# 双并行批处理机环境下生产与配送联合调度

李潇，郑瑞平
济南大学 管理科学与工程学院，山东 济南 250002
DOI:10.61369/ASDS.2026090001

**摘　　要：** 针对制造企业中生产加工与配送运输之间存在的协同优化问题，研究双并行批处理环境下生产—配送联合调度问题。考虑工件尺寸、设备容量以及配送容量等实际约束，将工件分配至两台并行批处理设备进行加工，并在加工完成后统一组织配送。以系统总成本最小为目标，建立双并行批处理生产—配送联合调度混合整数规划模型。利用 CPLEX Java API 对模型进行求解，并通过实例分析验证模型有效性。进一步对配送成本灵敏度分析，研究不同成本下的调度规律。结果表明：所建立模型具有较好的可行性与应用价值；通过统筹生产与配送两阶段决策，有助于降低系统整体运营成本，提高企业物流运作效率。

**关 键 词：** 联合调度；并行机；批处理；分批配送

## Joint Scheduling of Production and Distribution under the Environment of Double Parallel Batch Machines

Li Xiao, Zheng Ruiping
School of Management Science and Engineering, University of Jinan, Jinan, Shandong 250002

**Abstract:** To address the coordination optimization problem between production processing and distribution operations in manufacturing enterprises, this paper investigates the integrated production–distribution scheduling problem in a dual parallel batch–processing environment. Considering practical constraints such as job sizes, machine capacities, and vehicle capacities, jobs are assigned to two parallel batch–processing machines for production and subsequently organized for distribution after completion. With the objective of minimizing the total system cost, a mixed–integer programming model for integrated production and distribution scheduling is developed. The model is solved using the CPLEX Java API, and a numerical example is conducted to verify its effectiveness. Furthermore, a sensitivity analysis on distribution cost is performed to explore scheduling behaviors under different cost scenarios. The results demonstrate that the proposed model is both feasible and effective. By jointly optimizing production and distribution decisions, the model can reduce overall operational costs and improve logistics performance in manufacturing enterprises.

**Keywords:** integrated scheduling; parallel machines; batch processing; batch delivery

## 引言

生产与配送作为制造企业供应链运作中的两个关键环节，其决策过程往往相互影响。然而在实际管理中，生产排程与配送计划通常由不同部门分别制定，缺乏统一协调，容易导致产品完工后等待发运、车辆利用率偏低以及运输成本增加等问题[1]。随着企业对整体运营效率要求的不断提高，生产－配送联合调度（Integrated Production and Distribution Scheduling Problem，IPDSP）逐渐成为供应链协同优化领域的重要研究方向。近年来，国内外学者围绕生产与配送协同决策开展了大量研究，并在模型构建与求解方法等方面取得了较为丰富的成果[2]。

现有关于集成生产与配送调度问题（IPDSP）的研究，多数建立在传统生产模式的框架之下，其核心特征在于，一台机器在任一给定时刻仅能加工一个单独的作业或一道单一的工序[3,4]。然而，在诸如集成电路的烧机测试、工业陶瓷的烧制、机械电镀等特定生产场景中，作业的加工过程并非遵循上述传统模式。取而代之的是一种称为并行批加工（parallel batching, p-batch）的模式[5]。

在 p-batch 加工模式下，同一处理批次的作业具有同步启停约束，其中耗时最长的工件通常决定了该批次加工的时间[6]。在物流配送环节，分批配送策略通过动态集货的方式提高车辆装载率，从而降低单位运输成本[7,8]。现有研究多数只围绕单机环境或简单流水车间

作者简介：
李潇（2000.04-），汉族，山东菏泽人，硕士研究生在读，研究方向为企业物流与供应链；
郑瑞平（2002.09-），汉族，山东临清人，硕士研究生在读，研究方向为企业物流与供应链。

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License. 

