# 考虑平板车承重能力的船舶分段运输调度方法

李柏鹤1,2,蒋祖华1,2，陶宁蓉3，孟令通1,2

（1．高新船舶与深海开发装备协同创新中心，上海，200240；2 .上海交通大学 机械与动力工程学院，上海200240；3．上海海洋大学 工程学院，上海 201306）

**摘要**：针对船厂运输任务分段的平板车缺乏有效调度现状，以多种类型平板车和任务分段的承重约束，任务时间窗约束作为约束条件。并考虑实际运输时单个分段重量超出现有平板车最大承重能力的情况，采用多个平板车协同运输解决。建立以平板车完成任务的空载行驶时间和平板车的等待时间权重和作为优化目标的模型。设计禁忌搜索算法对模型的求解。最后以某船厂实际数据为例，对模型的应用进行实例验证，结果表明，文中方法可以求解较优的调度方案，可以解决大型分段的运输，实现资源的高效利用。

关键词：堆场间调度；多类型平板车；多车协同运输；时间窗约束；禁忌搜索算法

船舶制造是典型的拉式生产方式，船体建造工艺流程以中间产品“分段”作为组织生产的基本作业单元**[1]**，分段在船坞之外的作业场或堆场进行组立装配、预舾装、涂装和舾装等建造工艺，最后到船坞进行总组搭载。船体分段重量较大，一般为200-300ｔ，个别可达500t。因此，分段在作业场地和堆场之间运输主要依靠重型平板车，对于单个分段的重量超出现有平板车的最大承重能力时（该分段称作大型分段），采用多个平板车一起运输大型分段。实际中，某大型船厂每天要完成约300个分段的运输。如何对船厂有限的运输资源进行充分利用、如何运输超重分段，提高平板车利用率、保证任务准时进行的情况下，降低无效作业时间，减少浪费，是十分重要的。

国内外船舶分段运输问题的研究相对较少。Joo**[2]**等以拖期时间和延迟时间的权重和为目标函数，设计了GA和SEA两种算法对问题进行求解。C Wang**[3]**等人以船舶分段运输过程中以平板车空驶时间，延误时间和迟到时间的总和为目标函数，提出一种基于贪心的启发式算法对问题进行求解。Mojtaba Salehi**[4]**等人认为运输在温室气体排放中占很大比例，文中提出一个双目标混合整数非线性规划，目标函数为总运输成本和总碳排放量，并提出一种Constructive heuristic算法求解问题。Zhi-Hua Hu**[5]**等人考虑了多个单类型平板车运输一个大型分段，即多车一货。建立了以最小化完工时间为优化目标的数学模型，为了提高求解方法的计算性能，用贪婪插入算法和遗传算法生成初始解，设计了顺序插入法求解模型。国内方面，张志英**[6]**等构建了考虑堆场信息、分段进出场次序等因素的最短路模型并对其进行优化，以最小化临时分段移动量和平板车在堆场中的行驶距离为优化目标，确定分段在堆场中的最优停放位置和进出场路。王冲**[7]**等为解决船厂平板运输车搬运船舶分段的日程计划问题，建立了利用最少数量的平板运输 车完成分段搬运作业，以及所有分段搬运作业完成时间最小化的两阶段优化模型，提出了基于遗传算法的2种编码方法以实现模型求解。但是，上述研究均没有考虑多种平板车车型下的多车协同运输，而本研究的目的是解决大型分段的运输难点，采用多个平板车协同运输，并且平板车有多种承重能力，同时保证生产的准时性，引入任务时间窗紧约束作为约束条件。

