

文章编号: 1005-0523(2022)03-0017-07



## 多供应商大宗整列直达列车联动发车分析研究

林柏梁, 赵小红, 孟羽菲

(北京交通大学交通运输学院, 北京 100044)

**摘要:** 对于由多供应商提供大宗原材料的企业, 供应商的列车发车间隔将影响企业的库存水平。为此, 将着重研究在收货方平均库存最小目标下的多供应商的整列直达列车联动发车间隔关系。由于不同供应商的供货量、始发直达的列车运输量、途中的运输时间或路径差异均会对列车到达间隔产生影响; 故分别解析了多供应商列车运输量相同与不相同、每个供应商年供货量相同与不相同 4 种组合情况下的列车联动发车间隔优化方法。最后, 给出了算例分析, 结果显示, 相对于随机的发车间隔, 企业的平均库存水平降低了 24.2%。

**关键词:** 大宗货物运输; 多供应商; 整列直达列车; 联动发车

中图分类号: U2-9

文献标志码: A

本文引用格式: 林柏梁, 赵小红, 孟羽菲. 多供应商大宗整列直达列车联动发车分析研究[J]. 华东交通大学学报, 2022, 39(3): 17-23.

DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.20220406.011

## Analysis of Linkage Departure of Entire Direct-Train for Multi-Suppliers Transporting Bulk Commodities

Lin Boliang, Zhao Xiaohong, Meng Yufei

(School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** For enterprises whose bulk raw materials are supplied by multiple suppliers, the train departure interval of suppliers may affect their inventory level. This paper focuses on the linkage departure interval of entire direct-trains between multi-suppliers under the target of minimum average inventory of the customer. Due to the fact that the arrival interval will be influenced by the supply volume from different suppliers, freight volume of originating direct train, and the delivery time or path differences in transit, it respectively analyzes the optimization methods of linkage departure interval under four combinations of freight volume for multi-suppliers and the annual supply volume of each supplier. Finally, the corresponding numerical example is given, and the results show that the average inventory level of customer is reduced by 24.2% compared to the random departure interval.

**Key words:** bulk commodities transportation; multi-suppliers; entire direct-train; linkage departure

**Citation format:** LIN B L, ZHAO X H, MENG Y F. Analysis of linkage departure of entire direct-train for multi-suppliers transporting bulk commodities[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2022, 39(3): 17-23.

库存与运输作为现代物流系统的重要组成部分, 二者的成本均在总物流成本中占据相当大的比

重。铁路作为远距离大宗货物运输的主要方式, 在过去很长一段时期内处于大宗货运市场的优势地

收稿日期: 2021-11-24

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB1201402)

位。随着我国经济的快速发展以及交通运输行业市场竞争的加剧,大宗货物的物流成本敏感性增加,市场对铁路运输的服务质量也提出了更高的要求。近年来,铁路开始致力于运输全过程的服务质量,最大限度地降低全社会的物流成本。铁路大宗货物运输应该树立低成本、高质量的运输理念<sup>[1]</sup>,同时与收货方企业的库存管理、消耗节奏紧密联系,铁路应在满足自身运力要求的前提下,尽可能与下游收货方的需求相配合,制定合理的发车间隔,从而控制其库存水平,降低全社会的物流成本。

考虑到电厂、钢厂等大宗原材料消耗企业大多有自己的铁路专用线,对铁路运输的依赖性较强,企业库存管理与铁路列车配送间隔具有直接的关联性。故铁路运输组织部门可根据货主的库存水平优化不同供应商的列车发车时间与发车间隔,使供应商供货节奏适应收货方企业生产节拍,从而控制其库存水平,最终实现企业库存成本最小化。

铁路运输与物流领域方面已经有不少相关研究。在铁路运输成本与货主库存成本方面,曹学明等<sup>[2]</sup>在铁路直达运输条件下,将煤炭采购成本、仓储成本、运输成本、资金成本在内的物流总成本最小化作为目标函数,构建了发电厂燃煤多周期运输与库存一体化模型。纪丽君等<sup>[3]</sup>,孔亮<sup>[4]</sup>从物流库存成本的角度,研究了装车地车流组织优化问题,包括分析不同车流组织模式下铁路运输企业的车流组织费用、以及发、收货方的库存成本,构建以三者总物流成本最小化为目标的非线性0-1整数规划模型,从而得到车流组织优化方案。文献[5-6]在铁路装车地列车组织优化中考虑了电厂煤炭库存成本,选取确定性非瞬时库存模型进行优化研究,寻求使运输与库存总成本最低时的车流组织形式。杨帆等<sup>[7]</sup>在装车地车流组织优化过程中提出了低频始发直达列车的概念,将铁路运输与装卸车地库存成本联合优化,综合考虑发货和收货方的仓储成本、直达和非直达列车的组织成本,构建了低频始发直达的优化模型,并通过多供应商与多货主的算例验证了模型的有效性。

