

# 基于分级恢复策略的班轮船期干扰恢复模型

庄慧敏, 钟铭, 邢江波

(大连海事大学交通运输工程学院, 辽宁 大连 116026)

**摘要:** 班轮运输容易受到许多破坏性因素干扰, 例如港口拥堵或恶劣天气, 将会导致到达港口的延误、操作成本的增加, 甚至声誉受损。为了给班轮公司提供实时的干扰管理决策工具, 研究了班轮运输船期恢复问题。首先, 针对船期恢复策略进行了分级, 提出了分级恢复策略。其次, 引入“服务包容度”的概念, 提出考虑服务包容度的船期干扰恢复模型。最后, 实例验证了模型的有效性。结果表明, 该案例可以在 5 秒内求出结果, 为决策者提供合理的实时决策支持。

**关键词:** 班轮运输; 船期恢复问题; 分级恢复策略; 服务包容度

**中图分类号:** U692.3      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1006—7973 (2020) 06—0071—04

准班率是评价班轮公司服务质量的一个重要指标。但在班轮运输中大约 70%—80% 的船舶往返航次至少在一个港口经历干扰, 产生延误<sup>[1]</sup>, 而延误会造成班轮公司准班率的下降。目前, 当干扰出现时, 班轮经营者依靠人工经验决定采取什么措施来恢复延误的船期, 缺乏科学的决策工具来帮助他们做出合理的决策。因此, 研究班轮运输干扰管理问题具有很大的价值, 而且在实际中决策的实时性也至关重要。对于已有的船期恢复策略, 有些策略偏离了原计划, 使船舶不再按照原计划挂靠港口, 造成一定的成本损失。在现实中, 班轮运输的干扰恢复应优先考虑对原计划偏离较小的策略。另外, 在现实生活中, 在准班率的统计上, 各相关方对班轮运输服务具有一定的包容度, 比如船舶在预计到港时间 (ETA) 之后的 24 小时 (可以称之为包容时间长度) 之内到达港口, 就算准班。所以当延误时间不超过包容时间长度时, 班轮公司

就没必要采取恢复措施; 而当延误时间超过包容时间长度时, 班轮公司只要采取措施使延误时间减少到包容时间长度内就行 (即没必要百分百的恢复船期), 这样可以在保证一定的服务水平下, 尽量减少班轮公司的操作成本。

文献方面, Brouer 等<sup>[1]</sup>提出船期恢复问题 (Vessel Schedule Recovery Problem, VSRP), 目标是选择合适的恢复措施来平衡船舶燃油成本、对货物在余下网络中的影响和顾客服务水平三者之间的权衡。Li C 等<sup>[2]</sup>考虑时间问题, 对于可预见的干扰的实时恢复问题研究了损失减少程度; 吴迪等<sup>[3]</sup>研究了集装箱班轮晚班到港规律, 并利用该规律对泊位计划进行优化, 从而减少船舶靠泊冲突概率; 董哲<sup>[4]</sup>从班轮公司和托运人两者的角度出发, 以船期恢复成本最小以及船舶实际到达时间与原计划偏离最小建立双目标模型, 研究集装箱班轮船期恢复问题。Saremi S 等<sup>[5]</sup>在前人研究的基础上, 考

表 2 2013—2017 年集装箱海铁联运量的标准差椭圆在随机椭圆中分布的概率

项目	中心经度	中心纬度	长半轴	短半轴	方向角
2017 集装箱海铁联运标准差椭圆	118.677	33.552	10.039	2.88	30.724
2017 集装箱海铁联运随机椭圆均值	117.726	30.432	10.295	2.925	25.225
2017 集装箱海铁联运随机椭圆最大值	120.012	35.089	14.991	5.362	173.22
2017 集装箱海铁联运随机椭圆最小值	114.64	25.535	5.823	1.113	1.189
标准差椭圆在随即椭圆中的分布频次	98	22	160	188	227
标准差椭圆在随即椭圆中的分布概率 %	1.96	0.44	3.2	3.76	4.54

