



## 考虑船公司满意度的泊位-岸桥计划干扰恢复

陆志勇, 刘玥华

(中交第三航务工程勘察设计有限公司, 上海 200032)

**摘要:** 干扰性事件在集装箱船舶靠泊作业时时有发生, 一些事件如抢班作业、天气突变等会扰乱原定的泊位-岸桥分配计划, 此时如何制定新计划以减少干扰性事件的影响显得尤为重要。以最小化船舶延误、码头作业成本和恢复计划偏离程度为目标, 构建两阶段的混合整数规划模型, 使用大规模领域搜索 (ALNS) 启发式算法求解, 并通过算例分析验证模型的可靠性。结果表明, 设计的泊位-岸桥干扰恢复模型能够有效地对泊位-岸桥计划进行干扰恢复, ALNS 算法可提供满意解, 且能够对集装箱码头实际运作提供指导。

**关键词:** 泊位-岸桥计划; 干扰恢复; 自适应大领域搜索; 反馈调整; 船公司满意度

中图分类号: U656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)03-0237-06

### Interference recovery of berth and quay crane plan considering satisfaction of shipping company

LU Zhiyong, LIU Yuehua

(CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

**Abstract:** Disruptive incidents often occur in the berthing operation of container ships. These incidents such as rush operations and sudden weather changes will disrupt the original berth and quay crane allocation plan. How to make a new plan at this time to reduce the impact of disruptive events is particularly important. In this paper, with the goal of minimizing ship delays, terminal operating costs, and the degree of deviation from the recovery plan, a two-stage mixed integer programming model is constructed, and the large-scale domain search (ALNS) heuristic algorithm is used to solve the problem. The reliability of the model is verified by analysis of examples. The results show that the designed berth and quay crane interference recovery model can effectively restore the berth and quay crane plan interference. ALNS algorithm can provide satisfactory solutions and provide certain guidance for the actual operation of container terminals.

**Keywords:** berth and quay crane plan; interference recovery; adaptive large-scale search; feedback adjustment; satisfaction of shipping company

码头遵循预先安排的泊位-岸桥计划。轻微干扰时, 可通过调整资源恢复作业, 不改变船舶停靠位置或作业顺序; 而面对显著干扰, 仅调整资源可能难以应对或成本过高, 需调整后续船舶的服务计划, 因而涉及码头与船公司间的利益平衡。

通过合理规划提高码头作业效率和资源利用

率的相关研究包括: Park et al.<sup>[1]</sup>考虑泊位位置、时间和岸桥分配; Imai et al.<sup>[2]</sup>探讨岸桥调度路径; 乐美龙等<sup>[3]</sup>通过 Memetic 算法和 Gurobi 软件求解大规模实例, 优化模型和算法, 制定可行方案, 在方案实施过程中应对干扰事件的影响。王泽<sup>[4]</sup>以所有船舶的总在港时间最短为目标建立泊位与

收稿日期: 2024-09-27

作者简介: 陆志勇 (1985—), 男, 高级工程师, 从事港口工程自动化、智能化系统设计、研发、集成工作。

拖轮集成再调度优化模型；闫寒<sup>[5]</sup>提出将集装箱的任务量纳入干扰恢复决策考量的优化方法；王婧贇<sup>[6]</sup>建立船舶交通组织双层优化模型和基于干扰管理策略的两阶段行生成算法。

## 1 问题描述

船舶装卸时间是衡量集装箱港口竞争力的关键因素之一。在规划阶段，装卸时间受到泊位分配、岸桥分配、岸桥调度和堆场计划等多个作业阶段的影响。船舶装卸时间可通过各泊位的岸桥数量及其工作时间来量化，通常以小时为单位。相比于直接使用船舶装卸时间，采用岸桥资源时(QC-hours)作为衡量标准更能精确反映岸桥的能力，有助于对岸桥资源进行描述和规划。

对于集装箱港口而言，干扰管理指在船舶实际到港/离港时间、资源需求与预期出现偏差时，如何以最小成本调整原有的泊位-岸桥计划，以保证作业顺利进行，同时满足船公司和码头的需求。

