doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.10.064

基于多目标优化算法的桑蚕养殖基地低碳布局优化研究

郦仕云　李诗妮　吕瑞峰　裴　植　陈　勇　易文超
（浙江工业大学机械工程学院，杭州 310023）

摘要：随着低碳理念的全球推广，茧丝绸产业亟需向低碳化转型，促使其源头养蚕基地在提升经济效益的同时实现环境友好型发展。本研究以某养蚕基地为对象，针对设施长宽各异的多行设施布局问题，将桑蚕存活率及生物学特性融入布局优化框架，并以低碳目标为导向，构建了以最小化运营成本和最大化非物流关系为目标的规划方法。提出了一种融合动态变异策略与模拟退火局部搜索机制的改进 NSGA－Ⅱ算法（Improved non-dominated sorting genetic algorithm－Ⅱ，IMNSGA－Ⅱ），显著增强了算法的搜索效率与收敛性能。实验结果表明，优化方案使运营成本降低 29.29%，非物流关系改善 10.23%，布局面积压缩 29.04%。同时，该方案严格遵循生物安全隔离规范，通过将清洗消杀区合理配置于布局边界，显著降低了交叉污染风险，为养蚕基地的低碳化运营提供了技术支撑。

关键词：蚕存活率；多行设施布局；低碳规划；改进 NSGA－Ⅱ；多目标优化
中图分类号：TH181　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2025)10-0704-12　　**OSID**：

Low-carbon Layout Optimization of Silkworm Breeding Facilities Based on Multi-objective Optimization Algorithms

LI Shiyun　LI Shini　LÜ Ruifeng　PEI Zhi　CHEN Yong　YI Wenchao
(*College of Mechanical Engineering*, *Zhejiang University of Technology*, *Hangzhou* 310023, *China*)

Abstract: With the global dissemination of low-carbon principles, the sericulture industry urgently needs to transition toward low-carbon operations, which requires its fundamental silkworm breeding facilities to improve both economic efficiency and environmental sustainability. Focusing on a specific silkworm breeding facility, aiming to address a multi-row layout problem with facilities of varying lengths and widths. It innovatively integrated silkworm survival rates and biological characteristics into the layout optimization framework, guided by low-carbon objectives, and a planning approach aimed at minimizing operational costs and maximizing non-logistical relationshipswas developed. To this end, an improved non-dominated sorting genetic algorithm－Ⅱ (IMNSGA－Ⅱ), incorporating dynamic mutation strategies and a simulated annealing local search mechanism, was proposed, which significantly improved search efficiency and convergence performance. The performance of IMNSGA－Ⅱ was verified by the IGD index comparative experiment, and the layout examples were solved by IMNSGA－Ⅱ. The experimental results demonstrated that the optimized scheme reduced operational costs by 29.29%, enhanced non-logistical relationships by 10.23%, and decreased the layout area by 29.04%. Furthermore, the scheme strictly adhered to biosafety isolation standards by optimally positioning the cleaning and disinfection zone at the layout periphery, significantly mitigating cross-contamination risks, thereby providing robust scientific support for the low-carbon operation of silkworm breeding facilities.

Key words: silkworm survival rate; multi-row facility layout; low-carbon planning; enhanced NSGA－Ⅱ; multi-objective optimization

收稿日期：2025－04－19　修回日期：2025－05－14
基金项目：国家自然科学基金面上项目(72271222、71871203)和国家自然科学基金专项项目(L1924063)
作者简介：郦仕云(1978—)，男，副教授，博士，主要从事智能制造系统工程研究，E-mail：lishiyun@zjut.edu.cn
通信作者：裴植(1982—)，男，教授，博士，主要从事生产制造系统建模与优化研究，E-mail：peizhi@zjut.edu.cn

0　引言

在经济全球化的大背景下，全球茧丝绸市场的竞争激烈程度与日俱增，养蚕产业面临原材料价格攀升、劳动力短缺及利润空间逐步收窄等多重发展困境，制约行业可持续发展。与此同时，随着绿色低碳发展理念在全球范围内的广泛传播[1]，茧丝绸企业纷纷将低碳转型作为战略重点，探索绿色发展路径。中国蚕茧、生丝等丝绸原材料产量占据全球总量 80% 以上，对全球丝绸产业可持续进程具有直接且关键的影响。然而，如何在落实低碳发展要求的同时，显著提升企业的经济效益与运营效率，这对于行业的长远发展以及在全球市场的竞争力提升，构成了亟待破解的重大挑战。

设施布局规划（Facility layout planning，FLP）旨在给定的空间范围与约束条件框架内，对生产系统中的各类资源实施合理的组织与分配，从而实现设计目标集的最优化[2]。工厂布局作为 FLP 的重要分支，包含工厂总体布局与车间布局两个层面[3]。SULE[4] 和 TOMPKINS 等[5] 提出科学合理的设施布局设计，不仅能够大幅提升企业整体运营效率，还可使总运营成本降低 50%。

多行设施布局因其空间利用率高、物料传输灵活性强及搬运设备使用效率显著等优势，已成为国内外学者的重点研究方向。现有研究采用多种启发式算法求解多行设施布局问题，包括遗传算法[6]、模拟退火算法[7]、珊瑚礁算法[8] 等。在该布局结构中，设施间物料流动均依托交叉分布的横向与纵向通道系统完成转运。董舒豪等[9-10] 提出考虑物料装卸点与搬运通道的多行设施布局设计方法，并相继研究了两种典型情形：纵向通道数量已知但位置不确定；纵向通道数量与位置均不确定。但这些研究均以设施宽度相等为前提条件。在并行排序问题（PROP）方面，GONG 等[11] 研究了兼顾生产线柔性的动态并行排序问题，提出了一种结合和声搜索与禁忌搜索的混合算法，有效应对大规模优化场景。同样针对 PROP，CRAVO 等[12] 提出一种基于迭代局部搜索的解决方案。然而，上述两项研究均未考虑布局中通道配置的影响，且仅聚焦于物料搬运成本优化，忽略了其他复杂约束条件的综合分析。

本研究针对多行设施布局中未充分考虑的复杂因素，构建一种设施长宽各异且在旋转后综合考虑上、下料口的多行设施布局优化模型。以某养蚕基地为研究对象，将蚕存活率及生物安全隔离原则等生物学特性融入布局优化框架，同时兼顾低碳目标，实现环境效益与经济效益的协同提升，为传统农业向智慧农业的转型提供理论依据。

1　养蚕基地现状分析

L 基地位于广西某地，是一家蚕桑产业示范基地，致力于建设成为国内一流的智慧养蚕基地。广西属亚热带季风气候区，气候温暖湿润，年平均气温在 16～23℃之间，这种气候条件为桑树种植及蚕的生长发育营造了适宜环境，但也给基地温湿度控制带来较大挑战。特别是在夏季高温高湿和冬季低温潮湿的季节，需要采取额外的温控措施，以确保蚕的生长环境稳定。基地的桑叶供应主要依赖于自有的桑叶园，桑叶采摘后通过内部物流系统搬运至基地。摘茧后的蚕茧在质检中心完成质量检测后，通过外部物流搬运至下游加工企业。基地总占地面积为 8 625 m^2（75 m × 115 m），布局如图 1 所示，各设施的尺寸见表 1。基地年有效生产周期为 240 个工作日。基地采用标准化蚕种生产模式，规划年产能为 1 800 张蚕种，其中“张”为蚕种生产专用计量单位，特指单张蚕种纸上承载的标准蚕卵数量（本研究为 25 000 只/张）。

