

机械与过程控制

基于智能算法的啤酒灌装生产线设备选型研究

贾瑞, 李光

(天津科技大学, 天津 300222)

摘要: **目的** 以啤酒灌装生产线为研究对象, 基于粒子群智能算法, 实现啤酒灌装生产线所需设备的快速选型, 且使设备的利用率最大化。**方法** 建立啤酒灌装生产线所需设备的数据库, 利用 Matlab 软件编写粒子群智能算法, 对啤酒灌装生产线的相关设备进行多目标优化, 实现快速智能寻优。**结果** 在客户要求的约束条件下, 当初始化 100 个种群、迭代次数为 8000 时, 生产线平衡率高达 90% 以上, 满足了客户要求。**结论** 文中验证了粒子群智能算法的可靠性, 并得到了客户满意的求解方案。该智能算法在生产线布局初期具有很强的柔性, 可以快速解决啤酒灌装生产线建厂初期设备的快速选型问题。

关键词: 啤酒灌装生产线; 设备选型; 粒子群算法; 多目标优化

中图分类号: TB486⁺.2, TH166 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2019)09-0135-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.09.022

Equipment Selection of Beer Filling Production Line Based on Intelligent Algorithms

JIA Rui, LI Guang

(Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China)

ABSTRACT: The work aims to achieve rapid selection of equipment for beer filling production line and maximum utilization ratio of equipment with the beer filling production line as the research object based on the Particle Swarm Intelligence (PSO) algorithm. The equipment database for beer filling production line was established. With the help of MATLAB software, multi-objective optimization of equipment in beer filling production line was carried out by particle swarm optimization algorithm. Under the constraints of customer requirements, when 100 populations were initialized and the number of iterations was 8000, the balance rate of the production line reached more than 90%, which met customer requirements. The work validated the reliability of the PSO algorithm and obtains a satisfactory solution. PSO algorithm has strong flexibility in the early stage of production line layout. It can quickly solve the problem of rapid equipment selection in the early stage of beer filling production line construction.

KEY WORDS: beer filling production line; equipment selection; particle swarm optimization; multi-objective optimization

从 1954 年开始, 包装生产线设计问题已被研究了 60 多年, 目前生产线的方案设计主要有 2 类, 对已有的生产线进行改造与建立全新的生产线^[1]。人们对前者的研究较多, 对后者的研究较少。新的包

装生产线设计理念是让 80% 的问题在前期设计阶段就得到解决, 这样可避免项目在投产阶段出现大量的问题^[2]。包装生产线平衡实质上是对生产线上的全部工序与设备进行优化, 使各工序或工作站上的作业

收稿日期: 2019-01-19

基金项目: 天津市自然科学基金 (17JCTPJC54900)

作者简介: 贾瑞 (1993—), 男, 天津科技大学硕士生, 主攻包装生产线智能布局。

通信作者: 李光 (1975—), 男, 博士, 天津科技大学副教授, 主要研究方向为包装机械、虚拟仿真及包装动力学。

负荷和作业时间相均衡。其以质量、效率、成本等为目标,通过消除瓶颈工序、减少工时浪费,最终实现“一个流”生产^[3]。通常情况下,包装生产线平衡率在70%~85%时,装配生产线的控制基本科学;当生产线平衡率高于85%时,生产过程中进行的则是“一个流”模式^[4]。

半个世纪以来,研究人员提出了多种技术和方法解决包装生产线的平衡率问题。主要有工业工程法^[5-6]、仿真方法^[7-8]、精确求解方法^[9-10]以及启发式算法^[11-14]。工业工程方法依赖于管理者的经验,缺乏数据的支撑;仿真方法效果比较直观,在建模初期耗时较长;精确求解法虽计算精度较高,但当模型较为复杂时,会花费相当长的时间才能得到计算结果。随着启发式算法即智能算法的发展,生产线平衡问题得到了一定的解决^[14]。当前包装行业虽在向柔性化、信息化、智能化方向发展,但通过智能算法对啤酒灌装生产线所需设备快速选型的方法鲜有报道。文中拟以某啤酒灌装生产线为例,通过粒子群智能算法对啤酒灌装生产线建厂初期所需的设备进行选型,并根据客户需求从数据库选出最优设备,提高整条包装生产线的平衡率,减少工作站空闲的时间,以此为建立全新的包装生产线做好选型准备。