### 1.1 船公司满意度指标定义

船公司满意度评价指标体系构建：以船公司视角确定指标权重，通过量化船公司对各项指标的重视程度(重要度)计算权重，公式为：

$$Q_i = \frac{A_i}{\sum B_i} \quad (1)$$

式中： $Q_i$ 为第*i*个指标的权重； $A_i$ 是第*i*个指标的重要程度均值； $\sum B_i$ 为所有指标重要程度均值的总和。结合行业专家意见和实践经验对权重进行二次修正，最终构建满意度评价指标体系。

### 1.2 假设前提

针对研究问题的模型，刘娇<sup>[7]</sup>提出较为微观的假设前提，以具体某个集装箱作业干扰的恢复起点为切入点进行假设和建模。吕宵欢<sup>[8]</sup>则基于宏观层面的假设，以岸桥台时量固定为前提构造模型。

本文结合上述2种思想，采用连续泊位分配法，并将其离散化为等量小间距，目标为优化每艘船的泊位分配、作业时间(岸桥小时数)和岸桥数量。

假设：1) 泊位水深足够；2) 船舶作业过程

连续进行，除非发生突发事件；3) 船舶有最小和最大岸桥数量限制；4) 船舶均有最佳停泊位置，在此位置停泊时内部运输成本最低。

## 2 模型构建

### 2.1 参数定义

定义以下参数： $N$ 为船舶的数量； $d_i$ 为没有惩罚成本的*i*船的最迟完工时间； $b_i$ 为*i*船的最佳停泊位置，在此泊位，堆场拖车有最小的搬运成本； $q$ 为*i*船在*t*时刻分配的岸桥数量； $q_{i,\min}$ 为允许同时服务*i*船需要的最小岸桥数； $q_{i,\max}$ 为允许同时为*i*船提供服务的最大岸桥数； $c_{1,i}$ 为*i*船因偏离期望位置，每单位距离产生的运送集装箱的额外费用； $c_{3,i}$ 为*i*船因出发延误超过规定的到期时间导致的每单位时间的惩罚费用； $c_3$ 表示岸桥的运行成本率，元/QC-hour； $x_i$ 为*i*船到达的停泊位置； $e_i$ 为*i*船的装卸结束时间； $r_{i,t} = 1$ 表示至少有1台岸桥在*t*时刻被指派给*i*船，反之为0； $r_{i,t,q} = 1$ 表示*i*船于*t*时刻被指派*q*台岸桥，反之为0。

### 2.2 目标函数和约束条件

董哲<sup>[9]</sup>在设计目标函数时，定义了船期恢复成本模型，并以恢复成本与变动幅度最小化为目标进行建模。在该设计思想的基础上，由于调整泊位计划时需要同时考虑集装箱码头运营方及船公司的诉求与利益的约束，本文以最小化码头作业成本及恢复计划偏离度为目标构建模型。

首先建立第一阶段的初始泊位-岸桥分配模型，以确定每艘船的停泊时间和位置及分配给每艘船的岸桥数量。第一阶段的目标是最小化计划期内所有船舶的服务成本，包括因停泊位置偏差产生的额外费用、船舶延误离港的惩罚费用、以及岸桥的运行成本。服务成本最小值为：

$$\text{Min} \sum_{i=1}^N \left\{ c_{1,i} |x_i - b_i| + c_{2,i} (e_i - d_i)^+ + c_3 \sum_{t \in T} \sum_{q \in R_i} q \times r_{i,t,q} \right\}。$$

第二阶段为泊位-岸桥干扰恢复模型, 即搜索船舶停泊位置与时间的调整方案。其中干扰管理问题被表述为一个双准则问题。第 1 个准则是原始目标函数, 第 2 个准则是与原始计划偏差的度量。偏差量最小值为:  $\text{Min}\left\{\sum_{i=1}^N c_{1,i} |x'_i - b_i| + c_{2,i} (e'_i - e_i)^+\right\}$ 。

上述干扰恢复模型的目标是找到一个新的调度方案, 该方案不仅在原有目标上较优, 且与原调度方案的偏差最小。

### 3 算法设计

#### 3.1 ALNS 算法

自适应大邻域搜索(adaptive large neighborhood search, ALNS)算法是一种高效的元启发式算法, 它通过动态选择破坏和修复策略探索解空间。

