

基于遗传算法的空投捆绑包装线平衡优化方法研究

朱景山^{1,2}, 胡涛^{1*}, 阳静², 王进³, 蔡乐⁴

(1. 海军工程大学 管理工程与装备经济系, 武汉 430033; 2. 空降兵研究所, 湖北 孝感 432100;
3. 95857 部队, 湖北 孝感 432100; 4. 军委审计署广州审计中心, 广州 510623)

摘要: 目的 优化空投捆绑包装线工序安排, 改善工作平衡, 并提升保障效率。方法 针对按现行空投捆绑包装方法设计的空投捆绑包装线, 基于遗传算法建立空投捆绑包装线平衡问题数学模型和设计算法, 通过 Matlab 运行算法对空投捆绑包装线工序进行优化安排, 比较优化前后的最小生产节拍、平衡率、平滑指数等指标。结果 根据关键指标对比分析, 相较于优化前, 基于遗传算法改进的空投捆绑包装线的最小生产节拍缩短 125 s, 平衡率提升 12.9%, 平滑指数降低 134.66。结论 基于遗传算法构建的空投捆绑包装线平衡问题数学模型和优化算法可行, 优化后较好地改善了工作平衡和提高了保障效率, 可为改进空投捆绑包装保障条件提供参考和借鉴。

关键词: 空投; 捆绑包装; 数学模型; 遗传算法

中图分类号: TB482

文献标志码: A

文章编号: 1001-3563(2025)09-0316-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2025.09.036

Optimization Method of Airborne Bundle Packaging Line Balance Based on Genetic Algorithm

ZHU Jingshan^{1,2}, HU Tao^{1*}, YANG Jing², WANG Jin³, CAI Le⁴

(1. Department of Management Economics, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;
2. Institute of Paratroops, Hubei Xiaogan 432100, China; 3. 95857 Unit, Hubei Xiaogan 432100, China;
4. Guangzhou Audit Center, Audit Office of the Central Military Commission, Guangzhou 510623, China)

ABSTRACT: The work aims to optimize the process arrangement of airborne bundling packaging line, improve the work balance and enhance the guarantee efficiency. Aiming at the airborne bundle packaging line designed according to the current airborne bundle packaging method, the mathematical model and design algorithm of the airborne bundle packaging line balance problem were established based on the genetic algorithm. The process of the airborne bundle packaging line was optimized by Matlab algorithm, and the minimum production beat, balance rate, and smoothness index and other indicators were compared before and after optimization. According to the comparative analysis of key indicators, compared with the minimum production beat before optimization, the improved airborne bundle packaging line based on the genetic algorithm was shortened by 125 seconds, the balance rate increased by 12.9%, and the smoothness index was reduced by 134.66. The mathematical model and optimization algorithm for the balance problem of airborne bundle packaging lines constructed based on the genetic algorithm are feasible. After optimization, the work balance and guarantee efficiency can be improved well, which can provide reference for improving the guarantee conditions of airborne bundle packaging.

KEY WORDS: airborne; bundle packaging; mathematical model; genetic algorithm

在空降行动、抗震救灾中,可能受地理障碍限制,物资装备补给困难,通过空运空投方式立体投送是一种有效方式和应急手段^[1]。为确保空投顺利,物资装备必须按要求捆绑包装好,高效的空投捆绑包装能力是保障有力的前提和基础^[2-4]。由于空投捆绑包装工作复杂,要求高,效率低,相关人员在提高效率方面开展了部分探索。严李^[5]通过对重装空投系统的组成与应用流程进行介绍分析,指出应重点关注载机适配性和离机安全性。张武生等^[6]从捆绑包装过程入手,指出现阶段重装空投捆绑包装过程存在器材准备难、捆绑包装步骤繁杂、重心调整效率低、系留影响大、管理使用不便等问题,提出应在改进捆绑包装的方法步骤上提高保障效能。罗晓军等^[7]运用 IE 方法展开了捆绑包装过程的研究,以捆绑包装流程为对象,建立了伞折叠和货台组装捆绑 2 个典型过程的多服务台排队模型。经过多轮迭代仿真分析表明,空投骨干、吊车行吊等资源配置是影响目前捆绑包装效能的主要因素,提出应注重增加利用率较高的资源配置的优化原则。综合文献分析:一是应重点关注捆绑包装效率的提升;二是影响捆绑包装效率的因素主要是方法步骤不合理、关键操作效率低、资源配置局限、流程控制不科学等;三是解决效率问题的有效研究不够。为此,笔者受工业生产中的装配线相关研究启发^[8],针对空投捆绑包装工作与装配工作相似的特点,着重从方法步骤和流程控制等影响因素入手,采用流水线模式进行空投捆绑包装方式的探索,即捆绑包装对象以稳定的速度依次通过流水线上的工作站,工作站配备固定的操作员完成特定的操作,最后产出符合要求的空投件。由于空投捆绑包装的程序复杂,作业差异性大,关联约束性强,空投捆绑包装线设计的合理性及有效性分析和优化是个难点,主要是平衡问题^[9]。国内外有关装配线平衡问题研究较多,尤其智能算法在解决复杂的装配线平衡问题时表现出显著优势^[10-15],包括禁忌搜索、蚁群算法、模拟退火算法、遗传算法、粒子群算法、人工蜂群算法等。对比分析,禁忌搜索结构设计复杂,过度依赖初始解;蚁群算法信息素更新计算复杂,初期搜索盲目收敛慢;模拟退火算法降温策略敏感,全局搜索能力弱;粒子群算法易陷入局部最优,离散化可能损失信息;人工蜂群算法参数调整复杂,离散化实现难度高;遗传算法具有全局优化、全局搜索能力、避免早熟收敛、处理多目标优化问题、灵活编码、处理大规模问题等方面的综合优势。

