

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2518027

# 机器人多工位搬运锂电池的混合元启发式调度算法研究

倪栋<sup>1,2</sup>

(1.厦门市产品质量监督检验院 厦门 361004;2.国家市场监督管理总局重点实验室  
(高比能新能源电池安全检测与评价技术) 厦门 361004)

**摘要:** 针对锂电池加工排序工艺与机器人多工位搬运调度的有效协同问题,本文提出了一种混合元启发式调度算法。该算法以最小化周期时间为优化目标函数,构建多工位机器人搬运的元启发式混合整数线性规划模型,通过引入生产周期时间的有效约束,对模型求解性能进行初步优化。为解决锂电池种类数增加造成的计算时间急剧增长问题,设计了一种遗传算法与禁忌搜索融合的混合元启发式算法,平衡搜索深度与计算效率,实现短时间内获取近似最优解方法。通过仿真与应用实验表明:与传统混合整数线性规划调度算法相比,本文所提算法求解的时间效率最高可提升57.92%,有效提升了机器人多工位搬运的调度效率。

**关键词:** 锂电池;搬运机器人;调度算法;混合元启发式

**中图分类号:** TP391;TN-9 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4

## Study of hybrid meta-heuristic scheduling algorithms for robotic multi-station handling of lithium batteries

Ni Dong<sup>1,2</sup>

(1. Xiamen Products Quality Supervision & Inspection Institute, Xiamen 361004, China;  
2. Key Laboratory of Safety Detection and Evaluation Technology of New Energy Batteries with High Specific Energy, State Administration for Market Regulation, Xiamen 361004, China)

**Abstract:** A hybrid meta-heuristic scheduling algorithm is proposed for the effective synergy between lithium battery processing sequencing process and robot multi-station handling scheduling. The algorithm minimises the cycle time as the optimisation objective function, constructs a meta-heuristic mixed-integer linear programming model for multi-station robot handling, and initially optimises the performance of the model by introducing effective constraints on the production cycle time. In order to solve the problem of the sharp increase in computing time caused by the increase in the number of lithium battery types, a hybrid meta-heuristic algorithm fused with genetic algorithm and tabu search is designed, which balances the depth of the search with the efficiency of the computation, and achieves the method of obtaining the approximate optimal solution in a short time. Simulation and application experiments show that compared with the traditional mixed integer linear programming scheduling algorithm, the proposed algorithm can improve the time efficiency of the solution by up to 57.92%, which effectively improves the scheduling efficiency of the multi-station robot handling.

**Keywords:** lithium batteries; handling robots; scheduling algorithms; hybrid meta-heuristics

## 0 引言

物料搬运机器人已在新能源集成制造单元中得到广泛部署,显著提高了生产线的自动化水平。在锂电池的加工流程中,搬运机器人需要在滑轨上精确运行,负责将不同种

类的电池按照特定的工艺顺序搬运至多台加工机器。这一过程不仅涉及电池加工排序工艺的精细规划,还涵盖了机器人多工位搬运调度的协同决策,构成了一个复杂工业调度问题<sup>[1-5]</sup>。因此,研究机器人多工位搬运锂电池的调度问题,对于提高新能源集成制造系统的智能化程度具有重要

意义。

传统的机器人制造单元调度问题主要集中在单一类型加工对象,只需要对机器人的移动序列展开研究<sup>[6-7]</sup>;而锂电池加工的机器人制造单元中,由于电池种类多样且每种电池在不同加工机器上的处理时间各异,搬运机器人需要在滑轨上完成多工位精确搬运任务。因此,多工位搬运机器人优化调度问题需要同时考虑多种类的锂电池加工序列和机器人多工位最优移动序列因素。

针对这类多约束组合的复杂协同问题<sup>[8-11]</sup>,许多专家学者开展了相关研究工作。例如,Paul 等<sup>[12]</sup>和 Elmi 等<sup>[13]</sup>同时对工件加工序列和机器人移动序列进行数学建模,提出混合整数线性规划模型(mixed-integer linear programming, MILP)。这些模型能够充分考虑不同种类工件在不同机器上的处理时间差异,以及对应的机器人移动约束,实现了二者的协同决策。但这类研究只局限于工件种类数及加工机器少的小规模场景中,一旦问题规模变大,问题解的个数将呈指数增长,需要花费大量的时间来寻求模型精确的解。为此,一些学者开始研究近似算法,通过搜索近似的最优解来缩短求解时间<sup>[14-15]</sup>。黄飘等<sup>[16]</sup>提出一种改进遗传算法(genetic algorithm, GA),并设计了相适应的交叉、变异策略,避免迭代过程中非法解的产生,提升了算法寻优能力;熊福力等<sup>[17]</sup>则提出一种结合动态邻域提取启发式算法和禁忌搜索算法(tabu search, TS)的方法,提高初始解质量,节省寻优时间。虽然这一类研究一定程度上提升了求解效率,但仍存在计算资源消耗的问题,难以简单应用于实际场景。