#### 3.2 求解算法设计

##### 3.2.1 初始解生成

初始解贪婪生成。船舶分配根据服务成本升序排序。按此顺序, 将船舶的分配以可行的方式逐一放入解决方案中。

##### 3.2.2 破坏算子

1) 成本-时间相关性破坏。根据偏差量降序排列候选解决方案的分配, 然后选择偏差量最高的分配  $i$  并将其放入销毁列表中。接着, 搜索与选定分配  $i$  有时间相关性的分配。

2) 随机破坏。随机选择一项分配并放入销毁列表。

##### 3.2.3 修复算子

1) 基本贪婪修复。假定将要插入的船舶具有  $\{r_k^{\min}, r_k^{\max}\} = \{3, 5\}$  的岸桥能力约束。假设所考虑的分配与局部解决方案中的任何分配都不重叠。对于分配的停靠时期, 表 1 显示了可用的岸桥数量。

**表 1 可用岸桥数量**  
**Tab. 1 Number of available quay cranes**

时期	1	2	3	4	5
可用岸桥数/个	5	3	5	5	4

所考虑的分配有一个值为 3 (18/5 取整) 的  $q$ , 将用于 2 个时期, 并且  $q+1=4$  的岸桥将用于 3 个时期 ( $3 \times 2 + 4 \times 3 = 18$ )。从指定 4 个岸桥的第 1 个时期开始制定岸桥计划。下一时期只有 3 个可用的岸桥, 因此将 3 个岸桥分配给时期 2, 依此类推。产生的详细岸桥计划见表 2。

**表 2 岸桥计划示例 1**  
**Tab. 2 Example 1 of quay crane plan**

时期	1	2	3	4	5
分配岸桥数/个	4	3	4	4	3

2) 智能贪婪修复。智能贪婪修复在基础贪婪的基础上考虑每一阶段的可用岸桥数量智能地给出多种方案, 如表 3 所示, 通过 5 次迭代, 岸桥计划产生多种方案。

**表 3 岸桥计划示例 2**  
**Tab. 3 Example 2 of quay crane plan**

迭代数/次	时期	QC-hours/ (个·h)	目标岸桥数/个	可用岸桥数/个	分配岸桥数/个
1	3	18	4	2	2
2	4	16	4	3	3
3	5	13	5	4	4
4	2	9	5	6	5
5	1	4	4	6	4

#### 3.3 基于岸桥资源时的泊位-岸桥干扰恢复计划反馈调整

基于建模与求解, 可得到干扰恢复计划的最佳方案, 恢复流程逻辑如图 1 所示。在遭遇干扰时, 该模型将被调用以减少干扰影响, 并通过 QC-hours 偏离度与规定阈值的比较作为是否达到调优目标的判断标准, 但这一过程未考虑 QC-hours 随干扰变化及其后续影响这一重要因素。干扰发生时, 原计划中的岸桥能力需求会因多种因素变化而变化, 这可能导致按原定的 QC-hours 需求量调整的方案变得不可行。船舶装卸时间可通过各泊位的岸桥数量和每艘船的 QC-hours 计算得出<sup>[10]</sup>。

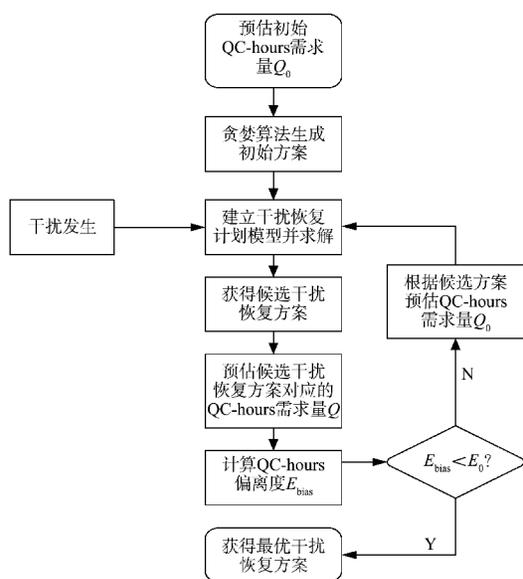


图 1 恢复流程逻辑

Fig. 1 Recovery process logic

4 算法分析

以盐田港集装箱码头为例，选取长 900 m 泊位 4 d 的岸线数据用于分析。设定停泊安全距离为 20 m，以 10 m 为 1 个单位长度，则整个泊位长度为 90 个单位。港口配置 8 台岸桥，每艘船可分配 1~3 台岸桥，见表 4。