关于列车到达间隔对货主的库存影响方面的研究相对较少。游艳雯等<sup>[8]</sup>构建了基于企业合理库存管理的列车运行计划优化模型,通过优化大宗货物收货企业的列车到达次序、到达时刻,实现企业库存最小化。樊亚夫<sup>[9]</sup>以钢铁厂为研究目标,将企业

库存成本最小化作为优化目标,进行列车运行计划的编制,设计不同品类货物到达时间窗,以解决列车到达不均衡而导致的货物堆积、库存成本激增的问题。

从供货模式来看,许多学者对不同模式下的运输与库存联合优化问题进行了研究。Chandra等<sup>[10]</sup>针对一对多配送的运输与库存联合优化模型,设计算例证明了运输与库存相互协调的必要性。Pryor<sup>[11]</sup>研究点对点配送系统,将库存与运输作为一个系统进行优化,以解决满足企业生产计划的供应问题。裴英梅等<sup>[12]</sup>采用贪婪随机自适应搜索算法(GRASP)就多供应商对单一货主的库存与运输整合优化问题(ITIO)进行了求解。

综上所述,目前列车到达间隔对收货方库存动态影响的研究较少,故本文聚焦于多对一供货结构情况下,不同供应商整列供货情况下的铁路行车组织问题,主要确定不同供应商之间的联动发车间隔,使得列车匹配到达收货方,从而使得货主的平均库存最小化。这对于降低全社会物流成本,提高铁路运输的服务质量以及客户满意度具有重要的理论和现实意义。

## 1 问题描述

对于一些大型原材料消耗企业,例如电厂、钢铁厂等,往往由多个供应商为其供应原材料。显然,对某个企业而言,其所需的原材料供应商往往分布不同的区域,当他们都通过铁路进行供货时,不同的运输计划会导致收货企业不同的库存水平。在各供应商的列车集中到达或者无规律性随机到达的情况下,均会增加收货方的平均库存量。只有在铁路运输按照收货人的物资消耗节奏合理地安排列车到达间隔,才能实现收货人库存成本最小化的目标。

在每个供应商单次送货批量一定的情况下,不同供应商的列车到达时间和到达间隔直接影响收货方的库存水平。不失一般性,在忽略一些突发状况等偶然因素的情况下,不同车站组织的列车发车间隔及发车时间(挂运的运行线)直接决定了列车的到达间隔。对于由多个供应商供货的大宗货物消耗企业,控制其库存最小化的优化方法就是确定不同供应商之间的联动发车间隔。

多供应商列车的到达方式基本可以概括为:

1) 集中到达,即来自不同供应商的列车几乎同时到达收货方;

2) 随机到达,即来自不同供应商的列车发车时间与间隔彼此互相独立,仅按照各自的运行计划发车,到达收货方的时间具有不确定性;

3) 联动到达,即来自不同供应商的列车发车时间与间隔相互配合,按照一定顺序和规律到达收货方。

本文旨在通过比较多供应商列车在上述3种到达方式下的收货方平均库存水平,探寻最低库存水平下的列车到达方式,并确定不同供应商之间的联动发车间隔优化方法。

## 2 列车到达间隔与收货方库存水平的关系

一些采用铁路运输的大型企业,例如电厂和钢厂,往往有比较稳定的原料需求,而且需求量较大,大多采用整列直达的方式运输大宗货物。对于需要多个供应商来满足其货物需求的企业来说,不同供应商的列车发车间隔决定收货方到货间隔,并且将会影响收货方的库存水平。在保证收货方安全库存的基础上,若在未消耗完(不考虑安全库存)上次送达货物的情况下列车到达,必然造成货物的堆积,使得收货方库存成本增加。