## １问题描述

研究的问题可做以下描述：有n个待执行的运输任务和t个运输平板车，每个运输任务包括：任务编号、分段编号、分段重量、运输起点、运输终点、运输时间窗（任务最早可执行时间，任务最晚执行的时间）。每个运输平板车包括：平板车编号、平板车承重能力。每个任务必须由满足其分段承重需求的平板车在时间窗范围内开始从运输起点运送至运输终点。其中，对于大型分段，一个平板车由于承重限制无法运输，此时就要多个平板车协同运输。图1是某船厂的道路路口情况、堆场位置以及平板车停放位置。假设平板车T1任务序列是任务A和任务B，任务A：将目标分段从平直中心运输到涂装平台；任务B：将目标分段从9号平台运输至曲面车间。那么平板车的实际执行流程是，从平板车停放位置出发，行驶至平直中心，提取分段，负载行驶至涂装平台，放下分段。然后空驶运行至9号平台，提取分段，负载行驶至曲面车间，然后空驶至平板车停放位置，结束运输。



图 1道路及堆场布局图

图2说明了对于大型任务来说，两个平板车协同运输的工作原理。以平板车TP1和TP2为例。平板车TP1从车场出发，空驶至S1堆场，装载分段B1，负载行驶至S3堆场，卸下分段，然后空驶至S5,因为分段B3是超重分段，需要TP1,TP2一起运输，所以等TP1,TP2均到达S5时，开始运输分段B3至S6。因此，对于协同运输大型分段的平板车，如果一辆早到，一辆晚到，将会导致早到的平板车等待，这在生产过程中是极度浪费的。



图 2 平板车协同运输示意图

考虑到堆场实际情况以及便于堆场调度问题的研究，假设：（1）平板车运输分段的过程一旦开始执行，不可被其他任务打断。（2）平板车在同一时刻最多只能运输一个分段。（3）不考虑道路因素（道路上是否有平板车，道路宽度，道路上可以通行多少平板车）对平板车通行的影响。本文要解决的问题：（1）运输任务的最优序列。（2）运输任务对应哪些平板车执行。（3）各个任务的开始执行时间和完成时间。

## ２ 堆场间运输调度模型

### 2.1 定义变量

为运输任务编号,。

为第个任务的实际开始执行时间。

为完成第个任务所需要的时间。

为第i个任务的时间窗始点，即任务可以开始执行的时间点。

为第i个任务的时间窗终点，即任务必须开始执行的时间截点。

为平板车编号,。

为第辆平板车承重能力。

为第i个任务分段的重量。

为第i个任务是否是超重任务，即一个平板车无法运输，为1表示是;为0表示不是。

为执行完第i个任务后，空驶到第j个任务的起点所消耗的时间,。0 或者表示车场位置。

表示平板车执行所有任务的空载行驶时间权重。

表示平板车执行所有任务的等待时间权重。

表示无穷大的正数。

E表示车场开放时间，即平板车最早可出发时间。

L表示车场关闭时间，即平板车最晚回归时间。

表示的决策变量,；

表示平板车执行任务顺序的决策变量，。

表示平板车执行其第一个任务的决策变量。

表示平板车执行其最后一个任务的决策变量。

### 2.2 目标函数

本章建立堆场间运输调度模型，优化平板车完成所有任务的空载行驶时间和平板车等待时间权重和。

1. 平板车完成所有任务的任务间空驶时间。
2. 平板车从车场出发空驶到其第一个任务起点的时间，以及平板车执行完任务空驶返回车场时间。
3. 平板车由于早到或者由于协同运输而产生的的等待时间。

目标函数以上述三者的权重和作为优化目标，使其最小化。

### 2.3 约束条件

1. 非大型分段由一个且只由一个平板车运输，大型分段由两个平板车运输。

1. 每个平板车上第一个任务只有一个。
2. 每个平板车上最后一个任务只有一个。
3. 平板车上执行的相邻两个任务之间时间存在约束。
4. 任务时间窗约束。
5. 车场时间窗约束。
6. 平板车承重能力与任务分段重量约束。
7. 对于大型分段任务来说，执行任务的平板车必须都到任务始点地，任务才能开始执行。
8. (10) (11) 保证任务在解的可行性。

## 3 模型求解

船舶分段运输调度模型为混合整数线性规划问题，对于小规模问题，可以采用商业求解器，如Cplex求出最优解，但在实际规模问题中，当需要搬运的分段数量较大时，采用现有求解器很难在有限的时间内求出最优解。为此，从实际应用角度出发，本文设计禁忌搜索算法在分钟级别的时间内高效求解模型，具有实际应用价值。