表 4 船舶信息统计

Tab. 4 Ship information statistics

船舶序号	到港时间/h	计划离港时间/h	期望停泊位置/m	作业箱量/TEU	岸桥数量分配
1	4	10	26	1 000	1~3
2	7	17	6	760	1~3
3	8	23	49	800	1~3
4	16	32	2	880	1~3
5	18	36	52	1 200	1~3
6	37	50	3	920	1~3
7	17	34	32	880	1~3
8	28	46	10	800	1~3
9	30	42	42	800	1~3
10	41	60	43	720	1~3
11	32	62	13	880	1~3

采取贪心算法，以最小化总成本为目标，求解泊位-岸桥分配计划模型，获取船舶的停泊位置、作业时期以及作业时期内分配的岸桥数，如表 5 所示。

表 5 初始泊位-岸桥计划

Tab. 5 Initial plan of berth and quay crane

船舶序号	作业时间/h	停泊位置/m	分配岸桥数量/个
1	4~13	26~47	3,3,3,3,3,3,2,2
2	7~14	6~23	3,3,3,3,3,2,2
3	8~15	49~73	2,3,3,3,3,3,3
4	16~22	2~27	3,3,3,3,3,3,2,2
5	18~28	52~78	3,3,3,3,3,3,3,3,3,3
6	37~45	3~22	3,3,3,3,3,3,3,2
7	17~25	32~48	3,3,2,2,3,3,3,3
8	28~35	10~36	3,3,3,2,2,3,3,3
9	30~82	42~67	3,3,3,3,3,2,2
10	41~47	43~70	3,3,3,3,2,2
11	47~55	13~46	3,3,3,2,2,3,3,3

初始泊位-岸桥计划甘特图见图 2。初始泊位-岸桥计划的船舶靠泊无等待时间，可泊于期望停泊点。

00:00:00 起岸桥运行出现问题，需 8 h 恢复。船舶 4、5 分别晚到 10、8 h，要求在 8 和 10 h 内完成装卸。泊位 10~20 和 50~70 的设备分别于 16:00:00 和 20:00:00 进行维护，期间不提供服务。

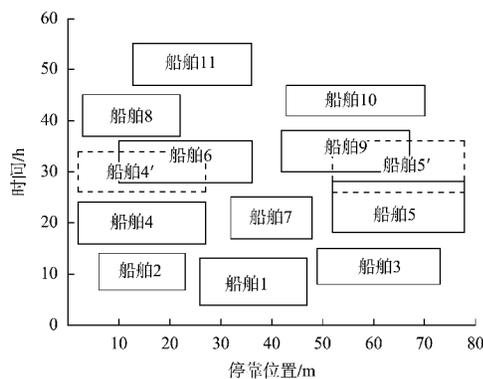


图 2 初始泊位-岸桥计划甘特图

Fig. 2 Gantt chart of initial berth and quay crane plan

干扰事件导致图 2 显示的初始泊位计划中部分船舶作业重叠，船舶 9 无法按时进入原定泊位。因此，需要调整初始计划以应对干扰。受影响的船舶包括 1~11。设定程序最大运行时间为 30 min，每个邻域的最大搜索时间为 3 min。

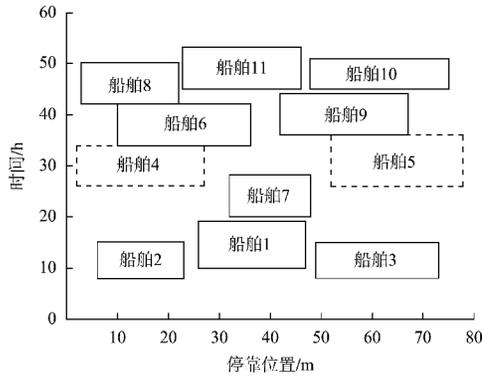


图3 调整后泊位-岸桥计划甘特图

Fig. 3 Gantt chart of adjusted berth and quay crane plan

程序运行过程中, 解决方案逐步优化。约 336 s 后得到满意解, 成本为 37.338 9 万元, 之后未出现更优解。调整后泊位-岸桥计划甘特图见图 3, 作业时间及停泊位置见表 6。