展开，但实际加工环境中，更加常见的是并行设备[9,10]。其中，双并行批处理机是一类具有代表性的生产配置，能够较好反映实际生产过程中的资源协调问题[11]。

相比单一流水线系统，双机环境需要考虑的更多，一方面不仅需要考虑工件在两台设备之间的分配，同时需要协调不同设备上的批次划分与加工顺序[12,13]。并且，涉及到双系统决策，这会进一步增加批次组织难度，因此导致双并行批处理环境下的协同调度问题复杂度明显提高[14,15]。

针对上面提到的这些问题，本文把双并行批处理环境下的生产－配送联合调度问题作为研究对象，在考虑机器容量和车辆运力约束的基础上，建立起一个以系统总成本最小为目标的混合整数规划模型，该模型同时兼顾了机器负荷成本与车辆启用成本这两项。求解方面，采用 CPLEX 求解器来完成，并通过一系列数值实验去分析订单规模、配送成本权重这些参数对调度结果所带来的影响，目的是要揭示系统内在的规律与决策机制，为企业在生产配送一体化环节的决策提供优化支撑。

## 一、问题描述与模型构建

### （一）问题描述

本文研究对象为双并行批处理生产—配送联合调度系统。系统包含两台并行批处理设备以及一个配送阶段。设存在若干待加工工件，每个工件均具有对应加工时间与工件尺寸。所有工件首先需要被分配至两台设备中的一台进行批处理加工。同一批次中的工件可同时开始加工，而批次加工时间由其中加工时间最长的工件决定。由于设备容量有限，每个生产批次中工件尺寸总和不能超过设备容量上限。加工完成后，系统进一步根据配送容量对工件进行统一配送。配送阶段同样存在容量约束。

本文目标是在满足设备容量与配送容量约束条件下，合理安排工件分配、批次划分以及配送组织方式，从而实现系统总成本最小化。

### （二）模型假设

为保证模型能够较好反映实际制造场景，同时降低模型求解复杂度，本文在模型构建过程中作如下基本假设：

（1）所有工件在零时刻均可开始加工，即不存在订单动态到达情况；

（2）每个工件仅允许被分配至一台设备进行加工，且不可拆分；

（3）同一生产批次中的所有工件同时开始加工；

（4）同一设备在同一时刻仅能加工一个批次；

（5）配送阶段采用统一配送模式，不考虑车辆路径问题；

（6）配送车辆容量固定，且不同车辆容量一致；

（7）系统目标主要关注加工完成时间与配送批次成本，不考虑人工成本与库存持有成本；

上述假设能够在保证模型合理性的同时，突出本文研究重点，即生产与配送阶段之间的协同优化关系。

### （三）符号定义

| | |
|---|---|
| J={1,2,...,n} | 作业集合，n 为作业总数 |
| j | 作业索引 |
| M={1,2} | 并行设备集合 |
| m | 设备索引 |
| K={1,2,...,n} | 生产批次集合 |
| k | 生产批次索引 |
| L={1,2,...,n} | 配送批次集合 |
| l | 配送批次索引 |
| $p_j$ | 工件 j 的加工时间 |
| $s_j$ | 工件 j 的体积（尺寸） |
| $Q_1$,$Q_2$ | 生产设备容量，配送车辆容量 |
| λ | 加工时间成本权重 |
| μ | 配送批次成本权重 |
| n | 工件总数量 |
| $X_{1jk}$ | 若工件 j 被分配至设备 1 的批次 k，则取 1，否则取 0 |
| $X_{2jk}$ | 若工件 j 被分配至设备 2 的批次 (k)，则取 1，否则取 0 |
| $Y_{1k}$ | 设备 1 批次 k 是否启用 |
| $Y_{2k}$ | 设备 2 批次 k 是否启用 |
| $T_{1k}$ | 设备 1 批次 k) 的加工时间 |
| $T_{2k}$ | 设备 2 批次 k) 的加工时间 |
| $W_{kl}$ | 若生产批次 k 分配至配送批次 l，则取 1，否则取 0 |
| $Z_l$ | 配送批次 l 是否启用 |
| $S_k$ | 生产批次 k 的总尺寸 |
| TC | 系统总成本 |
| $TC_p$ | 生产阶段成本 |
| $TC_d$ | 配送阶段成本 |