大连港、天津港等港口集装箱海铁联运比例逐年升高, 环渤海港口群的集装箱多式联运量优势在不断扩大, 正引领港口集装箱海铁联运的发展。应加大上海、深圳等世界一流港口的海铁联运基础设施建设, 加快管理体制变革, 协调海铁联运各参与方的责任与利益, 同时铁路部分应合理划分运输半径, 利用市场化手段提升集装箱海铁联运比例。

参考文献:

- [1] 武慧荣, 朱晓宁, 钱继锋. 集装箱海铁联运系统分析及发展研究 [J]. 物流技术, 2013, 32(7):1-4.
- [2] 吴铁锋, 朱晓宁. 集装箱海铁联运发展的方案研究 [J]. 北京交通大学学报 (社会科学版), 2011, 10(2):27-32.
- [3] 王宏. 集装箱海铁联运最优路径算法设计与仿真 [D].

北京交通大学, 2017.

- [4] 贾鹏, 胡燕, 匡海波. 全国空港客货运格局的时空演化及驱动机制研究 [J]. 系统工程理论与实践, 2019, 39(5):1198-1211.
- [5] 赵璐, 赵作权. 中国沿海地区经济空间差异的动态演化 [J]. 世界地理研究, 2014, 23(1):45-54.
- [6] 赵璐, 赵作权, 王伟. 中国东部沿海地区经济空间格局变化 [J]. 经济地理, 2014, 34(2):14-18.
- [7] 赵媛, 杨足膺, 郝丽莎, 等. 中国石油资源流动源—汇系统空间格局特征 [J]. 地理学报, 2012, 67(4):455-466.
- [8] Wang B J. Theories and methods for soil grain orientation distribution in SEM by standard deviational ellipse [J]. Yantu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(7): 1082-1087.

虑了港口需求和 CO<sup>2</sup> 排放量对船期恢复决策的影响。

本文将船期恢复策略分为 A、B、C 三级，基于分级恢复策略引入服务包容度 (service tolerance) 的概念，在考虑服务包容度的情况下，建立班轮船期干扰恢复的数学模型，从而为班轮公司提供科学有效的实时干扰管理决策工具。

## 1 船期恢复策略分级分析

本节对 Notteboom<sup>[1]</sup> 提出的 5 项班轮船期恢复策略进行分析，这 5 种策略分别是：提高航速，提高港口装卸效率，交换港口挂靠顺序，取消货物装载，取消港口挂靠。根据 Yu 和 Qi<sup>[6]</sup> 提出的干扰管理思想，当出现干扰时，调整后的新计划尽量与原计划的偏离度最小，而以上 5 项船期恢复策略对原计划的偏离度见图 1 所示。

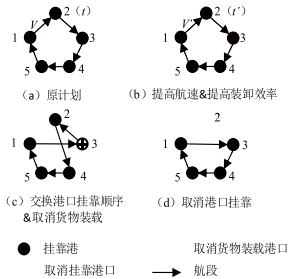


图 1 不同船期恢复策略对原计划的偏离度

从图 1 可以看出，对于提高航速和提高港口装卸效率策略，只有船舶速度以及船舶在港时间发生了变化，对原计划的偏离度最小；对于交换港口挂靠顺序策略，班轮服务网络中弧的结构发生了变化，而对于取消货物装载策略，船舶在完成货物卸载后就开航离开港口，等于只完成了在该港的一半服务任务，这两项恢复策略对原计划的偏离度次之；对于取消港口挂靠策略，连班轮服务网络中节点的数量都发生了变化（少了一个），对原计划的偏离度最大。根据不同恢复策略对原计划的偏离度大小，我们将上面的 5 项船期恢复策略分成了 A、B、C 三级（偏离度依次增大），当班轮运输出现干扰时，船期恢复策略实施优先权从 A 到 C 级依次降低。显然，提高航速和提高港口装卸效率属于 A 级别恢复策略，交换港口挂靠顺序和取消货物装载属于 B 级别恢复策略，而取消港口挂靠则属于 C 级别恢复策略。

本文只考虑 A 级船期恢复策略，即提高航速和提高港口装卸效率这两项恢复策略，也是现实生活中班轮公司最常用的恢复策略，使班轮公司优先考虑对原计划偏离度最小的恢复策略。