1 啤酒灌装生产线工艺流程

啤酒灌装生产线工艺流程见图1。首先从玻璃工厂采购空瓶或对旧瓶进行回收,将空瓶放在仓库或者直接输送到啤酒灌装生产线;然后通过去瓶盖机去掉瓶盖,由洗瓶机进行清洗,洗完后再经验瓶装置进行检验;随后由灌装机进行灌装,装瓶压盖机会将由瓶盖输送机送过来的瓶盖与已经灌装好的啤酒瓶进行压盖,进行成品检验;再通过贴标机贴标后,由装箱机装箱;最后由码垛机器人码垛,将包装好的成品入库,也可根据实际需求直接出厂。

文中根据某客户的生产工艺要求,对如图1所示工艺流程所需的设备进行快速选型。

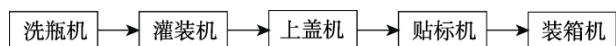


图1 啤酒灌装生产线工艺流程

Fig.1 Process flow chart of beer filling production line

2 建立数据库

通过收集不同厂家的啤酒灌装包装设备数据,建立啤酒灌装生产线所需设备的数据库。设备主要数据为设备价格、设备占地面积及相应的设备产能,产能为该设备对应的最高产能。文中主要对这3个目标进行约束求解,不考虑设备其他方面的影响因素。此部分数据仅限于理论分析研究,在实际应用时需要采集

更加准确的数据进行求解,数据库部分数据见表1,表1中洗瓶机、灌装机、上盖机、贴标机与装箱机各有A、B 2个型号。

表1 啤酒灌装生产线的设备数据库参数

Tab.1 Equipment database parameters of beer filling production line

设备类型	不同型号设备产能/(瓶·h ⁻¹)		不同型号设备面积/m ²		不同型号设备成本/万元	
	A	B	A	B	A	B
洗瓶机	3000	4000	1.21	2.356	3.6	4.1
灌装机	6000	8000	3.118	4.1125	4	4.5
上盖机	3000	1500	1.346	0.84	2.7	3.1
贴标机	4800	7200	0.935	2.4	3.2	3.7
装箱机	1080	2400	1.445	2.08	1.6	0.5

3 常用术语

1) 工作站。工作站为完成连若干工艺过程的自动化设备^[1],常用 N 表示工作站的数目,一个工作站能够完成连续的若干工艺过程。文中将具有相同设备的工艺视为一个工作站。

2) 生产平衡率。生产平衡率表示生产线上各个工作站之间工作过程的均衡程度^[1],生产平衡率越大越好,常用 P 表示。

$$P = \frac{\sum_{i=1}^N c_i}{N \times (c_i)_{\max}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: N 为工作站数目; c_i 为第 i 个工作站设备的总产能。

3) 平滑性系数。平滑性系数是表示生产线上各个工作站产能分布离散状况的一个指标^[1],平滑性系数越小越好,用 S 表示。

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (c - c_i)^2}{N}} \quad (2)$$