### （四）数学模型

在上述问题描述与模型假设基础上，本文建立双并行批处理生产—配送联合调度混合整数规划模型。

系统总成本由两部分叠加构成：一是两台设备上全部批次加工时长之和，以权重 λ 折算为时间成本；二是配送阶段启用的批次数，以权重 μ 折算为运输成本。前者反映在制品占压与设备使用强度，后者反映车辆调度规模与运营支出。两项权重的相对大小代表企业不同的成本偏好，这一设计使模型具有较好的参数适应性。

1. 目标函数

$$\min TC=\lambda\left(\sum_k T_{1k}+\sum_k T_{2k}\right)+\mu\sum_l Z_l \quad (1)$$

$$\sum_k X_{1jk}+\sum_k X_{2jk}=1,\forall j\in\{1,2,...,n\} \quad (2)$$

$$\sum_j s_j X_{1jk}\le Q_1 Y_{1k},\ \forall j,k\in\{1,2,...,n\} \quad (3)$$

$$\sum_j s_j X_{2jk}\le Q_1 Y_{2k},\ \forall j,k\in\{1,2,...,n\} \quad (4)$$

$$\sum_j X_{1jk}\ge Y_{1k}\ \forall j,k\in\{1,2,...,n\} \quad (5)$$

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

$$\sum_{j} X_{2jk} \geq Y_{2k} \quad \forall j,k \in \{1,2,...,n\} \qquad (6)$$

$$\sum_{j} X_{1jk} \leq Y_{1k}, \quad \forall j,k \in \{1,2,...,n\} \qquad (7)$$

$$\sum_{j} X_{2jk} \leq Y_{2k} \quad \forall j,k \in \{1,2,...,n\} \qquad (8)$$

$$T_{1k} \geq p_j X_{1jk} \forall j,k \in \{1,2,...,n\} \qquad (9)$$

$$T_{2k} \geq p_j X_{2jk}, \quad \forall j,k \in \{1,2,...,n\} \qquad (10)$$

$$S_k = \sum_{j} s_j (X_{1jk} + X_{2jk}) \quad \forall j,k \in \{1,2,...,n\} \qquad (11)$$

$$\sum_{k} S_k W_{kl} \leq Q_2 Z_l, \quad \forall k,l \in \{1,2,...,n\} \qquad (12)$$

$$\sum_{l} W_{kl} = Y_{1k} + Y_{2k}, \quad \forall k,l \in \{1,2,...,n\} \qquad (13)$$

$$\sum_{k} W_{kl} \geq Z_l, \quad \forall k,l \in \{1,2,...,n\} \qquad (14)$$

$$X_{1jk}, X_{2jk}, Y_{1k}, Y_{2k}, W_{kl}, Z_l \in \{0,1\} \qquad (15)$$

目标函数（1）是运营总成本的最小化函数，主要由加工和运输成本组成。约束（2）限定了每个作业只分配到某台设备的一个内部批次。保证了作业不被计入多个批次，导致加工时长与容量消耗均失真。约束（3）（4）分别对设备1和设备2施加设备容量限制。同时限定了工件进入空批次的可能。约束（5）（6）保证了加工批次逻辑的完整性：约束（7）（8）保证已启用批次不为空，确保工件只能进入已启用批次。两组约束共同作用，若有一个缺失，或可能导致解中存在”空批”或”悬空工件”等无效结构。约束（9）（10）是对批次 k 内的每个工件 j，均要求 $T_{1k}$（或 $T_{2k}$）不低于 $p_j$，故在最优解中，$T_k$ 将恰好取到批内最大加工时间，避免了直接引入最大值算子带来的非线性问题。约束（11）定义了辅助变量 $S_k$ 为批次 k 的工件尺寸总量；约束（12）约束每个配送批次的累计装载量不超过 $Q_2$，对配送增加了容量限制。