本文结合现有研究结果,综合考虑多种类电池的加工工艺、移动机器人工位等约束,构建机器人搬运的元启发式混合整数线性规划。为提升模型在大规模问题下的求解能力,引入电池生产周期时间有效约束,显著减少模型的求解空间;利用遗传算法早收敛特性和禁忌搜索法的自适应优点,设计混合元启发式算法以较短时间得到近似最优解,提升调度过程的时间效率,为锂电池加工场景下的机器人制造单元提供高效的调度方案。

## 1 机器人多工位搬运序列建模与优化

基于实际的机器人多工位搬运场景,提出多工位搬运调度问题的正式定义,并建立机器人序列与锂电池加工序列的混合整数线性规划模型。针对模型求解效率,引入电池生产周期时间约束,从而有效缩短求解时间。

### 1.1 锂电池加工排序工艺描述

典型锂电池加工场景下的机器人制造单元由  $m$  台加工机器  $M_1, M_2, M_3, \dots, M_m$ 、一台输入设备  $M_0$ 、一台输出设备  $M_{m+1}$  和一台搬运机器人组成,如图 1 所示。

不同种类的锂电池组成最小工件集(minimal part set, MPS)被搬运。MPS 定义为每个加工周期电池数量之间的固定比例,假定需要加工 200 个 A 型电池,100 个 B 型电池

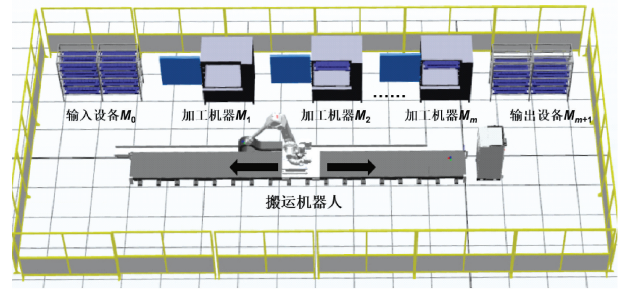


图 1 锂电池加工场景

Fig. 1 Lithium battery processing scene diagram

和 300 个 C 型电池,则 MPS 为 2 个 A 型、1 个 B 型和 3 个 C 型电池,重复加工 100 次 MPS 即可完成加工任务。为简化生产管理,不同种类的锂电池预先放置在输入设备  $M_0$  上,并保持可加工状态;移动机器人以 MPS 循环执行搬运任务,一次只搬运一个锂电池到加工机器;每台加工机器同一时间内只处理一个锂电池,加工时长由电池的种类决定;相邻的加工机器之间距离保持一致,中间无缓冲区域,电池在加工机器上等待时间无限制;机器人的移动时间与被搬运锂电池无关,在任意两个加工机器之间的移动时间为一个特定的常数;所有锂电池遍历完成每个工位的流水线加工后将被放置在输出设备  $M_{m+1}$  上。

在该加工过程中,锂电池以 MPS 被循环加工,而机器人多工位移动顺序将根据电池加工顺序动态调整。以 3 台加工设备和 3 种电池的搬运场景为例:假设 3 种电池加工顺序为  $a \rightarrow b \rightarrow c$ ,即电池移动序列为  $\sigma_{battery} = \{a, b, c\}$ ,电池在 3 台加工设备上的加工时间如表 1 所示。机器人装卸时间设为 1 min,在任意两个加工机器之间的移动时间设为 2 min。该场景下的搬运甘特图如图 2 所示。

表 1 加工时间表

设备	电池类型		
	$a$	$b$	$c$
$M_1$	10	14	8
$M_2$	8	6	12
$M_3$	12	10	15

这种搬运方式能够有效减少机器人的空闲时间,同时具备较高的灵活性,适用于多电池类型且生产需求多样化的场景。然而随着电池种类的增加,计算复杂度和求解难度也随之增大。因此,本文旨在构建相关数学模型,并借助启发式算法显著提升求解效率。

### 1.2 机器人搬运序列混合整数线性规划建模

构建机器人多工位搬运的混合整数线性规划模型,其目标函数是最小化生产周期时间,即相邻两个最小工件集中第一个电池进入机器人制造单元的时间间隔,可表示为:

$$\text{Minimize } T_{cycle} \quad (1)$$

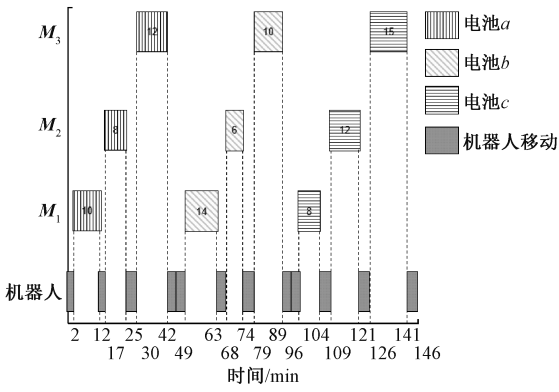


图 2 搬运甘特图

Fig. 2 Handling Gantt chart

MPS 由  $n$  个多类型的电池  $N = \{1, 2, \dots, n\}$  组成。由于移动机器人一次只搬运一个电池,定义机器人的活动集合  $A$ , 每个活动  $A_i$  都包括 3 个动作: 1) 将电池从设备  $M_i$  卸载; 2) 从设备  $M_i$  移动到  $M_{i+1}$ ; 3) 将电池装载至设备  $M_{i+1}$  上。机器人制造单元中的所有设备  $M = \{M_1, M_2, M_3, \dots, M_m\}$  一共包含  $m+1$  个加工工位, 因此对应了  $m$  类机器人活动, 即  $A = \{0, 1, \dots, m\}$ 。完整搬运活动中, 机器人重复执行  $n$  次相同的一单位周期, 将会存在  $n(m+1)$  个搬运工位, 用集合  $P$  表示所有工位。机器人在每个工位  $k \in P$  的活动开始时间为  $T_k$ 。此外, 电池的种类不同, 在不同加工设备上的处理时间也有差异, 集合  $p_{ij}$  用于表示电池  $j \in N$  在对应设备  $i \in M$  上加工的时间。

模型的决策变量主要包括以下几部分:

$x_{ilk} \in \{0, 1\}$  当机器人活动  $A_i$  第  $l$  次重复分配到在  $k$  工位时,  $x_{ilk} = 1$ 。其中,  $l \in N, k \in P$ 。

$y_{ilj} \in \{0, 1\}$  当机器人活动  $A_i$  第  $l$  次重复属于电池  $j$  时,  $y_{ilj} = 1$ 。其中,  $l \in N, j \in N$ 。

辅助变量  $z_{ilkj} = x_{ilk} \cdot y_{ilj}, z_{ilk} \in \{0, 1\}$ , 当机器人活动  $A_i$  第  $l$  次重复分配到在  $k$  工位且属于电池  $j$  时,  $z_{ilkj} = 1$ 。其中,  $l \in N, k \in P, j \in N$ 。

基于上述决策变量设定模型的约束条件, 具体可从以下几方面进行表述:

1) 分配约束

机器人在每个工位只进行相应类型的活动。电池的加工需要符合对应的机器人活动, 如式(2)、(3)所示。

$$\sum_{k \in P} x_{ilk} = 1 \quad \forall i \in A, \forall l \in N \quad \sum_{l \in N} \sum_{i \in A} x_{ilk} = 1 \quad \forall k \in P \quad (2)$$

$$\sum_{l \in N} y_{ilj} = 1 \quad \forall i \in A, \forall j \in N \quad \sum_{j \in N} y_{ilj} = 1 \quad \forall i \in A, \forall l \in N \quad (3)$$

2) 时间约束

机器人活动  $A_i$  在工位  $k$  时, 若其前序活动  $A_{i-1}$  在工位  $h < k$ , 则必须等待前序活动完成; 若其前序活动  $A_{i-1}$  在工位  $h > k$ , 则需考虑周期时间, 如式(4)~(6)所示, 其中  $H$

为极大的正数;  $\alpha$  为搬运机器人装、卸电池的时间常数;  $\beta$  为搬运机器人在相邻工位间的移动时间常数。

$$T_{k+1} \geq T_k + 2\alpha + \beta + \beta \cdot |i - j| \quad (4)$$

$$T_k \geq \sum_{l \in N} \sum_{j \in N} z_{ilkj} \cdot p_{ij} + H(\sum_{l \in N} x_{ilk} + \sum_{l \in N} x_{(i-1)lh} - 2) + T_h + 2\alpha + \beta \quad \forall k > h \quad (5)$$

$$T_{cycle} + T_k \geq \sum_{l \in N} \sum_{j \in N} z_{ilkj} \cdot p_{ij} + H(\sum_{l \in N} x_{ilk} + \sum_{l \in N} x_{(i-1)lh} - 2) + T_h + 2\alpha + \beta \quad \forall h > k \quad (6)$$

3) 可行性约束

在锂电池加工中, 机器人活动  $A_i$  的第  $l$  次重复必须在后续重复  $r$  之前分配, 且两次  $A_i$  活动的重复间必须有一个  $A_{i-1}$  活动, 如式(7)、(8)所示。

$$\sum_{k \in P} k x_{ilk} \leq \sum_{k \in P} k x_{irk} \quad \forall i \in A, \forall l < r \quad (7)$$

$$\sum_{r \in N, s=k+1}^{h-1} \sum_{s=k+1}^{h-1} x_{(i-1)rs} \geq 1 - H(2 - x_{ilk} - x_{i(i+1)h}) \quad \forall k < h \quad (8)$$

