

谭岐钰,张红波,高贵兵.基于人员调度优化的混流生产线平衡改善[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2021,36(2):52-59. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.02.008

TAN Q Y, ZHANG H B, GAO G B, et al. Improvement of Mixed Production Line Based on Personnel Scheduling Optimization [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021,36(2): 52-59. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.02.008

基于人员调度优化的混流生产线平衡改善

谭岐钰,张红波*,高贵兵

(湖南科技大学 机电工程学院,湖南 湘潭 411201)

摘要:针对 H 企业单头电缆生产线在混流模式下生产线平衡较差的问题进行分析,发现该生产线目前的人力资源调度和配置难以适应作业负荷持续变动的生产现状.因此,以提高生产线平衡率并最小化生产线总人数和最优化各工序人员安排为目标建立数学模型,采用粒子群算法在 MATLAB 仿真软件中对算例模型进行求解,最终得出的最优人力资源调度方案使得生产线平衡率达到 80% 以上,进一步实现均衡化生产,提高企业的生产效率和生产响应能力.

关键词:混流生产模式;产线平衡;人员调度;粒子群算法

中图分类号:TH164 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2021)02-0052-08

Improvement of Mixed Production Line Based on Personnel Scheduling Optimization

TAN Qiyu, ZHANG Hongbo, GAO Guibing

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: According to the analysis of the poor line balance of the single-head cable production line of H enterprise in the mixed mode, it was found that the current human resource scheduling and configuration of the production line were difficult to adapt to the production status of the continuous change of workload. Therefore, a mathematical model was established to redress the line balance, minimize the total number of people on the production line and optimize the assignment of worker in each procedure. Then Particle Swarm Optimization was utilized in the MATLAB simulation software to solve the example model mentioned. Ultimately, the optimal personnel dispatching scheme helped the production line balance rate reach over 80%, boost balanced production and improve the production efficiency and responsiveness of the enterprise.

Keywords: mixed production mode; line balance efficiency; personnel scheduling; Particle Swarm Optimization

近年来,产品高度定制化已经成为市场需求的发展趋势^[1].较短的生命周期和上市时间、多样化的客户需求使得企业需要频繁地对生产线进行调整和重新配置,以适应不断变化的生产节奏和产品类型,于是混流生产模式被提出,即根据客户需求在一条生产线上同时生产多种类型的产品,用来解决大量相似产品的快速制造问题^[2].即便如此,制造商仍面临着必须提高生产效率和生产率挑战.企业借助计算生产线

收稿日期:2020-11-19

基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(2018JJ2124);湖南省教育厅科学研究项目资助(18A193)

*通信作者,E-mail: zhanghb1688@163.com

平衡的方法来判断该产线各工序间的负荷是否达到能力平衡,以此来找到提高生产效率的最佳方法.生产线各工序间的负荷平衡是保证产线持续流动的根本,也是减少物料等待时间、减少在制品的根本方法.而在混流生产模式下的现实生产活动中,由于各工序的作业时间存在极大的不确定性,单个工作站的作业时间处于不断变化之中,因此,解决生产线平衡的问题则变得尤其具有挑战性.

Keckl 等^[3]侧重于工作站生产时间的变化,给出了基于混合模型生产线原理的流水线分析框架,以识别在生产时间方面面临高度复杂性的工作站,进而对其进行改善以达到负荷平衡的目的;Bautista 等^[4]提出了一种基于有限动态规划和线性规划的混合过程,以解决混流生产模式下的最佳生产排序问题,从制定合理生产计划的角度可以在一定程度上平衡不稳定的生产时间;Kant 等^[5]提出一种新的制造模型,该模型可重构机器单元,以最佳的组装产品顺序和最小化总数量的方式,提高整条生产线的效率.尽管国内外许多学者针对混流生产模式下的生产线平衡优化有了较多的研究,但是从生产线人力资源调度优化上来提高产线平衡的研究则相对较少.