约束（13）是联结生产与配送两阶段的桥梁约束：保证了已启用的生产批次仅能归属一个配送批次，未启用批次不产生配送需求。约束（14）保证了已启用的配送批次至少包含一个生产批次，防止空车。约束（15）规定各决策变量的类型与取值域。

## 二、实例求解与灵敏度分析

本文实例源于一家为汽车维修行业提供电镀服务的 P-batch 模式企业。该企业亟需解决电镀批处理调度与分批配送的协同优化问题，此场景是构建与验证本文 IOPDSP_CT 模型的直接对象。

**（一）参数设置**

案例直接取自某电镀服务企业生产调度与配送的实际应用场景。这家汽车电镀服务企业采用的是并行批处理生产模式，其电镀制品全部需要配送到同一经销商，这就要求企业必须把批处理调度和分批配送协同起来进行优化，从而让运营总成本达到最小。在这一生产过程中，待加工的工件共有十二个，每个工件都带有一个对应的加工时间和工件尺寸属性，这些工件的基础数据可见表1。

表1：工件基础数据

| 编号 | p/h | s/m3 |
|---|---|---|
| J1 | 5.5 | 8 |
| J2 | 4 | 6 |
| J3 | 8.5 | 11 |
| J4 | 7 | 9 |
| J5 | 4.5 | 7 |
| J6 | 6 | 8 |
| J7 | 5 | 7 |
| J8 | 9 | 12 |
| J9 | 7.5 | 10 |
| J10 | 6.5 | 8 |
| J11 | 8 | 9 |
| J12 | 4 | 6 |

根据实地考察，系统参数如下：

$Q_1 = 25m^3$；$Q_2 = 35m^3$；$\lambda = PW \cdot EC$；EC=0.5元 / （kWh）$\lambda$=12.5元 / 小时；PW=25kW；$\mu$ = 500元。

**（二）求解结果与分析**

该算例采用 CPLEX Java API 求解，首先，通过 CPLEX 将数学模型进行代码实现；对所建立模型进行求解，系统在38.4s 内获得最优调度方案。目标函数值（即运营总成本）达到1925元。结果表明，模型能够在满足设备容量与配送容量约束条件下，实现生产阶段与配送阶段协同优化。

在模型运行过程中，它会根据各工件的加工时间与尺寸自动完成工件分配。由于不同工件在这两项属性上存在较明显的差异，系统需要在“设备负载平衡”与“容量利用率”之间做出权衡。有可能碰到这样一类情形：加工时间偏长、尺寸稍小的工件，适合跟中等加工时间的工件搭配成一个批次，而大尺寸工件则容易受到设备容量约束的限制，往往需要形成相对独立的批次。所以，生产批次的划分本质上是一个典型的组合优化问题。

通过求解结果可知，两台设备的加工负载相对均衡。对于部分加工时间较长的作业，模型会优先将其分配，保证加工时间的作业不会集中投放到同一设备上，以避免某一台设备负载过高，同时也保证系统等待时间不会过长。另外，在满足容量约束的前提下，尽可能的提高批次容量利用率，因此生产批次数量也可以进一步的控制。在配送环节，系统进一步的根据配送容量约束对工件进行重新整合。因为配送批次数量会直接影响运输成本，所以模型会尽可能提高车辆载重率，进一步减少配送次数。

为更直观的说明模型运行结果，本文分别对生产端批次划分结果与配送端组织结果进行分析。利用 CPLEX 求解器对模型进行迭代求解，系统在38.4s 内获得最优调度方案。该模型根据工件加工时间与尺寸差异自动形成生产批次，最终共形成5个加工批次，分别分配至两台并行设备，具体见表2。