### 3.1 禁忌搜索算法

禁忌搜索算法在组合优化问题中具有较好的效果，广泛应用于TSP，VRP等。禁忌搜索算法依靠禁忌表的存在，可能在搜索中跳出局部最优，同时不同的构造邻域的方法也增加了邻域空间的多样性，具有很好的求解效果。本文设计禁忌搜索算法求解文中的模型**。**

#### 3.1.1 解的编码方式

模型解的编码方式：三个一维数组串行，表示平板车运输的分段及运输顺序。如图3(a)中，第一行表示任务编号，第二行表示任务被执行的平板车编号，第三行同第二行，若第二行和第三行的平板车编号相同，则表示该任务是由一个平板车执行；若第二行和第三行平板车编号不相同，则表示该调度任务由两个平板车协同运输。解码后的运输方案如图3(b)，即平板车1执行任务3，6，1，2；平板车2执行任务4，6，5；平板车3执行任务9，7，10，8，其中任务6为大型任务，由平板车1和平板车2协同运输。同理，如果考虑三个平板车协同运输，则用四个一维数组串行，表示平板车运输的分段及运输顺序。



1. **解的编码方式**



1. **解码图**

图 3 解码图

#### 3.1.2 构造初始种群

采用随机构造初始种群的方式，先随机生成任务序列，再根据承重约束为每个任务分配平板车，对于大型任务则随机产生两个符合其承重约束的平板车。由于模型中存在时间窗约束，很可能构造的个体是不可行的，但对于不可行解，在计算适应度时会给予惩罚，因此在迭代中，不可行解会逐渐被取代。

#### 3.1.3 个体适应度评估

个体代表模型的解，个体适应度函数就是模型需要优化的目标函数，对于文中的模型适应度越低，个体越好。个体解码后，可以得到每个车的运输方案，可以计算平板车从车场出发，执行第一个任务的空载行驶时间，以及执行后续任务的空载行驶时间以及执行完所有任务后回到车场的空载行驶时间。在计算平板车等待时间时，首先需要注意大型任务的开始时间为执行大型任务的所有平板车均到达其起始点才可以开始执行，如图4所示。第一辆平板车上任务6执行时间要后移，因为第二辆平板车还未到。其次，需要调整每个任务的开始执行时间，以最小化等待时间，由于任务6是大型任务，任务6的开始时间被延后，导致平板车在执行完任务3后存在一段等待时间，此时需要对任务6之前的任务开始执行时间进行调整，如图4中将任务3的开始时间延后，此时等待时间就消除了，第三辆平板车同理，需要调整部分任务的开始执行时间，这样可以减少平板车的等待时间。在算法求解过程中可以出现不可行解，但是一定要对其适应度加上一定的惩罚，且根据不可行解的出现情况，动态改变惩罚的系数。



图 4 超重任务时间更新

#### 3.1.4 邻域结构

如何从当前解出发，构造高效的邻域解是禁忌搜索的核心所在。此处设计五种邻域结构：1、让一个任务从一辆平板车迁移到另外一个车。2、让一辆平板车上的两个任务的执行顺序发生改变。3、交换两辆平板车上的任务片段。4、让一个任务从一辆平板车上的位置迁移到该车上另一个位置的前面。5、让一个任务从一辆平板车上的位置迁移到该车上另一个位置的后面。具体操作过程如下：

1. **插入任务到另一辆车**

让一个任务从一个车迁移到另外一个车上，步骤如下:

Step 1 在解的任务序列上随机选择一个任务。

Step 2 若这个任务是超重任务，则在满足超重任务的承重约束下生成新的平板车赋值给解的第三行序列；若这个任务不是超重任务，则在满足任务承重约束下生成新的平板车赋值给解的第二，三行序列。