## 2 基于分级恢复策略的船期恢复问题

### 2.1 问题描述

假设班轮运输服务中因干扰发生延误的地方（海上或港口）标记为 0 点，时间用  $T_0$  表示，0 点后面的挂靠港集合用  $I=\{1, 2, \dots, N\}$  来定义，在第  $N$  个港口，设定船期完全得到恢复（即没有延误），第  $i$  个航段表示从第  $(i-1)$  个挂靠港到第  $i$  个挂靠港之间的航程（第 1 个航段是从 0 点到第 1 个挂靠

港之间的航程）。另外，本文用 ETB（预计靠泊时间）而不是 ETA 来衡量班轮服务的准时性，因为托运人 / 收货人更加关注的是集装箱实际装卸作业时间，而不论是船舶已经到达港口却必须等待靠泊，又或者是船舶迟到，对于托运人 / 收货人来说是没有区别的<sup>[7]</sup>。让  $T_i^{\text{ETB}}$  表示船舶在第  $i$  港预计靠泊时间， $t_i^{\text{n}}$  和  $t_i^{\text{out}}$  分别表示在第  $i$  港领航进港时间和领航出港时间，当港口可能发生拥堵时，可以将预计的拥堵时间加入到  $t_i^{\text{n}}$  或者  $t_i^{\text{out}}$  中；让  $t_i^{\text{p}}$  表示船舶在第  $i$  港原计划停留时间， $L_i$  表示第  $i$  航段的长度， $T_i^{\text{S}}$  表示船舶在第  $i$  航段开航的时间。

本文在设置船期延误惩罚成本函数时，引入服务包容度 (service tolerance) 的概念。设  $A_i$  表示在第  $i$  港船期延误完全包容时间长度，当延误时间  $t_i^{\text{d}}$  不超过  $A_i$  时，惩罚成本为 0；设  $\tilde{A}_i$  为在第  $i$  港船期延误最大包容时间长度，当  $t_i^{\text{d}}$  超过  $\tilde{A}_i$ （比如 1 周）时，惩罚成本为一个最大值  $C_i$ ；而当  $t_i^{\text{d}}$  介于  $A_i$  和  $\tilde{A}_i$  两者之间时，惩罚成本为一个线性函数。因此，考虑服务包容度的船期延误惩罚成本函数可以用下式来表达（示意图见图 2 所示）：

$$F_i = \begin{cases} 0, & t_i^{\text{d}} \leq A_i \\ C_i (\tilde{A}_i - A_i) \times (t_i^{\text{d}} - A_i) / (A_i - \tilde{A}_i), & A_i < t_i^{\text{d}} \leq \tilde{A}_i \\ C_i, & t_i^{\text{d}} > \tilde{A}_i \end{cases} \quad (1)$$

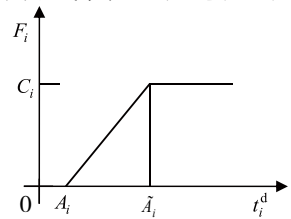


图 2 船期延误惩罚成本函数

为方便表达及简化模型，本文将第 1 节提到的提高港口装卸效率策略称为缩短在港时间策略，用  $\Delta t_i$  表示在第  $i$  港船舶在港时间的减少值， $v_i$  表示船舶在第  $i$  航段上的平均航速。考虑服务包容度的船期恢复问题 (ST-VSRP) 目标是通过确定  $v_i$  和  $\Delta t_i$  的值来平衡船期延误惩罚成本、燃油成本和缩短在港时间成本之间的权衡。

### 2.2 模型构建

让  $\alpha$  表示船舶燃油价格， $g_i(v_i)$  表示在第  $i$  航段航速  $v_i$  下船舶燃油消耗率 (ton/n mile)。由于船舶燃油每日消耗量与航速的三次方近似成正比<sup>[8]</sup>，所以我们可以写成  $g_i(v_i) = \mu(v_i)^2$ ，因为  $g_i(v_i)$  是使用吨 / 海里来表达的<sup>[7]</sup>。此外， $f_i$  让表示在第  $i$  港的缩短在港时间成本，我们假设缩短单位时间成本与缩短的时间呈线性方程关系，随着缩短的时间越多，缩短单位时间成本就越高，因此我们可以写成  $f_i = (\lambda \Delta t_i) \cdot \Delta t_i = \lambda \Delta t_i^2$ 。