某 H 企业是我国高端电缆组件产品研制生产的主要企业之一,电缆作为适用性非常广泛的产品,定制化程度非常高,而为不同型号的电缆产品设计不同的产线对于企业来说是完全无利可图的,因此该电缆生产线采用混流生产模式来应对产品的大规模定制化.据调研,电缆车间是影响企业生产效率的关键部门,经常出现生产滞后的现象.因此,本文针对电缆车间的产线平衡问题进行研究和分析,建立优化模型并利用粒子群算法求解得出最优人力资源调度方案,提高产线处理不同型号多种产品的能力,有较大的现实意义和较强的现场推广性.

1 车间现状

1.1 确定目标产线

H 企业生产的电缆产品头数为 1~46 头不等,电缆产品产值分布如图 1 所示.

由图 1 可知:仅单头电缆的产值高达 34%,占总产值 1/3.由于多头电缆的加工工艺与单头电缆存在相似性,因此,选择单头电缆 A₁ 产线作为优化研究的目标产线.

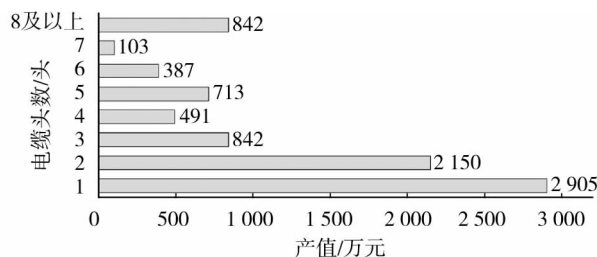


图 1 电缆产品产值分布

1.2 A₁ 产线生产现状

1.2.1 单头电缆加工工序

表 1 为 A₁ 产线的工序作业内容和对应的作业时间,各工序的作业时间是严格按照秒表时间研究的规范与方法在生产现场进行测定.电缆组件产品主要由外壳、基座、导线、接触件和防护套构成,总共为 6 道大加工工序.由于电缆加工工艺复杂,目前没有较好的设备替代方案,因此,电缆产品的加工主要是由工人手工完成,且 H 企业的产品属于军工类产品,具有保密性质,在生产过程中只能进行批处理而不能单件流动,存在较强的约束关系,每一批产品必须严格按照加工要求完成上一工序,才能进入下一工序.

表 1 工序工时

序号	大工序	划分单元	单位	作业时间/s
1	剥穿压	剥线	根	3
		穿线	根	5
		压线	根	2
2	装打调	装入	头	51
		打底胶	头	51
		调高低	头	81
		外壳粘接	头	23

续表

序号	大工序	划分单元	单位	作业时间/s
3	灌封/清洁	灌封	头	50
		清洁	头	10
4	线束处理	组装锁紧件	头	58
		垫硅胶垫	头	42
		组装尾附	头	131
		涂 823	根	6
		组装橡胶垫	头	8
		修线	头	19
		贴标签	根	4
5	吊/校麻花针	涂三防漆	头	10
		吊麻花针	头	22
5	吊/校麻花针	校麻花针	头	23
		完工检验	头	15

1.2.2 作业人员安排现状

A₁ 产线为多人共站,即在一个大工序工站上安排了多名作业人员^[6].图2为单头电缆 A₁ 产线作业人员安排现状图,第1~第6工序分别安排了3,3,1,4,1,1名作业人员,产线总作业人数为13人.

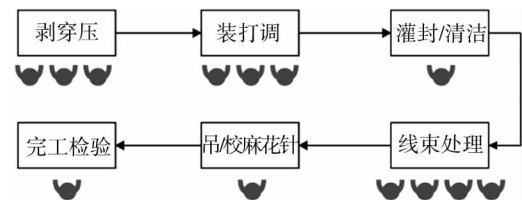


图2 作业人员安排现状

1.2.3 产线平衡率

电缆产品型号众多,产品型号的不同意味着连接器导线的芯数不同,电缆内部导线芯数为9~45芯不等,芯数变化较多、跨度较大,但不同型号的产品又具有相同的工艺流程和生产作业方法.因此,为了提高产线的利用率,采用混流生产模式同时上线加工生产不同型号的产品.

