

集装箱码头装卸作业的调度控制模型及算法设计

陈璐^{1,2,3}, 奚立峰¹, 蔡建国¹, Nathalie BOSTEL^{2,4}, Pierre DEJAX^{3,4}

(1. 上海交通大学 机械与动力工程学院 工业工程与管理系, 上海 200030;

2. 法国南特通讯及控制技术研究所, 法国 南特;

3. 法国南特矿业工程师学院 自动化控制及工业工程系, 法国 南特;

4. 法国南特大学 圣纳赛尔技术学校, 法国 南特)

摘要: 对集装箱码头上装卸作业的调度控制直接影响码头的整体运营效率. 本文研究了集装箱码头装卸作业的调度控制问题, 提出了一个基于柔性化flow shop的集成化控制模型. 该问题具有非线性规划 (NP: non-polynomial) 难度, 因此本文开发设计了两类基于优先级规则的启发式调度算法. 利用该模型来对码头中多种装卸设备进行总体调度可以提高设备之间的协调性, 提高码头效率, 降低成本. 实验研究证明算法能有效地解决该问题.

关键词: 调度; 优化; 柔性化flow shop; 启发式算法

中图分类号: TP29 **文献标识码:** A

Integrated model and heuristic algorithms for the scheduling of container handling system in a maritime terminal

CHEN Lu^{1,2,3}, XI Li-feng¹, CAI Jian-guo¹, Nathalie BOSTEL^{2,4}, Pierre DEJAX^{3,4}

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China;

2. IRCCyN -Institut de Recherche en Communication et Cybernétique de Nantes, France;

3. Department of Automatic Control and Industrial Engineering,
Ecole des Mines de Nantes, La Chantrerie, France;

4. IUT de Saint Nazaire de l'université de Nantes, Département GLT,
58 rue Michel Ange, 44606 Saint Nazaire Cedex, France)

Abstract: The scheduling of container handling system in a maritime terminal has a direct influence on the overall efficiency of the terminal. An integrated scheduling model is presented to schedule the container handling system in this paper. The problem is treated as a flexible flow shop scheduling problem. Because of the NP (non-polynomial) hardness of the problem, two types of priority rules based heuristic algorithms are developed to solve the problem. Scheduling different kinds of handling equipment in an integrated way can improve the cooperation among different equipment, increase the overall performance of the terminal, and decrease the operation cost in the terminal. Computational experiments show that the algorithms can solve the addressed problem effectively.

Key words: scheduling; optimization; flexible flow shop; heuristics algorithm

1 引言(Introduction)

集装箱运输是一种高效率、大规模生产的运输工艺. 集装箱码头是海陆联运的枢纽, 是海上运输和陆上运输的链接点之一. 提高码头上物流运作水平, 对码头现有资源进行合理地控制及决策, 可以提高集装箱装卸作业效率, 降低码头、船公司及货主的单箱成本. 集装箱的装卸作业主要包括以下一些操作: 1) 岸边装卸桥(桥吊)对进/出口箱的卸船/装船操

作; 2) 在堆场区域内场地龙门吊(场吊)对集装箱进行取/放操作; 3) 场地集卡车用来在码头沿岸区域及堆场之间运输集装箱, 它同时服务于桥吊和场吊. 在过去的几年中, 关于集装箱码头资源调度及优化问题已经有很多学者进行过研究. Iris和Koster^[1]对这些问题进行了全面的文献综述. Daganzo^[2]研究了岸边桥吊的调度策略对码头吞吐量及船只装卸作业时间的影响. Kim和Park^[3]将桥吊的调度问题视为 m 个

平行机床调度问题. Kim等^[4~6]通过对堆场内单个跨运车的路径规划来减少跨运车的总运输车程,并以此提高出口箱的操作效率. Bish^[7]对码头上集卡车的调度问题进行了研究,以减少总的装卸时间.

然而,对码头上所用到的不同装卸设备的集成化控制决策问题的研究却很少见. 现有的对单个设备进行规划的方法无法考虑到其他设备所产生的影响,同时对一类设备的最优化调度并不意味着使得码头总作业效率最高. 由于在码头上所使用的多种设备之间存在着很大的相互关联性,本文提出一个集成化的调度控制模型,其目的是: 1) 同时考虑多种装卸设备以提高不同设备之间的协调性; 2) 使得一定时间范围内的装卸作业的总完成时间(Makespan)最小.