图 5邻域结构1

1. **交换一辆车上的两个任务**

让一个车上的两个任务的执行顺序发生改变。步骤如下：

Step 1 在解的平板车序列中随机选择一个平板车。

Step 2 在该平板车上选择两个任务，交换其位置及平板车号。



图 6邻域结构2

1. **交换两辆车的任务片段**

让两个车之间交换任务片段，这样更有利于保护时间窗的约束**[8]**。步骤如下：

Step 1 在解的平板车序列中选择两个平板车。

Step 2 选择平板车上除了开始和末尾的一个任务序列片段，即两个连续的任务，与另外一个平板车上的任务序列片段进行交换。

Step 3 检查新的解是否满足超重任务的承重约束，若不满足，则返回Step 1。若满足则结束。



图 7 邻域结构3

**4） 迁移一辆车上的任务至另一个任务的前面**

让一辆车上一个任务迁移到该车上另一个任务的前面，这样可以增大任务序列多样性。步骤如下：

Step 1 在解的平板车序列中选择一辆平板车。

Step 2 选择平板车上一个任务，再选择另一个任务。

Step 3 将选择的第一任务迁移到选择的第二个任务位置前面。



图 8 邻域结构4

**5）迁移一辆车上的任务至另一个任务的后面**

让一辆车上一个任务迁移到该车上另一个任务的后面，这样可以增加任务序列多样性。步骤如下：

Step 1 在解的平板车序列中选择一辆平板车。

Step 2 选择平板车上一个任务，再选择另一个任务。

Step 3 将选择的第一任务迁移到选择的第二个任务位置后面。



图 9 邻域结构5

#### 3.1.5 惩罚系数的更新

由于模型的约束较多，很难一直在可行解空间搜索模型的解，且对于上述五种邻域构造方法均不保证时间窗约束成立，因此，对于不满足时间窗约束的个体，在计算个体适应度的时候，要加上额外的惩罚，且有文献**[9]**中证明，动态系数的方式效果更好，即如果本次迭代中最好的解不是可行解，那么惩罚的系数应该变大；如果本次迭代中最好的解是可行解，那么惩罚前的系数应该变小。

#### 3.1.6 禁忌表及特赦规则

由于上述设定的五种邻域结构是不同的，因此，针对每个邻域结构分别建立禁忌表，来防止每种策略产生重复的邻域解。特赦规则即如果由禁忌表中的操作产生的解优于当前最优解，则触发特赦规则。对于第一种邻域结构,用表示任务由车迁移到车，则用作为禁忌元素加入到禁忌表中以防止最优解的操作重复出现，同理第二种邻域结构用表示车上任务和任务交换，则禁忌元素为和，第三种邻域结构用表示车上任务片段与车上任务片段交换**，**则禁忌元素为，第四种邻域结构用表示车上任务迁移到任务前面，第五种邻域结构用表示车上任务迁移到任务后面。其次禁忌长度与邻域空间有关，一般为。

## 4 数值试验

### 4.1实例验证

为了验证模型及算法的可行性与正确性。以上海某船厂的实际调度任务为例，利用Java语言编程求解。输入参数如下：（1）船厂路口矩阵图;（2）任务分段信息;（3）平板车信息;（4）时间窗约束信息。（5）算法参数：禁忌搜索的邻域搜索长度20000，禁忌长度57，迭代次数300，无改善解代数为100。运输任务表如表1所示。