4) 变量基本范围约束

最后, 对变量的基本范围进行限制, 如式(9)、(10)所示。

$$T_1 = 0 \quad (9)$$

$$T_k, T_{cycle} \geq 0 \quad \forall k \in P \quad (10)$$

因此, 机器人多工位搬运的混合整数线性规划模型由目标函数式(1)和约束条件式(2)~(10)组成。

1.3 基于生产周期时间有效约束的模型求解性能优化

在求解混合整数线性规划模型时, 需在解空间内持续搜索满足所有约束条件的解集。为了缩短搜索时长, 本文引入了与生产周期时间相关的约束。

在该场景中, 每个电池需要依次经过所有加工机器的加工, 相应的搬运机器人也必须从输入设备多工位移动至输出设备, 再返回搬运下一个电池。所以移动机器人搬运  $n$  个电池的总行程时间至少为  $2n(m+1)\beta$ 。此外, 所有电池的装、卸时间为  $2n(m+1)\alpha$ , 在这个过程中, 搬运机器人可能原地等待或者移动到其他加工机器搬运电池。如果搬运机器人进行新的搬运活动, 则开始该活动的最短时间为  $\delta$ 。因此, 电池生产制造周期  $T_{cycle}$  一定大于或等于  $2n(m+1)(\alpha + \beta) + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \min\{p_{ij}, \beta\}$ 。

电池生产制造周期可视为两个最小工件集 MPS 中对应相同的一个电池活动开始时间的间隔。而机器人开始从设备  $M_i$  卸载电池时, 在下次重复 MPS 循环中执行相同的活动之前, 必须完成以下最小动作集: 从设备  $M_i$  卸载电池; 移动至设备  $M_{i+1}$ ; 从设备  $M_{i+1}$  装载电池; 移动至设备  $M_{i-1}$ ; 从设备  $M_{i-1}$  卸载电池; 移动至设备  $M_i$ ; 从设备  $M_i$  装载电池; 等待电池加工完成。  $n$  次重复这一系列活动的时间可以表示为:  $4n(\alpha + \beta) + \sum_{j=1}^n p_{ij}$ 。并且, 周期时间还

必须大于序列中最后一项机器人活动的完成时间加上搬运机器人装、卸电池需要的时间,因此,可以得到周期时间的下界约束为:

$$T_{cycle} \geq \max \left\{ \begin{array}{l} 2n(m+1)(\alpha+\beta) + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \min\{p_{ij}, \beta\}, \\ 4n(\alpha+\beta) + \max\left\{ \sum_{j=1}^n p_{ij} \right\}, \\ T_{n(m+1)} + 2\alpha + \sum_{i \in A} \sum_{t \in N} (i+2)\beta x_{it(n(m+1))} \end{array} \right\} \quad (11)$$

基于上节提出的机器人多工位搬运混合整数线性规划模型,增加了  $T_{cycle}$  条件约束,能够缩小求解的范围,有助于提升寻解的速度。

## 2 混合元启发式近似最优调度算法

本节提出了一种结合遗传算法与禁忌搜索的元启发式算法,在保证搜索深度的同时优化计算效率,从而能够在较短时间内获得近似最优解。该算法基于上节所构建的混合整数线性规划模型,进一步提升了求解速度。

### 2.1 机器人搬运序列解空间遗传算法全局搜索方法

遗传算法的核心思想在于模拟生物进化过程,通过选择、交叉和变异等操作,逐步优化种群中的个体,使其逐渐适应环境并逼近最优解。而禁忌搜索算法是一种基于本地搜索的优化技术,通过维护一个禁忌列表来避免搜索空间中的局部最优解,跳出局部最优陷阱。因此,利用 GA 求得锂电池加工顺序,之后通过 TS 算法确定相应的机器人移动序列,并结合迭代过程计算周期时间。遗传算法具体步骤如下:

#### 1) 染色体编码

将每个染色体编码为一个电池序列,例如  $\sigma_{battery} = \{j_1, j_2, \dots, j_n\}$ 。

#### 2) 种群规模

将种群规模设定为有关电池数量的函数:  $\kappa \times n$ 。  $\kappa$  为种群规模参数。

#### 3) 适应度计算

适应度函数为周期时间  $T_{cycle}$  的倒数,即周期时间越小,适应度越高。

#### 4) 精英解决方案

将精英群体中适应度值最高的个体直接替换子代种群适应度值最低的个体,要转移到下一代的精英解的数量以种群规模的百分比  $O$  来确定。

#### 5) 交叉

采用锦标赛选择制度,在种群中随机选择一定数量的个体  $n'$ , 适应度最好的个体保留至下一代。

#### 6) 突变

根据突变概率  $\zeta$  选择染色体个体是否发生突变。如果发生突变,则随机选择两个位置互换。这种突变方式对染

色体产生的干扰大,随机性高,能够更好的跳出局部最优,扩大解空间。

#### 7) 终止标准

设定 GA 在  $\gamma_1$  非改良代后终止。

上述提到的参数由 2.1 节计算测试确定。算法流程如图 3 所示。

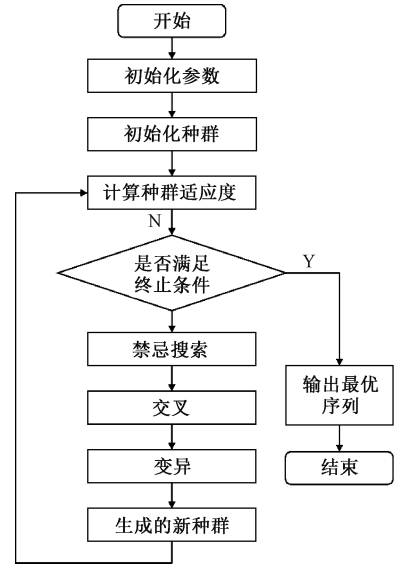


图 3 遗传算法流程图

Fig. 3 Genetic algorithm flowchart

### 2.2 机器人搬运序列精细邻域禁忌搜索方法

通过遗传算法确认电池搬运序列后,再利用禁忌搜索确认机器人多工位搬运序列。禁忌搜索具体步骤如下:

#### 1) 获取初始解

机器人的初始移动从  $A_0$  开始,根据 GA 传递的电池序列,将搬运活动随机排序,由此生成初始搬运活动序列。

#### 2) 邻域结构

在每次迭代中,TS 算法检查当前解的邻域,并移动到最佳的非禁忌域。在本研究中,利用插入算子来生成邻域。将活动从当前位置移至另一个位置,保证两个连续  $A_i$  活动之间必须有一个  $A_{i-1}$  和  $A_{i+1}$ 。插入过程如下:

#### (1) 遗传算法生成的电池移动序列:

$$\sigma_{battery} = \{j_3, j_1, j_2\} \quad (12)$$

#### (2) 机器人初始移动序列:

$$\sigma_{robot} = \{A_0^{j_3}, A_1^{j_3}, A_2^{j_3}, A_3^{j_3}, A_0^{j_1} \dots\} \quad (13)$$

#### (3) 随机选择一个搬运活动:

$$\sigma_{robot} = \{A_0^{j_3}, A_1^{j_3}, A_2^{j_3}, A_3^{j_3}, A_0^{j_1} \dots\} \quad (14)$$

#### (4) 插入其他位置,生成新的序列:

$$\sigma_{robot} = \{A_0^{j_3}, A_2^{j_3}, A_1^{j_3}, A_3^{j_3}, A_0^{j_1} \dots\} \quad (15)$$

#### 3) 禁忌表长度

禁忌表长度关乎禁忌表内储存内容的长短,过长会导致约束过多,过短则会导致循环搜索,本文设定禁忌列表的长度为  $\ell n(m+1)$ ,其中  $\ell \in [0, 1]$ ,  $n(m+1)$  为搬运工位数。

4) 选择

对每个邻域解, 计算出生产周期时间。若邻域解的周期时间优于历史最优, 即使其在禁忌表中, 仍允许接受。

5) 终止条件

设定 TS 在  $\gamma_2$  次迭代后未改进, 则终止搜索。上述参数也由 2.1 节计算测试确定。禁忌搜索流程如图 4 所示。

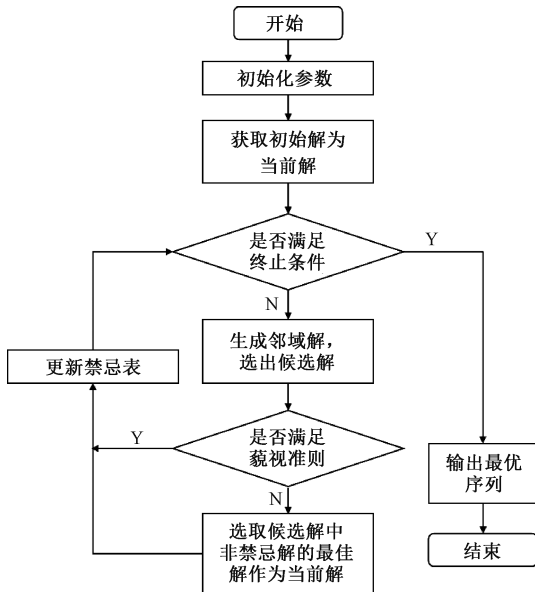


图 4 禁忌搜索流程图

Fig. 4 Tabu search flowchart

3 机器人多工位搬运锂电池实验与分析

为验证本文算法的可行性和有效性, 首先通过算例测试确定最优参数值, 然后将构建的完整模型应用于实际电池搬运场景。

3.1 算法参数选择

混合元启发式算法需要提前设定种群规模  $\kappa$ 、最大迭代次数  $\gamma_1$ 、精英解概率  $O$ 、突变概率  $\zeta$ 、禁忌搜索表长度  $\ell$  和禁忌搜索最大迭代次数  $\gamma_2$  等 6 个参数。本文将采用 Carlier 算例集<sup>[18]</sup>来确定这六个参数的最佳值。其中, 每个参数根据类似混合多工位调度文献中的参考数值预先给出两种水平值, 组成  $2^6$  种组合, 如表 2 所示。

