

港口建设规模优化研究

鲁子爱

(河海大学交通与海洋工程学院 江苏 南京 210098)

摘要 按系统分析方法研究了运输系统中各种费用项目对货物转运费的影响程度 科学合理地选取费用项目 建立了港口规模优化模型 根据模型的特点和各参变量的物理意义及其相互关系导出了港口最优规模必须满足的条件 给出了利用相对比较简单的“爬山法”寻求最优解的方法和具体步骤. 与以往的研究成果相比, 该优化模型考虑的因素更全面、求解更方便. 结合实例分析提出了厦门港应该优先发展万吨级以上深水泊位、改造小船泊位以提高其靠泊能力的港口发展战略, 给出了 2010 年厦门港的最优建设规模, 为厦门港的建设与发展提供了决策依据.

关键词 系统 港口规模 最优化 货物运输

中图分类号 :U651⁺.3 文献标识码 :A 文章编号 :1000-1980(2002)05-0062-05

港口建设规模优化以货运成本最低为目标确定各种港口设施规模,使港口建设与整个交通运输系统相互协调配套,从而提高港口的运行效率、优化运输系统、降低货运成本.

码头是港口生产营运的中心,港口泊位数是港口的主要规模,其他设施一般应与码头泊位数量配套或相互协调,因此港口规模优化总是以寻求最优泊位数为主要研究内容,决策目标就是当泊位数增加或减少时都将引起总费用的增加,可表示为

$$C_S^t < C_{S+1}^t \text{ 且 } C_S^t < C_{S-1}^t \tag{1}$$

其中 C_{S-1}^t 、 C_S^t 和 C_{S+1}^t 分别为港口有 $(S-1)$ 、 S 和 $(S+1)$ 个泊位时平均每天发生的总费用. 考虑的因素不同,总费用表达式(优化模型)也不同. 20 世纪 70 年代仅考虑港、船两方面的因素,费用模型比较简单^[1],求解也比较方便. 随着研究的不断深入,对总费用 C_S^t 的考虑因素越来越多、越来越全面. 从 20 世纪 80 年代开始,总费用模型中计入了货物在港口积压引起的时间价值. 计算货物积压费时一般只考虑船舶的等待时间和作业时间,对正在装卸的船舶,若按其载货量的一半计算积压费建立模型^[2],就不能用显式表达决策目标,使问题的求解非常困难,若全部计算可得到用显式表达的决策目标^[3],求解比较方便.

本文把港口作为运输系统的一部分,分析研究系统中各种因素对货物转运费的影响,合理地选取费用项目,从而建立港口规模优化模型,并利用“爬山法”寻求最优解.

1 主要费用项目

港口是交通运输的枢纽,港口服务系统是运输系统的一个子系统,影响货物转运费的因素繁多. 在研究港口的最优规模时,若为追求全面而考虑所有的费用项目,将增加问题的求解难度,甚至无法求解. 因此,建立模型时要结合港口实际选取主要费用项目,达到既方便求解又能满足实际要求之目的. 本文建立的港口规模优化模型考虑了港口建设费、船舶费用和货物的时间价值 3 项费用.

1.1 港口建设费

港口建设费是指码头、港池、航道、锚地、防波堤、仓库、堆场、道路、装卸运输机械以及生产、生活辅助设施等的投资. 进出港航道和生产、生活辅助设施规模一般按港口的使用要求确定,其变化幅度有限,投资也相对固定,在港口建设费中可不列入,而只考虑泊位综合投资(码头、港池、仓库、堆场、装卸机械设备). 防波堤投资和锚地建设费,可表示为

$$c_p = \sum_k c_{b,k} S_k + c_{d,L} + \sum_k c_{m,k} n_{m,k} \tag{2}$$

式中： $c_{b,k}$ ——每个 k 类泊位每天分摊的综合投资； S_k ——第 k 类码头泊位数量； $c_{d,L}$ ——防波堤投资； $c_{m,k}$ ——每个 k 类锚泊位每天分摊的投资； $n_{m,k}$ ——第 k 类锚泊位数量。