表2：生产端调度结果

| 批次 | 设备 | 工件组合 | 总尺寸 /m³ |
|---|---|---|---|
| $B_{1,1}$ | M1 | $J_3, J_8$ | 17.5 |
| $B_{1,2}$ | M1 | $J_4, J_6, J_{10}$ | 19.5 |
| $B_{2,1}$ | M2 | $J_2, J_5$ | 8.5 |
| $B_{2,2}$ | M2 | $J_1, J_7, J_{12}$ | 14.5 |
| $B_{2,3}$ | M2 | $J_9, J_{11}$ | 15.5 |

由表2可知，组成的5个生产批次均满足设备容量约束要求。可见，该流水线可以根据工件大小不同，自动分配作业，另其组

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License. 

成较为紧凑的批次组合，同时兼顾了不同批次之间的加工时间平衡。为了提高设备利用率，降低系统整体的等待时间，加工时间较长的工件通常会与尺寸相对较小的工件共同组成批次。

考虑配送容量 Q2 = 35及配送成本权重 μ = 500后，系统进一步对生产批次进行配送整合。

最终形成3个配送批次，详见表3

表3：配送端组织结果

| 配送批次 | 包含工件 | 总尺寸 /m³ | 车辆利用率 |
|---|---|---|---|
| L1 | $J_3$, $J_8$ | 17.5 | 50% |
| L2 | $J_2$, $J_5$, $J_4$, $J_6$, $J_{10}$ | 28 | 80.0% |
| L3 | $J_1$,$J_7$, $J_9$, $J_{11}$, $J_{12}$ | 30 | 85.7% |

L3批次载重30 m³，利用率85.7%，接近满载；L1批次载重17.5 m³，L2批次批次载重28，就加工总时长而言，5个批次合计34h。代入目标函数：

$$TC = 0.5 \times 25 \times 34 + 500 \times 3 = 1925 \text{ 元}$$

上述结果中，配送成本1500元占总成本的77.9%，加工时间成本仅占22.1%，这与 μ = 500的参数设置直接相关——在当前权重配置下，系统调度逻辑的核心驱动力在于压缩配送批次数量，而非压缩加工时长。这一点在后续的权重灵敏度分析中将得到进一步验证。

**（三）配送容量协同分析**

为进一步分析配送阶段对生产阶段的影响，本研究将配送车辆车型作为关键灵敏度因素进行研究，并通过选用第三方车辆的不同车型，调整车辆容量 $Q_2$来模拟不同车型条件下的配送能力变化，车辆单次配送成本依据当地物流市场车型租赁价格进行设定。在实际生产场景中，企业采用双并行批处理设备进行加工，订单规模与前文实例基本保持一致，因此实验结果能够较好反映实际运行情况。

实验中，固定加工时间权重 λ=12.5以及配送成本权重 μ=500，令配送容量 Q2分别取 23、35、45、55、65、75。实验结果如表4所示。

表4：不同配送容量下系统运行结果

| 车型编号 | Q2/m³ | 生产批次数 | 配送批次数 | 车辆单次配送成本 / 元 | 总成本 |
|---|---|---|---|---|---|
| $v_1$ | 25 | 6 | 5 | 450 | 2668.8 |
| $v_2$ | 35 | 5 | 3 | 520 | 1925 |
| $v_3$ | 45 | 4 | 3 | 550 | 1868.8 |
| $v_4$ | 55 | 5 | 2 | 590 | 1598.8 |
| $v_5$ | 65 | 5 | 2 | 630 | 1678.8 |
| $v_6$ | 75 | 5 | 2 | 680 | 1778.8 |

由表4可知。选用 $v_1$车型成本最高，这是因为车辆载荷量较小，需要多次启用车辆运输才能达成运输任务。选用 $V_4$时成本最低，这是因为随着载荷量增加，只需要两辆自营车辆就可完成配送，同时没有过多的浪费运力，性价比最优。在配送车荷载量由25 m³ 扩大至55 m³ 的区间内，当 $Q_2$体积整体增大，系统总成本也是降低的趋势，配送批次数由5降至2，这说明适当的调换更高荷载量的车型的确会节省成本。但在配送车荷载量由55 m³ 扩大至75 m³ 的区间，总成本却直线上升。这说明配送容量并非越大越好——当批次数压缩至系统可行下限后，进一步扩容反而会提高总成本，这也是企业值得关注的一点。