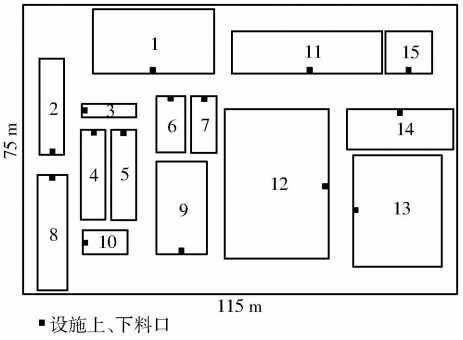


图 1　工厂化丝绸原料生产基地布局示意图

Fig. 1　Layout of factory silk raw material production base

表 1　基地设施尺寸

Tab. 1　Dimensions and floor space of base　m

序号	设施名称	长	宽
1	桑叶存储室	31	16
2	1～3 龄蚕房	24	6
3	蚕盘更换区	14	3
4	低龄蚕喂养区	22	6
5	高龄蚕喂养区	22	6
6	4 龄蚕房	14	7
7	高龄蚕盘存储室	14	6
8	低龄蚕盘消杀区	7	29
9	5 龄蚕房	23	13
10	低龄蚕盘存储室	12	6
11	高龄蚕盘消杀区	39	10
12	上蔟区	37	27
13	蚕蔟存储室	28	23
14	蚕蔟消杀区	28	10
15	质检中心	12	10

然而,当前基地在车间布局方面缺乏系统的理论指导和科学方法,过度关注生产效率的提升,而忽视了养蚕基地本身具有的生物特性,在生产布局和系统规划方面存在显著问题,直接影响基地的运营效率与效益。主要问题包括:

(1)温度控制不够精细。温度是蚕生长发育的重要环境因素之一。现有设施布局中,设备内部与外部温差可达 5 ~ 8℃,远超蚕适宜生长的温差范围(±2℃),导致在蚕盘搬运过程中,蚕因温度变化受到不利影响,从而降低了存活率。

(2)喂养过程粗放,资源浪费严重。在现有养殖过程中,桑叶的投喂比例始终固定,未能根据蚕的实际生长需求进行调整,导致桑叶浪费率高达 10% ~15%。这种粗放式喂养方式增加了桑叶消耗成本。

(3)基地整体布局不合理,物流效率低下。物流动线设计缺乏稳定性且差异较大,导致物料搬运路径长达 2 458 m。此外,物品堆放无序,如图 2 所示,导致物流路线交叉频繁,引发物流冲突,进一步降低搬运效率。同时,空间功能分区不科学、细分不足,不同龄期的蚕群未按生物隔离要求进行物理分隔布置,增加了交叉感染风险,影响蚕群健康状态与生产稳定性,凸显布局管理问题。



(a) 消杀区 (b) 蚕盘堆放

图 2 养蚕基地现场部分物流示意图

Fig. 2 Logistics diagrams of part of sericulture base

为提高 L 公司蚕茧生产效益,设计更高效的物料搬运方案,实现车间布局的合理化,本研究将对 L 公司基地布局进行深入分析与优化设计。通过将桑蚕的生物特性融入到科学的布局规划中,为 L 公司乃至整个蚕桑行业提供可借鉴的实践经验,推动产业向高效、智能、绿色的方向持续发展。

2 数学模型建立

2.1 问题描述与相关假设

本研究基于设施布局原则,以养蚕基地设施布局优化为研究目标。鉴于该基地在实际运营中对 AGV 搬运通道的特定需求,加之其整体布局特征与多行设施布局模式相契合,故将该基地布局纳入多行设施布局研究的范畴。然而,与常规多行布局相比,该基地内各设施长、宽都不相等,这一特性要求在布局优化过程中引入额外的约束条件,以确保方案的实际可行性与最优性。该多行设施布局模式如图 3 所示,其具体构型如下:布局始于区域左侧边界,将若干尺寸各异的矩形设施配置于多个高度不等的行内(行高对应于设施的宽度)。各相邻行间设有横向通道,而在中间行内则布设纵向通道,以此实现设计目标集的最优化配置。基地描述为有 N 个面积不相等的设施 $D_i(i=1,2,\cdots,N)$。x 轴与基地的长边平行重合,y 轴与基地的宽边平行重合;设施 i 的长度和宽度分别为 l_i、w_i;横向通道和纵向通道宽度为 w_h,设施间的最小安全间隔为 s。

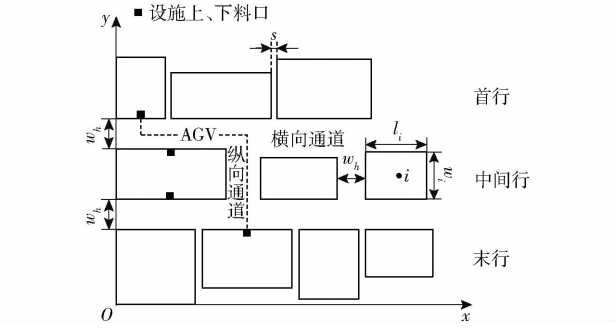


图 3 布局坐标部分设施示意图

Fig. 3 Facility layout diagram

本研究针对多行设施布局问题提出如下基本假设条件:①各个设施几何尺寸(长、宽)为已知定值。②设施物料上、下口均位于设施上下两侧边界中心位置。③通道配置参数(包括横向与纵向通道数量、空间分布)作为优化变量处理,纵向通道按自下而上顺序编号为纵向通道 1 ~ q。④中间行设施设置 2 个进出口,首行和末行设施设置 1 个进出口。

2.2 通道模型

在多行设施布局情境下,为确保同一行内设施间物流的高效衔接,需配置横向通道,同时为优化跨行设施间物料搬运效率,需在相邻中间行设施间增设纵向通道,以实现行间顺畅连接并提升物流路径的整体性能。区别于其他布局的纵向通道设置方式,本研究在中间行的每一对相邻设施间均设立纵向通道,使设施能够便捷地选取最短路径。布局中纵向通道的生成流程如图 4 所示。

2.3 距离计算

为精确求解相关参数值,本研究对多行设施布局中的物料搬运模式进行了系统性归纳与分类,如图 5 所示。由于多行布局中的设施通常沿直线路径排列,物料搬运往往受到网格状结构的限制,只能沿水平或垂直方向移动,而无法直接穿透障碍物进行直线移动。因此,采用曼哈顿距离作为实际搬运的距离计算方式[13]。

图 5a 中,同行搬运的距离计算方式为

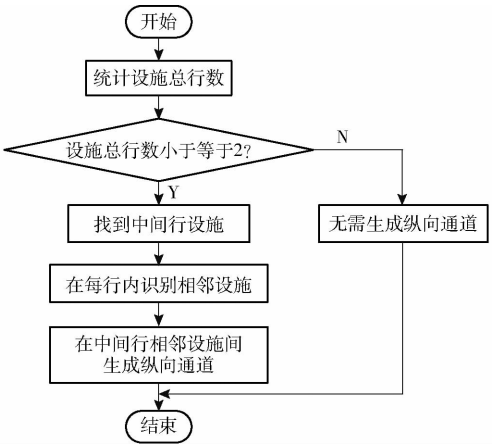
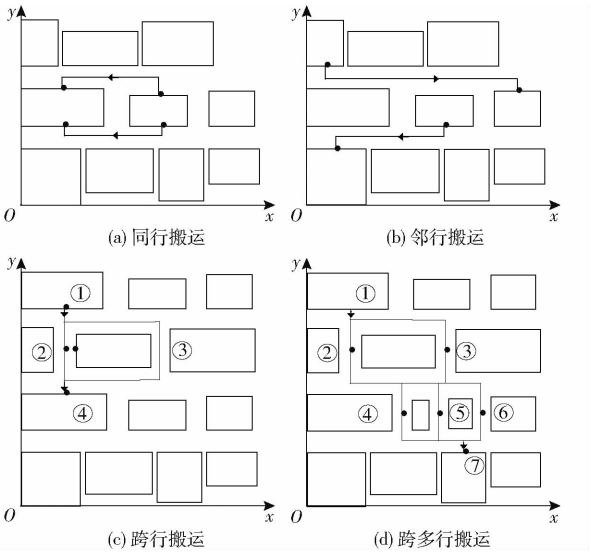