本文以参照空投捆绑包装的流程、内容和操作设计的空投捆绑包装线为样本,基于遗传算法建立空投捆绑包装线平衡问题数学模型,设计优化算法,并采用 Matlab 软件运行算法解析空投捆绑包装线的最优工序安排。通过计算优化前后的最小生产节拍、平衡率、平滑指数等关键指标,评判分析优化前后的捆绑包装线工作平衡情况和保障效率,验证本文优化方法

的可行性和有效性。同时,验证流水线模式空投捆绑包装的可行性和优越性,为改进空投捆绑包装保障模式提供参考借鉴,也为提升空投保障效率创新路径。

1 空投捆绑包装线概述

1.1 总体流程

空投捆绑包装,是以空投系统为中心,将零部件、物资、装备和伞具在货台上装配的过程。通过一定的操作过程,将各部分组装形成一个整体,经过检查后产出符合空投要求的空投件。总体流程:从货台进场开始,按照货台的检查和组装、装备的定位和固定包装、装备的捆绑系留、伞具的装配连接、综合检查等流程实施,如图 1 所示。

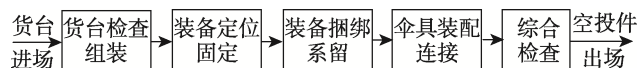


图 1 捆绑包装流程

Fig.1 Bundle packaging flow chart

1.2 作业工序

根据总体流程,按照最小化原则能分尽分^[16]以及连贯作业不分解、一致动作不分解、协同动作不分解等原则,采用 IE 方法将捆绑包装操作过程人工划分 77 个作业工序,并将工序按流水线分配到 8 个工作站。捆绑包装的各工序之间存在一定的优先关系限制,如图 2 所示。

1.3 作业时间

由于捆绑包装作业复杂、费时费力,部分作业动作幅度大,需多人协同完成。时间直读法是测定其工序作业时间较为准确、经济、适用的方法。整体空投捆绑包装用时较长,对照观测次数标准,应通过 3 次测量、取中值获取工序时间,减少异常值的影响。

实际作业存在人员熟练度、敬业程度、休息转换时间、环境条件等情况,工序的标准作业时间,需引入评定系数、放宽率等进行修正,避免时间过紧脱离实际。标准时间计算公式:标准时间=(测量时间×评定系数)(1+放宽率)。

对照评定系数参照表,按专业人员设定熟练系数为 0.1,努力系数选择 0。因捆绑包装标准化程度不高,操作动作差异性较大,环境系数选择-0.03,一致性系数选择-0.05,综合评定系数为 1.02。对照放宽类型参照表,操作人员以年轻男性为主,生理需求方面放宽率选择 0.03。操作人员体力、心理负担较重,允许适当的休息放松,疲劳程度方面放宽率选择 0.16。根据任务性质,延迟放宽、政策放宽率均设定为 0,综合放宽率为 0.19。根据测算,77 个工序的标准作业时间及 8 个工作站工作时间见表 1。