由表1可知:剥穿压工序以及线束处理工序中的涂 823 保护剂和贴标签工序的单位为根,因此,不同连接器导线芯数会导致不同的加工生产时间.选择芯数跨度最大的2个产品型号 A 型号(9芯)和 B 型号(45芯)作为比照对象,利用生产线平衡率计算式(1)求得 A 型号(9芯)产品和 B 型号(45芯)产品的生产线平衡率.

$$R = \frac{\sum t_i}{QC} \times 100\% \tag{1}$$

式中:R 为生产线平衡率;t_i 为电缆生产线各工序作业时间;Q 为工站个数;C 为节拍(所有工序中最长作业时间).

A 型号(9芯)和 B 型号(45芯)产品的生产数据如表2所示.

表2 A 型号和 B 型号产品生产数据

工序	大工序工时/s		作业人数	操作工时/s	
	A 型号	B 型号		A 型号	B 型号
1	90	450	3	30.0	150.0
2	206	206	3	68.6	68.6
3	60	60	1	60.0	60.0
4	358	718	4	89.5	179.5
5	45	45	1	45.0	45.0
6	15	15	1	15.0	15.0

由表2可知:作业人员总人数固定不变的情况下,线束处理工序的操作工时也就是单名作业人员的作

业负荷量要远远大于其他工序,所以当前工位可能无法在规定的时间内完成相应的生产任务;由于产品导线芯数的改变,剥穿压工序的操作时间由 A 型号产品的 30 s 增加到 150 s,作业时间相差较大。

将表 1 的数据代入式(1),可求得 A 型号(9 芯)产品的生产线平衡率为 57.4%,B 型号(45 芯)产品的生产线平衡率为 48.1%。由生产线平衡率的计算结果可知:A 型号和 B 型号产品上线时的生产线平衡率都十分低,平衡损失率较大。

2 问题描述

2.1 工序划分不合理

吊/校麻花针工序有 2 个划分工序,总作业时间为 45 s,而完工检验工序的单头操作时间仅为 15 s。当导线仅为 9 芯时,第 1 工序的单头总作业时间为 90 s,第 4 工序的单头总作业时间为 358 s,与第 5 和第 6 工序的单头作业时间相差甚远,出现较多空闲等待时间。

2.2 作业任务负荷变化

当不同型号的产品上线时,实际生产时间与生产线的周期时间发生了偏差。多导线产品上线时,工序难以在规定时间内完成相应的生产任务,不利于作业人员工作情绪的稳定和生产效率的稳定,且产生时间波动的工序不止单一工序,剥穿压和线束处理工序的作业时间均受到影响,因此,如果不及时对生产线上的人力资源进行调配来适应变换的作业负荷,则难以实现流动生产,混流生产的积极意义将不复存在^[7]。

2.3 人员调度混乱

为了应对不同型号产品上线所带来的各工序作业负荷的变化,当工作量增大,管理人员会凭经验采取临时抽调其他正在作业人员的办法来尽量平衡各工站负荷,即出现“哪里活多,则往哪里加人”的现象,生产线缺乏标准的人员调度机制导致了极大程度的人员调度混乱^[8],最终直接影响到生产线的总体平衡,即使是在增设作业人员的情况下,生产效率仍然较低。因此,针对上述问题进行优化,以求得生产线作业人员的最佳安排模式。

3 工序合并优化

A₁ 产线共有 6 道大加工工序,所有工序都为必要且不可重排。第 5 工序吊/校麻花针工序主要是对产品麻花针进行基本的外观检验,并对错位针进行校正。第 6 工序主要是对加工后的产品进行完工检验。本质上来说,这 2 个工序都属于检验工序,并且第 5 工序的作业内容技术要求低、学习成本低、易于工人的操作和掌握,因此,利用 ECRS 原则即取消(Eliminate)-合并(Combine)-重排(Rearrange)-简化(Simplify)中的合并原则(Combine)将原有的第 5 工序和第 6 工序合并为吊校/检验工序,合并后减少 1 人的操作工时为 60 s,合并后的工序工时表如表 3 所示。