式中: N 为工作站数目; c 为客户要求的最低产能; c_i 为第 i 个工作站设备的总产能。

4) 非劣解。在多目标优化问题的可行域中存在一个问题解,若不存在另一个可行解,使得一个解中的目标全部劣于该解,则该解称为多目标优化问题的非劣解。

5) 非劣解集。非劣解集为所有非劣解的集合。

4 粒子群智能算法流程设计

粒子群智能算法流程见图2,具体流程如下所述。

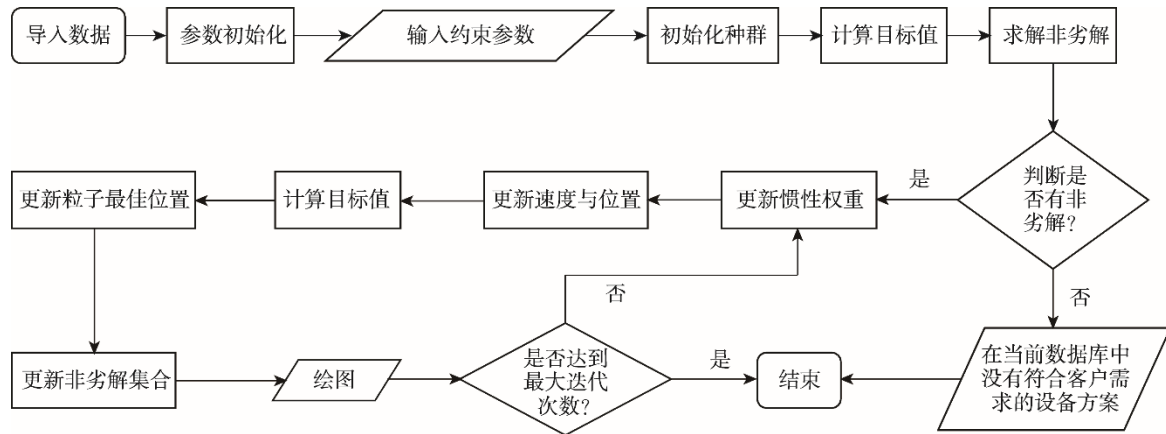


图2 粒子群算法选型流程

Fig.2 Flow chart of particle swarm algorithm selection

1) 导入数据库数据。文中主要将客户要求的产能、成本、占地面积作为多目标进行约束求解, 将建好的数据库模型导入 Matlab 软件。

2) 初始化参数。包括最大迭代次数 $I_{\max}$ 、惯性权重的最大值 $\omega_{\max}$, 最小值 $\omega_{\min}$ 、调节系数 c_1 , c_2 。

3) 输入客户需求。文中以客户要求的啤酒灌装生产线产能、设备总成本、设备总占地面积等为多目标进行求解。

4) 初始化种群。初始化种群的数量越多, 粒子群搜索的能力越强, 相应的计算时间也会增加。一般初始化 20~40 个种群比较好^[15], 如果数据库中的数据较多, 初始化种群数量应相应地增加。

5) 计算目标值。首先根据客户要求的啤酒包装生产线目标产能, 通过不同设备的产能数据得到相应方案(随机选出的方案)下所需的设备数量, 并向上取整。假设某个工序需要多台设备, 那么将这几台设备放在一个工作站里; 通过设备数量计算不同方案下设备的实际产能, 取当中最低的产能作为该种方案下生产线的产能; 随后经计算得到相应方案下的生产线平衡率和平滑性系数; 再根据前一步得到的设备数量计算设备的总价格与总占地面积; 最后以生产线平衡率最高、设备总价格最低及符合客户需求的设备总占地面积为多目标进行优化。

6) 在满足客户产能、以及设备总占地面积的约束条件下, 以生产线平衡率最高, 生产线总成本最低为目标进行计算, 得到非劣解集。判断非劣解集中是否含有非劣解, 如果有, 进行下一步, 否则输出, 即在客户的需求条件下, 当前数据库中没有符合客户需求的设备方案。

7) 更新惯性权重。惯性权重体现的是粒子继承先前速度的能力。较大的惯性权重有利于全局搜索, 较小的惯性权重则有利于局部搜索, 为了更好地平衡算法的全局搜索与局部搜索能力, 文中采用了线性递减惯性权重(ω)。 ω 的求解公式如下所示。

$$\omega = \omega_{\max} - \frac{(\omega_{\max} - \omega_{\min})}{I_{\max}} \times I \quad (3)$$