图 4　纵向通道生成流程图

Fig. 4　Vertical channel generation flowchart



(a) 同行搬运　(b) 邻行搬运　(c) 跨行搬运　(d) 跨多行搬运

图 5　物料搬运基本类别

Fig. 5　Basic types of material handling

$$d_{ij} = |x_i - x_j| + \min(d_1, \cdots, d_k, \cdots, d_q) - \frac{l_i + l_j}{2} \tag{1}$$

其中
$$d_k = |y'_k - y_i| + |y'_k - y_j| \tag{2}$$

式中　d_{ij}——设施 i 到 j 的搬运距离

x_i——设施 i 中心点横坐标

y_i——设施 i 中心点纵坐标

x_j——设施 j 中心点横坐标

y_j——设施 j 中心点纵坐标

y'_k——纵向通道 k 在 y 方向上的中心坐标

l_i——设施 i 长度

l_j——设施 j 长度

图 5b 中，邻行搬运的距离即为曼哈顿距离，有

$$d_{ij} = |x_i - x_j| + |y_i - y_j| - \frac{l_i + l_j}{2} \tag{3}$$

在跨行搬运场景中（如图 5c 和图 5d 所示），鉴于物料搬运设备可根据实际布局特征选择多条可行路径，因此需要通过路径规划算法对所有可行路径进行优化分析，以确定具有最小搬运距离的最优路径。基于邻接图表示方法[9]，本研究首先量化设施 i 和设施 j 所在行之间的通道数量，记为 n_d。通过系统化分析，进一步确定了节点个数为 n_o，计算公式为

$$n_o = 2 + n_d \tag{4}$$

则可以确定图 5c 和图 5d 所需绘制的节点数分别为 4 和 7。以图 5d 为例，节点①和⑦为两设施 i 和 j 的中心点，节点②和③为第 3 行中纵向通道的中心点，节点④、⑤、⑥为第 2 行中纵向通道的中心点，进而可以生成图 6 所示的邻接图。

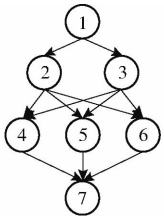


图 6　邻接图

Fig. 6　Adjacent map

2.4　蚕存活率影响因素的多元线性回归模型

2.4.1　建模中蚕存活率影响因素分析

在桑蚕基地布局优化模型的构建中，蚕的存活率是一个关键变量，直接影响着物流量、桑叶消耗量以及相关的成本和碳排放。现有文献中考虑生物存活率的布局研究有限，鉴于此，在优化建模过程中对存活率参数进行量化与评估具有重要意义。

在蚕的生长过程中，存活率受到环境条件、饲料质量以及病害防治等内外部因素的综合影响[14-16]。为深入剖析影响桑蚕存活率的各类因素及其内在关联，本研究运用线性回归模型，探究对蚕存活率影响最为显著的因素，即

$$\lambda = \beta_0 + \beta_1 F_X + \beta_2 F_W + \beta_3 F_Q + \beta_4 F_D + \varepsilon \tag{5}$$

式中　λ——蚕存活率

β_0——截距项

β_1、β_2、β_3、β_4——各因素的回归系数

F_X——温度偏差

F_W——湿度偏差

F_Q——桑叶新鲜度

F_D——病害率

ε——未被考虑的随机误差

本研究的所有实验数据均来源于基地历史记录，相关回归分析与计算任务通过 Matlab 工具完成，最终生成实际存活率与预测存活率之间的回归关系图（图 7）和残差分布图（图 8）。

由图 7 可见，回归图中数据点基本沿对角线（$y = x$）分布，表明多元线性回归模型能够有效捕

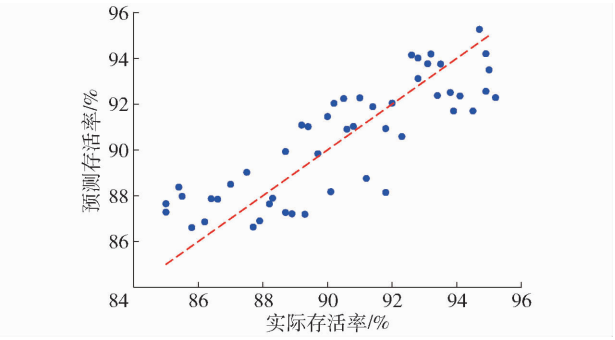


图 7 存活率回归图

Fig. 7 Survival regression plot

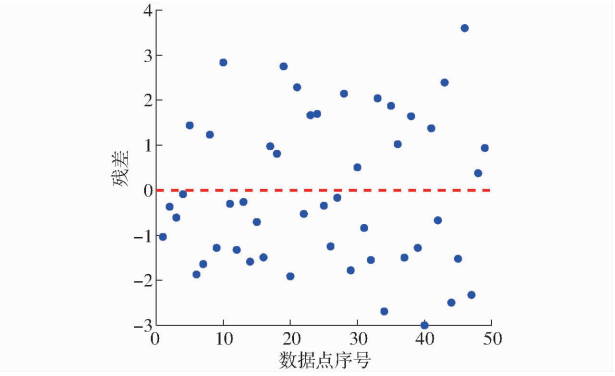


图 8 残差分布图

Fig. 8 Residual plot

捉环境温度、环境湿度、桑叶新鲜度及病害防治与蚕群存活率之间的关联性，预测值与实际值高度一致。

通过图 8 的散点分布，可观察到数据点围绕中心虚线呈均匀分布，未表现出明显系统性模式或趋势，表明残差符合线性回归的随机性假设。

回归分析所得的回归结果、标准误差、t 值及 p 值等统计指标如表 2 所示。根据表中数据可以观察得到，病害影响表现出最强的解释力，其回归系数绝对值最大且统计显著性极为显著。相比之下，桑叶新鲜度和温度偏差虽然也显示出统计学意义，但其影响程度远低于病害因素。湿度偏差的 p 值为 0.056 8，未达到显著性阈值 0.05，因此被排除在主要影响因素之外。鉴于病害因素对蚕存活率的显著影响，下面针对蚕病害因素对存活率影响开展研究，明晰病害与蚕存活率间的深层关联。

表 2 回归结果

Tab. 2 OLS fitting results

变量	回归结果	标准误差	t	p
β_0	101.850 2	1.165 4	85.811 0	$1.594\,3\times10^{-51}$
F_X	−2.946 4	1.294 0	−2.277 0	0.027 5
F_W	−0.428 3	0.219 1	−1.955 2	0.056 8
F_Q	−0.280 6	0.079 1	−3.546 9	0.000 9
F_D	−12.747 0	1.645 1	−7.748 3	$8.033\,4\times10^{-10}$

2.4.2 蚕病害因素动态变化

在桑蚕基地中，由于小龄蚕对外界病原体的抵抗力较弱，而大龄蚕的代谢产物容易成为病菌传播的媒介，若小龄蚕和大龄蚕的养殖设施之间距离过近，则会增加交叉感染的概率，从而降低蚕的存活率。本研究将小龄蚕房与大龄蚕房间距视为影响病害发生的主要因素，深入分析该间距与蚕群存活率之间的关联性，揭示间距较小时存活率降低、间距较大时存活率升高的规律。后续研究将引入正态分布理论。

本研究中将小龄蚕房（设施 2）和大龄蚕房（设施 9）的欧氏距离 $d'_{2,9}$ 作为自变量，存活率 λ 作为因变量。以累积分布函数表示的病害率模型中的病害率随距离平滑递减且边界值更接近要求的病害率范围，与生物学中病害传播的渐进性一致。因此，本文选择使用累积分布函数的病害率模型描述小龄蚕房和大龄蚕房距离与存活率的关系，即

$$\lambda=\lambda_{\min}+(\lambda_{\max}-\lambda_{\min})F\left(\frac{d'_{2,9}-d_{2,9}^{\min}}{d_{2,9}^{\max}-d_{2,9}^{\min}}\middle|\mu,\sigma\right) \tag{6}$$