为了说明相关原理,这里考虑3个供应商(分别标记为 $S_1, S_2, S_3$ )对一个收货方供货,且收货方总仓库为 $C$ 。不失一般性,我们为收货方总仓库 $C$ 设置3个虚拟子仓库 $C_1, C_2, C_3$ ,分别用来储存来自3个供应商的货物。收货方以速率 $R$ 均匀消耗货物,且遵循“先到先消耗”的原则。虚拟子仓库的假设并不影响总仓库的库存变化。

### 2.1 多供应商配货列车集中到达收货方

一般来说,供应商为了完成各自的供货合同,他们会习惯依据供货量形成大致等间隔的供货频率申请整列直达列车的发车。若不同供应商对应装车地发出的列车集中到达收货方时,收货方的库存量上升,库存成本增加,会对收货方造成一定的库存压力。这种情况的发生虽然具有偶然性,但是仍需避免,否则,不仅仅增加收货方的库存成本,有时还因卸车能力不足导致待卸时间增加,减缓了车辆的周转效率。

### 2.2 多供应商配货列车随机发车

当铁路运营部门按照各个供应商大致均衡的发货批次周期铺画发车运行线时,发车衔接时间具

有一定的随机性。此时,收货方的库存也会增加。图1给出了3个供应商对应的直达列车随机发车时,收货方库存水平的变化曲线。供应商 $S_1, S_2, S_3$ 均以间隔 $T$ 发车,且装车地发车时刻之间无关联。这种情况下,导致子仓库 $C_2$ 和 $C_3$ 均产生货物堆积(浅色矩形),收货方库存成本增加。

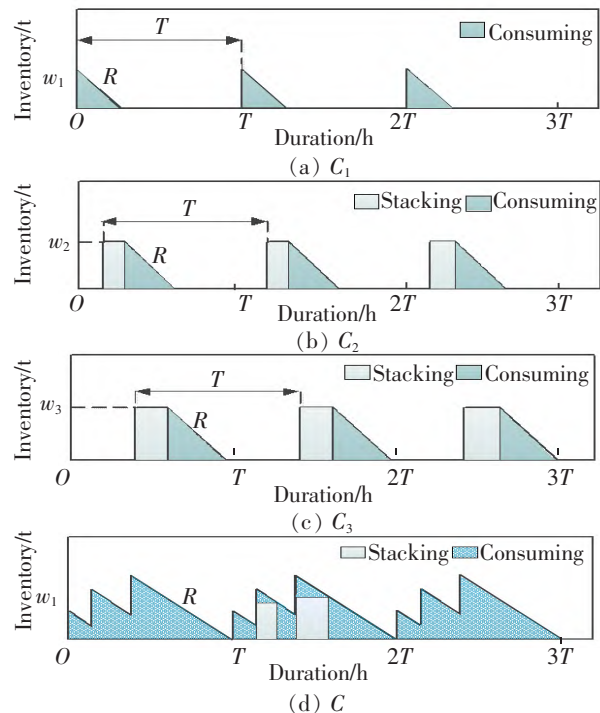


图1 随机发车时收货方库存水平变化曲线

Fig.1 The change curve of the customer's inventory level under the random departure interval

### 2.3 多供应商配货列车联动发车

以上两种情况,收货方仓库均存在不同程度的库存增高现象。为了降低收货方库存成本,不同供应商之间应该互相配合,制定合理的发车次序和发车间隔。优化不同供应商供货的联动发车间隔方法,是指在多对一供货结构下,当多个供应商按照“用完即到”方式供货,且不同供应商之间联动发车时,各列车到达收货方的专用线要确保等间隔时长。

如图2所示,供应商 $S_1, S_2$ 和 $S_3$ 均以间隔 $T$ 发车。 $S_1$ 发出的第一列车到达后储存在子仓库 $C_1$ ;收货方以速率 $R$ 消耗完 $C_1$ 的货物时, $S_2$ 发出的第一列车到达子仓库 $C_2$ ;收货方以速率 $R$ 消耗完 $C_2$ 的货物时, $S_3$ 发出的第一列车到达子仓库 $C_3$ ;收货方再以速率 $R$ 消耗完 $C_3$ 的货物时, $S_1$ 发出的第二列车到达。依次类推,多个供应商联动发车,互相配合,完成整个收货方的货物需求任务。在这种多供