2 集成化的调度控制模型(Integrated scheduling model)

文中的集成化调度控制模型基于如下假设: 1) 对于既有装载作业又有卸载作业的船只,假设装载作业在所有卸载作业完成之后再开始; 2) 一台场地吊车只执行一种操作,或者是取箱操作,或者是置箱操作. 图1所示的模型包括3个子问题,即岸边桥吊的配置、堆场内吊车的配置以及集卡车的路径规划. 诸如集装箱船的靠泊计划,码头布局,集装箱在船上及堆场的存储计划这样的信息均被视为已知. 本文所提出的控制模型是对柔性化flow shop调度问题的拓展和延伸.

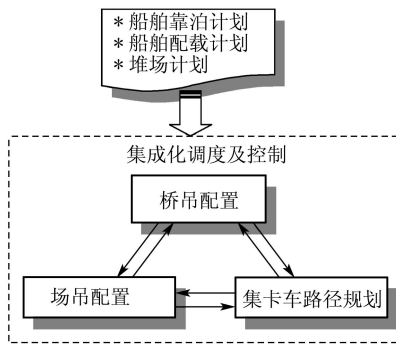


图1 集成化调度控制模型的基本思想

Fig. 1 Basic idea of the integrated scheduling model

2.1 模型中的参数含义(Notations in the model)

该模型包括以下一些基本元素:

· 作业(Job): 每个集装箱都必须经过一系列装卸操作,因此对一个集装箱完整的装/卸操作被视为一个作业. 这里存在两种不同类型的作业,即装载作业和卸载作业.

· 设备(Machine): 模型中包含3种不同类型的设备: 桥吊(QC)、场吊(YC)和集卡车(YV).

· 操作(Operation): 每个作业包含3个操作,即由桥吊完成的集装箱上/下船操作;由场吊完成的堆场内集装箱取/放操作以及由集卡车完成的在桥吊和场吊之间的集装箱转移操作.

本节利用一个混和整数规划模型来表示控制问题及其特征. 该模型包括以下参数: N 为所有作业的集合; P 为具有先后关系约束的作业对的集合,如果作业 i 先于作业 k ,则 $(i, k) \in P$; O 是所有的操作集合, $O = \{O_{ij} | i = 1, \dots, n, j = 1, 2, 3\}$; M_{ij} 是可以处理操作 O_{ij} 的设备集合; m_{ij} 为集合 M_{ij} 的数量; E_m 为设备 m 可以处理的所有操作的集合; P_{ij} 是操作 O_{ij} 的处理时间; e_{ikj} 是作业 i 和作业 k 在 j 级的调整时间; L 是一个充分大的常数.

决策变量包含:

$x_{ijm} = 1$, 如果 O_{ij} 由设备 m 处理; 否则为0. $m \in M_{ij}$.

$y_{ikjm} = 1$, 如果在设备 m 上操作 O_{ij} 紧随操作 O_{kj} ; 否则为0. $j = 1, 2, 3$;

s_{ij} 为操作 O_{ij} 的开始时间;

$C_{\max}$ 为最后一个作业的完成时间.

2.2 模型的建立(Definition of the model)

该集成化控制模型是对典型柔性化flow shop调度问题的延伸和拓展,这里利用调度问题中常用的三元标识符^[8]对其进行定义:

定义1 用 $HF|prec, s_{ik}, block|C_{\max}$ 来表示集装箱码头运作的集成化调度控制模型. 即一个带有任务先后关系限制($prec$), 设备调整时间(s_{ij})及阻塞现象($block$)的柔性化flow shop调度模型(HFSS-B). 目标函数是使得作业总完成时间($C_{\max}$)最小.

目标函数

$$\min C_{\max} = \max(s_{ij} + P_{ij}). \quad (1)$$

约束条件为

$$s_{ij} \geq 0, \forall i \in N, \forall j \in \{1, 2, 3\}, \quad (2)$$

$$s_{ij} + P_{ij} \leq S_{i(i+j)}, \forall i \in N, \forall j \in \{1, 2, 3\}, \quad (3)$$

$$\sum_{m \in M_{ij}} x_{ijm} = 1, \forall i \in N, \forall j \in \{1, 2, 3\}, \quad (4)$$

$$s_{ij} \leq s_{kj}, \forall (i, k) \in P, \forall j \in \{1, 2, 3\}, \quad (5)$$

$$\forall O_{ij}, O_{kj} \in E_{jm}, \text{ with } x_{ijm} = x_{kjm} = 1,$$

$$\text{then } s_{i(j+1)} + e_{ikj} \leq s_{kj} + Ly_{ikjm}, \quad (6)$$

$$s_{k(j+1)} + e_{kij} \leq s_{ij} + Ly_{kijm}, \quad (7)$$

$$x_{ijm}, y_{ik} = 0 \text{ or } 1, \forall i, k \in N, \forall j \in \{1, 2, 3\}, \forall m \in M_{ij}. \quad (8)$$