式中 $F(x)$——正态概率分布函数

$\lambda_{\min}$——最小存活率

$\lambda_{\max}$——最大存活率

μ——均值，表示分布的中心位置

σ——标准差，表示分布的离散程度

$d_{2,9}^{\min}$——布局中设施 2 和设施 9 的最小欧氏距离（两者相邻）

$d_{2,9}^{\max}$——布局中设施 2 和设施 9 的最大欧氏距离（分别位于布局的左下角和右上角）

2.5 目标函数

如前所述，本研究结合当前基地低碳优化布局的需求，构建了以最小化运营成本和最大化非物流关系为优化目标的多目标函数。

2.5.1 最小化运营成本

基地运营成本主要包括 4 部分：物料搬运成本、建设折旧成本、碳排放成本和其他成本，即

$$J_1=Z_1+Z_2+Z_3+Z_4 \tag{7}$$

式中 J_1——基地运营成本

Z_1——物料搬运成本

Z_2——建设折旧成本

Z_3——碳排放成本

Z_4——其他成本，如桑叶消耗成本、消毒用药成本等

2.5.1.1 物料搬运成本

物流成本是企业成本的主要组成部分。本研究揭示，大龄蚕房与小龄蚕房间距与病害发生率呈显

著负相关，这一空间分布特性直接影响桑蚕存活率，从而对布局优化产生重要作用。因此，在物料搬运成本核算中，需将存活率作为关键变量纳入考量。随着桑蚕存活率的提升，物料搬运需求相应增加，具体表现为桑叶搬运量上升以满足高密度饲喂需求、蚕盘清洗频率增加以确保卫生标准，以及蚕体上蔟物流量扩大以适应更大规模的结茧需求。物料搬运成本计算式为

$$Z_1 = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\frac{c_{ij}f_{ij}d_{ij}}{\lambda} \tag{8}$$

式中　n——布局内的设施总数

c_{ij}——设施 i 到 j 之间单位距离的单位搬运成本

f_{ij}——设施 i 到 j 之间的物料搬运量

2.5.1.2　建设折旧成本

由于基地建设涉及大量基础设施投资，建设成本对基地的整体效益具有重要影响。因此，在规划阶段不仅需要关注养殖成本，还应综合考虑前期建设投资对基地效益的长期影响，力求在建设规模与运营效率之间取得最佳平衡，有

$$Z_2 = \frac{c_b ab\theta}{t} \tag{9}$$

其中

$$\theta = \frac{1}{t_{\lim}} \tag{10}$$

式中　c_b——基地单位面积的建设成本

a——基地总长度

b——基地总宽度

θ——工业厂房年折旧系数

t——年有效生产周期

$t_{\lim}$——工业厂房的折旧年限

2.5.1.3　碳排放成本

该生产基地的碳排放主要由温控系统碳排放和设备运行碳排放两部分构成。其中，温控碳排放由两部分组成：空调系统运行直接产生的能源消耗碳排放；由蚕群代谢呼吸活动引起的热负荷所导致的间接空调能耗碳排放，有

$$Z_3 = [(C_{\text{space}} + C_{\text{equipment}})E_{elec} + C_{meta}E_{meta}]c_c \tag{11}$$

式中　C_{space}——基地每日温控能耗

$C_{\text{equipment}}$——设备运行能耗

E_{elec}——碳排放因子

C_{meta}——桑蚕生理代谢活动产生的碳排放量

E_{meta}——呼吸因子

c_c——基地内单位碳排放成本

鉴于蚕的生长环境对恒温条件的长期依赖性，温度控制是该基地的重要能源消耗之一。温控消耗的主要影响因素是室内外温差，温差增大直接导致热交换速率提升，从而增加温控系统的能源需求。其次是建筑本身的隔热性能，建筑保温性能的优劣直接影响热量传递效率，保温性能不足将导致冷热量散失加剧，进而迫使空调系统以更高频率运行以维持桑蚕所需的恒温环境。本研究重点关注基地建筑结构中四面垂直墙体和水平屋顶的传热性能。有

$$C_{\text{space}} = FA_{\text{total}}\Delta T \tag{12}$$

其中

$$A_{\text{total}} = 2H(a+b) + ab \tag{13}$$

式中　F——围护结构传热系数

A_{total}——总传热面积

ΔT——平均室内外温差

H——基地内建筑的平均高度

本研究特别关注桑蚕生理代谢活动所产生的呼吸碳排放。在生长发育过程中，桑蚕通过呼吸、消化等生理过程产生碳排放影响环境的碳循环。有

$$C_{meta} = \frac{N_{\text{silk}}q_{\text{silk}}}{\lambda} \tag{14}$$

式中　N_{silk}——桑蚕数量

q_{silk}——单只桑蚕代谢热

2.5.2　最大化非物流关系

非物流关系指的是在布局优化中，注重信息交流、人员互动或功能协作等非物质流动的联系。设施间的非物流关系通常与曼哈顿距离无关，以欧氏距离作为衡量指标更为适宜，其目标函数 J_2 表示为

$$J_2 = U - \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} b_{ij}r_{ij} \tag{15}$$

式中　U——一个大数，保证 J_2 为正数

r_{ij}——设施间的非物流关系密切值，如表 3 所示

b_{ij}——设备单元之间的密切度关联因子

表 3　设施关系密切度分类

Tab. 3　Classification of facility closeness

密切度等级	符号	r_{ij} 量化值
绝对重要	A	3
特别重要	E	2
重要	I	1
一般	O	0
不重要	U	-1

设备单元之间的密切度关联因子主要和设施单元间的欧氏距离 d'_{ij} 以及最大可能欧氏距离 $d'_{\max}$ 有关，具体关系见表 4。$d'_{\max}$ 的取值方法为：考虑到设施几何分布对距离的影响，将所有设施中长度最小的两个设施，分别放置于矩形布局总区域的两对角处。在此设定下，这两个设施之间的欧氏距离即 $d'_{\max}$。d'_{ij} 的计算式为

$$d'_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \tag{16}$$

表 4 密切度关联因子

Tab. 4 Closeness association factors

d'_{ij}范围	b_{ij}
$(0, d'_{\max}/6]$	1.0
$(d'_{\max}/6, d'_{\max}/3]$	0.8
$(d'_{\max}/3, d'_{\max}/2]$	0.6
$(d'_{\max}/2, 2d'_{\max}/3]$	0.4
$(2d'_{\max}/3, 5d'_{\max}/6]$	0.2
$(5d'_{\max}/6, d'_{\max}]$	0

2.6 约束条件

2.6.1 间距约束

中间行相邻设施间需设置纵向通道,行与行之间则要设置横向通道,这些通道设置需满足最小宽度 w_h。首行与末行的相邻设施间无需设置通道,仅需满足间距 s,如图 3 所示。

对于首行相邻设施 i 和设施 j 的水平约束为

$$|x_i - x_j| - \frac{l_i + l_j}{2} = s \tag{17}$$

对于中间行相邻设施 i 和设施 j 的水平约束为

$$|x_i - x_j| - \frac{l_i + l_j}{2} = w_h \tag{18}$$

行和行的垂直约束为

$$|y_m - y_n| - \frac{w_m + w_n}{2} = w_h \tag{19}$$

式中 m——换行前该行最高上边界的设施序号

n——换行后该行的设施序号

w_m——设施 m 宽度

w_n——设施 n 宽度

2.6.2 边界约束

各个设施在车间布局时,不能超出车间边界,即

$$\begin{cases} x_i - \dfrac{l_i}{2} \geqslant 0 \\ x_i + \dfrac{l_i}{2} \leqslant a \\ y_i - \dfrac{w_i}{2} \geqslant 0 \\ y_i + \dfrac{w_i}{2} \leqslant b \end{cases} \tag{20}$$