式中: $\omega_{\max}$ 为初始惯性权重; $\omega_{\min}$ 为迭代至最大次数时的惯性权重; I 为当前迭代次数; $I_{\max}$ 为最大迭代次数。

根据惯性权重更新公式, 计算当前迭代条件下的权惯性权重。

8) 更新粒子自身的速度和位置。

速度和位置的更新公式分别为:

$$v^{k+1} = \omega v^k + c_1 r_1 (P_{id}^k - X^k) + c_2 r_2 (P_{gd}^k - X^k) \quad (4)$$

$$X^{k+1} = X^k + v^{k+1} \quad (5)$$

式中: r_1 和 r_2 为分布在[0,1]之间的随机数; k 是当前迭代次数; P_{id}^k 为个体最优粒子位置; P_{gd}^k 为全局最优粒子位置; c_1 和 c_2 为常数, 通常都取 2; v 为粒子速度; X 为粒子位置。

9) 根据新的粒子位置重新计算目标值, 方法同上。

10) 更新粒子最佳位置。

11) 更新非劣解集合。

12) 在当前迭代条件下, 计算非劣解集粒子在数据库中对的位置、相应设备数量选择方案、相应的生产线平衡率及平滑性系数、设备总成本、设备总占地面积, 并进行绘图。

13) 判断是否满足最大迭代次数终止条件, 如果满足, 输出结果; 否则返回更新惯性权重, 继续计算。

5 案例求解

多目标优化问题的显著特点是优化各个目标使其同时达到综合条件下的最优值。假设客户需求目标产能为 1 万瓶/h、预投资设备总金额为 20~50 万元、设备总占地面积为 40 m², 在这样的要求下用粒子群智能算法从数据库中快速选型。

文中分别初始化 40, 100 个种群, 迭代次数分别为 2000, 5000, 8000。详细求解数据结果见表 2。

由表 2 可知,当种群数为 40,迭代次数分别为 2000,5000,8000 时,有 6 种求解方案完全相同;当种群数为 100,迭代次数分别为 2000,5000,8000 时,有 9 种求解方案完全相同;当种群数分别为 40,

100 个,迭代次数为 8000 时,有 8 种方案结果完全相同。综上可知,随着种群数量的增加,迭代次数越多非劣解集越接近,求解结果越可靠,以上数据说明粒子群智能算法求解方案可行。