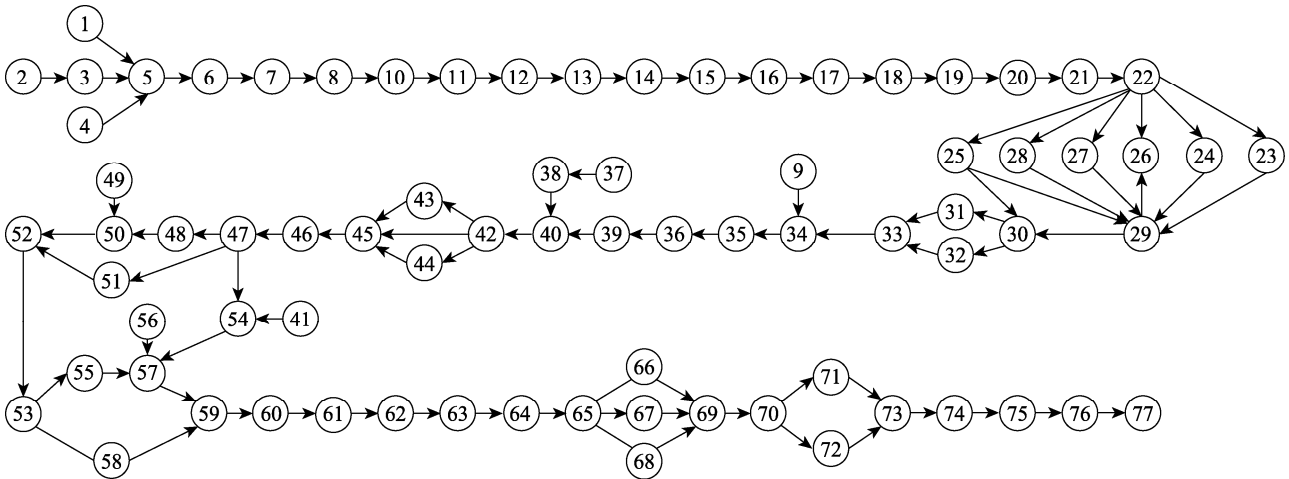


图 2 捆绑包装工序优先图
Fig.2 Priority diagram of bundle packaging process

表 1 工作站标准时间
Tab.1 Standard time of working station

工作站编号	工序序号	标准作业时间/s	时间/s
K1	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21	15, 20, 18, 12, 13, 20, 53, 45, 8, 62, 88, 12, 75, 5, 46, 23, 5, 5, 7, 45, 18	595
K2	22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34	4, 61, 30, 26, 40, 53, 35, 8, 95, 75, 10, 35, 50	522
K3	35, 36, 37, 38, 39, 40, 41	12, 29, 64, 35, 58, 89, 267	554
K4	42, 43, 44, 45, 46, 47	158, 82, 76, 138, 120, 20	594
K5	48, 49, 50, 51, 52, 53	47, 23, 68, 39, 208, 195	580
K6	54, 55, 56, 57, 58, 59, 60	95, 52, 25, 62, 46, 167, 210	657
K7	61, 62, 63, 64, 65	108, 75, 324, 256, 32	795
K8	66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77	20, 34, 3, 8, 4, 47, 142, 125, 155, 210, 81, 26	855

2 模型构建

2.1 问题描述与参数定义

捆绑包装线平衡问题描述如下： J 为装备捆绑包装作业的工序总数； j 为装备捆绑包装作业工序序号， $j=1,2,\dots,J$ ； I 为需要捆绑的装备总数； i 为装备编号， $i=1,2,\dots,I$ ； C_{theory} 为捆绑包装线理论生产节拍； C_t 为捆绑包装线实际生产节拍； K 为工作站总数； k 为工作站编号 $k=1,2,\dots,K$ ； t_j 为装备在捆绑包装作业工序 j 中的作业时间； T_k 为装备在工作站编号为 k 的工作站捆绑包装作业总时间； x_{jk} 为决策变量， $x_{jk}=0$ 表示捆绑包装作业工序 j 未被安排到工作站 k 中， $x_{jk}=1$ 表示捆绑包装作业工序 j 被安排到工作站 k 中； $\text{pre}(j)$ 为捆绑包装作业工序的优先顺序集合，优先于捆绑包装作业工序 j 完成的工序集合。

2.2 基本假设

1) 1 台装备仅可捆绑包装于 1 个货台上，1 个货台仅可捆绑包装 1 台装备。

2) 货台、装备、伞具、蜂窝纸板、垫木以及各类配件工具供应及时，即其供应不影响捆绑包装作业进程。

3) 货台在捆绑包装线上转站不受限制。

4) 每个捆绑包装作业区的作业总时间一定比生产节拍小。

5) 捆绑包装线上没有并行的工作站。

6) 捆绑包装线上的货台保持稳定的节奏上线，并匀速转站。

2.3 约束条件

根据重装空投捆绑包装的实际情况，约束条件如下：

1) 每道捆绑包装作业仅安排到唯一工作站内，其数学表述如式 (1) 所示。

$$\sum_{k=1}^K x_{jk} = 1, \forall j \quad (1)$$

2) 捆绑包装作业按照工序优先顺序关系执行，其数学表述如式 (2) 所示。

$$\sum_{k=1}^K kx_{ik} \leq \sum_{k=1}^K kx_{jk}, \forall i, j \in \text{pre}(j) \quad (2)$$

3) 工作站作业总时间不大于理论节拍，其数学表述如式 (3) 所示。

$$T_k \leq C_{\text{theory}}, \forall k$$

(3)

2.4 目标函数

捆绑包装线的保障效率, 实质上是最小化捆绑包装生产节拍。为了平衡操作人员的工作负担和保持公平, 还应尽可能保证工作站负荷均衡。

1) 最小化捆绑包装生产节拍, 即实际捆绑包装节拍尽可能小。其数学表述:

$$f_1 = \min \left[\max \left(\sum_{j=1}^J t_j x_{jk} \right) \right]$$

(4)

2) 最小化平衡损失率, 即每个捆绑包装工作站的作业总时间差距尽可能小。其数学表述:

$$f_2 = \frac{\max(T_k) \times K - \sum_{k=1}^K T_k}{\max(T_k) \times K}$$

(5)