2.6.3 重叠约束

本研究规定各行设施的布置需与通道精确对齐,在完成设施排列后,需实施垂直方向的位移调整,然而此操作易导致设施在调整后与横向通道产生空间交叠现象。基于此,有必要增设设施与相邻横向通道间的重叠约束,有

$$y_i + \frac{l_i}{2} + \Delta Y_i + \frac{w_h}{2} \leqslant y'_k \tag{21}$$

式中 ΔY_i——设施 i 在垂直方向上的位移

2.6.4 特殊位置约束

基地中还存在一些具有特殊要求的设施,需根据其功能特点和实际需求进行特定布局设计。例如,在本实例中,设施 8 作为蚕盘清洗消杀区,主要负责收集蚕沙(蚕的排泄物)以及对养蚕器具的杀菌消毒工作。由于蚕沙需要集中处理或外运,因此将设施 8 设置在布局的边界处,一方面便于蚕沙的收集、存储和外运,减少废物转运对基地内部物流和生产的干扰。另一方面,可以有效减少蚕沙和其他废弃物对养殖区域的影响,避免交叉污染。同时,还能减少消杀过程中产生的有害气体对养殖区的影响,确保气体不会过量扩散,从而降低对蚕正常生长的威胁,避免蚕的大规模死亡,蚕盘清洗消杀区的位置约束为

$$P_s = \{(x_i, y_i) \mid x_i = x_s, y_i = y_s\} \tag{22}$$

式中 P_s——清洗消杀区位置

x_s——清洗消杀区的 x 轴坐标

y_s——清洗消杀区的 y 轴坐标

2.6.5 生物隔离约束

为有效防范不同蚕龄养殖区域间的交叉感染风险,本研究依据生物安全隔离原则对区域布局进行了严格设计。小龄蚕因其生理特性,对外界病原体的抵御能力较为薄弱;大龄蚕的代谢产物则极易沦为病菌传播的载体。鉴于此,在不同蚕龄区域间设置清晰明确的生物隔离至关重要。设施 2 为小龄蚕房,设施 9 为大龄蚕房。根据前文基于病害率模型所揭示的病害率与距离关系的研究成果,可知存活率与空间距离呈负相关特性:空间距离缩小,蚕的存活率随之降低;反之存活率相应升高。因此,为了提高蚕存活率,不同蚕龄区域间的实际间距应不小于预设的最小生物隔离间距 D_{meta},即

$$d_{2,9} \geqslant D_{\text{meta}} \tag{23}$$

3 针对布局模型的 IMNSGA-Ⅱ算法

设施布局问题属于 NP-hard 问题,其优化求解对提升企业生产效益具有重要意义[17]。然而,由于问题的复杂性,目前尚缺乏能够精确高效求解 FLP 全局最优解的方法。在此背景下,智能优化算法因其在解决 NP-hard 问题中的高效性而成为研究热点。本研究结合基地布局的实际需求,选择 NSGA-Ⅱ算法作为求解方法,并对其进行针对性改进,以更好地适应 FLP 的求解需求。

3.1 IMNSGA-Ⅱ算法的改进策略

鉴于 NSGA-Ⅱ算法在多目标优化问题中的局限性,其初始种群质量较低且精英保留策略尚不完善,导致算法在全局搜索与局部优化能力的平衡方

面表现不足，易陷入局部最优解[18]。针对上述问题，本研究对 NSGA－Ⅱ算法加以改进，提出改进 NSGA－Ⅱ算法（IMNSGA－Ⅱ）。IMNSGA－Ⅱ算法的具体流程如图 9 所示。

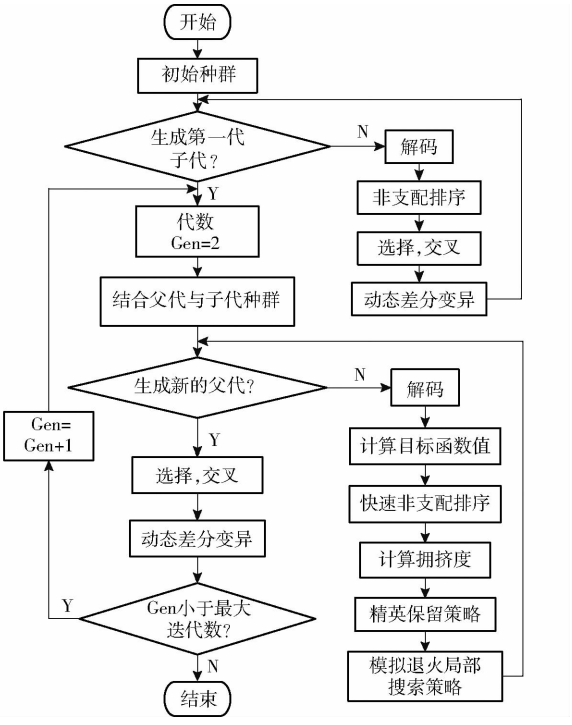


图 9　IMNSGA－Ⅱ算法基本流程图

Fig. 9　Basic flowchart of IMNSGA－Ⅱ

该算法旨在增强解的多样性，有效避免过早收敛，同时实现全局搜索与局部优化间的动态平衡，包含以下两个关键技术：

（1）动态差分变异策略

动态差分变异策略[19]是一种自适应变异方法，根据种群多样性的变化动态调整变异操作。设施布局优化问题通常具有高维、非线性和多峰的特性，传统 NSGA－Ⅱ的标准变异操作容易陷入局部最优，而动态变异策略通过多种变异操作的结合，能够更好地探索解空间，避免早熟收敛。本研究在 NSGA－Ⅱ算法中引入动态变异策略来求解设施布局优化问题，主要基于该策略在增强全局搜索能力和避免局部最优方面的显著优势。该策略将染色体分为设施顺序、旋转标志和垂直调整策略 3 部分，分别应用自适应变异、动态阈值和带方向的动态变异。

自适应变异：确保变异幅度不会因垂直调整过于集中而过小，增强探索能力。

$$S = z\max(\eta, S_{\min}) \tag{24}$$

式中　S——变异范围

z——动态差分变异的缩放因子

η——垂直调整部分的标准差

$S_{\min}$——最小变异幅度

动态阈值：根据种群的多样性（标准差）动态调整阈值，使变异策略得以灵活切换探索和收敛。

$$y_{\text{threshold}} = k\sigma \tag{25}$$

式中　$y_{\text{threshold}}$——判断是否使用差分变异的阈值

k——常数，用于调整阈值敏感度

带方向的动态变异：通过方向因子引导变异方向，使基因值倾向于向均值靠拢或远离，提升局部收敛性。

$$y_{\text{chrom}} = xl_{\text{vol}} + DRS \tag{26}$$

其中

$$D = \text{sign}(\mu - xl_{\text{vol}}) \tag{27}$$

式中　y_{chrom}——变异后的基因值

xl_{vol}——随机选择的第一个父代基因值

D——方向因子

μ——随机选择的一个父代基因值

R——随机数，$R \in [0,1]$

（2）局部搜索策略

局部搜索以其简单高效的特点，在解决组合优化问题时表现出较强的实用性，尤其在处理大规模复杂问题时，能够快速找到较优解[20－21]。局部搜索的引入可以增强 NSGA－Ⅱ算法在解空间局部区域的探索能力，帮助种群个体更快收敛到 Pareto 前沿的优质区域，在邻域内进行针对性优化，从而提升解的质量。本研究采用模拟退火[22]的局部搜索策略，旨在进一步提升 NSGA－Ⅱ算法在求解多目标优化问题时的解集质量。该策略针对 Pareto 前沿的个体进行精细搜索，通过采用概率性调整来随机扰动当前解的决策变量，以 70% 概率随机修改解的设施垂直偏移量，或以 30% 概率修改布局总宽度。同时，利用模拟退火的概率接受机制，允许在一定条件下接受较差的解。