1.2 船舶费用

船舶在航行过程中所需费用称为航行费用，在港口停泊等待或靠泊作业所需费用称为停泊费用。航行费用对港口规模不产生影响，故只需考虑船舶的停泊费用。

船舶的停泊费用一般包括船舶的资本回收费、保养修理费、保险费、停泊燃料费、船员工资福利费、企业管理费等，具体计算比较复杂，工程界常采用经验公式计算^[4]。

1.3 货物的时间价值

货物在港口与腹地之间的运输费用及其时间价值取决于所采用的运输方式，与港口建设规模没有直接的关系，在研究港口规模时只考虑货物在港口滞留所产生的时间价值。货物在港存放时间的长短主要取决于港口仓储条件和集疏运条件，对港口规模的影响比较小，所以本文仅考虑船舶的等待时间和装卸船时间引起的货物积压费。

设第 k 种货物的价格为 $c_{g,k}$ （元/t），平均每天在港的第 k 种船舶数量为 $\bar{n}_{S,k}$ （艘/d），第 k 种船舶在港口的装卸量为 G_k （t/艘），则每天由于船舶等待和装卸作业产生的货物积压费 c_g （元/d）为

$$c_g = \frac{i}{365} \sum_k c_{g,k} G_k \bar{n}_{S,k} \tag{3}$$

式中 i 为现金贴现率。

2 港口规模优化模型

2.1 目标函数

根据以上分析，略去对港口建设规模不产生直接影响或者影响不大的费用项目，港口规模优化的目标函数可表示为

$$\min C_S^t = \sum_k c_{b,k} S_k + c_{d,L} + \sum_k c_{m,k} n_{m,k}^S + \sum_k (c_{S,k} + \frac{i}{365} c_{g,k} G_k) \bar{n}_{S,k} \tag{4}$$

式中： $n_{m,k}^S$ ——港口有 S 个码头泊位时第 k 类锚泊位个数； $c_{S,k}$ ——第 k 种船舶在港停泊艘天费用； $\bar{n}_{S,k}$ ——港口有 S 个码头泊位时第 k 类船舶在港数量，其他符号意义同前。

在港口吞吐量一定的情况下，港口规模优化就归结为按式（4）所示的目标函数求港口各类码头泊位数 S_k 的最优解。式中的平均在港船数 $\bar{n}_{S,k}$ 和锚泊位数 $n_{m,k}^S$ 都是随 S_k 的不同而变化的量， $n_{m,k}^S$ 与平均等待船舶数 $\bar{n}_{w,k}^S$ 密切相关，基本呈线性相关关系，即

$$n_{m,k}^S = f_k \cdot \bar{n}_{w,k}^S \tag{5}$$

港口各类船舶的平均在港数量为平均装卸船数 $\bar{n}_{b,k}^S$ 和平均等待船数 $\bar{n}_{w,k}^S$ 之和，从而目标函数可改写成

$$\min C_S^t = \sum_k c_{b,k} S_k + c_{d,L} + \sum_k (c_{S,k} + \frac{i}{365} c_{g,k} G_k) \bar{n}_{b,k}^S + \sum_k (c_{S,k} + c_{m,k} f_k + \frac{i}{365} c_{g,k} G_k) \bar{n}_{w,k}^S \tag{6}$$

2.2 约束条件

这里的约束条件是指对目标函数中各类码头泊位数取值范围的限制，主要包括自然条件方面的限制和营运要求方面的限制。

任何港口无论岸线多么充裕，可建造的码头泊位数总是有限的，所以有约束条件：港口各类码头泊位数的总和 S 不大于最多可建造的泊位数 S_m 。

另外，港口的泊位利用率 ρ 总是小于 1 的，否则就不能正常运行。港口泊位利用率是船流密度 a 与泊位数 S 的比值，而 a 在数值上与港口平均每天的装卸船数 $\bar{n}_b$ 相等，所以有 $S > \bar{n}_b = S_{\min}$ ，此条件对港口各类泊位都适用，另外港口泊位数必须取大于零的整数。

综上所述，港口规模优化问题的约束条件为

$$\left. \begin{aligned} S &= \sum_{k=1}^{N_b} S_k \leq S_m \\ S_k &> S_{k,\min} \quad k = 1, 2, \dots, N_b \end{aligned} \right\} \tag{7}$$

式中： N_b ——港口码头泊位的种类数； $S_{k,\min}$ ——港口第 k 类码头泊位数量的最小值； S_m ——港口最多可以

建造的码头泊位总数.