式中: $T_k = \sum_{j=1}^J t_j x_{jk}$ 。

3) 最小化工作站负荷均衡指数, 即保持较均衡的工作负担, 让操作人员感到公平, 保持积极的工作态度, 从而持续保持稳定的捆绑包装效率。其数学表述:

$$f_3 = \min \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^K \left[T_k - \left(\sum_{k=1}^K T_k \right) / K \right]^2}{K}}$$

(6)

通过加权法处理, 让多目标以科学的方式变换为单目标求最优解。其中, 权重是重要程度的相对比值, 比重越大, 目标在求解中的影响越大, 最优化时也相应地获得更高的优化倾斜。层次分析法 (AHP) 是获取权重的有效方法, 通过将主观的定性关注程度转化为的量化指标, 而后计算出权重系数。

向捆绑包装的保障主体调查对 3 个最优化目标的关注程度, 构建判断矩阵。参考 AHP 评价标准 (表 2), 按照 3 个步骤计算权重。

1) 建立判断矩阵。对 3 个目标的重要性程度调查, 得到表 3 判断矩阵。

2) 计算目标权重。根据表 3, 通过幂法计算求得 $\lambda_{\max}$ 和对应的特征向量, 从而计算出目标权重。

第一步: 取 m 维归一化的初始正向量 $\mathbf{w}^{(0)} = (\mathbf{w}_1^{(0)}, \mathbf{w}_2^{(0)}, \dots, \mathbf{w}_n^{(0)})$ 。

表 2 AHP 评价标准
Tab.2 AHP evaluation criteria

评价值	评价标准	说明
1	同样重要	2 个目标同样重要
3	重要性稍高	比另一目标重要性稍微高
5	重要性较高	凭经验认为更倾向于该目标
7	重要性高	肯定地认为注重更倾向于该目标
9	重要性很高	有充分的理由证明该目标明显重要
2、4、6、8		介于以上评价标准之间的折中评价价值
以上值的倒数		以上 2 个目标比较的相反情况

表 3 捆绑包装线判断矩阵
Tab.3 Multi-objective judgment matrix of bundle packaging line

目标	捆绑包装生产节拍	平衡损失率	负荷均衡指数
捆绑包装生产节拍	1	7	8
平衡损失率	1/7	1	2
负荷均衡指数	1/8	1/2	1

第二步: 计算 $\overline{\mathbf{w}}^{(p+1)} = A\mathbf{w}^{(p)}, p = 0, 1, 2, \dots$ 。

第三步: 计算 $\mathbf{w}^{(p+1)} = \overline{\mathbf{w}}^{(p+1)} / \sum_{i=1}^m \overline{w}_i^{(p+1)}$ 。

第四步: 验证精确度。比照预先设定的精度 ε , 当 $\left| w_i^{(p+1)} - w_i^{(p)} \right| < \varepsilon, i = 1, 2, \dots, m$ 时, $\mathbf{w}^{(p+1)}$ 就是求得的特征向量, 转至第五步; 否则返回至第二步。

第五步: 计算最大特征值 $\lambda_{\max}$,

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{\overline{w}_i^{(p+1)}}{w_i^p}。$$

根据以上计算程序, 选取 3 维的归一化初始正向量 $\mathbf{w}^{(0)} = (1/3, 1/3, 1/3)^T$, 预先设定精度 $\varepsilon = 0.000\ 1$, 表 3 表示的矩阵的特征向量计算数据见表 4。

表 4 计算过程数据
Tab.4 Calculation process data

$\mathbf{w}^{(p)}$	$\overline{\mathbf{w}}^{(p+1)}$	$\mathbf{w}^{(p+1)}$	$\left w_i^{(p+1)} - w_i^{(p)} \right $
(1/3, 1/3, 1/3)	(5.333 3, 1.047 6, 0.541 7)	(0.770 4, 0.151 3, 0.078 3)	(0.437 1, 0.182 0, 0.255 0)
(0.770 4, 0.151 3, 0.078 3)	(2.455 9, 0.418 0, 0.250 3)	(0.786 1, 0.133 8, 0.080 1)	(0.015 7, 0.017 5, 0.001 8)
(0.786 1, 0.133 8, 0.080 1)	(2.363 5, 0.406 3, 0.245 3)	(0.783 9, 0.134 8, 0.081 4)	(0.002 2, 0.001 0, 0.001 3)
(0.783 9, 0.134 8, 0.081 4)	(2.378 7, 0.409 6, 0.246 8)	(0.783 7, 0.135 0, 0.081 3)	(0.000 2, 0.000 2, 0.000 1)
(0.783 7, 0.135 0, 0.081 3)	(2.379 1, 0.409 6, 0.246 8)	(0.783 8, 0.134 9, 0.081 3)	(0.000 1, 0.000 1, 0.000 0)
(0.783 8, 0.134 9, 0.081 3)	(2.378 5, 0.409 5, 0.246 7)	(0.783 8, 0.134 9, 0.081 3)	(0, 0.000 0, 0.000 0, 0.000 0)