具体而言，模拟退火过程从较高温度开始，逐步降温，在每次迭代中通过随机扰动生成邻域解，并计算其目标函数值。初始温度设为 1 000℃，冷却速率设为 0.95。若邻域解优于当前解，则直接接受；否则，以概率 G 接受较差的解。

$$G = \exp\left(-\frac{\Delta f}{T}\right) \tag{28}$$

式中　Δf——当前解与邻域解的目标函数值差异

T——当前温度

3.2　IMNSGA－Ⅱ算法的算子设计

本研究设计了特殊的编码、解码机制以及对应的交叉、变异操作，旨在同时适用于对齐和非对齐的情况，并支持动态边界条件，为后续优化算法提供通用性支持。

3.2.1　编码设计

本文采用实数编码方式设计了一种分为 4 段功能的染色体结构[（Q_1，Q_2，…，Q_n），（Λ_1，Λ_2，…，

Λ_n), (ΔY_1, ΔY_2, …, ΔY_n), w_d], 其中, Q_n 表示第 n 个设施编号, Λ_n 表示设施旋转情况, Λ_n 为 1 时表示设施已旋转, Λ_n 为 0 时表示设施未旋转, ΔY_n 表示上一排设施在垂直方向上的上移距离。为优化设施间的搬运效率, 设施在排布时基于 ΔY_n 值进行垂直方向调整, 同时确保满足设施间最小安全间距约束, w_d 表示染色体中的布局宽度。第 1 段(设施放置顺序)表示 15 个设施的放置顺序, 使用实数编码, 通过排序确定设施排列。

第 2 段(设施旋转状态)表示每个设施的旋转状态, 运用 0 或 1 的二进制实数对各设施的旋转状态进行编码。其中, 0 表示设施保持原始方向, 1 表示设施随机旋转 90°。这一操作会改变设施原本的宽度与高度。

第 3 段(y 轴位移调整)描述设施在 y 轴方向的位移调整, 以实数表征每个设施的位移调整量, 旨在优化设施的垂直位置, 且位移范围受布局边界与主通道的约束。研究基于工程实际与空间规划需求, 将最长设施的长度设为位移调整的上限阈值, 由此确定取值区间为 0 ~ 39 m。

第 4 段(布局宽度可变)涉及布局宽度的可变性。传统的布局优化中预先假设了固定宽度, 当设施数量较多或旋转状态导致宽度需求增加时, 固定宽度可能导致空间不足或重叠。反之, 若设施排列较为紧凑, 过大的固定宽度会浪费空间, 降低效率。基于多行布局的架构要求, 将宽度参数的搜索空间限定为 70 ~ 100 m 区间, 在此约束条件下, 优化算法能够有效收敛至全局最优布局方案。

3.2.2 解码设计

解码操作是将个体的基因型转换为表现型的过程。本研究按照染色体中所在编码位置对应的设施编号及其宽度, 判断前面所有编码位置的设施及其累计总宽度与布局平面总宽度之间的剩余空间是否满足该设施的宽度, 如果满足则该设施在当前行, 否则在下一行。根据位置及其宽度, 解码得到其对应的坐标。

3.2.3 交叉设计

为适应本文多行设施布局问题的实数编码特性, 针对染色体的 4 个分段分别设计了差异化的交叉与变异操作。第 1 段染色体采用了顺序交叉方法; 第 2 段染色体采用了位交叉方法; 第 3 段浮点数编码的 y 轴位移调整, 同样采用位交叉方法; 第 4 段所涉布局宽度可变部分采用浮点数编码, 采用算术交叉方法。

3.2.4 变异设计

为增强设施顺序的随机扰动效果, 本研究对第 1 段染色体采用交换变异策略; 针对第 2 段染色体代表的旋转状态采用位翻转变异策略; 第 3 段染色体代表设施在 y 轴位移调整量, 采用动态差分变异策略; 第 4 段染色体代表可变布局宽度, 采用多项式变异策略。

3.3 算例验证

3.3.1 算法 Pareto 前沿对比

为全面验证 IMNSGA-Ⅱ的性能, 采用 MOPSO、MOEA/D 和 NSGA-Ⅱ 3 个典型的多目标优化算法进行对比实验。对于每个算法, 设置种群规模为 150, 最大进化代数为 200, 交叉常量 $C_R = 0.9$。本测试函数实验运行于配置为 2.40 GHz 13th Gen Intel (R) Core(TM) i7-13620H、内存 16 GB 的服务器上, Windows 11 操作系统, Matlab R2023a 版本。

由于多目标 ZDT 系列函数和 DTLZ 系列函数被广泛应用于验证多目标优化算法, 本实验分别采用 ZDT1 和较为复杂的 DTLZ4 函数来验证算法性能。

图 10 分别展示了 MOEA/D、MOPSO、NSGA-Ⅱ和 IMNSGA-Ⅱ在 ZDT1 函数上的优化效果。从图中可以看出, 对于具有凸性的真实 Pareto 前沿, MOEA/D 在前、后两段的解集未能有效逼近真实 Pareto 前沿。MOPSO 在前半段能够找到与真实 Pareto 前沿较为接近的解, 但在后半段解集分布明显不足。相比之下, NSGA-Ⅱ的解集分布更为均匀, 但部分解的逼近精度较低。与上述 3 种算法相比, IMNSGA-Ⅱ的解集不仅能够更好地逼近真实 Pareto 前沿, 而且分布均匀性显著提升。

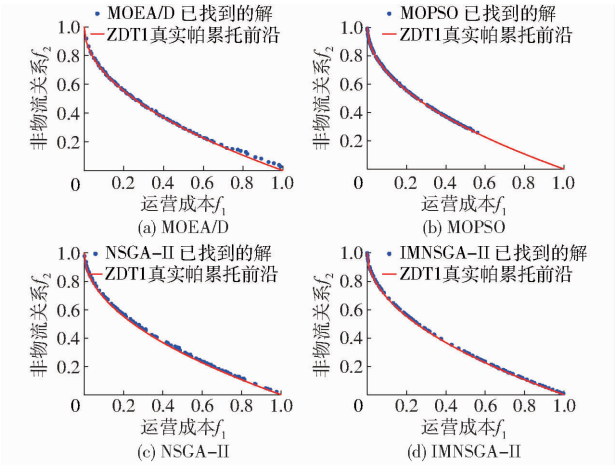


图 10 各算法在 ZDT1 函数上的优化结果

Fig. 10 Optimization effect of each algorithm on ZDT1

图 11 分别展示了 MOEA/D、MOPSO、NSGA-Ⅱ和 IMNSGA-Ⅱ在 DTLZ4 函数上的优化结果。DTLZ4 函数在两个目标函数下的 Pareto 前沿是一个球形表面的一部分。从图中可以看出, MOEA/D 的解集稀少, 且不够逼近真实 Pareto 前沿。MOPSO 两端的部分解集缺失, 且整体解集明显偏离真实

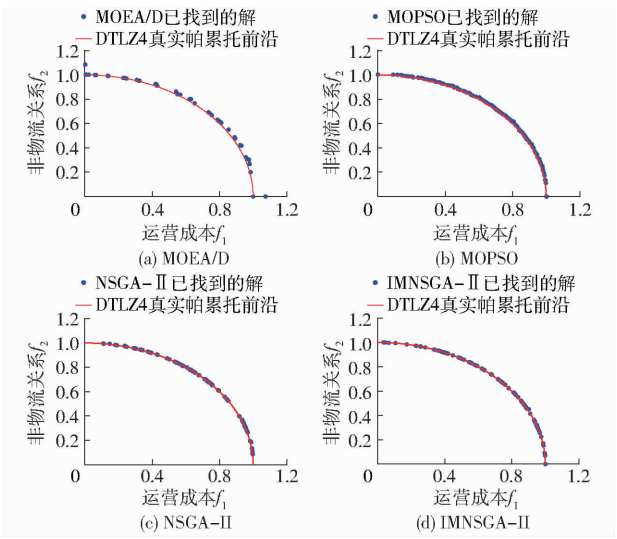


图 11　各算法在 DTLZ4 函数上的优化结果

Fig. 11　Optimization effect of each algorithm on DTLZ4

Pareto 前沿，表明其收敛性存在不足。相比之下，NSGA－Ⅱ的解集在真实 Pareto 前沿上的逼近精度有所提升，但分布均匀性较差，尤其在真实 Pareto 前沿的两端存在解集缺失问题。与前 3 种算法相比，IMNSGA－Ⅱ的解集不仅在真实 Pareto 前沿上的逼近效果更优，且分布均匀性显著改善。