考虑服务包容度的船期恢复问题可以用非线性规划 (NLP) 数学模型来表达，如下所示。

$$\min \sum_{i \in I} F_i + \alpha \sum_{i \in I} L_i g_i(v_i) + \sum_{i \in I} f_i \quad (2)$$

约束条件：

$$T_i^{\text{ETB}} = T_i^{\text{S}} + L_i / v_i + t_i^{\text{n}} - t_i^{\text{d}}, \forall i \in I \quad (3)$$

$$T_i^{\text{S}} = T_{i-1}^{\text{S}} + L_{i-1} / v_{i-1} + t_{i-1}^{\text{n}} + t_{i-1}^{\text{p}} - \Delta t_{i-1} + t_{i-1}^{\text{out}}, i = 2, \dots, N \quad (4)$$

$$T_1^{\text{S}} = T_0 \quad (5)$$

$$0 \leq \Delta t_i \leq \varepsilon_i t_i^{\text{p}}, \forall i \in I \quad (6)$$

$$V^{\min} \leq v_i \leq V^{\max}, \forall i \in I \quad (7)$$

$$t_N^d \leq 0 \quad (8)$$

$$t_i^d, \Delta t_i \in \mathbf{R}, \forall i \in I \quad (9)$$

目标函数(2)最小化船期延误惩罚成本、燃油成本和缩短在港时间成本。约束(3)表达了预计靠泊时间与实际靠泊时间的关系;约束(4)-(5)给出了船舶在每个航段上开航时间的表达式;约束(6)限制了在每个港口船舶能缩短在港时间的范围,其中 $\varepsilon_i$ 是最大能缩短时间系数;约束(7)限制了船舶航速的变化范围,其中 $V^{\min}$ 是最小限制航速, $V^{\max}$ 是最大限制航速;约束(8)为硬约束,规定了船期必须在第N个港口得到完全恢复(没有延误),这样与考虑服务包容度的软约束相结合,可以更好地保证班轮运输的可靠性;约束(9)为实数变量,负的 $t_i^d$ 表示船舶早到时间。

### 3 实例验证

#### 3.1 案例概述

船舶 COSCO COLOMBO 号服务于中远集装箱公司的 AWE2 航线,挂靠港依次为: Qingdao (QD, 400) - Shanghai (SH, 130) - Ningbo (NB, 1100) - Yokohama (YH, 7800) - Panama (PM, 1975) - New York (NY, 380) - Boston (BT, 559) - Norfolk (NF, 1785) - Panama (PM, 8800) - Qingdao (QD), 括号内分别是港口名称缩写和航段长度。关于各个挂靠港的参数数据见表1所示。此外,船舶最小、最大限制航速分别是 10、24.5kts;燃油价格为 560 USD/ton,  $\mu=0.0004, \lambda=125, \varepsilon_i=0.3, \forall i \in I, \hat{A}_i=168(\text{h}) \forall i \in I$ 。

表1 挂靠港参数(时间单位: h)

挂靠港	航段速度 (kt)	缩短在港时间(h)	延误时间(h)
SH	24.50	6.60	15.33
NB	20.72	4.20	7
YH	18.56	2.40	2.10
PM	18.56	4.80	8
NY	18.41	3.92	15
BT	12.98	3.92	-9.65
NF	12.98	3.90	-18.51
PM	12.98	3.92	-10.92
QD	12.98	0	0

历史上的某一天,由于大雾天气,该船舶从 QD 离开的时候,比船期表晚了 24 个小时,延误发生( $T_0=48$ ),决策者希望通过采取合理的恢复策略,使船期在返回 QD 时得到完全恢复。应用本文提出的数学模型对本案例船期恢复措施进行优化,计算结果见下一小节。

#### 3.2 计算结果

应用商业优化软件 LINGO 11.0,在 3.2GHz,双核处理器以及 2GB 内存配置的电脑上运行,该案例可以在 5 秒内获得全局最优解,考虑到船期恢复问题是操作层面的问题,此案例的求解时间是非常高效的。具体计算结果见表 2 所示。