应商大宗整列直达列车联动发车的方式下,收货方库存不会出现货物堆积现象,库存成本较低。

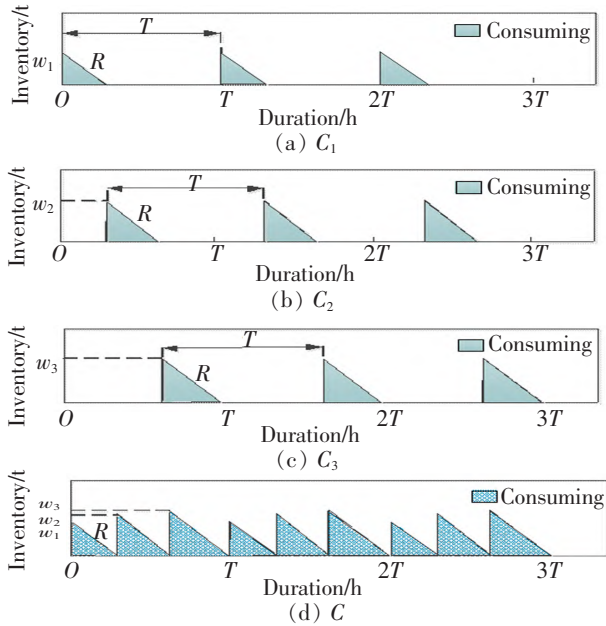


图2 联动发车下收货方库存水平变化曲线

Fig.2 The change curve of the customer's inventory level under the linkage departure interval

### 3 多供应商直达列车联动发车间隔优化方法

假设企业  $F$  从  $N^{supply}$  个供应商那里分别采购了某种原材料,数量分别为  $Q_1, Q_2, \dots, Q_{N^{supply}}$ 。若原料的

年消耗量为  $D$ ,则显然有  $D = \sum_{i=1}^{N^{supply}} Q_i$ ,其日均消耗量为  $q^{consumption} = D/365$ 。假设供应商  $S_i$  的直达列车途中所需要的运输时间为  $\tau_i^{trans}$ ,且  $N^{supply}$  个供应商按照上文中联动发车方式申请发车。

#### 3.1 各供应商年供货量相同且每列车运量相同

在各个供应商供货量相等的情况下,即  $Q_i = D/N^{supply}$ ,设供应商  $S_i$  的直达列车运输量为  $w_i^{train}$ ,且  $w_i^{train} = w_{i+1}^{train}, i \in [1, N^{supply}-1]$ ,则当供应商按照“用完即到”的方式供货时,列车的到达间隔  $\Delta t^{arrive}$  为

$$\Delta t_{i,j+1}^{arrive} = \frac{24w_i^{train}}{q^{consumption}} \quad \forall i \in [1, N^{supply}-1] \quad (1)$$

显然,有

$$\Delta t_{N^{supply},1}^{arrive} = \frac{24w_{N^{supply}}^{train}}{q^{consumption}} \quad (2)$$

这里需要说明的是,第1个供应商到第  $N^{supply}$  个供应商依次供货,且每个供应商每次申请发出一列车,循环供货,完成对企业  $F$  的全年供货任务。并且

由于多供应商对应的列车运量相同,即存在

$$\Delta t^{arrive} = \Delta t_{i,j+1}^{arrive} = \Delta t_{N^{supply},1}^{arrive} \circ$$

供应商  $S_i$  的直达列车发车间隔  $\Delta t_i^{departure} = N^{supply} \Delta t^{arrive}, i \in [1, N^{supply}]$ ,此时供应商对应列车的联动发车间隔  $\Delta t^{departure}$  为

$$\Delta t_{i,j+1}^{departure} = \Delta t_{i,j+1}^{arrive} - (\tau_{i+1}^{trans} - \tau_i^{trans}) \quad \forall i \in [1, N^{supply}-1] \quad (3)$$

$$\Delta t_{N^{supply},1}^{departure} = \Delta t_{N^{supply},1}^{arrive} - (\tau_1^{trans} - \tau_{N^{supply}}^{trans}) \quad (4)$$

式(3)和式(4)反映了列车到达间隔和发车间隔之间的联系。

#### 3.2 各供应商年供货量不同、每列车运量相同

在各个供应商供货量  $Q_i$  不相等的情况下,设供应商  $S_i$  的直达列车运输量为  $w_i^{train}$ ,且  $w_i^{train} = w_{i+1}^{train}$ ,则需要的配送列车数量为:  $Q_i/w_i^{train}, i \in [1, N^{supply}]$  列。