表 1运输任务表

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 任务号 | 始点堆位 | 终点堆位 | 分段重量 | 时间窗（分钟） | 任务号 | 始点堆位 | 终点堆位 | 分段重量 | 时间窗（分钟）  （始点，终点） |
| 1 | P6207 | T1101 | 38 | 0,200 | 21 | P6207 | T1101 | 38 | 150,450 |
| 2 | T1805 | T1301 | 44 | 0,200 | 22 | T1805 | T1301 | 44 | 150,450 |
| 3 | P6207 | 涂装车间 | 64 | 0,200 | 23 | P6207 | 涂装车间 | 64 | 150,450 |
| 4 | P7101 | 涂装车间 | 76 | 0,200 | 24 | P7101 | 涂装车间 | 76 | 150,450 |
| 5 | P7107 | 总组平台 | 80 | 0,200 | 25 | P7107 | 总组平台 | 80 | 150,450 |
| 6 | T1805 | 预舾装车间 | 83 | 0,200 | 26 | T1805 | 预舾装车间 | 83 | 150,450 |
| 7 | P6207 | 预舾装车间 | 83 | 0,200 | 27 | P6207 | 预舾装车间 | 83 | 150,450 |
| 8 | P6207 | 涂装车间 | 88 | 0,200 | 28 | P6207 | 涂装车间 | 400 | 250,480 |
| 9 | P6207 | 总组平台 | 400 | 0,200 | 29 | P6207 | 总组平台 | 100 | 250,480 |
| 10 | P6207 | 总组平台 | 120 | 0,200 | 30 | P6207 | 总组平台 | 120 | 250,480 |
| 11 | P6207 | T1125 | 120 | 50,250 | 31 | P6207 | T1125 | 120 | 250,480 |
| 12 | 曲面车间 | 总组平台 | 122 | 50,250 | 32 | 曲面车间 | 总组平台 | 122 | 250,480 |
| 13 | P6207 | 涂装车间 | 126 | 50,250 | 33 | P6207 | 涂装车间 | 126 | 250,480 |
| 14 | 曲面车间 | 预舾装车间 | 126 | 50,250 | 34 | 曲面车间 | 预舾装车间 | 126 | 250,480 |
| 15 | P7107 | 总组平台 | 142 | 50,250 | 35 | P7107 | 总组平台 | 142 | 250,480 |
| 16 | P7314 | T1125 | 158 | 100,300 | 36 | P7314 | T1125 | 158 | 350,480 |
| 17 | P7511 | 曲面车间 | 176 | 100,300 | 37 | P7511 | 曲面车间 | 176 | 350,480 |
| 18 | P7314 | 预舾装车间 | 400 | 100,300 | 38 | P7314 | 预舾装车间 | 400 | 350,480 |
| 19 | P6207 | T1101 | 319 | 100,300 | 39 | P6207 | T1101 | 319 | 350,480 |
| 20 | T1805 | P7314 | 326 | 100,300 | 40 | T1805 | P7314 | 326 | 350,480 |

得到调度结果如表2所示。调度结果中平板车与执行任务之间满足承重约束；任务开始执行时间满足时间窗约束；任务9，18，28，38为超重任务，由两辆平板车协同运输。实例验证了算法的有效性。

### 4.2 数值试验分析

### 4.2.1 实验条件

为了验证提出的禁忌搜索算法求解模型的性能，以多组船厂实际数据进行试验。计划表中的任务数量取6、8、10、12、20、30、40、50；大型任务数分别为1、1、1、1、2、3、4、5；平板车数量取2、3、4、5、6、7、8。任务执行时间，任务之间的行驶时间作为输入量。时间窗根据实际背景进行调整。选用IBM ILOG CPLEX优化求解器求解模型，禁忌搜索是基于Java语言编写。考虑实际应用以及方便比较，设定CPLEX求解器求解时间定为3600秒，基于禁忌搜索算法求解结果与其对比，验证算法的性能。

### 4.2.2 试验结果与分析

算法性能评价指标为: ,其中是禁忌搜索算法求解结果,是CPLEX求解结果。表3给出了小规模任务数和平板车数组合情况下求解情况，禁忌搜索取3次求解平均值作为最终结果。表4给出了中等规模和大规模任务数和平板车数组求解情况。其中B表示任务数量，N表示车数量，表示CPLEX求解时间，表示禁忌搜索求解时间,时间单位均为秒。

表 3 小规模任务CPLEX与禁忌搜素求解对比

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |  |  |
| 6  6 | 2  3 | 46.2  59.0 | 0.818  1.095 | 46.2  59.0 | 0.596  0.425 | 0  0 |
| 8  8 | 2  3 | 75.3  73.3 | 0.787  29.172 | 75.3  73.3 | 0.565  8.59 | 0  0 |
| 10  10 | 3  4 | 121.2  108.0 | 23.276  214.117 | 121.2  108.2 | 8.238  15.785 | 0  0 |
| 12 | 3 | 153.7 | 26.418 | 155.5 | 15.775 | 0.01158 |
| 12 | 4 | 148.7 | 243.75 | 151.5 | 16.026 | 0.01848 |