表 2 粒子群算法优化结果
Tab.2 Optimization results of particle swarm optimization

方案			非劣解位置				所需设备数量/台					生产线 平衡率	平滑性 系数	总成本/ 万元	总面积/ m ²	生产线产能/ (万瓶·h ⁻¹)
种群 数:40, 迭代次 数:2000	方案 1	10	10	8	6	2	1	1	2	2	5	84.4%	4195.24	23.2	38.1	1.2
	方案 2	10	3	8	9	7	1	1	2	1	4	72.3%	2717.41	19.82	24.1	1.104
	方案 3	10	10	8	6	7	1	1	2	2	4	83.4%	4217.15	23.02	33.5	1.104
	方案 4	10	3	8	6	2	1	1	2	2	5	80.0%	3794.73	21.2	34.1	1.2
	方案 5	9	10	8	6	7	2	1	2	2	4	87.8%	2553.49	26.42	34.8	1.104
	方案 6	10	3	1	9	2	1	1	4	1	5	100.0%	0	27.2	32.6	1.2
	方案 7	10	3	8	6	7	1	1	2	2	4	78.9%	3818.94	21.02	29.6	1.104
	方案 8	9	10	8	6	2	2	1	2	2	5	88.9%	2190.89	26.6	39.4	1.2
种群 数:40, 迭代次 数:5000	方案 1	10	3	8	9	7	1	1	2	1	4	72.3%	2717.41	19.82	24.0	1.104
	方案 2	10	3	8	6	2	1	1	2	2	5	80.0%	3794.73	21.2	34.1	1.2
	方案 3	10	10	8	6	2	1	1	2	2	5	84.4%	4195.24	23.2	38.1	1.2
	方案 4	10	3	1	9	7	1	1	4	1	4	98.4%	429.33	27.02	28.0	1.104
	方案 5	10	3	8	9	2	1	1	2	1	5	73.3%	2683.28	20	28.6	1.2
	方案 6	10	3	8	6	7	1	1	2	2	4	78.9%	3818.94	21.02	29.6	1.104
	方案 7	10	3	1	9	2	1	1	4	1	5	100.0%	0	27.2	32.6	1.2
	方案 8	9	10	8	6	2	2	1	2	2	5	88.9%	2190.89	26.6	39.4	1.2
种群 数:40, 迭代次 数:8000	方案 1	10	3	8	6	7	1	1	2	2	4	78.9%	3818.94	21.02	29.6	1.104
	方案 2	10	3	8	9	7	1	1	2	1	4	72.3%	2717.41	19.82	24.0	1.104
	方案 3	10	10	8	6	7	1	1	2	2	4	83.4%	4217.15	23.02	33.5	1.104
	方案 4	10	10	8	6	2	1	1	2	2	5	84.4%	4195.24	23.2	38.1	1.2
	方案 5	10	3	8	6	2	1	1	2	2	5	80.0%	3794.73	21.2	34.1	1.2
	方案 6	10	3	1	9	2	1	1	4	1	5	100.0%	0	27.2	32.6	1.2
	方案 7	10	3	8	9	2	1	1	2	1	5	73.3%	2683.28	20	28.6	1.2
	方案 8	9	10	8	6	7	2	1	2	2	4	87.8%	2553.49	26.42	34.8	1.104
	方案 9	9	10	8	6	2	2	1	2	2	5	88.9%	2190.89	26.6	39.4	1.2
种群 数:100, 迭代次 数:2000	方案 1	10	3	8	9	7	1	1	2	1	4	72.3%	2717.41	19.82	24.0	1.104
	方案 2	10	3	1	9	2	1	1	4	1	5	100.0%	0	27.2	32.6	1.2
	方案 3	10	10	8	6	2	1	1	2	2	5	84.4%	4195.24	23.2	38.1	1.2
	方案 4	10	3	8	9	2	1	1	2	1	5	73.3%	2683.28	20	28.6	1.2
	方案 5	10	10	8	6	7	1	1	2	2	4	83.4%	4217.15	23.02	33.5	1.104
	方案 6	9	10	8	6	7	2	1	2	2	4	87.8%	2553.49	26.42	34.8	1.104
	方案 7	10	3	8	6	7	1	1	2	2	4	78.9%	3818.94	21.02	29.6	1.104
	方案 8	10	3	1	9	7	1	1	4	1	4	98.4%	429.33	27.02	28.0	1.104
	方案 9	10	3	8	6	2	1	1	2	2	5	80.0%	3794.73	21.2	34.1	1.2
	方案 10	9	10	8	6	2	2	1	2	2	5	88.9%	2190.89	26.6	39.4	1.2