3 优化模型求解

3.1 最优解的存在性

直接利用解析方法判断目标函数是否存在最优解相当困难,从目标函数出发作定性分析,再结合港口生产实际,完全可以判断最优解的存在性.式(6)是定义在实数空间上的实函数,由约束条件式(7)可知,函数自变量 S_k 的取值范围为 $S_k \in \{S_{k\min}, S_{k\min} + 1, S_{k\min} + 2, \dots, S_m\}$, 所以有

$$S = \sum_{k=1}^{N_b} S_k \in \{1, 2, \dots, S_m\} \tag{8}$$

显然有关系式 $S \subset \mathbf{N}$ (自然数集) $\subset \mathbf{Z}$ (整数集) $\subset \mathbf{R}$ (实数集). 因此,当 $S \in \{1, 2, \dots, S_m\}$ 时,对每个 S 值都存在一个(也可能是多个)函数值与之对应,即目标函数是有界的,根据有界函数必然存在最大值和最小值的性质,式(6)表示的目标函数一定存在最优解.

3.2 最优解应满足的条件

决策目标式(1)中的 $S+1$, S 和 $S-1$ 表示港口泊位总数的变化,由某种类型的泊位数改变所引起.设港口拥有 N_b 种类型的码头泊位,可以服务于 N_b 种类型的船舶,以 S_k 表示第 k 种类型的泊位数量,当某种类型的泊位数发生变化时,相应类型的在港船舶数量和锚泊位数量就会发生变化,且不会影响到其他类型,所以当第 j 种类型的泊位数 S_j 发生变化时,根据式(6)可得到 C_{S-1}^t , C_S^t 和 C_{S+1}^t 的表达式,进而代入式(1)整理后得到

$$\begin{aligned} c_{b,j} + (c_{S,j} + c_{m,j}f_j + \frac{i}{N}c_{g,j}G_j)(\bar{n}_{w,j}^{S+1} - \bar{n}_{w,j}^S) &> 0 \\ c_{b,j} + (c_{S,j} + c_{m,j}f_j + \frac{i}{N}c_{g,j}G_j)(\bar{n}_{w,j}^S - \bar{n}_{w,j}^{S-1}) &< 0 \end{aligned}$$

两个不等式组,其中各有 N_b 个不等式($j = 1, 2, \dots, N_b$),将它们改变一下形式并合在一起,即得到目标函数的最优解应满足的条件

$$\bar{n}_{w,j}^{S-1} - \bar{n}_{w,j}^S > \frac{c_{b,j}}{c_{S,j} + c_{m,j}f_j + \frac{i}{N}c_{g,j}G_j} > \bar{n}_{w,j}^S - \bar{n}_{w,j}^{S+1} \quad j = 1, 2, \dots, N_b \tag{9}$$

3.3 寻优方法与步骤

利用“爬山法”寻优的思路是:根据约束条件式(7)设定不同的港口泊位状态(各种类型的泊位数量),选择合适的方法求得对应的平均等待船数,代入目标函数最优解应满足的条件(9)进行检验,若不能满足就调整港口的泊位状态重新计算,直至满足后即得到港口的最优规模.

在满足约束条件式(7)的情况下,平均排队长度 $\bar{n}_w^S$ 与港口泊位数 S 成反比,且严格单调,即

$$\bar{n}_w^{S_0} > \bar{n}_w^{S_0+1} > \dots > \bar{n}_w^{S_m}$$

其中 S_0 是港口泊位总数的最小值.另外由式(9)可知,随着 S 的增大 $\bar{n}_w^S$ 的减小速率加快,即

$$\bar{n}_w^{S_0} - \bar{n}_w^{S_0+1} > \bar{n}_w^{S_0+1} - \bar{n}_w^{S_0+2} > \dots > \bar{n}_w^{S_m-1} - \bar{n}_w^{S_m} \tag{10}$$

事实也证明上述关系是成立的.这一结论为解决问题提供了方便,因为已不需要研究港口泊位状态的调整方法及其收敛性,只要将港口的初始泊位状态按最小规模设定,再逐步增加码头泊位数,直至满足条件(10)即可得到港口规模的最优解.

根据港口规模优化问题的特点,很容易得到“爬山法”的寻优流程,见图1.其中每种类型的码头泊位数初值 S 必须大于相应类型的最小泊位数,即平均装卸船舶数 $\bar{n}_{b,j}$ 指标 D 由式(11)确定.

$$D = \frac{c_{b,j}}{c_{S,j} + c_{m,j}f_j + \frac{i}{N}c_{g,j}G_j} \tag{11}$$

4 实例分析

按本文提出的港口规模优化模型对厦门港的现状 & 发展规划进行分析,提出厦门港的最佳规模和发展战略.

厦门港设有件杂货码头 ,煤炭、矿石、散粮和散肥等干散货码头 ,集装箱码头 ,油码头和客运码头及客货两用码头 ,是一个综合性港口 .