表 3 合并优化后的工时工序

序号	大工序	划分单元	单头用时/s	操作工时/s
5	吊校/检验	吊麻花针	22	60
		校麻花针	23	
		完工检验	15	

4 人员调度优化算法

4.1 问题描述及数学模型

通常认为,生产线平衡率达到 80% 以上时,生产线的控制基本是在科学管理原则下进行的^[9]。因此,结合生产线的实际情况,主要解决在混流生产模式下,生产线如何以最少的总人数安排对各工序进行最佳的人员调度,提高生产线平衡率并使其稳定在 80% 以上的问题。

根据生产线平衡率式(1)建立以下数学模型:

$$\min X = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5. \quad (2)$$

s.t.

$$f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = \frac{\left(\frac{10n}{x_1} + \frac{206}{x_2} + \frac{60}{x_3} + \frac{268 + 10n}{x_4} + \frac{60}{x_5}\right)}{5C} \geq 0.8; \quad (3)$$

$$C = \max\left(\frac{10n}{x_1}, \frac{206}{x_2}, \frac{60}{x_3}, \frac{268 + 10n}{x_4}, \frac{60}{x_5}\right); \quad (4)$$

$$5 \leq x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 \leq 20; \quad (5)$$

$$x_1 \geq 1, x_2 \geq 1, x_3 \geq 1, x_4 \geq 1, x_5 \geq 1; \quad (6)$$

$$x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 \in \mathbf{N}^+; \quad (7)$$

$$n = 9, 10, \dots, 44, 45. \quad (8)$$

式中: X 为第 1~第 5 工序的工人总人数; x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 分别为第 1~第 5 工序的人数; n 为导线芯数; 目标函数式(2)为生产线总人数的最小值; 约束式(3)和式(4)为生产线平衡率达到 80%及以上; 约束式(5)为生产线总上线人数, 范围为 5~20; 约束式(6)和式(7)为每个工序至少安排一人或以上; 约束式(8)为该生产线上的产品导线芯数, 范围为 9~45.

4.2 粒子群优化算法设计

近几年来,有许多学者采用粒子群算法来解决组合优化中的调度问题.张思等^[10]采用粒子群算法针对操作时间不确定性的问题建立数学模型并进行求解,最终得出最优岸桥调度方案;Jiang^[11]基于智能车间调度优化问题,首先建立优化配送路线的数学模型,然后利用粒子群算法求得配送路径最优解,对智能车间的物流配送路线进行合理规划,为提高生产效率、降低服务成本和带动制造业发展等实际活动提供线索;刘洪铭等^[12]引入自适应策略来改进粒子群优化算法,最后解决作业车间调度优化问题,为加工工件找到最合理的加工顺序.本文求解典型组合优化问题中的人员调度问题,因此,选用粒子群算法来试求最优解.

4.2.1 粒子群算法

粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)是 Kennedy 和 Eberhart 在模拟鸟群觅食过程中的迁徙和群集行为时提出的一种基于群智能的随机优化计算技术,是通过粒子间的相互作用发现复杂搜索空间中的最优区域^[13].

优化问题的潜在解都是搜索空间中的一只鸟,称为粒子,每个粒子都有一个由待优化函数决定的适应度值,每个粒子还有一个速度决定它一次飞行的方向和距离,粒子协同运动,一起在解空间中搜索.在迭代的搜索过程中,每个粒子通过跟踪 2 个极值来更新自己:第一个极值为个体极值,就是当前粒子自身经历过的最好位置;另一个极值为群体极值,指的是当前种群经历过的最好位置.通过 2 个极值的引导,整个种群逐渐收敛,最终找到最优解^[14].