另外还有值得关注的一点，配送容量对生产批次也有很大的影响。当配送容量较小，受到单次荷载容量的制约，在生产端需要将工件划分成更小的生产批。

## 三、结论

针对双并行批处理环境下生产与配送协同优化问题，本文构建了以系统总成本最小化为目标的生产—配送联合调度混合整数规划模型，并利用 CPLEX 求解器进行了实例验证。研究结果表明：

（1）所建立模型能够在满足设备容量与配送容量约束的条件下，实现工件分配、生产批次划分及配送批次组织的协同优化，验证了模型的可行性与有效性。

（2）在双并行批处理环境下，模型能够根据工件加工时间和尺寸特征合理组织生产批次，实现设备负载均衡，并提高设备容量利用率。

（3）配送容量对系统运行具有显著影响。随着配送容量的增加，配送批次数量逐渐减少，车辆载重率不断提高，系统总成本呈现先下降后趋于稳定的变化趋势，表明生产与配送之间存在明显的协同效应。

*参考文献*


[1] 程八一，李明 . 面向生产 – 库存 – 配送的联合调度问题及蚁群优化算法 [J]. 机械工程学报 ,2015,51(12):202-212.

[2] 罗梦文，王恺 . 考虑车辆路径的多工厂生产与配送联合调度 [J]. 运筹与管理，2024,33(11):51-57.

[3] 刘蓉，周林，王朝，等 . 带并行批处理机的柔性作业车间调度问题研究 [J]. 武汉理工大学学报 ( 信息与管理工程版 ),2020,42(1):36-43.

[4] 程八一，黄小曼，杨艳艳，等 . 差异分批模式下的联合成本优化问题及算法 [J]. 管理科学学报 ,2016,19(8):102-112.

[5]Potts C N, Kovalyov M Y. Scheduling with batching: a review[J].European Journal of Operational Research,2000,120(2):228-249.

[6]Boysen N, Fliedner M, Scholl A. Scheduling with batching: a survey[J].International Journal of Production Economics,2009,120(1):1-13.

[7]Pinedo M. Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems[M].New York: Springer,2016.

[8]JOO C M, KIM B S. Rule-based meta-heuristics for integrated scheduling of unrelated parallel machines, batches, and heterogeneous delivery trucks[J].Applied Soft Computing, 2017,53:457-476.

[9]Marinoni T.,Montagna J. M.,Fumero Y.A New Integrated Approach for Solving Batching, Production Scheduling and Delivery Problems in Single-Stage Batch Environments[J].Computers & Chemical Engineering,2024,188:108753.

[10]Chen Z L.Integrated production and distribution scheduling: a review[J].Annals of Operations Research,2010,181(1):463-493.

[11]Geurtsen M,Adan J. Akçay A.Integrated Maintenance and Production Scheduling for Unrelated Parallel Machines with Setup Times[J].Flexible Services and Manufacturing Journal,2024,36:1046 - 1079.

[12]Allahverdi A.A survey of scheduling problems with setup times or costs[J].European Journal of Operational Research,2015,246(2):345-378.

[13]Liang, T, Zhou, L. & Jiang, Z.Integrated scheduling of production and material delivery for the intelligent manufacturing system[J].International Journal of Production Research,2025, 63(3), 882 - 903.

[14]Chen Z L.Online Integrated Production and Distribution Scheduling: Review and Extensions[J].INFORMS Journal on Computing,2024,37(2):360 - 380.

[15]Ullrich C A.Integrated machine scheduling and vehicle routing with time windows[J].European Journal of Operational Research,2013,227(1):152-165.


 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.