表2 案例计算结果

挂靠港	完全包容时间长度	延误最大惩罚成本 (USD)	领航进港时间	领航出港时间	ETB	在港时间
QD			0	2	0	24.0
SH	12	500,000	1	1	50	22.0
NB	7	400,000	3	3	84	14.0

YH	3	300,000	2	2	163	8.0
PM	8	100,000	1	0.5	586	16.0
NY	15	950,000	3	3	701	26.0
BT	11	700,000	2	2	782	20.0
NF	7	600,000	3	3	855	13.0
PM	8	100,000	1	1	998	16.0
QD	12	500,000	2	2	1680	

从表 2 的结果可以看出,船舶在第一个航段是满速航行的,到达 SH 靠泊时,延误时间依然超出了完全包容时间长度(产生船期延误惩罚成本),而从第二个航段起,船舶航速逐渐降了下来,到达 NB 时,延误时间已经恢复到完全包容时间长度内(不产生船期延误惩罚成本),到达 YH、PM 和 NY 时,延误并没有被完全消除,甚至在 PM 和 NY 的延误时间还处于完全包容时间长度临界值,因为这样可以减少燃油成本,符合我们解决该问题的期望,证明了模型的有效性。需要说明的是,在 BT、NF、PM(第二个)这三个挂靠港,延误时间为负值,一是因为船期表中这几个挂靠港之间的航段加入了比较多的缓冲时间,二是因为模型规定了船舶到达最后一个挂靠港时,延误完全被消除。此外,优化方案在每个挂靠港都采取了缩短在港时间策略,这是由于缩短在港时间成本相对较低的缘故。其实,当船舶在 BT 靠泊时,延误时间首次变为负值,说明船期已经得到了完全恢复,船舶可以按照原计划继续航行。

### 4 结论

(1) 对 Notteboom 提出的 5 项班轮船期恢复策略进行了分析,并按照各项恢复策略对原计划的偏离度,将这 5 项策略分为了 A、B、C 三级。

(2) 基于分级恢复策略,引入服务包容度(service tolerance)的概念,针对考虑服务包容度的船期恢复问题,提出了一个非线性规划(NLP)数学模型,目标是 minimized 船期延误总成本、燃油成本和缩短在港时间成本。

(3) 利用一个来自中远集装箱公司的实例,验证了本文所提模型的有效性。计算结果显示,模型可以在高效的时间内获得全局最优解,能够为决策者提供合理的实时干扰管理决策支持。

#### 参考文献:

- [1] Brouer B D, Dirksen J, Pisinger D, et al. The Vessel Schedule Recovery Problem (VSRP) - A MIP model for handling disruptions in liner shipping [J]. European Journal of Operational Research, 2013, 224 (2): 362-374.
- [2] Li C, Qi X, Song D. Real-time schedule recovery in liner shipping service with regular uncertainties and disruption events[J]. Transportation Research Part B Methodological, 2016, 93: 762-788.
- [3] 吴迪, 王诺, 吴暖, 等. 集装箱班轮晚班到港规律及其应用研究 [J]. 大连海事大学学报, 2015, 41 (1): 77-82.
- [4] 董哲. 集装箱班轮船期干扰恢复双目标模型 [D]. 大连海事大学, 2018.



# 基于 DEA 评价模型的港口航道通航效率分析

柯桂强

(泉州海洋职业学院, 福建泉州 362700)

**摘要:** 基于数据包络分析方法 (DEA), 建立港口航道通航效率评价体系, 对某沿海港口的航道通航效率进行了评价分析, 结果表明: 当航道船舶总吨数达到 4030 万吨、航道空间占有率达到 0.035、航道利用率达到 87%、阻抗值为 0.175、阻塞率为 77.6%、船舶排队长度为 1.6 艘、平均等待时间为 5.93h 以及船舶平均航行时间间距为 2.2h 时, 该港口的航道通航效率达到最佳, 相关研究成果可为航道建设和船舶调度管理提供科学依据。