在第 k 次迭代中,粒子 i 按照式(9)和式(10)调整每一维的速度和位置实现粒子的位置变化.

$$v_{ij}^{k+1} = wv_{ij}^k + c_1r_1(p_{ij}^k - x_{ij}^k) + c_2r_2(p_{gj}^k - x_{ij}^k); \quad (9)$$

$$x_{ij}^{k+1} = x_{ij}^k + v_{ij}^{k+1}. \quad (10)$$

式中: k 为当前迭代次数; i 为第 i 个粒子; j 为粒子的第 j 维; v_{ij} 为粒子更新的速度; w 为惯性权重; c_1 和 c_2 为学习因子,通常情况下 $c_1 = c_2 = 2$; r_1 和 r_2 为在 $(0, 1)$ 内均匀分布的随机数,增强搜索的随机性; p_{ij} 为粒子个体历史最优位置; p_{gj} 为粒子种群历史最优位置; x_{ij} 为粒子当前的位置.

对于不同的问题,如何确定局部搜索能力与全局搜索能力的比例关系,对于其求解过程非常重要.甚至对于同一个问题而言,进化过程中也要求不同的比例.较大的惯性权重有较好的全局收敛能力,而较小的惯性权重则有较强的局部收敛能力^[15].因此,随着迭代次数的增加,惯性权重应不断减少,从而使得粒子群算法在初期具有较强的全局收敛能力,而晚期具有较强的局部收敛能力.

惯性权重满足:

$$w(t) = w_{\max} - \frac{t(w_{\max} - w_{\min})}{t_{\max}}. \quad (11)$$

式中: t 为当前迭代次数; w_{\max} 为 w 的最大值,通常取 $w_{\max} = 0.9$; w_{\min} 为 w 的最小值,通常取 $w_{\min} = 0.4$; t_{\max} 为最大迭代次数,将惯性权重看作迭代次数的函数,从 0.9~0.4 线性减少.

4.2.2 粒子群算法设计

实验中的决策变量为各个工序的人员数量 x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 , 将各工序的人数编码为一个粒子,一个粒子有 5 维,分别代表各工序的人数;约束条件为 $f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) \geq 0.8$, 人员数量之和 X 介于 $[5, 20]$, 且 x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 均为正整数;适应度函数为 x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 之和 X , 求其最小值.

粒子群优化算法的设计流程图如图 3 所示.

初始化种群粒子总数为 30, 粒子为 5 维的 $[1, 10]$ 内均匀分布的随机整数, 初始化速度为与粒子种群同维度的全 0 矩阵, 其含义是每个粒子在每个维度上都有对应的速度; 个体历史最优初始化为各个粒子本身, 由于约束条件包含 $f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) \geq 0.8$, 全局最优粒子对粒子种群优化起到决定性作用, 因此, 在初始化全局最优位置时, 需要确保种群最优粒子满足 $f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) \geq 0.8$. 首先在初始化种群内寻优, 若求得的当前全局最优粒子满足 $f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) \geq 0.8$, 则保留, 并开始迭代寻优; 否则, 需要重新生成粒子, 并判断其是否满足约束条件, 若满足则保留, 将其作为全局最优粒子, 并开始迭代寻优, 若不满足则重新生成.

迭代过程包含初始化惯性权重参数 w 、学习因子 c_1 和 c_2 、最大迭代次数等, 按照一般实验参数选取原则选取参数, 惯性权重参数 w 采用线性递减权值策略为 0.9~0.4 线性下降, 使算法尽快收敛, 学习因子 c_1 和 c_2 为 2, 最大迭代次数为 1 000.

按照式(8)和式(9)更新粒子速度及位置, 进而按照粒子 $f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) \geq 0.8$ 的原则更新个体历史最优与全局最优, 迭代 1 000 次后, 求得的全局最优值即为所求得的最优解.

将模型在 MATLAB 仿真软件平台下运行, 当 $n=9$ 时, 适应度函数值迭代曲线如图 4 所示. 由图 4 可知: 适应度函数值随迭代次数的增加而减小, 并最终收敛, 输出最优解.