表 2 参数水平值

Table 2 Levels of parameter

参数名称	水平值	
	1	2
种群规模 $\kappa$	10	20
最大迭代次数 $\gamma_1$	35	55
精英解概率 $O$	0.1	0.2
突变概率 $\zeta$	0.1	0.2
禁忌搜索表长度 $\ell$	0.05	0.2
禁忌搜索最大迭代次数 $\gamma_2$	20	50

本实验中, 算法程序均基于 python3.8 版本开发, 实验测试硬件均采用以下标准: 操作系统选用 ubuntu16.04LTS (64 位), CPU 型号 i7-4710, 内存容量为 12 GB。为降低随机性对实验结果的影响, 每组标准算例独立运行 10 次, 并取平均值作为最终实验结果。正交实验结果如表 3 和图 5 所示。

表 3 正交实验结果

Table 3 Results of orthogonal experiments

序号	$\kappa$	$\gamma_1$	$O$	$\zeta$	$\ell$	$\gamma_2$	平均时间/s
1	10	55	0.1	0.1	0.05	20	82.28
2	10	35	0.1	0.1	0.05	20	73.29
3	10	55	0.2	0.1	0.05	20	79.45
4	10	55	0.1	0.2	0.05	20	82.89
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
37	20	35	0.2	0.2	0.2	50	60.3
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
61	20	55	0.1	0.2	0.2	50	87.41
62	20	55	0.1	0.1	0.2	50	78.17
63	20	55	0.1	0.2	0.05	50	79.54
64	20	55	0.1	0.2	0.2	20	74.89

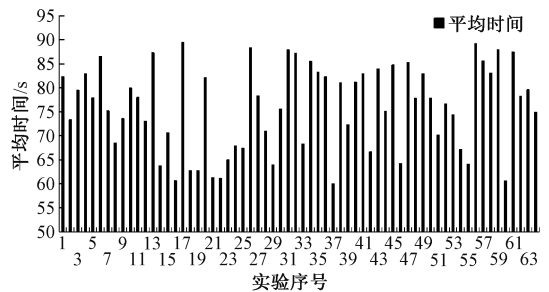


图 5 正交实验平均时间图

Fig. 5 Plot of average time of orthogonal experiments

经过正交实验的寻优仿真, 选择平均时间最短的参数组合作为模型最佳参数: 种群规模  $\kappa = 20$ 、最大迭代次数  $\gamma_1 = 35$ 、精英解概率  $O = 0.2$ 、突变概率  $\zeta = 0.2$ 、禁忌搜索表长度  $\ell = 0.2$  和禁忌搜索最大迭代次数  $\gamma_2 = 50$ 。

3.2 应用实验分析

本文以某质检院电池自动上下料及质量检测车间为案例, 该车间通过独立工业机器人替代人工完成电池自动上下料任务, 其作业环境如图 6 所示。系统需要针对不同型号的电池, 利用工业相机对左端货架上的电池托盘进行识别和定位电池托盘, 随后驱动机器人完成托盘抓取与搬运, 并将其放置于 3 个经改造的自动开关门检测箱内。完成依次检测完毕后, 机器人将电池取出并搬运至右端货架。

根据 2.1 节的参数选择以及现场实际的电池加工情况开展应用实验, 现场测定的重要实验参数如表 4 所示, 并列举前 3 种电池的加工时间。

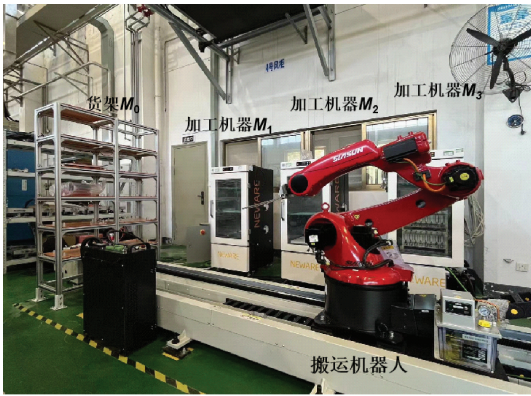


图 6 实际作业环境图

Fig. 6 Actual operating environment map

为评估本文提出的元启发式混合整数线性规划算法对计算效率的优化效果,本研究设计了一组对比实验,将提出的算法与原始 MILP 模型进行求解效率比较。实验采用重复独立试验设计,针对每个测试算例进行 10 次独立求解以