**关键词:** DEA 模型; 评价体系; 港口航道; 通航效率

**中图分类号:** U612      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1006—7973 (2020) 06—0074—03

加快推进港口建设、完善航道规划是我国由航运大国向航运强国迈进的重要过程, 也是响应“海上丝绸之路”的重要一环。随着吞吐量和船舶规模的快速增长, 航道成为制约港口发展的主要因素之一。与内河航道不同的是, 沿海港口的航道系统更加复杂, 影响其通航效率的因素也多种多样<sup>[1-3]</sup>, 开展沿海港口的通航效率分析研究, 不仅能科学地对沿海港口航道通航能力进行准确评估, 同时也可对航道建设和船舶调度管理提供科学依据<sup>[4-6]</sup>。

本文选取航道利用情况、航道拥堵情况以及航道安全与舒适度三个评价指标, 在 DEA 理论上建立沿海港口航道通航效率评价体系, 分析了通航效率与各因素之间的相互关系, 可为沿海港口航道建设与船舶调度提供借鉴。

## 1 港口概况

某规划沿海港口分为东部、中部和西部三个主体作业区, 其中东部主体作业区规划 43 个泊位 (50000t 级泊位 28 个, 30000t 级泊位 4 个, 5000t 级泊位 11 个), 包含客轮、游轮、汽车、钢铁、木材、石油化工等多个种类。主航道长度约为 27km, 支航道长度共计 16km, 设计通航宽度 180m, 航道设计底标高为 -14m。港口当地年平均气温 11.8℃, 年平均降雨量 708mm, 年平均雾日数 210d, 年平均雷雨天气为 29d, 7 级以上大风概率出现概率为 1.5%, 潮汐为不规则半日潮。

## 2 基于 DEA 的评价指标体系

### 2.1 DEA 方法介绍

数据包络分析法, 简称 DEA 法, 根据多项投入和产出指标, 利用线性规划的分析方法, 对具有可比性的同类问题进行有效性评价的一种量化分析法。该方法具有如下特点: ①在多输出-多输入等综合有效性问题评价方面具有较好的适应性, 较其它评价方法具有绝对的优势; ② DEA 模型分析时不需要对数据进行无量纲化处理; ③不需要像层次分析法、模糊综合评价分析法那样进行权重假设。DEA 评价法基本思路与效率的定义相吻合, 具有“非参数性、多指标性、客观性和相对性”, 且不需要设置生产函数, 能够达到对航道通航效率的客观评价, 故本文选择 DEA 方法进行评价分析。

### 2.2 体系建立

根据研究航道的相关特征, 确定对应的评价指标, 评价指标包括航道阻抗值、航道阻塞率、船舶排队长度、船舶等待时间、航道轴线风流偏角、通过航道的船舶总吨数、航道利用率、航道空间占有率以及船舶平均间距等 9 个指标, 其中前五项为成本型指标, 后四项为效益型指标, 根据各指标的特点, 再将其分为三个方面: ①航道拥堵情况方面, 包括航道阻抗值、航道阻塞率、船舶排队长度、船舶等待时间等四项指标; ②航道利用情况方面, 包括通过航道的船舶总吨数、航道利用率、航道空间占有率三项指标; ③航道安全与舒适

[5] Saremi S, Hosseini-Motlagh S M, Sadjadi S J. A reschedule design for disrupted liner ships considering ports demand and CO<sup>2</sup> emissions: the case study of Islamic Republic of Iran Shipping Lines [J]. International Journal of Industrial & Systems Engineering, 2016, 9 (1): 126-148.

[6] Yu G, Qi X, Disruption Management: Framework, Models and Applications[M]. Singapore: World Scientific Publishing Company, 2004.

[7] Fatemeh Cheraghchi, Ibrahim Abualhaol, Rafael Falcon, et al. Modeling the speed-based vessel schedule recovery

problem using evolutionary multiobjective optimization [J]. Information Sciences, 2018, 448: 53-74.

[8] Hamed Hashemini, Changmin Jiang. Strategic trade-off between vessel delay and schedule recovery: an empirical analysis of container liner shipping [J]. Maritime Policy & Management, 2017, 44 (4): 458-473.

[9] 邢江波, 钟铭, 王天旻. 考虑集装箱流恢复的班轮运输船期恢复模型 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2017, 17 (2): 183-188.