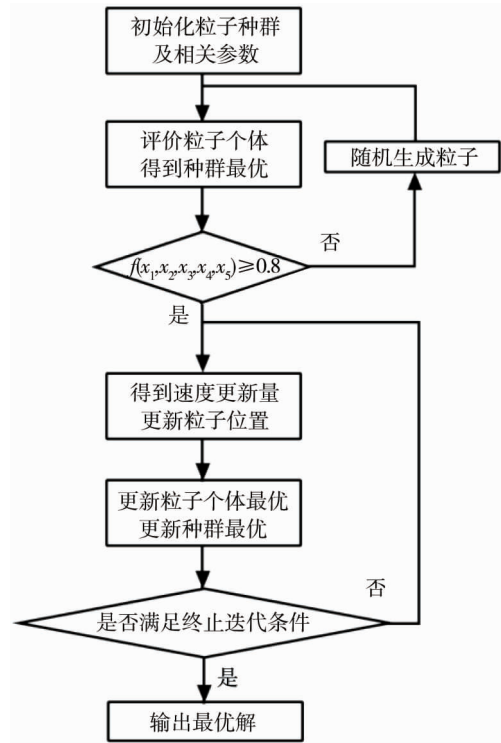


图 3 设计流程

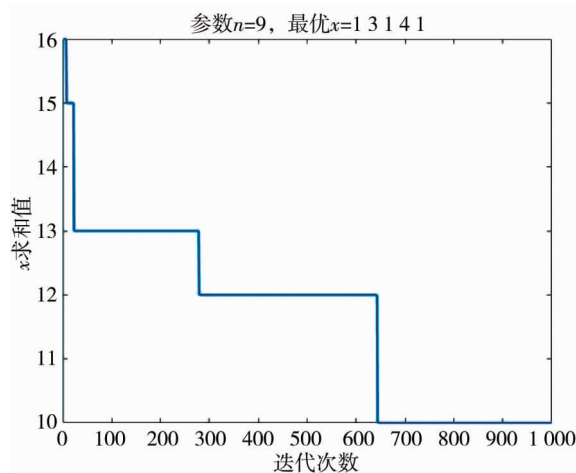


图 4 适应度函数值迭代曲线

4.3 实验结果及分析

依次改变参数值, 得出不同型号产品线上的最优人员调度方案如表 4 所示.

表4 最优人员调度方案

$\min X$	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	适用芯数 n
9	1	2	1	4	1	10
10	1	3	1	4	1	9
11	2	2	1	5	1	20~21
12	2	3	1	5	1	11~18
13	3	2	1	6	1	29~31
14	3	3	1	6	1	19, 22~27
	4	2	1	6	1	35
15	4	2	1	7	1	38~43
16	4	3	1	7	1	28, 32~34, 36~37
	5	2	1	7	1	44~45

由表4可知:该产线需要配备9~16名作业人员才能保证产线负荷处于较为平衡的状态,同时求得的结果 $f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$ 的值均大于0.8,且不同型号的产品在人员调度上有不同的最优解,管理人员可以根据生产计划对第1、第2和第4工序上的作业人员进行标准化的合理安排,避免生产人员在调度时产生较为混乱的局面。

由于导线芯数的变动会导致人员数量的波动,为了保证优化前后生产线平衡率的对比具有合理性和有效性,因此,采用同等人力资源数量数据,即采用优化前标准的人员($3+3+1+4+1+1=13$ 人)和优化后的最优人员($3+2+1+6+1=13$ 人)配置生产线平衡率数据进行对比分析,13人的人员配置适用于导线芯数为29, 30, 31根,优化前后的生产线平衡率和瓶颈时间对比结果如表5所示。

表5 优化前后的生产线平衡率和瓶颈时间对比

产品芯数/根	优化前		优化后	
	生产线平衡率/%	节拍/s	生产线平衡率/%	节拍/s
29	50.8	139.5	80.1	103.0
30	50.5	142.0	81.1	103.0
31	50.3	144.5	81.8	103.3