仍然按照“用完即到”的供货方式,列车的到达间隔计算同式(1)和式(2)。多供应商可按照如下方式申请发车。第1阶段,  $N^{supply}$  个供应商各自以间隔  $N^{supply} \Delta t^{arrive}$  申请发车,直达列车数量为  $\min Q_i/w_i^{train}, i \in [1, N^{supply}]$  列,此时列车的联动发车间隔计算同式(3)和式(4)。

第2阶段,供货量最小的供应商  $S_i$  无需提供货物(假设该供应商为第  $a$  个,即  $i=a$ ),其余  $N^{supply}-1$  个供应商各自以间隔  $(N^{supply}-1) \Delta t^{arrive}$  申请发车,其直达列车数量为:  $(\min Q_i - \min Q_a)/w_i^{train}, i \in [1, N^{supply}]$  且  $i \neq a$  列。此时列车联动发车间隔计算同式(3)和式(4),但  $i \in [1, N^{supply}]$  且  $i \neq a$ 。

依次类推,最后仅有供货量最大  $\max Q_i$  的供应商  $S_i$  需提供货物(假设该供应商为第  $b$  个,即  $i \neq b$ )。  $S_b$  以间隔  $24w_b^{train}/q^{consumption}$  申请发车。

#### 3.3 各供应商年供货量相同、每列车运量不同

在各个供应商的直达列车运输量  $w_i^{train}$  不相等的情况下,设供应商  $S_i$  的供货量  $Q_i$  均相等,即  $Q_i = D/N^{supply}$ ,则需要的直达列车数量为:  $Q_i/w_i^{train}, i \in [1, N^{supply}]$  列。收货方  $F$  的货物消耗速率为  $R = q^{consumption}/24$ 。

各个供应商可按照如下方式申请发车。第1阶段,  $N^{supply}$  个供应商各自以间隔  $N^{supply} w_i/R, i \in [1, N^{supply}]$  申请发车,直达列车数量为:  $Q_i/\max w_i^{train}$ ,

$i \in [1, N^{\text{supply}}]$  列。此时列车的联动发车间隔为

$$\Delta t_{i,j+1}^{\text{departure}} = \frac{w_i^{\text{train}}}{R} - (\tau_{i+1}^{\text{trans}} - \tau_i^{\text{trans}}) \quad \forall i \in [1, N^{\text{supply}} - 1] \quad (5)$$

$$\Delta t_{N^{\text{supply}},1}^{\text{departure}} = \frac{w_{N^{\text{supply}}}^{\text{train}}}{R} - (\tau_1^{\text{trans}} - \tau_{N^{\text{supply}}}^{\text{trans}}) \quad (6)$$

第 2 阶段,列车运输量最大的供应商  $S_i$  无需提供货物(假设该供应商为第  $m$  个,即  $i=m$ ),其余  $(N^{\text{supply}}-1)$  个供应商各自以间隔  $(N^{\text{supply}}-1)w_i^{\text{train}}/R, i \in [1, N^{\text{supply}}]$  且  $i \neq m$  申请发车,直达列车数量为:  $Q_i/\max w_i^{\text{train}}, i \in [1, N^{\text{supply}}]$  且  $i \neq m$  列。此时列车联动发车间隔计算方法同式(5)和式(6)。

依次类推,最后仅有列车运输量最小的供应商  $S_i$  需提供货物(假设该供应商为第  $n$  个,即  $i=n$ );因此,  $S_n$  以间隔  $w_n^{\text{train}}/R$  申请发车。

### 3.4 各供应商年供货量不同、每列车运量不同

在各个供应商供货量不等的情况下,设供应商  $S_i$  的直达列车运输量为  $w_i^{\text{train}}$ ,则需要的直达列车数量为:  $Q_i/w_i^{\text{train}}$  列,收货方  $F$  的消耗速率为  $R$ 。

同样按照“用完即到”的发车方式,各个供应商之间的联动发车方式和发车间隔计算同式(5)和式(6),但各阶段内不同供应商对的直达列车数量存在差异。

## 4 算例分析

假定某电厂从 3 个供应商处采购原煤,且该电厂年原煤消耗量为 54 万 t,日均原煤消耗量为 1 480 t。对应 3 个供应商的直达列车途中所需要的运输时间分别为 42,32,36 h。本节针对上述 4 种联动发车间隔优化方法和随机发车间隔的情况,分别给出算例并进行对比及分析。