表 5 应用实验结果

Table 5 Application experimental results

序号	电池数量 $n$	混合整数线性规划			元启发式混合整数线性规划			效率提升幅度 ( $t_1 - t_2$ )/ $t_1$ /%
		最优时间/s	最差时间/s	平均时间 $t_1$ /s	最优时间/s	最差时间/s	平均时间 $t_2$ /s	
1	3	1.34	2.02	1.63	1.21	1.60	1.41	13.50
2	4	9.13	11.94	10.92	8.55	9.24	8.86	18.86
3	5	16.76	20.36	18.45	12.24	14.87	13.64	26.07
4	6	42.78	48.07	45.01	26.42	28.48	27.47	38.97
5	7	66.08	73.68	70.32	40.03	43.19	41.64	40.78
6	8	112.83	119.45	115.44	57.21	61.49	59.39	48.55
7	9	135.54	157.74	147.50	69.79	73.44	72.10	51.12
8	10	184.60	210.21	195.63	80.98	85.13	82.32	57.92

为验证算法的鲁棒性,选择其中一组算例对其 10 次实验的时间作图分析,结果如图 7 所示。由图 7 可得,结合了元启发式的混合整数线性规划相比传统混合整数线性规划模型,除了时间效率提升外,其运算稳定性也更优。

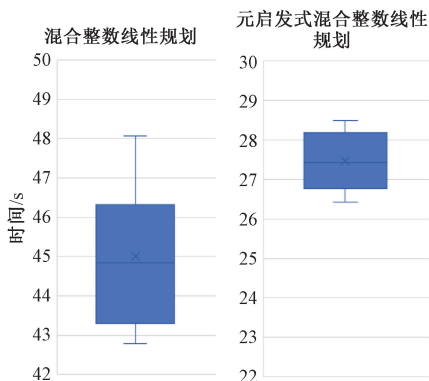


图 7 算法稳定性对比

Fig. 7 Algorithm stability comparison

为验证利用元启发式算法的求解收敛速度是否提升,选择其中一组算例对其迭代次数和生产周期结果进行作图分析,结果如图 8 所示。

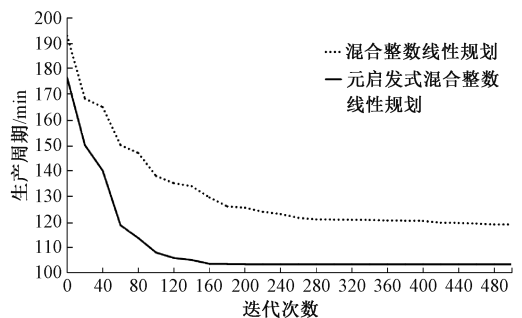


图 8 收敛速度对比图

Fig. 8 Convergence speed comparison graph

根据图 8 的对比结果可知,结合了元启发式的混合整数线性规划比传统混合整数线性规划模型在求解过程中

表现出更快的收敛速度,且规划出的最终生产周期更短。

分支切割法(branch-and-cut, B&C)是一种常见的用于求解混合整数线性规划问题的精确算法,该算法结合了分支定界法和割平面法的思想,通过不断地分支和添加割平面,逐步逼近整数最优解<sup>[19-20]</sup>。将本文元启发式混合整数线性规划与 B&C 进行对比实验,每个算例独立运行 10 次取平均时间,实验结果如图 9 所示。

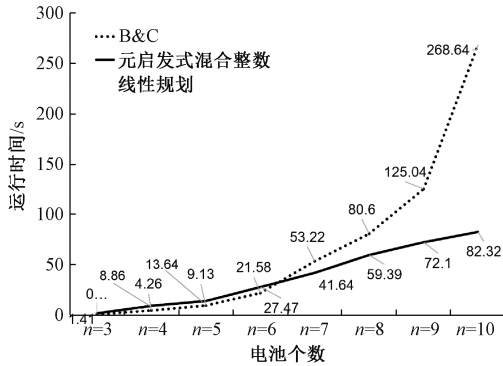


图 9 算法对比实验图

Fig. 9 Algorithm comparison experimental graph

由图 9 可得, B&C 算法在小规模问题求解时的时间效率略优于元启发式混合整数线性规划,但随着问题规模变大,元启发式混合整数线性规划处理复杂调度问题的能力明显优于传统算法。因此,认为本文所提方法更适用于实际生产制造场景,能够有效节省调度规划时间。

## 4 结 论

本文针对多种类电池的机器人制造单元调度问题,构建了元启发式混合整数线性规划模型,同时引入生产周期时间约束,从而有效缩小求解空间。为在较短时间内获得近似最优解,本文设计了一种混合元启发式算法,通过融合遗传算法与禁忌搜索算法,提升了求解效率。实验结果表明,本文提出的元启发式混合整数线性规划算法在时间性能方面具有显著优势,适用于实际电池制造调度场景。

## 参 考 文 献

[1] SUEMITSU I, IZUI K, YAMADA T, et al. Simultaneous optimization of layout and task schedule for robotic cellular manufacturing systems [J]. Computers & Industrial Engineering, 2016, 102: 396-407.