式(1)表示目标函数为最小化总完成时间make-

span. 式(2)约束每个操作在时刻0之后开始. 式(3)为每个集装箱作业的操作顺序约束. 约束(4)确保每个操作只由一台设备完成. 式(5)定义作业*i*作业*k*先后关系约束. 约束(6)和(7)定义了阻塞现象约束, 即不同设备之间不存在临时存储区, 集装箱在不同设备之间的转移(如从桥吊至集卡车或从集卡车至场吊)只有当所需设备都可用时才可以进行. 式(8)保证满足取整数约束.

以最小化作业完成时间为目标函数的调度问题是一类典型的组合优化问题, 只有少数一些特例可以得到有效解决^[9]. 每个作业最多只有3个操作的两设备的job shop调度问题^[10], 3台设备的带阻塞现象的flow shop调度问题^[11]等已被证明是NP难度问题. 作为对这些问题的延伸, HFSS-B也是NP难度问题.

3 Job-by-Job启发式调度算法(Job-by-Job heuristics)

由于HFSS-B是一个NP难度问题, 本文采用基于优先级规则的启发式调度算法来对该问题进行求解. 解决HFSS-B的最大困难就是调度问题中的柔性加工路径问题, 应用优先级规则解决设备分配问题, 简单易行, 容易满足任务操作顺序的约束. 但是, 因作业先后关系及阻塞现象等复杂约束条件的存在, 在求解时需要避免死锁现象的存在. 死锁(deadlock)是指由于计划的不协调性使得整个系统处于停顿状态.

3.1 基于循环分派规则的Job-by-Job算法(Job-by-Job with basic cyclic heuristic)

本文提出一个易于实现的Job-by-Job(JBJ)算法, 其基本思想是: 在每一次迭代中, 首先选择一个可操作集装箱(其前驱作业已经完成), 将该集装箱的所有操作的计划添加到当前的计划中. 重复此过程直至所有集装箱全部完成为止.

循环分派规则BCH(basic cyclic heuristic)是指在为每个操作选择设备时, 按照循环式顺序进行, 具体算法如下:

- 1) range jobs in numerical order from 1 to n
- 2) Let Q be the set of all unscheduled jobs, $Q = 1, 2, \dots, n$, let $m(i, j) = 1$
- 3) while($Q \neq \emptyset$), do step 4)
- 4) For $i = 1$ to n :
 - if (all the jobs precede i have been scheduled)
 - for each stage $j = 1, 2, 3$:
 - if $m(i, j) > m_{ij}$, let $m(i, j) = 1$
 - place job i last on machine $m(i, j)$

let $m(i, j) = m(i, j) + 1$

$Q = Q \setminus \{i\}$

5) if ($Q = \emptyset$), stop. Otherwise, go to step 3).

显然, 该算法的时间复杂度为 $O(n)$.

3.2 基于最小设备负荷分派规则的Job-by-Job算法(Job-by-Job with least machine load)

在每次迭代中可以使用局部优化方法来进行设备分配. 例如可将一个操作分配给当前负荷最小的设备以平衡各设备的工作负荷, 即基于最小设备负荷分派规则LML(least machine load)的Job-by-Job算法. 如用 m_j 来表示阶段*j*的设备数量($j = 1, 2, 3$), 则在最坏情况下, 本算法需对一个操作进行 $\sum_{j=1}^3 m_j$ 次计算来选择设备. 因此本算法的时间复杂度也为 $O(n)$, 因为对每个操作的调度时间可在 $O(\sum_{j=1}^3 m_j)$ 时间内完成.

4 多重插入式启发式算法(MIH)(Multiple insertion heuristics)

MIH(multiple insertion heuristic)算法的主要思想来源于求解小车路径规划问题(VRP)的插入式启发式算法^[12], 将所有集装箱分级进行排序. 在每一级排序中, 将集装箱插入所有可能的设备处理序列中, 再利用优先级规则选择最佳插入位置. 由于各级设备之间不存在临时存储区, 当前级先完成操作的集装箱应先进入下一级进行处理, 因此采用FCFS(first come first served)和设备分配优先规则相结合的方法来解决设备的分配和相应的集装箱排序问题.