相关数据见表 5。

表 5 迭代次数与计算结果
Tab.5 Number of iterations and calculation results

p	0	1	2	3	4	5
$\max w_i^{(p+1)} - w_i^{(p)} $	0.437 1	0.017 5	0.002 2	0.000 2	0.000 1	0.000 0

从表 4 可以看出, 当 $p=5$ 时, $\max |w_i^{(p+1)} - w_i^{(p)}| = 0 < 0.000 1$, 迭代终止, 特征向量 $w = (0.783\ 8, 0.1349, 0.081\ 3)^T$, 最大特征根 $\lambda_{\max} = 3.034\ 9$ 。

3) 一致性检验。为与实际相符, 须检验判断矩阵一致性, 其检验公式见式 (7)、(8)。

$$C_I = (\lambda_{\max} - m) / (m - 1) \quad (7)$$

$$C_R = C_I / R_I \quad (8)$$

式中: R_I 表示伪随机一致性指标; C_R 表示一致性比率; C_I 表示一致性指标。见表 6。

表 6 随机一致性指标
Tab.6 Random consistency index

m	3	4	5	6	7	8	9	10
R_I	0.58	0.87	1.14	1.27	1.35	1.43	1.46	1.51

将 C_R 值与 0.1 比较, 如果小于 0.1 合理, 与实际情况相符。根据表 3, 判断矩阵的阶数 $m=3$, 通过式 (7) 计算, 一致性指标 $C_I=0.017\ 5$ 。根据表 6, 阶数为 3 的判断矩阵, $R_I=0.58$ 。根据式 (8) 计算, 一致性比率 C_R 为 0.03, 小于 0.1, 通过一致性检验。据此, 捆绑包装生产节拍、平衡损失率、工作站时间负荷均衡指数 3 个目标权重分别为 0.783 8、0.134 9、0.081 3, 即归一化后的最终最优化目标 f 为:

$$f = w_1 f_1 + w_2 f_2 + w_3 f_3 = 0.783\ 8 f_1 + 0.134\ 9 f_2 + 0.081\ 3 f_3 \quad (9)$$

3 算法设计

3.1 编码

针对空投捆绑包装线的平衡问题, 采用整数编码的方式编码染色体, 遵循图 2 所示作业优先关系编排工序组成染色体, 工序表示染色体的一个基因。

3.2 初始种群

初始种群时, 必须确保初始种群中的染色体都是按照作业优先关系要求编码生成:

第一步, 工序组成集合 $R = \{r_1, r_2, \dots, r_i, \dots, r_n\}$, 其中作业工序表示为 $i=1, 2, \dots, n$ 。

第二步, 根据作业优先关系, 从集合 R 中任选所有当前已没有紧前工序的工序放入一个新集合 $\bar{R}$ 中, 同时在作业优先关系和集合 R 中删除该工序。

第三步, 从集合 $\bar{R}$ 中任意选择一个工序, 按照固

定的顺序编入染色体的基因位置。

第四步, 当判断集合 $R = \emptyset$ 时, 表明所有作业工序都已经安排到工作站上, 初始种群中一条染色体已生成。否则, 继续跳转第二步。

3.3 解码与适应度函数

染色体代表了作业工序的编排方式, 为了对编排方式的优劣进行评价, 需要在解码操作中将工序分配到工作站中, 再根据工作站作业总时间进行适应度函数的计算比较。

第一步: 设定种群为一个集合 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_i, \dots, p_n\}$, 任意选中种群中的一条染色体, 并在集合 P 中删除该染色体。

第二步: 设定一个初始生产节拍 $C_{T0} = T \div K$, 其中 T 为捆绑包装线上所有工序作业时间总和, K 为捆绑包装线上的工作站数量。

第三步: 设定工序作业时间 T_i , 生产节拍增量 $a = \min \{ \min \{T_i\}, \min \{T_i - T_j\} \}$ 。其中, i 和 j 均为染色体的基因位置编号, 最大值为工序总数 N , 另设工作站工作时间 T_k , k 为工作站编号, 最大值是 K 。

第四步: 对照染色体基因顺序, 把相应基因对应的工序逐次安排到工作站。安排第 i 工序时, 若判断 $T_k \leq C_{T0}$, 则把该工序安排至第 k 工作站中; 若判断 $T_k > C_{T0}$, 则把该工序安排至第 $k+1$ 工作站中; 若判断 $T_k > C_{T0}$, 则停止安排并清空, 使 $C_{T0} = C_{T0} + a$, 重新从第 1 个工序开始安排工序。

第五步: 在安排第 N 个工序时, 若判断 $T_k \leq C_{T0}$, 则工序安排完成, 最小节拍 $C_T = \min \{T_k\}$, 跳转第一步。

随后, 根据综合了捆绑包装生产节拍、平衡损失率、工作站时间负荷均衡指数 3 个最优化目标, 并遵循越大越好的评价设计的适应度函数 F 进行计算。

$$F = \frac{1}{f} = \frac{1}{w_1 f_1 + w_2 f_2 + w_3 f_3} = \frac{1}{0.783\ 8 f_1 + 0.134\ 9 f_2 + 0.081\ 3 f_3} \quad (10)$$