表6 调整后泊位-岸桥计划

Tab. 6 Adjusted berth and quay crane plan

船舶序号	作业时间/h	停泊位置/m	分配岸桥数量
1	10~15	26~47	5,5,5,5,5
2	8~15	6~23	3,3,3,3,3,2,2
3	8~15	49~73	2,3,3,3,3,3,3
4	26~32	2~27	4,4,4,4,4,2
5	26~36	52~78	3,3,3,3,3,3,3,3,3,3
6	42~50	3~22	3,3,3,3,3,3,3,2
7	20~28	32~48	3,3,2,2,3,3,3,3
8	41~45	10~36	5,5,5,5
9	36~43	42~67	3,3,3,3,3,2,2
10	41~47	48~75	3,3,3,3,2,2
11	44~52	23~46	3,3,3,2,2,3,3,3

图3和表6显示, 恢复模型在本实例中表现出色, 所得方案确保所有船舶均能按时完成作业离开港口。干扰恢复模型可行解的资源偏离度及总成本统计见图4。

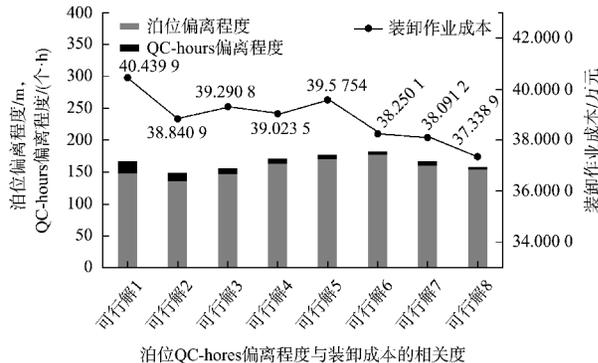


图4 干扰恢复模型可行解的各资源偏离度及总成本

Fig. 4 Deviation degree and total cost of various resources for feasible solutions of interference recovery model

由上述分析可知, 采用 ALNS 算法对泊位-岸桥计划进行干扰恢复是可行且高效的。调整后所得方案为满意解, 能够使得目标岸线的靠泊作业计划以较小的调整程度恢复正常运行。

将 ALNS 求解算法和韩子龙论文中的自然语言约束 (natural constraint language, NCL) 求解方法分别求解 8 次本算例, 得到成本和求解时间的平均值, 见表 7。由表可知, 本算法在成本控制和求解速度上均优于 NCL 方法, 可见 ALNS 算法可以有效解决多目标的泊位-岸桥干扰恢复问题, 降低码头运营成本, 提高客户满意度。

表7 2种算法性能对比

Tab. 7 Performance comparison of two algorithms

算法	成本/万元	求解时间/s
NCL	31.551 9	336.92
ALNS	30.656 7	245.67

### 5 结语

1) 总结了码头干扰管理的主要影响因素, 提出以最小化船舶延误与最低作业恢复偏离程度为主要指标的优化思想。

2) 提出两阶段混合整数规划模型, 尝试最小化航次延迟时间与作业计划偏离度, 并采用 ALNS 算法求解的方案。

3) 在盐田港的实际运用表明, 该方案可有效处理船舶作业干扰管理问题。

### 参考文献:

[1] PARK Y M, KIM K H. Container terminals and automated transport systems [M]. Berlin Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005: 159-181.

[2] IMAI A, CHEN H C, NISHIMURA E, et al. The simultaneous berth and quay crane allocation problem[J]. Transportation research (part E: logistics and transportation review), 2008, 44(5): 900-920.

[3] 乐美龙, 刘菲. 基于 Memetic 算法的泊位和岸桥分配问题[J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(11): 66-71.

LE M L, LIU F. Integrated berth allocation and quay crane scheduling by Memetic algorithms [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2011, 33(11): 66-71.