### 4.1 3 个供应商年供货量相同且每列车运输量相同

假设 3 个供应商的供货量均为 18 万 t/a,且直达列车运量均为 3 000 t。由式(1)和式(2)得到列车的到达间隔为 48 h;3 个供应商各自的发车间隔均为 144 h;由式(3)和式(4)分别得到列车的联动发车间隔为:58,44,42 h,即供应商  $S_2$  的第 1 列车在  $S_1$  的第 1 列车发车 58 h 后发车,  $S_3$  的第 1 列车在  $S_2$  的第 1 列车发车 44 h 后发车,  $S_1$  的第 2 列车在  $S_3$  的第 1 列车发车 42 h 后发车,3 个供应商循环发车完成对电厂的供货任务

经计算,该情况下的收货方平均库存为

$$\frac{1}{2} \times w_i^{\text{train}} = \frac{1}{2} \times 3\,000 = 1\,500 \text{ t}。$$

### 4.2 3 个供应商年供货量不同、每列车运量相同

假设 3 个供应商供货量分别为 21,18,15 万 t/a,直达列车运量均为 3 000 t,则 3 个供应商分别需要提供原煤 70,60,50 列车。根据 3.1 和 3.2 中的公式及相关说明,计算得到列车的到达间隔为 48 h,3 个供应商各自的发车间隔为 144 h。

由 3.2 可得,第 1 阶段,3 个供应商各自以 144 h 的间隔申请发出 50 列车,此时列车的联动发车间隔 58,44,42 h。第 2 阶段,  $S_3$  无需提供原煤,  $S_1$  还需提供 20 列车原煤,  $S_2$  还需提供 10 列车原煤。则  $S_1, S_2$  各自以 96 h 的间隔申请发出 10 列车,此时列车的联动发车间隔为:58,38 h。第 3 阶段,  $S_2$  无需提供原煤,仅剩  $S_1$  的 10 列车原煤待送达,  $S_1$  以 48 h 的发车间隔提供剩余原煤。

经计算,该情况下收货方的平均库存为

$$\frac{1}{2} \times w_i^{\text{train}} = \frac{1}{2} \times 3\,000 = 1\,500 \text{ t}。$$

### 4.3 3 个供应商年供货量相同、每列车运量不同

假设 3 个供应商的供货量均为 18 万 t/a,直达列车运量分别为 3 000,4 000,5 000 t,则 3 个供应商分别需提供原煤 60,45,36 列车。

由 3.3 可得,第 1 阶段 3 个供应商各自以 194 h 的间隔申请发出 36 列车,此时列车的联动发车间隔为:58,60,76 h。第 2 阶段,  $S_3$  无需提供原煤,  $S_1$  还需提供 24 列车原煤,  $S_2$  还需提供 9 列车原煤。  $S_1, S_2$  各自以 112 h 的间隔申请发出 9 列车,此时列车联动发车间隔为:58,54 h。第 3 阶段,  $S_2$  无需提供原煤,仅剩  $S_1$  的 15 列车原煤待送达,  $S_1$  以 48 h 的发车间隔提供剩余原煤。

经计算,第 1 阶段收货方的平均库存为

$$\frac{\sum_{i=1}^2 \frac{1}{2} \times w_i^{\text{train}} \times \Delta t_{i,i+1}^{\text{arrive}} + \frac{1}{2} \times w_3^{\text{train}} \times \Delta t_{3,1}^{\text{arrive}}}{\sum_{i=1}^2 \Delta t_{i,i+1}^{\text{arrive}} + \Delta t_{3,1}^{\text{arrive}}} = 2\,083 \text{ t}。$$

第 2 阶段收货方的平均库存为

$$\frac{\frac{1}{2} \times w_1^{\text{train}} \times \Delta t_{1,2}^{\text{arrive}} + \frac{1}{2} \times w_2^{\text{train}} \times \Delta t_{2,1}^{\text{arrive}}}{\Delta t_{1,2}^{\text{arrive}} + \Delta t_{2,1}^{\text{arrive}}} = 1\,786 \text{ t}。$$

第 3 阶段收货方的平均库存为

$$\frac{1}{2} \times w_i^{\text{train}} = \frac{1}{2} \times 3\,000 = 1\,500 \text{ t}。$$