3.4 算子

1) 选择。采用轮盘赌方式, 将适应度值对应选择概率作为轮盘扇面占比, 从而倾向选择较优个体。

假设种群规模是 m , 个体适应度值是 F_i , 那么选中该个体的概率 P_i 为:

$$P_i = \frac{F_i}{\sum_{i=1}^m F_i} \quad (11)$$

为避免把最优个体丢掉, 配合使用精英选择方法, 即把种群中最优个体直接选出, 并直接保留传至下代种群。其中, 适应度值最高个体的数量 u 可以根据算子收敛情况调整, 当收敛过快或陷入局部最优

时, 可把 u 设置小一点, 当收敛过慢时, 可适当把 u 设置大一点。

2) 交叉。染色体的基因排列受工序作业优先关系约束, 因此采取如下交叉策略: 第一步, 以一定的交叉概率选择要交叉的父代染色体, 分别随机 2 个交叉点, 父代染色体分别被分成 3 段基因链; 第二步, 选其一染色体 (父 1) 两交叉点之间基因链, 将其中所有基因按另条染色体 (父 2) 相应基因的排列顺序重排, 再接上父 1 染色体原始位置, 生成子代染色体 (子 1); 第三步, 同理选择另条染色体 (父 2) 两交叉点之间基因链, 将其中所有基因按父 1 相应基因的前后顺序重排, 再接上父 2 染色体原始位置, 生成子代染色体 (子 2)。交叉操作示意图如图 3 所示。

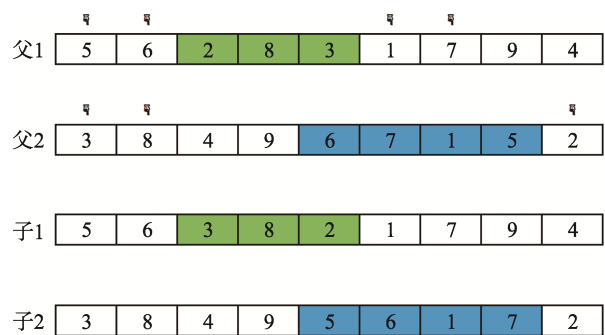


图 3 交叉示意图

Fig.3 Cross diagram

3) 变异。同交叉操作, 因基因排列受工序作业优先关系约束, 采用如下变异操作: 第一步, 以变异率为机会选择个体变异, 在变异个体上随机选择一个变异点, 使染色体分为 2 段基因链; 第二步, 令其一基因链不变直接作为子代染色体的一段基因链; 第三步, 将另段基因链按工序作业优先关系重排, 作为子代个体另一基因链接入染色体中, 变异完成。变异操作示意图如图 4 所示。

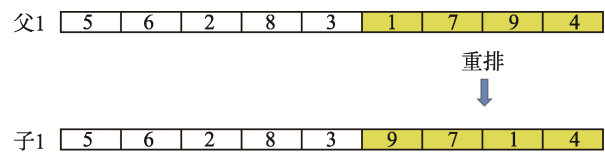


图 4 变异示意图

Fig.4 Schematic diagram of variation

3.5 交叉变异自适应

为了使交叉、变异操作能够保持适中的概率发生, 采用自适应方式设定交叉率和变异率。

假设交叉种群中, F_c 是适应度值, $\overline{F_c}$ 是适应度平均值, F_{cmax} 是适应度值最大值, F_{cmin} 是适应度值最小值, P_c 是交叉率, P_{cmax} 是交叉率当中的最大值, P_{cmin} 是交叉率当中的最小值。

当判断 $F_c \geq \overline{F_c}$ 时, 调整相应个体的交叉概率:

$$P_c = P_c \left[1 - \frac{(P_{cmax} - P_{cmin}) |F_c - \overline{F_c}|}{F_{cmax} - \overline{F_c}} \right] \quad (12)$$

当判断 $F_c < \overline{F_c}$ 时, 调整相应个体的交叉概率:

$$P_c = 1 - (1 - P_c) P_c \left[1 - \frac{(P_{cmax} - P_{cmin}) |F_c - \overline{F_c}|}{\overline{F_c} - F_{cmin}} \right] \quad (13)$$

假设变异种群中, F_v 是适应度值, $\overline{F_v}$ 是适应度平均值, F_{vmax} 是适应度值最大值, F_{vmin} 是适应度值最小值, P_v 是变异率, P_{vmax} 是变异率当中的最大值, P_{vmin} 是变异率当中的最小值;

当判断 $F_v \geq \overline{F_v}$ 时, 调整相应个体的交叉概率:

$$P_v = P_v \left[1 - \frac{(P_{vmax} - P_{vmin}) |F_v - \overline{F_v}|}{F_{vmax} - \overline{F_v}} \right] \quad (14)$$