3.3.2　算法 IGD 指标对比

为评估不同算法的性能，本研究采用反世代距离（Inverted generational distance，IGD）作为综合性能评价指标。分别将 MOEA/D、MOPSO、NSGA－Ⅱ和 IMNSGA－Ⅱ 4 种算法在 ZDT1 和 DTLZ4 函数上运行 10 次，表 5 展示了这 10 次运行结果的均值及标准差。基于表内数据的系统分析可知，IMNGSA－Ⅱ在 ZDT1 和 DTLZ4 函数上的 IGD 平均值与标准差表现均为最佳，表明其在两个实验中展现出卓越的全局优化能力与稳定性。

表 5　4 种算法在 ZDT1 和 DTLZ4 函数上的 IGD 值

Tab. 5　Four algorithms for IGD in ZDT1 and DTLZ4

测试函数	参数	ZDT1	DTLZ4
MOEA/D	均值	0.022 3	0.039 1
	标准差	5.41×10^{-3}	7.47×10^{-3}
MOPSO	均值	0.127 4	0.021 4
	标准差	8.76×10^{-3}	3.64×10^{-3}
NSGA－Ⅱ	均值	0.012 5	0.012 9
	标准差	1.05×10^{-3}	1.30×10^{-3}
IMNSGA－Ⅱ	均值	0.008 8	0.008 2
	标准差	9.76×10^{-4}	5.71×10^{-4}

3.4　基于 IMNSGA－Ⅱ的布局实例

为验证 IMNSGA－Ⅱ在实际应用场景中的有效性，在实例求解阶段将 IMNSGA－Ⅱ与传统 NSGA－Ⅱ算法进行深入比较。实验参数设置为：种群规模为 100，最大进化代数为 1 200。所有算法实验均运行于配置为 2.40 GHz 13th Gen Intel（R）Core（TM）i7－13620H 的高性能服务器上，为确保实验结果的统计显著性与稳定性，每种算法均独立运行 20 次。实验结果表明，IMNSGA－Ⅱ在解集质量、收敛速度及多样性方面均显著优于传统 NSGA－Ⅱ算法，充分证明改进策略的有效性与实用性。

图 12 展示了传统 NSGA－Ⅱ与 IMNSGA－Ⅱ的帕累托前沿对比图，图中标红的 IMNSGA－Ⅱ解表示所选取的布局方案。

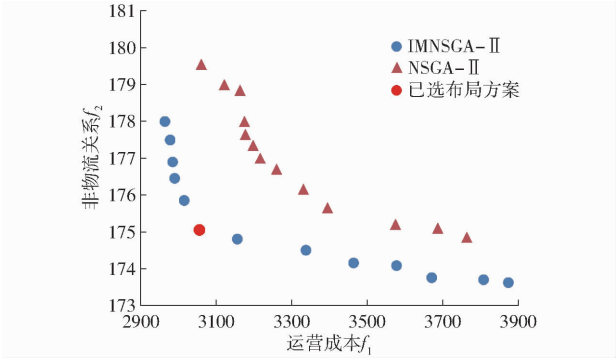


图 12　IMNSGA－Ⅱ与传统 NSGA－Ⅱ的 Pareto 前沿

Fig. 12　Pareto front of IMNSGA－Ⅱ and NSGA－Ⅱ

从图中可以看出，IMNSGA－Ⅱ在运营成本和非物流关系两个指标上都相较于传统 NSGA－Ⅱ更低，这表明其在多目标权衡中的表现更加出色，能够更好地支配竞争算法的解。此外，IMNSGA－Ⅱ的解集在解空间中分布更加均匀，覆盖范围更广。这种解的多样性不仅提供了更多的决策选项，还有效避免了解空间的局部集中问题。

由表 6 可知，NSGA－Ⅱ与 IMNSGA－Ⅱ算法在优化设施布局方面均取得一定成效，但 IMNSGA－Ⅱ在多项关键指标上表现尤为优异。尽管 NSGA－Ⅱ算法有所改进，其效果仍不及 IMNSGA－Ⅱ显著。IMNSGA－Ⅱ显著提升了解集质量与分布均匀性，在压缩布局面积、降低碳排放、缩短运行时间及平衡多目标优化方面均展现出更优性能。

表 6　算法优化前后性能对比

Tab. 6　Comparison before and after algorithm optimization

参数	优化前	优化后	
		NSGA－Ⅱ	IMNSGA－Ⅱ
运营成本 f_1	4 322	3 163	3 056
非物流关系 f_2	195.00	178.85	175.05
布局面积/m^2	8 625	6 786	6 120
运行时间/s		324	287

由表 6 结果可知，优化后布局面积缩减至 6 120 m^2，空间利用率大幅提升。与原始布局相比，IMNSGA－

Ⅱ将运营成本降低 29.29%，非物流关系改善 10.23%，布局面积减少 29.04%；相较于 NSGA－Ⅱ，IMNSGA－Ⅱ在运营成本上进一步优化 3.38%，非物流关系提升 2.12%，布局面积压缩 9.81%，运行时间缩短 11.42%。

图 13 展示了优化后的最优布局方案，喂养区与各龄蚕房、蚕盘存储室、换盘区、桑叶存储室及消杀区等功能单元之间存在较强的空间耦合关系。

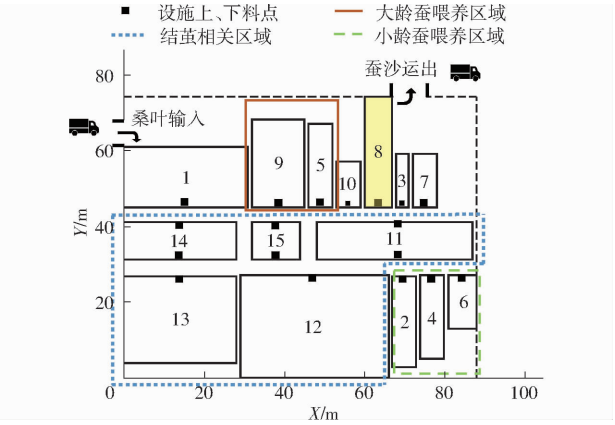


图 13 桑蚕基地优化后布局

Fig. 13 Layout of silkworm base after optimization

通过与原布局(图 1)的对比，可以得出以下主要改进和优化效果：

(1)空间利用率显著提升。原始布局中存在较多未被充分利用的空白区域，空间分布较为松散，导致整体空间利用率偏低。优化后，合理利用通道布局，空白区域得到了有效填补，功能区分布更加紧凑，特别是在图中的上、下侧区域更加紧凑合理，整体空间利用率显著提高。

(2)物流路径大幅缩短与简化。原始布局中物流路径较长且复杂，存在较多的迂回和交叉，导致物流效率低下，搬运成本较高。优化方案显著缩短并简化了物流路径，所有设施仅需通过 4 条通道即可实现高效物料转运。

(3)布局面积缩小，效率提升。原始布局的长宽分别为 115 m 和 75 m，总面积为 8 625 m^2，空间利用率较低。优化后的布局长宽上限分别缩减至 85 m 和 74 m，总面积为 6 120 m^2。

(4)优化方案重点考虑了设施间的功能耦合关系，通过邻近布置设施提升物流效率。具体而言，将小龄蚕房(设施 2)及其关联设施 4、设施 6 与大龄蚕房(设施 9)及其配套设施 5 实施分区布置，通过建立独立的喂养路线有效避免了不同发育阶段蚕群间的路径交叉。小龄蚕与大龄蚕房独立的喂养路线严格遵循生物安全隔离原则，有效阻断了小龄蚕与大龄蚕的搬运路径交叉，显著降低了不同发育阶段蚕群间的交叉感染风险；同时，将上蔟作业相关设施 11～15 集中布局，大幅缩短了上蔟物料的搬运距离，实现了作业流程的集约化。