4.1 基于最小附加时间的多重插入式算法(MIH-MET)(Multiple insertion heuristic with minimum extra time)

算法MIH-MET(minimum extra time)是指将集装箱插入到导致最小附加时间的设备序列中, 即增加对该集装箱的操作之后, 设备所需要进行的调整时间最短. 将集装箱*u*插入到*i*和*k*之间所导致的附加时间(或成本)定义为

$$\begin{cases} c(u) = c(i, u, k) = e_{iu} + e_{uk} - e_{ik}, \\ i, k, u = 1, \dots, n. \end{cases} \quad (9)$$

e_{ik} 表示设备对集装箱*i*和*k*进行连续操作时所需的调整时间.

MIH-MET算法如下所示:

- 1) For the first stage, arrange containers in numerical order from i to n for use
- 2) Let Q be the set of all unscheduled containers, $Q = \{1, 2, \dots, n\}$

3) **While** ($Q \neq \emptyset$), **do** step 4), 5)

4) **For** $i = 1$ to n :

if (all the containers that precede i have been scheduled), then:

a) Consider inserting container i into every possible position

b) Calculate the extra time of each possible insertion

c) Insert i into a machine sequence with the smallest extra time

5) **For** each stage $j = 2, 3$:

a) Update the ready times of each container for O_{jj} based on the completion times of $O_{j(j-1)}$

b) Arrange containers in non-decreasing order of ready times

c) **For** $i = 1$ to n :

if (all the containers that precede i have been scheduled), then:

Consider placing container i last on each machine $m \in M_{ij} \subset M$

Calculate the extra setup time in each position for container i

Placing container i in the position on the machine with the smallest extra setup time

d) $Q = Q \setminus \{i\}$

6) **If** ($Q = \emptyset$), **stop**. **Otherwise**, go to step 3).

如果用 m_1 来表示在第一阶段的设备数量, 那么在最坏情况下, 在步骤4)-a)中集装箱 i 有 $i-1+m_1$ 个可能的插入位置. 每次插入需一次计算, 因此MIH-MET需要 $\sum_{i=1}^n i-1+m_1 = n(n+1)/2 + (m_1-1)n$ 次计算. 该算法的时间复杂度还取决于步骤5)-a)中的排序算法, 如果采用插入排序算法($O(n^2)$), 那么MIH-MET总的时间复杂度为($O(n^2)$).

4.2 基于最先设备分配规则的多重插入式算法(MIH-FAM)(Multiple insertion heuristic first available machine)

算法MIH-FAM(first available machine)是指在每次迭代中, 将一个集装箱操作插入到最先变为空闲状态的设备, 以得到一个无延迟(non-delay)计划. 同样地, 可以得到MIH-FAM算法的时间复杂度也为($O(n^2)$).

尽管一个无延迟计划通常很接近最优解, 但是由于设备调整时间的存在, 可能会出现当一台设备处于空闲状态时, 为了尽量减少设备调整时间, 一个集装箱等待另外一台设备进行处理的现象.

4.3 基于最小完成时间的多重插入式算法(MIH-FAM)(Multiple insertion heuristic with minimum completion time)

算法MIH-MCT(minimum completion time)是指将一个集装箱插入到导致最小完成时间的设备序列中, 即当把一个集装箱插入到一个设备序列中后, 计算当前已排序集装箱的完成时间之和, 并选择一个使得该完成时间之和最小的位置, 将集装箱插入到该位置中.

在MIH-MCT算法中, 一个集装箱最多有 $i-1+m_1$ 个可能插入位置, 而每次插入需要进行 i 次计算. 因此整个算法需要 $\sum_{i=1}^n (i-1+m_1)i = \frac{1}{6}n(n+1)(2n+1) + \frac{m_1-1}{2}n(n+1)$ 次计算, 算法的总时间复杂度为($O(n^3)$).

5 实例计算(Computational experiments)

本文设计了一系列具有不同参数(集装箱数目, 设备数目)的问题. 任务的属性随机产生, 各操作的执行时间分别在一个一致性分布区间内随机产生, 如桥吊操作时间 $U(105, 161)$, 场吊取箱操作时间为 $U(9, 41)$, 场吊置箱操作时间 $U(38, 70)$, 集卡车操作时间 $U(60, 130)$ (单位:s). 数据的确定来源于上海港一个集装箱码头的实际布局以及设备运行参数.