表 4大规模任务CPLEX与禁忌搜索求解对比

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |  |  |
| 20  20  20 | 4  5  6 | 248.75  244.63  245.65 | 3600  3600  3600 | 257.9  254.8  247.9 | 28.798  31.27  45.756 | 0.03548  0.039913  0.009076 |
| 30  30  30 | 4  5  6 | 360.4  330.25  343.45 | 3600  3600  3600 | 353.5  328.4  330.9 | 40.47  63.954  62.206 | -0.01952  -0.00563  -0.03795 |
| 40  40  40 | 6  7  8 | 468.43  450.01  479.88 | 3600  3600  3600 | 472.9  453.2  441.1 | 52.89  51.153  51.574 | 0.009452  0.00704  -0.08792 |
| 50  50  50 | 6  7  8 | 702.46  698.89  788.26 | 3600  3600  3600 | 611.3  593.4  602.1 | 48.528  45.504  47.359 | -1.4912  -0.17778  -0.30918 |

由表3可见，随着任务数和平板车数增加，CPLEX求解时间急剧增加。禁忌搜素算法在多组测试用例上求出最优解，在未求出最优解的测试用例上求出近最优解，同时求解时间并没有呈急剧增加，证明禁忌搜索算法的有效性。由表4可见，当任务数为20，平板车数为4时，CPLEX已经在3600秒内无法求的最优解。针对较大规模的任务数和平板车数时，禁忌搜索算法均可以在70秒内求得结果，且在任务数为30、40、50时求得结果明显优于CPLEX。其他任务数和平板车数上GAP均小于0.02，验证了禁忌搜索算法在实际应用中具有很好的效果。

## 5 结论

本文提出了考虑平板车承重能力的船舶分段运输调度模型，通过平板车协同运输解决大型分段的运输难点。通过数值试验表明文中算法在规模较大的情况下依然可以快速求得质量较高的解，验证了文中提出解的编码方式，设计的禁忌搜索算法具有很好的效果，可用于实际生产。但是如何提高大规模问题解的精度，如何使算法求解稳定，仍需进一步研究。

## 参考文献

[1] 钟宏才,蒋如宏,谭家华,陈强,刘建峰.造船专业化生产单元模型及其作业安排优化[J].中国造船,2004(02):10-16.

[2] Joo C M, Kim B S. Block transportation scheduling under delivery restriction in shipyard using meta-heuristic algorithms[J]. Expert Systems with Applications, 2014, 41(6):2851-2858.

[3] Wang C, Mao Y, Hu B, et al. Ship Block Transportation Scheduling Problem Based on

Greedy Algorithm[J]. Journal of Engineering Science & Technology Review, 2016, 9(2):93-98.

[4] Salehi M, Jalalian M, Siar M M V, et al. Green transportation scheduling with speed control:

trade-off between total transportation cost and carbon emission[J]. Computers & Industrial

Engineering, 2017, 113.

[5] Hu Z H, Wei C. Synchronizing vehicles for multi-vehicle and one-cargo transportation[J].

Computers & Industrial Engineering, 2018, 119:36-49.

[6] 张志英，徐建祥，计峰.基于遗传算法的船舶分段堆场调度研究[J].上海交通大学学报，2013,47(7):1036-1042.

[7] 王冲, 茅云生, 辛锺桂. 基于遗传算法的船舶分段运输调度方法[J]. 上海交通大学学报, 2017, 51(3):338-343.

[8] Taillard, E., Badeau, P., Gendreau, M., Geurtin, F., & Potvin, J. Y. A Tabu Search Heuristic for the Vehicle Routing Problem with Soft Time Windows. Transportation Science, 31(November 2016), 170–186.

[9] Cordeau, JF., Laporte, G. & Mercier, A unified tabu search heuristic for vechile routing problems with time windows .A.J Oper Res Soc (2001) 52: 928.