当判断 $F_v < \overline{F_v}$ 时, 调整相应个体的交叉概率:

$$P_v = 1 - (1 - P_v) P_v \left[1 - \frac{(P_{vmax} - P_{vmin}) |F_v - \overline{F_v}|}{\overline{F_v} - F_{vmin}} \right] \quad (15)$$

4 结果分析

通过 MATLAB 软件, 设置种群规模 100, 迭代次数 200, 精英选择保优数 2, 初始的交叉率 0.8, 初始的变异率 0.1, 初始的最大交叉率 0.9, 最小交叉率 0.5, 初始的最大变异率 0.2, 最小变异率 0.005。经计算和解码得出最优化工序安排, 见表 7。优化前后的工作站工作时间对比如图 5 所示。

表 7 工作站标准时间
Tab.7 Standard time of working station

工作站 编号	工序	时间/s
K1	41 2 3 4 15 6 7 8 37 38 10	624
K2	111213141516171819 20 21 22 28 23 27 26 25 24 29 56 49	634
K3	30329 31333435 36 39 40 42	619
K4	44 43 45 46 47 54 48 51 50	685
K5	525358555759	730
K6	60616263	717
K7	64 65 68 66 67 69 70 72 71	546
K8	7374757677	597

由图 5 可知, 捆绑包装线优化前瓶颈工作站为 K8, 优化后瓶颈工作站为 K5, 瓶颈工作时间分别为 855、730 s。瓶颈工作时间即为最小生产节拍 C_T , 作为安排捆绑包装作业时生产节拍的主要依据。再比较分析捆绑包装线平衡几个关注的评价指标。

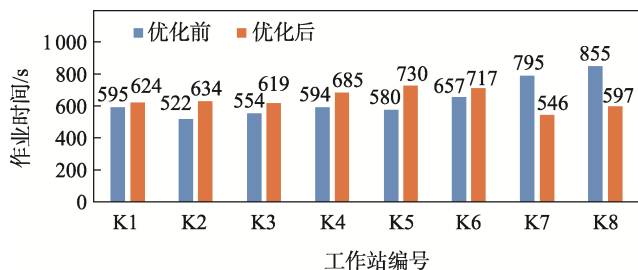


图 5 优化前后的工作站工作时间对比柱状图

Fig.5 Bar chart of working hours of working station after IE improvement

1) 平衡率 L_B :

$$L_B = \frac{\sum_{k=1}^m T_k}{\max\{T_k\} \times m} \times 100\% \quad (16)$$

2) 平衡损失率 d :

$$d = \frac{\max\{T_k\} \times m - \sum_{k=1}^m T_k}{\max\{T_k\} \times m} \times 100\% \quad (17)$$

3) 平滑指数 S_I :

$$S_I = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^m \max(\max\{T_k\} - T_k)^2}{m}} \quad (18)$$

优化前后各项指标对比情况见表 8。

表 8 捆绑包装线优化前后平衡情况对比
Tab.8 Comparison of bundle packaging line balance before and after improvement

捆绑包装线	C_T/s	$L_B/\%$	$d/\%$	S_I
优化前	855	75.32	24.68	238.65
优化后	730	88.22	11.78	103.99

从表 8 可见, 本文通过遗传算法对空投捆绑包装线优化后, 最小生产节拍从 855 s 降低至 730 s; 捆绑包装线平衡率从 75.32% 提升至 88.22%, 已经达到了优的评价标准; 捆绑包装线平衡损失率从 24.68% 降低至 11.78%, 有了较大改善; 捆绑包装线平滑指数从 238.65 降低至 103.99, 工作站负荷得到较好的均衡, 优化效果明显。

在工作站和工序数量固定、工序作业时间确定的情况下, 将工序合理地分配到工作站中, 尽可能平均每个工作站的作业总时间, 从而极力减小工作站之间的工作时间差, 同时缩短最小生产节拍, 是优化空投捆绑包装线和提升效率的关键。遗传算法在遵守工序优先关系限制的前提下, 通过全局搜索最小化生产节拍、平衡损失率和工作站负荷差异的工序安排, 从而确定捆绑包装线中最优的工序编排和分配方案。最优化的工序安排, 可使工作站之间的工作时间差异化达到最小, 操作员的负荷达到最均衡、心态更平衡、工作更积极, 瓶颈工作站的工作总时间减到最少, 对应生产节拍最小, 从而提升捆绑包装效率。因此, 本文

通过遗传算法优化后的空投捆绑包装线具有更好的负荷均衡和保障效率。

5 结语

本文对按照现行空投捆绑包装方法设计的空投捆绑包装线进行了介绍, 基于遗传算法构建了捆绑包装线平衡问题的数学模型, 聚焦关注的最小生产节拍、平衡率、平滑指数等多目标, 采用基于 AHP 法的加权法归一化处理为综合优化目标。根据空投捆绑包装工序优先关系限制, 基于遗传算法研究设计了包括编码、初始化种群、解码及适应度函数、选择、交叉、变异、及自适应交叉变异概率等内容的算法, 通过该算法运行可解算出空投捆绑包装线的最优化工序安排。通过最小生产节拍、平衡率、平衡损失率、平滑指数等关注的关键指标对比分析, 优化后最小生产节拍缩短 125 s, 平衡率提升 12.9%, 平滑指数降低 134.66, 工作平衡性和保障效率均明显提高, 验证了基于遗传算法最优化空投捆绑包装线工序安排的可行性和优越性, 为构建和完善空投捆绑包装线及提升空投捆绑包装效率提供了有益借鉴。