续表 1

方案		非劣解位置					所需设备数量/台					生产线平衡率	平滑性系数	总成本/ 万元	总面积/ m ²	生产线产能/ (万瓶·h ⁻¹)
种群数:100, 迭代次数:5000	方案 1	10	3	8	6	7	1	1	2	2	4	78.9%	3818.94	21.02	29.6	1.104
	方案 2	10	10	8	6	7	1	1	2	2	4	83.4%	4217.15	23.02	33.5	1.104
	方案 3	10	3	8	9	7	1	1	2	1	4	72.3%	2717.41	19.82	24.0	1.104
	方案 4	10	10	8	6	2	1	1	2	2	5	84.4%	4195.24	23.2	38.1	1.2
	方案 5	10	3	8	9	2	1	1	2	1	5	73.3%	2683.28	20	28.6	1.2
	方案 6	10	3	1	9	2	1	1	4	1	5	100.0%	0	27.2	32.6	1.2
	方案 7	10	3	8	6	2	1	1	2	2	5	80.0%	3794.73	21.2	34.1	1.2
	方案 8	9	10	8	6	7	2	1	2	2	4	87.8%	2553.49	26.42	34.8	1.104
	方案 9	10	3	1	9	7	1	1	4	1	4	98.4%	429.33	27.02	28.0	1.104
	方案 10	9	10	8	6	2	2	1	2	2	5	88.9%	2190.89	26.6	39.4	1.2
种群数:100, 迭代次数:8000	方案 1	10	3	8	9	7	1	1	2	1	4	72.3%	2717.41	19.82	24.0	1.104
	方案 2	10	10	8	6	7	1	1	2	2	4	83.4%	4217.15	23.02	33.5	1.104
	方案 3	10	3	8	9	2	1	1	2	1	5	73.3%	2683.28	20	28.6	1.2
	方案 4	10	3	1	9	7	1	1	4	1	4	98.4%	429.33	27.02	28.0	1.104
	方案 5	10	10	8	6	2	1	1	2	2	5	84.4%	4195.24	23.2	38.1	1.2
	方案 6	10	3	8	6	2	1	1	2	2	5	80.0%	3794.73	21.2	34.1	1.2
	方案 7	10	3	8	6	7	1	1	2	2	4	78.9%	3818.94	210 200	29.6	1.104
	方案 8	10	3	1	9	2	1	1	4	1	5	100.0%	0	272 000	32.6	1.2
	方案 9	9	10	8	6	2	2	1	2	2	5	88.9%	2190.89	266 000	39.4	1.2

当种群为 100 个，迭代次数为 8000 次时，用粒子群智能算法得到的可视化方案见图 3—8。

由图 3 可知，当生产线设备总成本一定时，对应的求解方案可使非劣解集中相对应的生产平衡率最

高。同样，当生产平衡率一定时，对应的求解方案可使非劣解集中相对应的生产线设备总成本最低。这些非劣解都在客户要求的生产线产能和总占地面积约束条件内。通过参考图 4—7 的求解结果确定最终选择方案。