由表5可知:在同等作业人数的情况下,最优的人员调度方案将生产线平衡率提高了30%左右,而瓶颈时间反而缩短了40s左右,该方案不仅提高了生产效率,缩短了生产时间,同时也证明该方案优化后的人员调度更为合理。

5 结论

- 1) 在混流生产模式下,作业人员的调度问题会在一定程度上对生产线平衡造成影响。
- 2) 建立数学模型并运用启发式算法求最优解对于解决生产线的优化问题具有一定有效性,其解得的生产线最优人力资源调度方案在理论上能够有效地提高生产线平衡率,促进产线流动。
- 3) 管理层应根据生产计划对生产线人力资源进行及时调整,合理安排用工,以标准化的人力资源调度模式提高生产效率,可避免以往在管理方面的经验主义,减少生产线混乱情况的发生,更好地适应于大规模定制化市场。

参考文献:

- [1] 马东升,宋华明,黄甫.需求波动的混流装配线平衡中资源配置研究[J].现代制造工程,2019(6):23-29.
- [2] Rahman N S A, Al Hazza M H F, Kays E. Minimizing makespan of multi-machine production system in flow shop environment by means of mixed integer programming model[J]. International Journal of Mechanical Engineering and Technology, 2018, 9(8):1102-1110.

- [3] Keckl S, Kern W, Abou-Haydar A, et al. An analytical framework for handling production time variety at workstations of mixed-model assembly lines[J]. *Procedia CIRP*, 2016, 41:201-206.
- [4] Bautista J, Cano A, Roaño A P. A hybrid dynamic programming for solving a mixed-model sequencing problem with production mix restriction and free interruptions[J]. *Progress in Artificial Intelligence*, 2017, 6(1): 27-39.
- [5] Kant R, Pattanaik L N, Pandey V. Sequential optimisation of reconfigurable machine cell feeders and production sequence during lean assembly[J]. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2019, 33(9):1-17.
- [6] 杨武成,程文明.多人共站第一类混流装配线平衡问题的优化研究[J/OL].西南交通大学学报:1-9[2021-04-09].
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1277.U.20200915.1218.006.html>.
- [7] Thiago C L, Adalberto S M, Ricardo L, et al. A simheuristic approach for throughput maximization of asynchronous buffered stochastic mixed-model assembly lines[J]. *Computers and Operations Research*, 2020, 115: 104863.
- [8] Porselvi S, Balaji A N, Jawahar N. Artificial immune system and particle swarm optimisation algorithms for an integrated production and distribution scheduling problem[J]. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 2018, 30(1): 31-68.
- [9] 叶晓素,蔡勇.精益生产方式下生产线平衡的研究[J].机电工程技术,2009,38(11):58-59.
- [10] 张思,吕梦晴,代剑环,等.基于不确定性操作时间的岸桥调度优化研究[J].工业工程与管理,2020,25(5):50-58.
- [11] Jiang W. Intelligent shop floor scheduling optimization based on improved particle swarm optimization[J]. *Academic Journal of Manufacturing Engineering*, 2018, 16(4):115-121.
- [12] 刘洪铭,曾鸿雁,周伟,等.基于改进粒子群算法作业车间调度问题的优化[J].山东大学学报(工学版),2019,49(1):75-82.
- [13] Meenu D, Kirti C. Particle Swarm Optimization: A Detailed Study in reference to Job Shop Scheduling and Flexible Job Shop Scheduling[C]//International Conference on Computing for Sustainable Global Development. 2017.
- [14] Liu M, Yang T. Research on supply chain modeling and simulation of robot production line based on uncertain demand[J]. *Academic Journal of Manufacturing Engineering*, 2018, 16(2):127-136.
- [15] Thakur A, Bartaria V N. Solving job shop scheduling problem with particle swarm optimization[J]. *International Journal of Advance Engineering and Research Development*, 2015, 2(4):476-482.