4.1 现状 (1996 年)分析

厦门港 1996 年实际投入生产的泊位 69 个 ,按港口实际条件和有关统计资料计算的结果表明 ,港口各类码头泊位分布不合理 :大船泊位偏少、小船泊位偏多 .从货物转运成本看 ,由于船舶等待而产生的费用(船舶待泊费和货物积压费)占 39.4% ,显得很不合理 .主要计算结果如表 1 所示 .

按本文建立的模型对厦门港 1996 年的规模进行了优化计算 ,结果也列入表 1 .从计算结果可以看出 ,港口规模优化后 (a)港口的大船泊位增加、小船泊位减少 ,各类码头泊位分布趋于合理 (b)船舶的排队情况有很大改善 ,平均排队长度和平均等待时间分别为比实际规模情况降低了 52% 和 40% (c)港口的优化规模虽然增加了港口的泊位建设费 ,但大大减少了船舶的待泊费和货物积压费 ,从而使得总费用降低 .若港口按优化规模建设 ,可节约货物转运费用约 15% .

从以上分析明显看出 ,厦门港的发展战略应该是 :优先发展万吨级以上的深水泊位 ,缓解大型船舶排长队等待的现象 ;对部分有条件的百吨级码头泊位进行改造 ,提高靠泊能力 ,使其达到千吨级或更高 ,既可减轻大船泊位的建设压力 ,又可减少多余的小船泊位而提高其利用率 .

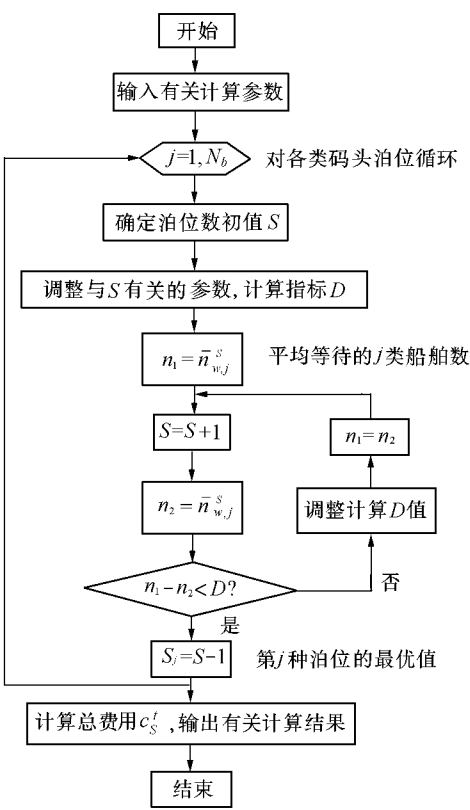


图 1 “爬山法”寻优流程

Fig.1 Flow chart of optimization with “climb-hill” method

港口特征参数		泊位总数/个				日均等待船数/艘					
		百吨级	千吨级	万吨级	合计	杂货船	散货船	集装箱船	油 船	客货船	合 计
1996 年	实际规模	37	18	14	69	0.313	1.369	0.574	0.235	1.693	4.184
	优化规模	16	29	19	64	0.796	0.507	0.545	0.060	0.109	2.017
2010 年	实际规模	40	31	59	130	0.238	1.110	3.410	0.192	0.081	5.031
	优化规模	13	34	49	96	0.252	0.211	0.449	0.246	0.194	1.352

港口特征参数		平均等待时间/h					货物转运费(万元/d)				
		杂货船	散货船	集装箱船	油 船	客货船	总平均	码头建设费	锚地建设费	船舶待泊费	货物积压费
1996 年	实际规模	1.262	2.748	4.583	3.357	15.007	3.969	40.754	0.016	22.986	3.526
	优化规模	3.005	3.536	2.151	0.777	0.963	2.368	49.541	0.005	6.721	0.950
2010 年	实际规模	0.660	5.005	5.931	0.708	0.156	2.579	141.261	0.032	98.270	38.818
	优化规模	0.701	0.967	0.786	0.903	0.371	0.695	116.080	0.009	13.284	4.119

4.2 最优发展规模(2010 年)

《福建省沿海港口建设规划》草案 预测了厦门港的货物吞吐量 ,并对千吨级以上泊位的建设进行了规划 .按此规划 2010 年港口吞吐量为 5650 万 t ,货运码头泊位总数为 130 个 ,其中万吨级以上泊位 59 个 ,千吨级泊位 31 个 ,小船泊位 40 个 .计算分析发现 ,此规划方案不尽合理 ,比较突出的问题仍然是大船泊位少、小船泊位多 ,百吨级小船几乎不需要等待 ,而 4 万 t 以上大船的平均等待时间达 200 多 h ,这是船方无法接受的 .在货物转运费用中由于船舶等待而引起的费用与码头泊位建设费相当 ,显得非常不合理 .