参考文献:

- [1] 廖圣洁, 阳静, 方政, 等. 不同缓冲方式下发电机空投跌落冲击仿真与性能分析[J]. 包装工程, 2024, 45(19): 334-339.
LIAO S J, YANG J, FANG Z, et al. Simulation and Performance Analysis of Generator Drop Impact in Different Buffering Modes[J]. Packaging Engineering, 2024, 45(19): 334-339.
- [2] 陶华堂, 宋华文. 空投物资捆绑包装分析与建模[J]. 装备指挥技术学院学报, 2005, 16(6): 21-25.
TAO H T, SONG H W. Analyzing and Modeling the Binding and Packing of Airdropped Material[J]. Journal of Institute of Command and Technology, 2005, 16(6): 21-25.
- [3] 鲁超宇, 陈金宝, 王宸, 等. 组合式气囊在重装空投中的缓冲性能分析[J]. 宇航学报, 2023, 44(6): 841-850.
LU C Y, CHEN J B, WANG C, et al. Analysis of Cushioning Performance of Combined Airbag in Heavy Airdrop[J]. Journal of Astronautics, 2023, 44(6): 841-850.
- [4] 梅祯琳. 重装空投货物离机姿态分析及优化设计[D]. 武汉: 华中科技大学, 2023.
MEI Z L. Attitude Analysis and Optimization Design of Reloaded Airdrop Cargo Leaving the Plane[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2023.

- [5] 严李. 分析我国重装空投系统应用流程[J]. 科技资讯, 2022, 20(7): 19-21.
YAN L. Analysis on the Application Process of Heavy Air Drop System in China[J]. Science & Technology Information, 2022, 20(7): 19-21.
- [6] 张武生, 渠文静, 张文静, 等. 重装空投快速捆绑包装与解脱问题研究[J]. 包装工程, 2018, 39(17): 243-247.
ZHANG W S, QU W J, ZHANG W J, et al. Researching on Speedy Bundling Package and Disengagement for Reloading Airdrop[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(17): 243-247.
- [7] 罗晓军, 林洁, 李延儒, 等. 基于排队论的 ADBAP 能力评估方法研究[J]. 计算机仿真, 2022, 39(5): 56-59.
LUO X J, LIN J, LI Y R, et al. Research on Capacity Evaluation Method of Airdrop Bundling and Packaging Based on Queuing Theory[J]. Computer Simulation, 2022, 39(5): 56-59.
- [8] 黄华星, 韦海燕, 李敏虔, 等. 工业工程在生产线策划中的应用[J]. 装备制造技术, 2024(7): 106-109.
HUANG H X, WEI H Y, LI M Q, et al. Application of Industrial Engineering in Production Line Planning[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2024(7): 106-109.
- [9] 高建伟, 李杨博, 马江. 基于工业工程方法的装焊线平衡优化[J]. 汽车实用技术, 2024, 49(13): 116-120.
GAO J W, LI Y B, MA J. Optimization of Assembly and Welding Line Balance Based on Industrial Engineering Methods[J]. Automobile Applied Technology, 2024, 49(13): 116-120.
- [10] ABDOLREZA R, DAVIDE G.A Tabu Search Algorithm for the Cost-Oriented Multi-Manned Assembly Line Balancing Problem[J]. International Journal of Industrial Engineering and Production Research, 2020, 31(2): 189-202.
- [11] 王帅. 基于改进遗传算法的混流装配线平衡研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2022.
WANG S. Research on Balance of Mixed-Model Assembly Line Based on Improved Genetic Algorithm[D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2022.
- [12] FARROKH S. Industrial Engineering Foundations: Bridging the Gap between Engineering and Management[M]. [s. l.]: De Gruyter, 2023.
- [13] POSSAN M C Jr, MICHELS A S, MAGATÃO L. An Exact Constraint Programming Based Procedure for the Multi-Manned Assembly Line Balancing Problem[J]. Computers & Operations Research, 2024, 162: 106451.
- [14] CHING L T. Industrial Engineering and Applications[M]. [s. l.]: IOS Press, 2023.
- [15] WANG X, ZHANG K, WANG W. Industrial Engineering Technology and Production Management Applications[J]. Industrial Technology Research, 2024, 2(1): 7-9.
- [16] 闫旭辉. FV 公司标准工时管理优化方案研究[D]. 长春: 吉林大学, 2024.
YAN X H. Research on Optimization Scheme of Standard Working Hours Management in FV Company[D]. Changchun: Jilin University, 2024.