[2] GÜREL S, GULTEKIN H, AKHLAGHI E V. Energy conscious scheduling of a material handling robot in a manufacturing cell [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2019, 58: 97-108.

[3] TONKE D, GRUNOW M, AKKERMAN R. Robotic-cell scheduling with pick-up constraints and

uncertain processing times [J]. IIEE Transactions, 2019, 51(11): 1217-1235.

- [4] PARENTE M, FIGUEIRA G, AMORIM P, et al. Production scheduling in the context of Industry 4.0: Review and trends [J]. International Journal of Production Research, 2020, 58(17): 5401-5431.
- [5] ZHANG J F, FANG X Y. Challenges and key technologies in robotic cell layout design and optimization[J]. Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2017, 231(15): 2912-2924.
- [6] WANG CH Y, ZHANG L X, LIU CH D. Adaptive scheduling method for dynamic robotic cell based on pattern classification algorithm [J]. International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing, 2018, 9(5): 1850040.
- [7] MOSALLAEIPOUR S, NEJAD M G, SHAVARANI S M, et al. Mobile robot scheduling for cycle time optimization in flow-shop cells, a case study [J]. Production Engineering, 2018, 12(1): 83-94.
- [8] HALL N G, KAMOUN H, SRISKANDARAJAH C. Scheduling in robotic cells: Complexity and steady state analysis [J]. European Journal of Operational Research, 1998, 109(1): 43-65.
- [9] 赵晓飞, 郭秀萍. 双层束搜索算法优化机器人制造单元调度问题[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(4): 56-61.
- ZHAO X F, GUO X P. Double layers beam search algorithm for optimizing robotic cells scheduling problem[J]. Computer Engineering and Applications, 2019, 55(4): 56-61.
- [10] 吴秀丽, 袁琦. 差分进化算法求解带批处理机的机器人制造单元调度问题[J]. 控制与决策, 2020, 35(1): 74-82.
- WU X L, YUAN Q. Differential evolution algorithm for solving robotic cell scheduling problem with batch-processing machines[J]. Control and Decision, 2020, 35(1): 74-82.
- [11] GULTEKIN H, COBAN B, AKHLAGHI E V. Cyclic scheduling of parts and robot moves in m-machine robotic cells [J]. Computers & Operations Research, 2018, 90: 161-172.
- [12] PAUL H J, BIERWIRTH C, KOPFER H. A heuristic scheduling procedure for multi-item hoist production lines [J]. International Journal of Production Economics, 2007, 105(1): 54-69.
- [13] ELM I A, NAZARI A, THIRUVADY D, et al. Cyclic flow shop robotic cell scheduling problem with

- multiple part types [J]. IEEE Transactions on Engineering Management, 2020, 69(6): 3240-3252.
- [14] BATUR G D, EROL S. Using simulated annealing for flexible robotic cell scheduling[J]. Gazi University Journal of Science, 2016, 29(3): 573-582.
- [15] HUANG B, ZHOU M CH, ABUSORRAH A, et al. Scheduling robotic cellular manufacturing systems with timed Petri net, A\* search, and admissible heuristic function [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2020, 19(1): 243-250.
- [16] 黄飘, 郑祖杰, 李新宇, 等. 滚动生产模式下的柔性作业车间调度问题[J]. 计算机集成制造系统, 2025, 31(4): 1287-1298.
- HUANG P, ZHENG Z J, LI X Y, et al. Flexible job-shop scheduling problem in rolling production mode[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2025, 31(4): 1287-1298.
- [17] 熊福力, 李琳琳. 考虑生产与运输成本的准时制分布式预制构件生产调度[J]. 计算机集成制造系统, 2024, 30(12): 4386-4405.
- XIONG F L, LI L L. Just-in-time distributed precast scheduling with considering production and transportation costs [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2024, 30(12): 4386-4405.
- [18] CARLIER J, NERON E. An exact method for solving the multi-processor flow-shop[J]. RAIRO-Operations Research, 2000, 34(1): 1-25.
- [19] ASHENAFI A, GUTA B W, MITIKU S K. Branch-and-cut solution approach for multilevel mixed integer linear programming problems[J]. EURO Journal on Computational Optimization, 2023, 11:100076.
- [20] SARA M. The follower optimality cuts for mixed integer linear bilevel programming problems[J]. Soft Computing, 2023, 27(16): 11529-11550.

### 作者简介

倪栋(通信作者),高级工程师,主要研究方向为检验检测技术方法与检测仪器设备开发研究。

E-mail:nidong@xmzjy.org