综合3个阶段,该情况下收货方的平均库存为1 790 t。

#### 4.4 3个供应商年供货量不同、每列车运量不同

假设3个供应商供货量分别为21,18,15万t/a,直达列车运量分别为3 000,4 000,5 000 t,则3个供应商分别需要提供原煤70,45,30列车。

在此条件下,各阶段的列车联动发车间隔与4.3相同,但每个阶段供应商申请发出的列车数量不同。第1阶段3个供应商均申请发出30列车,第2阶段 $S_1, S_2$ 各申请发出15列车,第3阶段 $S_1$ 申请发出25列车。由于平均库存量取决于列车的到达间隔和单列列车运量,该情况下收货方的平均库存和4.3的平均库存相同,为1 790 t。

#### 4.5 3个供应商以随机发车间隔申请发车

假设3个供应商供货量均为18万t/a,直达列车运量均为3 000 t,且各自以144 h的间隔发车。 $S_1$ 发出第1列车46后, $S_2$ 发出第1列车,接着48 h后, $S_3$ 发出第1列车,再过30 h后, $S_1$ 发出第2列车。由此,3个供应商完成对电厂F的供货任务。

图3给出了随机发车间隔下收货方库存的变化曲线。如果在36 h时, $S_1$ 送达原煤还未消耗完,而 $S_2$ 对应列车到达,使得子仓库 $C_2$ 货物堆积,库存成本增加。通过计算得到随机发车间隔下的收货方平均库存为1 980 t。

图4是3个周期内的多供应商随机发车间隔和联动发车间隔下的收货方库存变化对比图。由图可知,联动发车间隔的收货方平均库存明显更小。结合4.1中的计算结果可得,联动发车间隔下的收货方平均库存降低了24.2%,优化效果明显。

根据以上讨论,不难发现,无论供应商的供货量是否相同,相较于随机发车间隔的发车方式,联动发车间隔方式的收货方平均库存均有明显降低。同时,每列车运量的变化也不影响该结论。

此外,上述理论主要针对原煤等货量充足、需求地较多的大宗货物。在这种背景下,铁路运输组织方案对供应商库存水平的影响可以忽略不计。而对于原油等需求地较为单一的大宗货物,货主和供应商的库存都需要统筹考虑。

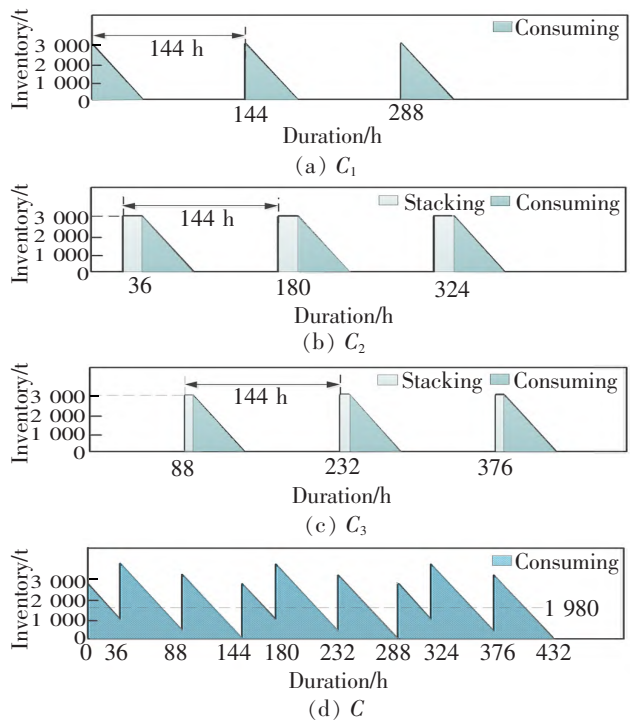


图3 随机发车间隔下的收货方库存水平变化曲线

Fig.3 The change curve of customer's inventory level under the random departure interval

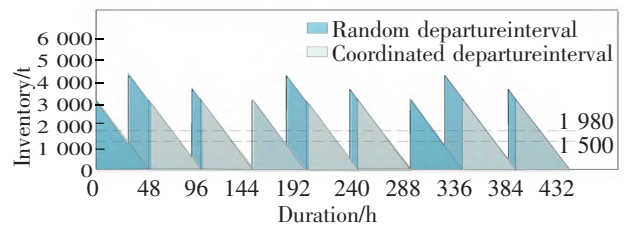


图4 随机发车间隔和联动发车间隔库存水平对比

Fig.4 Inventory level comparison between random and linkage departure interval

## 5 结论

1) 铁路运营部门应该加强与供应商、收货方的联系,与之积极沟通、紧密配合,从而制定最优的列车发车间隔方案,尽可能在保证收货方货物需求的同时,避免出现库存堆积,库存成本增加的情况。