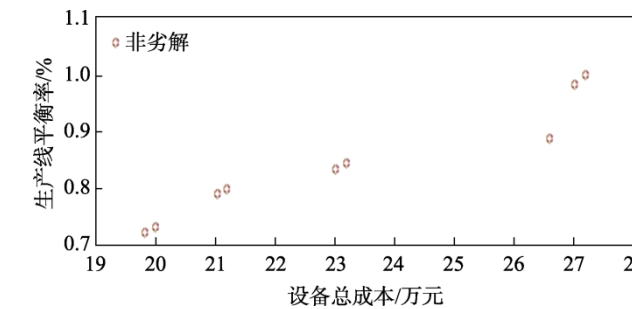


图 3 非劣解在目标空间分布
Fig.3 Distribution of non-inferior solutions in target space

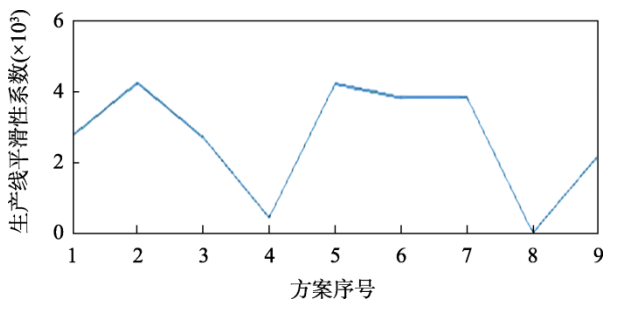


图 4 不同方案下的平滑性系数
Fig.4 Smooth factor under different schemes

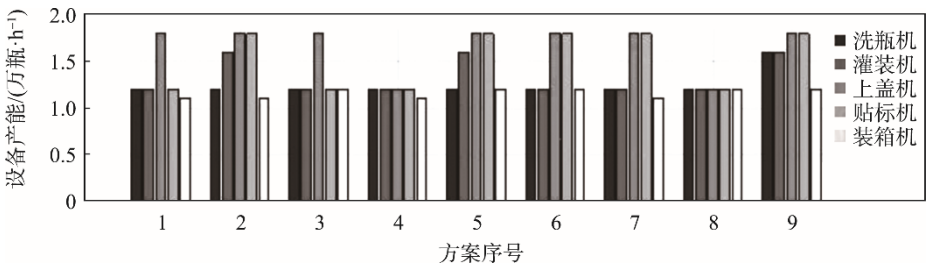


图 5 不同方案下设备的产能
Fig.5 Equipment capacity under different schemes

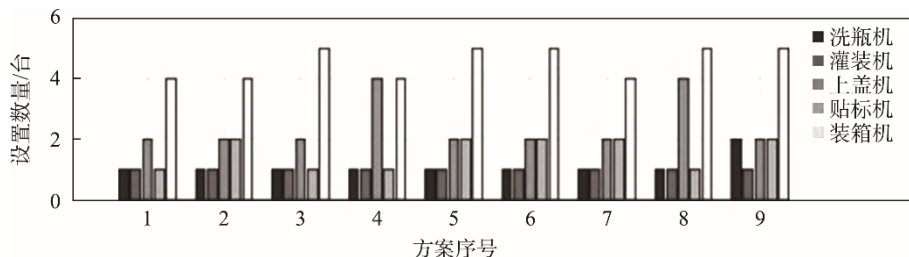


图 6 不同方案下所需设备数量

Fig.6 Number of equipment needed under different schemes

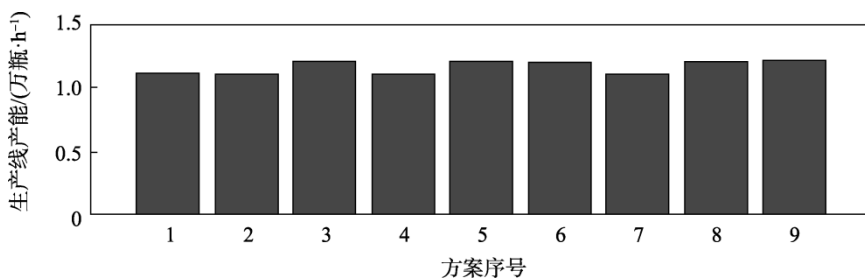


图 7 不同方案下生产线最低产能

Fig.7 Minimum production capacity of production line under different schemes



图 8 迭代次数

Fig.8 Number of iterations

由于非劣解中求解结果的总成本都在客户的预算范围内,所以根据生产线平衡率和生产线平滑性系数来选择最终方案。虽然方案 4 和方案 8 设备的平滑性系数都比较低,且生产线的平衡率分别为 98.4%和 100%,但由于方案 4 的生产线产能为 1.104 万瓶/h,更接近客户需求,所以方案 4 为最优方案。最终选择方案为生产能力为 1.2 万瓶/h 的洗瓶机 1 台、生产能力为 1.2 万瓶/h 的灌装机 1 台、生产能力为 3000 瓶/h 的上盖机 4 台、生产能力为 1.2 万瓶/h 的贴标机 1 台、生产能力为 2760 瓶/h 的装箱机 4 台。该方案生产线平衡率为 98.4%、产能为 1.104 万瓶/h、生产线设备总成本为 27.02 万元、生产线设备总占地面积为 27.994 m²,满足客户要求。

6 结语

通过粒子群智能算法快速选择设备的方案不仅可满足客户产能要求,而且符合设备总最大占地面积

约束等多目标,此外,机器设备总投资金额也在客户的预算内。且生产线的平滑性系数非常低,平衡率也高达 90%以上,生产效率非常高,满足一条流生产。然而,影响生产线选择方案的其他因素还很多,文中只考虑了 6 个方面,收集的数据也比较有限,如果能加入更多的影响因素并且有更多的数据参与计算,那么最终的选型方案效果会更好。

