过闭回路法检验后上述方案为最优方案, 暂且称该方案为理论最优方案。

2.3 管线布置方案的最终确定

上文中得到的理论最优方案为工程人员在管线布置方面提供了数学理论的支撑, 但是疏浚吹填工程的土方调配问题同一般的土方平衡运输问题相比较有其特殊性:

1) 绞吸船的数量有限, 不可能像理论最优方案中的各个吹填区域分块同时进行吹填作业, 需要有一定的吹填顺序。

2) 受制于工期节点、吹填区的挡水围堰施工、退水口设置、自然地形条件等可观因素的影响, 吹填区域本身要求吹填作业也存在一个先后顺序的问题。

3) 如果按照上文中理论最优方案的结论, 需要准备共 9 条管线, 分别为 A_1-B_1 、 A_1-B_2 、 A_1-B_3 、 A_1-B_5 、 A_1-B_6 、 A_2-B_3 、 A_2-B_4 、 A_3-B_6 、 A_3-B_7 , 实际工程中一般不可能同时准备好这 9 套管线,

因此还需要考虑就近利用管线的问题。

4) 由于管线磨损的问题, 根据不同土质管线在输送一定方量的材料后需要进行管线换面, 譬如说, 开挖本工程案例中的土质, 管线每输送 20 万 m^3 材料需要换面一次, 那么对于 A_1-B_5 、 A_2-B_4 、 A_3-B_6 、 A_3-B_7 这几个吹填量大的管线布置方案需要换面数次, 由于其吹填量太大甚至要更换新的管线才能完成任务。

5) 值得注意的是, 在得到理论最优方案后, 现场管线布置不必遵循所谓的最小元素法的基本原则, 而只需要最优理论方案中的疏浚吹填关系即可, 至于先疏浚哪一块或吹填哪一块就不必按照最小元素法求解时的那样, 必须先安排吹填排距最短的那个区域了。

根据上面的工程实际情况, 结合已经得到的理论最优方案才能确定最终的管线布置方案, 并以此最终方案来安排和指导现场作业。

2.4 存在问题

在运用运筹学中关于解决上述疏浚吹填工程中的土方调配进行线性求解时还有一些亟待解决的细节问题:

1) 排高的问题。如果吹填区域分块后要求的

吹填高程相差太大，需要通过一定的理论将排高换算成排距。

2) 直线排距的问题。上文用吹填分块和疏浚分块的几何中心的直线距离代表排距，实际工程中由于地形等障碍物的限制，有时候管线不能按照直线布置，而且潜管上岸后岸管的布置需要视现场情况待定，管线上下起伏、左右弯曲产生的局部损失也应该按照一定的方法换算成排距，因此实际排距的大小需要根据实际情况做出调整。

3) 上文的理论最优方案并没有考虑到实际施工中如果将两条或者多条绞吸船布置在一个疏浚区域内，或者即使不在同一个疏浚区域在相邻区域的施工干扰问题，理论最优方案的可操作性有时也要进行实际讨论。

4) 最短排距不等于最优排距的问题。绞吸船的排距并不是越短越好，存在一个最优排距的问题，假设某绞吸船的最优排距为 1~2 km，那么在用最小元素法求解的时候就不宜按照最短的排距开始求解，而是应该按最优排距区间的中间值譬如以 1.5 km 开始求解，最后求解在最优排距之外的那些方案。

5) 最小元素法表面上看很合理，但在有些情况下一味地按照最短排距优先安排疏浚和吹填工作会导致后期不得不采用排距很长的管线来安排疏浚吹填作业，从而导致整个管线布置工作量增加，经济上也不合理。这种情况下可以运用 Vogel 法代替最小元素法，能够有效避免这种情况的发生。

3 结语

1) 将运筹学中产销平衡的运输问题的解决思路引入到疏浚吹填工程中，用以解决土方调配问题。

2) 工程实例中将疏浚区域作为产销平衡运输问题中的“产地”，将吹填区域作为运输问题中的“销地”，按照产销平衡运输问题的处理方法对疏浚吹填工程进行求解前处理。

3) 采用最小元素法尝试性地对疏浚吹填管线的最优布置方案进行求解，并求得管线布置的理论最优方案。

4) 对最小元素法在工程实例求解过程中出现的问题提出了措施和建议。

通过一定的处理，将最小元素法在产销平衡运输问题中的应用引入疏浚吹填工程，在解决管线布置方面可以提供很多有益的理论借鉴。

参考文献:

- [1] 李婷. 双层运输问题的表上作业法[D]. 苏州: 苏州大学, 2014.
- [2] 胡运权, 郭耀煌. 运筹学教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998: 70-71.
- [3] 谢凡荣. 产销平衡运输问题的表上作业法解法的一个注记[J]. 运筹与管理, 2005(4): 44-46.
- [4] 殷春香. 论表上作业法与单纯形法的一致性[J]. 怀化学院学报, 2013(11): 84-87.
- [5] 何坚勇. 最优化方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 121-125.

(本文编辑 武亚庆)



· 消 息 ·

潍坊港 3.5 万吨级航道工程竣工

日前，天航局承建的潍坊港 3.5 万 t 航道工程完工并通过验收。

该工程于 2014 年 4 月开工，先后投入“通远”轮、“津航浚 109”轮、“天滨”船、“津航浚 405”船等 30 余艘施工船舶，共完成工程量 3 300 万 m³，疏浚产值 11 亿元。

http://en.ccccltd.cn/cccltd/news/jcxw/jx/201611/t20161104_86479.html (2016-11-04)