2) 并且未来进一步研究可以将列车卸车时间的计算考虑在内,得到更优的多供应商列车联动发车间隔。

3) 从整个物流系统的层面来看,虽然本文只考虑了收货方和承运方的利益(收货方库存成本最低,铁路的运营成本最小),但是其原理和方法不难推广到车流组织方案对供应商库存也有影响的情景。

## 参考文献:

- [1] 刘朋鑫. 基于物流化的铁路大宗货物运输组织优化研究[D]. 成都:西南交通大学,2014.  
LIU P X. Research on the optimization of the railway bulk freight organization based on logistics[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2014.
- [2] 曹学明,林柏梁,严贺祥. 铁路直达运输条件下煤炭运输与库存一体化模型[J]. 北京交通大学学报,2006(6):27-31.  
CAO X M,LIN B L,YAN H X. An integrated coal transportation and inventory model under condition of rail direct transportation[J]. Journal of Beijing Jiaotong University,2006(6):27-31.
- [3] 纪丽君,林柏梁,王志美. 基于物流成本的装车地车流组织优化模型研究[J]. 铁道学报,2009,31(2):1-6.  
JI L J,LIN B L,WANG Z M. Study on the optimization of car flow organization for loading area based on logistics cost [J]. Journal of the China Railway Society,2009,31(2):1-6.
- [4] 孔亮. 基于库存成本的装车地直达列车开行方案优化研究[J]. 交通科技与经济,2017,19(6):47-51.  
KONG L. Research on the optimization of direct freight train schemes for loading area based on inventory costs[J]. Technology & Economy in Areas of Communications, 2017, 19(6):47-51.
- [5] 张燕. 基于电厂库存成本的铁路装车地煤炭列车组织优化模型研究[D]. 北京:北京交通大学,2012.  
ZHANG Y. Research on the optimization of coal train organization for loading area based on power plant inventory cost[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University,2012.
- [6] 陈雷,林柏梁,张锦,等. 考虑库存费用的电厂煤炭铁路配送方案优化研究[J]. 铁道学报,2013,35(11):7-13.  
CHEN L,LIN B L,ZHANG J,et al. Study on optimization of railway distribution of power plant coal including inventory costs[J]. Journal of the China Railway Society,2013,35(11):7-13.
- [7] 杨帆,赵伊楠,范丁元,等. 基于库存理论的铁路始发直达运输产品设计[J]. 铁道运输与经济,2021,43(2):103-109.  
YANG F,ZHAO Y N,FAN D Y,et al. Transportation product design of originating direct train based on inventory theory[J]. Railway Transport and Economy, 2021,43(2):103-109.
- [8] 游艳雯,秦胜,张楷唯,等. 基于企业合理库存管理的列车运行计划优化调整[J]. 铁道货运,2019,37(3):23-27.  
YOU Y W,QIN S,ZHANG K W,et al. A study on a model to improve train operation plans based on rational inventory management[J]. Railway Freight Transport,2019,37(3):23-27.
- [9] 樊亚夫. 考虑大客户企业需求的列车运行计划优化编制模型[D]. 北京:北京交通大学,2020.  
FAN Y F. Model for optimizing the train operation plan considering consignor enterprise's demand[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University,2020.
- [10] CHANDRA P,FISHER M L. Coordination of production and distribution planning[J]. European Journal of Operational Research,1994,72(3):503-517.
- [11] PRYOR K. Scenarios:the trade off between transportation and inventory costs in point-to-point truckload[D]. Michigan: Industrial and Operations Engineering the University of Michigan,1999.
- [12] 裴英梅,叶春明,左翠红,等. GRASP 在多对一配送网络中 ITIO 问题上的应用[J]. 工业工程,2013,16(2):48-52.  
PEI Y M,YE C M,ZUO C H,et al. Application of GRASP to ITIO problem in many-to-one distribution network[J]. Industrial Engineering Journal,2013,16(2):48-52.



第一作者:林柏梁(1961—),男,二级教授,博士,博士生导师,国务院政府特殊津贴获得者,荣获第十二届詹天佑铁道科学技术奖成就奖。研究方向为运输与物流系统优化。E-mail: bllin@bjtu.edu.cn。

(责任编辑:刘棉玲)