按本文模型进行优化计算 ,结果亦列入表 1 .从表 1 可以看出 (a)节省了货物在港口的转运费 .优化规模与原规划规模相比 ,每天可节省货物转运费用约 140 万元 (b)港口的运营状况有了明显的改善 .港口规模优

化后,缩短了船舶的排队长度和排队时间,船舶的平均排队总长度和平均等待时间均减少 2.7 倍,平均等待时间小于 2 h 的船舶占 96.5%,大于 6 h 的船舶仅占 1.3%〔c〕提高了码头泊位利用率。初步规划方案中泊位类型分布不均匀,港口在运营过程中有的船舶等待时间过长,而有的码头泊位利用率又太低,港口规模的优化避免了这种不合理现象。港口规模小了,船舶的排队长度和排队时间反而有较大幅度的缩短,其根本原因就是充分发挥了港口每个泊位的作用,提高了泊位利用率。计算结果显示,优化后港口的各类码头的泊位利用率比较均匀,最高为 75.1%,最低为 26.3%,比初步规划规模时的 74.1%和 2.1%有了明显的改善,表明港口各类泊位的分布更趋合理。

5 结 语

a. 港口服务系统是交通运输系统的一个子系统,其建设规模不仅直接影响港口的经济效益和服务水平,而且影响到整个交通运输系统和区域经济的发展,合理的港口规模既可提高港口投资的经济效益,又可使得港口建设与交通运输系统相互协调配套,产生巨大的社会效益。

b. 以港口在完成货物转运任务的全过程中所发生的总费用最小为目标,建立了港口规模优化模型,在目标函数中考虑了码头、港池、装卸机械、防波堤、锚地的投资,船舶在港停泊费以及货物的时间价值等影响货物转运费用的主要因素,与以往研究成果相比,该模型考虑的因素更全面、求解更方便。

c. 根据港口规模优化问题的特点和模型中各参变量的物理意义及其相互关系,对模型进行了数学处理,导出了港口最优规模应满足的条件,从而可利用相对比较简单“爬山法”推求其最优解,并给出了具体计算方法。

d. 实证研究了厦门港的港口现状(1996年)和发展战略,指出厦门港当时最大的问题是大船泊位偏少、小船泊位偏多,将来的发展战略是:优先发展万吨级以上深水泊位,对有条件的小船泊位进行改造,提高靠泊能力。2010年厦门港合理的泊位总数为96个,其中万吨级以上泊位49个,千吨级泊位34个,小船泊位13个。该结果可作为厦门港建设与发展的决策依据。

参考文献:

- [1] 洪承礼. 港口规划与布置[M]. 第2版. 北京:人民交通出版社,1999. 49~57.
- [2] 赵智邦,江印庭. 用排队论推算港口最佳泊位数[J]. 水运工程,1982(2):8~15.
- [3] 鲁子爱. 排队论在港口规划中的应用[J]. 水运工程,1997(8):11~15.
- [4] 王宏达. 船舶在港停泊艘天费用之比较[J]. 水运工程,1991(6):9~12.
- [5] 鲁子爱,林民标. 港口服务系统的计算机仿真研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),1999,27(3):17~21.

Port scale optimization

LU Zi-ai

(College of Traffic and Ocean Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract: By means of the system analysis method, a model for port scale optimization is established, and the variables in the model are selected scientifically based on the influences of each cost-related factor on the freight cost in the transportation system. According to the characteristics of the model and the meaning of and relationship between the variables in the model, the restraint condition for port construction scale optimization is deduced, and a process is given for finding the optimal solutions by use of the simple “climb-hill” method. Compared with the former research, the factors considered in the present model are comprehensive, and the calculating method is convenient. As an example, it is pointed out that, in the development of the Xiamen Port, priority should be given to the development of deep berths of over 10 000 tons and reconstruction of small berths so as to improve the berthing ability of the port. In addition, the optimum construction scale of the port for 2010 is given. The results provide a basis for decision-making in construction and development of the Xiamen Port.

Key words: system; port scale; optimization; freightage