(5)设施 8 作为清洗消杀区被布置在布局的边界处，便于蚕沙的外运，减少废物转运对基地内部物流和生产的干扰，避免交叉污染。

4 结束语

本文以 L 公司养蚕基地为研究对象，针对其工艺过程复杂、物流交互量大、设施数量众多以及生物养殖特性所导致的高生产成本和生产现场混乱等实际问题，建立了设施宽度、高度皆不等的多行设施布局模型。在传统布局约束的基础上，新增清洗消杀区的位置约束和生物隔离约束，以满足生物安全要求。同时，通过将桑蚕存活率及其生物特性融入数学模型，精准量化存活率对空间布局的影响。研究表明，蚕存活率直接影响代谢呼吸热负荷引发的空调能耗及碳排放。通过优化空间布局间接降低温控碳排放，为企业低碳转型提供支持。提出的 IMNSGA－Ⅱ算法通过融合动态变异策略和模拟退火布局搜索机制，有效提升了算法的搜索能力与收敛性。优化后的布局方案大幅提高了空间利用率，简化并缩短了物流路径，有效缩减了布局面积。同时，优化方案严格遵循生物安全隔离原则，将清洗消杀区配置于布局边界，显著降低了交叉污染风险，实现了生物安全与低碳目标的协同优化。

参 考 文 献

[1] 申瑞霞，姚宗路，赵立欣，等. 双碳背景下黑龙江省农村生活用能研究[J]. 农业机械学报，2022，53(3)：377－383.
SHEN Ruixia，YAO Zonglu，ZHAO Lixin，et al. Study on rural household energy use in Heilongjiang Province under the dual-carbon background[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2022，53(3)：377－383.(in Chinese)

[2] 贲放. 机械加工设备布局方法及其仿真技术研究[J]. 工程技术研究，2018(15)：36－37.
BEN Fang. Study on layout methods and simulation technology of machining equipment[J]. Engineering Technology Research，2018(15)：36－37.(in Chinese)

[3] PÉREZ-GOSENDE P，MULA J，DÍAZ-MADROÑERO M，et al. Facility layout planning. an extended literature review[J]. International Journal of Production Research，2021，59(12)：3777－3816.

[4] SULE D R. Manufacturing facilities：location，planning，and design[M]. CRC Press，2008.

[5] TOMPKINS J A，WHITE J A，BOZER Y A，et al. Facilities planning[M]. John Wiley & Sons，2010.

[6] 曾强，陈永锋，袁瑞甫，等. 基于 IAGA 的多行设施布局优化方法[J]. 机床与液压，2024，52(3)：106－112.
ZENG Qiang，CHEN Yongfeng，YUAN Ruifu，et al. Multi-row facility layout optimization method based on IAGA[J]. Machine Tool & Hydraulics，2024，52(3)：106－112.（in Chinese）

[7] 管超，张则强，朱立夏，等. 双层过道布置问题的混合整数非线性规划模型及两阶段改进模拟退火算法[J]. 中国机械工程，2019，30(8)：975－983.
GUAN Chao，ZHANG Zeqiang，ZHU Lixia，et al. Mixed integer nonlinear programming model and two-stage improved simulated annealing algorithm for the double-aisle layout problem[J]. China Mechanical Engineering，2019，30(8)：975－983.（in Chinese）

[8] GARCÍA-HERNÁNDEZ L，SALAS-MORERA L，GARCIA-HERNANDEZ J A，et al. Applying the coral reefs optimization algorithm for solving unequal area facility layout problems[J]. Expert Systems with Applications，2019，138：112819.

[9] 董舒豪，徐志刚，秦开仲，等. 基于随机秘钥蝙蝠算法的多行设施布局设计[J]. 中国机械工程，2021，32(15)：1874－1883.
DONG Shuhao，XU Zhigang，QIN Kaizhong，et al. Multi-row facility layout design based on random key bat algorithm[J]. China Mechanical Engineering，2021，32(15)：1874－1883.（in Chinese）

[10] 董舒豪，徐志刚，常艳茹，等.考虑物料装卸点与搬运通道的多行设施布局[J]. 计算机集成制造系统，2021，27(5)：1269－1280.
DONG Shuhao，XU Zhigang，CHANG Yanru，et al. Multi-row facility layout considering material loading/unloading points and transportation aisles[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems，2021，27(5)：1269－1280.（in Chinese）

[11] GONG J，ZHANG Z，LIU J，et al. Hybrid algorithm of harmony search for dynamic parallel row ordering problem[J]. Journal of Manufacturing Systems，2021，58：159－175.

[12] CRAVO G L，AMARAL A R S. Adaptive iterated local search for the parallel row ordering problem[J]. Expert Systems with Applications，2022，208：118033.

[13] SUN Y，LI S，WANG Y，et al. Fault diagnosis of rolling bearing based on empirical mode decomposition and improved manhattan distance in symmetrized dot pattern image[J]. Mechanical Systems and Signal Processing，2021，159：107817.

[14] 刘艳伟，陆俣伽，陶积阳，等. 不同温度条件对桂蚕 5 号 1～2 龄人工饲料育的影响[J]. 广西蚕业，2021，58(1)：4－7.
LIU Yanwei，LU Yujia，TAO Jiyang，et al. Effects of different temperature conditions on the artificial diet rearing of 1st to 2nd instar Guisang 5 silkworms[J]. Guangxi Sericulture，2021，58(1)：4－7.（in Chinese）

[15] 夏忠洁，吴梦佳，雷锋杰，等. 芦丁对家蚕取食及生长发育的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2025，53(1)：91－98.
XIA Zhongjie，WU Mengjia，LEI Fengjie，et al. Effects of rutin on feeding and growth development of silkworms[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)，2025，53(1)：91－98.（in Chinese）

[16] 范仕弘，邵榆岚，张永红，等. 家蚕体内细菌感染模型建立及不同菌株的协同致病特征分析[J]. 南方农业学报，2024，55(6)：1854－1862.
FAN Shihong，SHAO Yulan，ZHANG Yonghong，et al. Establishment of a bacterial infection model in silkworms and analysis of synergistic pathogenic characteristics of different strains[J]. Journal of Southern Agriculture，2024，55(6)：1854－1862.（in Chinese）

[17] BRAGLIA M，ZANONI S，ZAVANELLA L，et al. Layout design in dynamic environments：strategies and quantitative indices[J]. International Journal of Production Research，2003，41(5)：995－1016.

[18] 张延安，杜岳峰，毛恩荣，等. 基于改进 NSGA－Ⅱ的大功率拖拉机变速箱箱体多目标优化[J]. 农业机械学报，2022，53(增刊 2)：310－319.
ZHANG Yan'an，DU Yuefeng，MAO Enrong，et al. Multi-objective optimization of high-power tractor gearbox housing based on improved NSGA－Ⅱ[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2022，53(Supp. 2)：310－319.（in Chinese）

[19] 王亚良，钱其晶，曹海涛，等. 基于动态差分元胞多目标遗传算法的混合作业车间布局改善与优化[J]. 中国机械工程，2018，29(14)：1751－1757.
WANG Yaliang，QIAN Qijing，CAO Haitao，et al. Improvement and optimization of hybrid job shop layout based on dynamic differential cellular multi-objective genetic algorithm[J]. China Mechanical Engineering，2018，29(14)：1751－1757.（in Chinese）

[20] KHURSHID B，MAQSOOD S. A hybrid evolution strategies-simulated annealing algorithm for job shop scheduling problems[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence，2024，133：108016.

[21] SUN X，GUO S，GUO J，et al. A Pareto-based hybrid genetic simulated annealing algorithm for multi-objective hybrid production line balancing problem considering disassembly and assembly[J]. International Journal of Production Research，2024，62(13)：4809－4830.

[22] 许璟琳，陈芊茹，彭阳，等. 基于 GRU－模拟退火的公共建筑自校准客流仿真及空间优化研究[J/OL]. 系统仿真学报，1－14[2025－05－04]. https://doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.24－0704.
XU Jinglin，CHEN Qianru，PENG Yang，et al. Public building self-calibrated occupant flow simulation and spatial optimization based on GRU-simulated annealing[J/OL]. Journal of System Simulation，1－14[2025－05－04]. https://doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.24－0704.