算法在一台个人计算机上由Visual C++实现, 计算机配置为: Centrino 1300 MHz, 256 MB RAM. 采用文献[13]所提出的下界值LB, 用平均偏差APD(average percentage deviation)作为对调度算法的评价, $APD = 100\% * (\text{Solution} - LB) / LB$. 表1是应用不同启发式算法所得APD结果的比较, 表2所示为这些算法在不同调度环境下的计算时间.

对实验中所有20个不同的调度问题, 算法结果相对于下界的平均偏差在0.5%至15.65%之间. 当集装箱数目增加时, 算法性能并不受影响. 表中的结果还显示, 算法MIH-FAM在所有启发式算法中性能最好. 此外, 对于实验中20个调度问题, 不同算法的计算时间均小于3.5 s. 调度算法的计算时间和结果都是令人满意的.

此外, 为了改进启发式算法的计算结果, 可以在这些解的基础上运用一些局部搜索算法(如Tabu搜索). 针对本文问题的特点, Chen等^[14]提出了一种全新的邻居结构定义方法, 避免了在搜索过程中由于调度问题中的技术约束可能导致的不可行解的出现, 并在此基础上开发了一个完整的Tabu搜索算法.

表 1 调度算法的计算结果比较
Table 1 Computational results for the heuristics

问题规模				APD				
集装箱数	QC	YC	YV	JBj-BCH	JBj-LML	MIH-MET	MIH-FAM	MIH-MCT
10	2	4	4	13.22	15.43	5.35	8.66	7.68
10	2	4	6	25.51	10.75	0.50	7.52	4.40
20	2	4	6	9.95	9.85	14.55	4.98	5.12
20	2	4	8	17.84	14.43	13.78	2.56	2.67
20	2	6	8	7.78	7.09	16.45	4.18	4.17
40	2	4	8	12.14	16.51	16.21	5.78	6.87
40	2	6	8	11.49	9.87	19.88	8.65	10.32
40	2	6	10	14.82	9.43	21.58	8.83	9.76
50	2	6	8	9.98	7.70	23.12	12.22	13.65
50	2	6	10	19.08	9.75	25.49	12.45	12.56
50	4	6	10	30.87	23.58	70.88	13.64	12.75
50	4	8	10	23.84	18.75	75.11	11.75	12.34
60	4	8	12	29.45	16.03	82.76	11.31	12.09
60	4	8	15	27.90	13.18	63.90	12.36	12.45
60	4	10	12	34.33	23.68	87.11	13.09	15.74
60	4	10	15	36.36	14.80	88.35	15.12	14.36
80	4	10	15	16.83	16.35	89.85	15.65	16.76
80	4	10	20	24.81	12.03	90.09	16.32	17.85
100	4	10	20	15.18	14.29	86.17	15.73	14.98
100	4	12	24	17.60	9.48	91.54	17.36	18.76

表 2 调度算法的计算时间比较
Table 2 Computational times for the heuristics

问题规模				CPU 时间/s				
集装箱数	QC	YC	YV	JBj-BCH	JBj-LML	MIH-MET	MIH-FAM	MIH-MCT
10	2	4	4	0.287	0.289	0.290	0.382	0.401
10	2	4	6	2.288	0.289	0.291	0.371	0.400
20	2	4	6	0.320	0.320	0.340	0.400	0.421
20	2	4	8	0.315	0.322	0.310	0.401	0.421
20	2	6	8	0.320	0.320	0.310	0.391	0.421
40	2	4	8	0.420	0.430	0.471	0.561	0.600
40	2	6	8	0.430	0.433	0.480	0.561	0.601
40	2	6	10	0.425	0.430	0.481	0.561	0.601
50	2	6	8	0.540	0.550	0.641	0.731	0.761
50	2	6	10	0.540	0.560	0.651	0.731	0.761
50	4	6	10	0.550	0.565	0.641	0.731	0.761
50	4	8	10	0.558	0.570	0.641	0.721	0.771
60	4	8	12	0.650	0.680	0.882	0.962	1.132
60	4	8	15	0.655	0.700	0.882	0.971	1.111
60	4	10	12	0.660	0.720	0.881	0.971	1.111
60	4	10	15	0.670	0.750	0.881	0.972	1.101
80	4	10	15	0.880	0.890	1.672	1.752	1.903
80	4	10	20	0.900	1.100	1.672	1.752	1.912
100	4	10	20	1.650	1.960	2.975	3.075	3.334
100	4	12	24	2.030	2.430	2.984	3.075	3.324