[4] 王泽. 不确定事件影响下泊位与拖轮集成再调度优

化[D]. 大连: 大连海事大学, 2023.

WANG Z. Integrated rescheduling optimization of berth and tugboats under the influence of uncertain events[D].

Dalian: Dalian Maritime University, 2023.

[5] 闫寒. 考虑集装箱的班轮运输干扰恢复决策优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2022.

YAN H. Study on optimization of liner disruption recovery decision considering container [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2022.

[6] 王婧贇. 基于干扰管理的散货港口船舶交通组织与装船设备协调优化[D]. 大连: 大连海事大学, 2022.

WANG J Y. Study on coordination and optimization of vessel traffic organization and shipping equipment in bulk cargo ports based on interference management[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2022.

[7] 刘娇. 基于多目标优化的班轮集装箱流干扰恢复研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2020.

LIU J. Research on disruption recovery of liner shipping container flow based on multi-objective optimization[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2020.

[8] 吕宵欢. 考虑中转的集装箱码头泊位和岸桥分配干扰恢复研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2020.

LYU X H. Recovery berth allocation and quay crane assignment considering transshipment in container terminals [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2020.

[9] 董哲. 集装箱班轮船期干扰恢复双目标模型[D]. 大连: 大连海事大学, 2018.

DONG Z. Bi-objective disruption recovery model for vessel schedule liner shipping [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2018.

[10] MEISEL F, BIERWIRTH C. Heuristics for the integration of crane productivity in the berth allocation problem[J]. Transportation Research(part E: logistics and transportation review), 45(1): 196-209. (本文编辑 王传瑜)

..... (上接第 204 页)

[9] 石娟, 钟光远. 一种基于海上风电工程的数字化交付实施方法[J]. 中国科技信息, 2024(11): 59-62.

SHI J, ZHONG G Y. A digital delivery implementation method based on offshore wind power engineering [J]. China science and technology information, 2024 (11): 59-62.

[10] 李家华, 杨彪, 许鸿贵, 等. BIM 技术在自动化集装箱码头设计中的应用[J]. 水运工程, 2022(10): 217-222.

LI J H, YANG B, XU H G, et al. Application of BIM

technology in design of automated container terminal project[J]. Port & waterway engineering, 2022(10): 217-222.

[11] 卢皓, 林明辉, 程文韬. 基于 BIM 技术的数字化管理平台设计与实现 [J]. 建筑经济, 2024, 45 (S1): 467-471.

LU H, LIN M H, CHENG W T. Design and implementation of digital management platform based on BIM technology[J]. Construction economy, 2024, 45 (S1): 467-471. (本文编辑 王璉)

..... (上接第 227 页)

[7] 向卫国, 王富章, 赵鲁东, 等. 桩基工程 BIM 智能化建模及数据提取方法[J]. 铁道建筑, 2020, 60(3): 77-81.

XIANG W G, WANG F Z, ZHAO L D, et al. BIM intelligent modeling and data extraction method for pile foundation engineering [J]. Railway engineering, 2020, 60(3): 77-81.

[8] 饶嘉谊, 杨远丰. 基于 BIM 的三维地质模型与桩长校核应用[J]. 土木工程信息技术, 2017, 9(3): 38-42.

RAO J Y, YANG Y F. BIM-based application of 3D geological model and pile length checking[J]. Journal of information technology in civil engineering and architecture, 2017, 9(3): 38-42.

[9] 李晓东, 吴海, 张宇航, 等. 基于 BIM 技术的桩长预控

制方法的研究与应用 [J]. 智能建筑与智慧城市, 2023(8): 85-88.

LI X D, WU H, ZHANG Y H, et al. Research and application of pre-control method of pile foundation length based on BIM technology[J]. Intelligent building & smart city, 2023(8): 85-88.

[10] 梁孟孟, 钱光耀, 建阳阳, 等. BIM 参数化地质模型在桩基工程中的应用 [J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(17): 12-15.

LIANG M M, QIAN G Y, JIAN Y Y, et al. Application of BIM parametric geological model in pile foundation construction [J]. Construction technology (Chinese and English), 2023, 52(17): 12-15.

(本文编辑 王传瑜)