参考文献:

- [1] 于东兴. 高速机器人饮料包装生产线技术及其关键装备研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
YU Dong-xing. Research on Beverage Packaging Line and Its Key Equipment Development Based on High Speed Robots[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [2] 付涛. 轿车白车身焊装生产线的工艺规划与布局设计[D]. 南京: 东南大学, 2017.
FU Tao. Process Planning and Layout Design of Auto Body in White Assembly Production Line[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [3] 张建伟. 生产线平衡与车间布局经路改进在制造业中应用研究[D]. 成都: 西华大学, 2016.
ZHANG Jian-wei. The Application and Study about Production Line Balance and Workshop Production Layout and Pathway Improvement in Manufacturing[D]. Chengdu: Xihua University, 2016.
- [4] 刘禹. 基于遗传算法的 B 公司装配线平衡优化研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
LIU Yu. Study on Assembly Line Balancing Optimization Based on Genetic Algorithm[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.

- [5] 高晋. 基于 IE 技术的 X 企业前制动器生产线改进研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.
GAO Jin. Study of Brake Production Line Improvement of IE Technology Based on X Enterprise[D]. Jinan: Shandong University, 2014.
- [6] 邵仁玉. 基于工业工程的生产线平衡与优化[J]. 机械设计与制造工程, 2014(48): 66—68.
SHAO Ren-yu. Balance and Optimization of Production Line Based on Industrial Engineering[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2014(48): 66—68.
- [7] ZHU W H, ZHANG X Q. Research on Assembly Line Planning and Simulation Technology of Vacuum Circuit Breaker[C]// Advanced Manufacturing and Automation VIII, Changzhou, China, 2019: 457—466.
- [8] 王巍, 杨维平, 杨光. 基于 Flexsim 仿真的生产线平衡研究与应用[J]. 价值工程, 2015(28): 226—228.
WANG Wei, YANG Wei-ping, YANG Guang. Application and Research of Line Balance Based on Flexsim Simulation Method[J]. Value Engineering, 2015(28): 226—228.
- [9] FATTAHI A, ELAOUUD S, AZER E S, et al. A Novel Integer Programming Formulation with Logic Cuts for the U-shaped Assembly Line Balancing Problem[J]. International Journal of Production Research, 2014, 52(5): 1318—1333.
- [10] KELLEGOZ T, TOKLU B. An Efficient Branch and Bound Algorithm for Assembly Line Balancing Problems with Parallel Multi Manned Workstations[J]. Computer & Operations Research, 2012, 39(12): 3344—3360.
- [11] HAMTA N, GHOMI SMTF, JOLAI F, et al. A Hybrid PSO Algorithm for a Multi-objective Assembly Line Balancing Problem with Flexible Operation Times, Sequence-dependent Setup Times and Learning Effect[J]. International Journal of Production Economics, 2013, 141(1): 99—111.
- [12] YU J, YIN Y. Assembly Line Balancing Based on an Adaptive Genetic Algorithm[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 48(1): 347—354.
- [13] 杨威, 孟冠军, 曹文钢, 等. 基于改进遗传算法的装配序列优化[J]. 机械传动, 2016, 40(9): 67—70.
YANG Wei, MENG Guan-jun, CAO Wen-gang, et al. Assembly Sequence Optimization Based on Improved Genetic Algorithm[J]. Mechanical Transmission, 2016, 40(9): 67—70.
- [14] 章志康, 张含叶. 基于改进遗传算法求解钢卷包装线平衡问题[J]. 包装工程, 2017, 38(5): 162—166.
ZHANG Zhi-kang, ZHANG Han-ye. Steel-coil Packaging Line Balancing Problem Solved Based on Improved Genetic Algorithm[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(5): 162—166.
- [15] 张勇. 面向灌装输送线的快速设计方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
ZHANG Yong. Rapid Design Method Research for Beverage-packaging Production Line[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.