6 结论(Conclusion)

集装箱码头是集装箱运输业中的一个重要环节, 优质、高效的码头生产运作管理不仅是码头本身发展的需要, 也是船公司、货主的要求. 本文提出了一个集成化的调度控制模型, 为码头装卸作业运作优化及决策提供了新的思路和途径. 基于优先级规则的启发式求解算法每一步都寻求局部最优解, 同时能对大规模调度问题进行求解, 实例计算证明了算法的有效性. 本文为进一步研究集装箱码头优化调度问题, 并将研究成果应用于生产调度的实际工作, 提高企业的经济效益提供了参考.

参考文献(References):

- [1] IRIS F A, de KOSTER R. Transshipment of containers at a container terminal: an overview[J]. *European J of Operational Research*, 2003, 147(1): 1 – 16.
- [2] DAGANZO C F. Crane productivity and ship delay in ports[J]. *Transportation Research Record*, 1989, 1251: 1 – 9.
- [3] KIM K H, PARK Y. A crane scheduling method for port container terminals[J]. *European J of Operation Research*, 2004, 156(3): 752 – 768.
- [4] KIM K H, KIM K Y. Routing straddle carriers for the loading operation of containers using a beam search algorithm[J]. *Computer & Industrial Engineering*, 1999, 36(1): 109 – 136.
- [5] KIM K H, KIM K Y. A routing algorithm for a single straddle carrier to load export containers onto a containership[J]. *Int J of Production Economics*, 1999b, 59(1-3): 425 – 433.
- [6] KIM K H, KIM K Y. An optimal routing algorithm for a transfer crane in port container terminals[J]. *Transportation Science*, 1999c, 33(1): 17 – 33.
- [7] BISH E K. A multiple-crane-constrained scheduling problem in a container terminal[J]. *European J of Operational Research*, 2003, 114(1): 83 – 107.
- [8] PINEDO M. *Scheduling Theory, Algorithms, and Systems*[M]. Second Edition. New Jersey: Prentice Hall, 2002.
- [9] BLAZEWICZ J, DOMSCHKE W, PESCH E. The job shop scheduling problem: conventional and new solution techniques[J]. *European J of Operational Research*, 1999, 93(1): 1 – 33.
- [10] LENSTRA J K. *Sequencing by Enumerative Methods*[M]. Mathematical Center Tract 69, Amsterdam: Mathematisch Centrum, 1977.
- [11] HALL N G, SRISKANDARAJAH C. A survey of machine scheduling problems with blocking and no-wait in process[J]. *Operations Research*, 1996, 44(3): 510 – 525.
- [12] VIGO D, TOTH P. The vehicle routing problem[M]//*SIAM Monographs on Discrete Mathematics and Applications*. Philadelphia, PA: SIAM, 2002, vol.9.
- [13] SANTOS D L, HUNSUCKER J L, DEAL D E. Global lower bounds for flow shops with multiple processors[J]. *European J of Operational Research*, 1995, 80(1): 112 – 120.
- [14] CHEN L, XI L F, CAI J G, et al. An integrated approach for modeling and solving the scheduling problem of container handling systems[J]. *J of Zhejiang University Science*, 2006, 7(2): 234 – 239.

作者简介:

陈璐 (1975—), 女, 上海交通大学机械与动力工程学院教师, 在职博士生, 主要研究领域为生产运作与管理、现代物流技术, E-mail: chenlu@sjtu.edu.cn;

奚立峰 (1966—), 男, 上海交通大学机械与动力工程学院教授, 博士生导师, 主要研究领域为现代物流技术、质量管理等, E-mail: lfxi@sjtu.edu.cn;

蔡建国 (1932—), 男, 上海交通大学机械与动力工程学院教授, 博士生导师, 主要研究领域为生产调度理论与应用、成组技术、现代制造技术等, E-mail: jgcai@sjtu.edu.cn;

Nathalie BOSTEL (1964—), 女, 法国南特大学圣那赛尔技术学院教师, 博士, 主要研究领域为生产计划与控制、运输调度与管理、物流技术, E-mail: Nathalie.Bostel@univ-nantes.fr;

Pierre DEJAX (1947—), 男, 法国南特矿业工程师大学教授, 主要研究领域为物流技术、运输管理、生产计划与控制等, E-mail: pierre.dejax@emn.fr.