

多目标约束下装配线再平衡研究

张于贤, 梁师文, 杨梦珂

(桂林电子科技大学 商学院, 广西 桂林 541004)

摘要:为了解决算法的最优解存在着达不到装配线平衡最优准则且无法对瓶颈工序进行操作分析的情形,提出了算法和IE技术两阶段组合求解法,并以H产品装配线为例,构建以装配线平衡损失率、装配节拍和站间平滑指数最小化为优化目标的装配线平衡模型;第1阶段,通过遗传算法对平衡模型求解,结果表明所求的最优解未达到85%的“一件流”生产模式;第2阶段,因该算法的求解效果不佳,利用IE技术对所求解的瓶颈工序进行操作改进,最终使平衡率由73.33%提高至88%,使得第1阶段的最优解再平衡,满足产品的平衡目标要求,通过将此结果与用改进遗传算法所得最优平衡率97.8%的对比分析可知,采用IE技术后的两阶段法所得结果虽然不是最优解,但是一个能满足生产需要的有效可行解。

关键词:装配线;再平衡;多目标约束;操作分析;瓶颈工序

本文引用格式:张于贤,梁师文,杨梦珂.多目标约束下装配线再平衡研究[J].兵器装备工程学报,2019,40(1):214-219.

Citation format:ZHANG Yuxian, LIANG Shiwen, YANG Mengke. Research on Rebalancing of Multi-Objective Constraints Assembly Line[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(1): 214-219.

中图分类号:TJ05;TG95

文献标识码:A

文章编号:2096-2304(2019)01-0214-06

Research on Rebalancing of Multi-Objective Constraints Assembly Line

ZHANG Yuxian, LIANG Shiwen, YANG Mengke

(Business School, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: In order to solve the problem that the optimal solution of the algorithm can not reach the optimal balance criterion of assembly line and can not operate analysis of the operation of the bottleneck process, the two phase combination method of algorithm and IE technology was proposed, and a H product assembly line was taken as an example to construct the assembly line balance model with the optimization of the balance loss rate of assembly line balance, the assembly beat and the minimization of the inter station smoothness index. In the first stage, the genetic algorithm was used to solve the equilibrium model. The results show that the optimal solution is not up to 85% of the “one flow” production mode. In the second stage, because of the poor solution effect of GA algorithm, IE technology was used to improve the operation of the bottleneck procedure solved by GA, and finally the balance rate was raised from 73.33% to 88%, which makes the optimal solution of the first stage rebalance, satisfies the requirement of the balance target of the product, and the result is 97.8% to the optimal balance rate obtained by the improved GA. The results of adopting IE technique show that the result of the two stage method is not an optimal solution, but an effective and feasible solution that can meet the needs of production.

Key words: assembly line; rebalance; multi-objective constraints; operation analysis; bottleneck process

收稿日期:2018-07-31;修回日期:2018-08-25

基金项目:国家自然科学基金项目(51461009);广西研究生教育创新计划资助项目(2017YJCS59)

作者简介:张于贤(1964—),男,博士,教授,主要从事管理科学与工程与机械工程研究。

通讯作者:梁师文(1992—),男,硕士研究生,主要从事工业工程研究,E-mail:liangshiwen8341@163.com。

装配线规划在现代复杂多变的大规模定制生产模式下扮演着重要的角色,装配线平衡与否直接影响制造系统的生产效率。

为了获得较高的装配线平衡率,须在工艺条件约束下,对全部装配工序按流水线节拍进行科学组合以使每个工位分配的负荷量充足且均衡。装配线平衡问题主要分为三类^[1],但在低成本,高效率且个性化的市场需求下,以装配线的工作站数为定值,求最小生产节拍的第 II 类装配线平衡问题仍是制造业目前须解决的难题。近年来,国内外学者针对第 II 类装配线平衡问题已经提出了诸多平衡数学模型及优化算法,其中文献[1-7]以最小生产节拍为目标函数构建单目标装配线数学模型,设计了各类算法对装配线问题进行求解,通过实例验证了算法的有效性和可行性。与单目标约束下的算法求解模型相比,尽管文献[8-10]设计了多目标装配线算法优化模型,可增强求解效果的可靠性和有效性,但仍有不少问题待解决:平衡约束模型未能更全面的反应实际生产现状,研究与实际应用依旧存在差距;智能算法虽然能够对工序作最优性排序,但仍存在最优解不符合装配线平衡最优准则的情形;多数文献从算法优化性能再改进入手提升求解效果,未能考虑到工序操作的复杂性和潜在的冗余性,且对瓶颈工序未能再深入地进行操作分析,使得装配线平衡率再提高。本文提出了基于 GA-IE 两阶段法的装配线多目标再平衡优化模型。

1 第 II 类装配线平衡问题描述

针对第 II 类装配线平衡问题,设工作站数目为 K ,工序集合为 N , t_i 为工序 i 的操作时间; $t(S_k)$ 为第 k 个工作站的工序时间,为了使得生产节拍最小化,须将所有工序均衡地分配到各个工作站。构建第 II 类装配线平衡模型须基于以下假设:

产品的装配工序时间已确定,工序逻辑优先关系已知;全部工序均被分配在工作站且只被分配到其中的一个工作站;工作站的数目是确定的;各个工作站由传送带链接,其传送速度一定,传送时间可忽略不计并且每隔固定的节拍时间投放一个待装配的零/部件。

为了解决单目标约束数学模型对装配线平衡界定比较单一化且模型结果与实际生产应用存在较大的偏差,提出多目标约束下的装配线平衡数学模型对装配线优劣作出较全面的评价,其模型可表示如下:

1) 最小化装配节拍:

$$\min CT = \max_{1 \leq k \leq K} \left(\sum_{i=1}^N t_i x_{ik} \right) \quad (1)$$

2) 最小化平衡损失率:

$$\min E^* = 1 - \max \left(\frac{\sum_{i=1}^N t_i}{K \times CT} \right) = \min \left(\frac{K \times CT - \sum_{i=1}^N t_i}{K \times CT} \right) \quad (2)$$

3) 工作站间最小化平滑指数:

$$\min H = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^K \left(\sum_{i=1}^N t_i x_{ik} - CT \right)^2}{K-1}} \quad (3)$$

$$\text{s. t } \sum_{k=1}^K (kx_{ik} - kx_{ik}) \leq 0; \forall i \in PRE(j) \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^K x_{ik} = 1; x_{ik} \in (0,1), i = 1,2,\dots,N \quad (5)$$

其中,式(1)表示以最大的装配任务时间为装配线节拍 CT ;式(2)表示最小装配线平衡损失率 E^* ;式(3)表示平滑指数 H ,即分配到各个工作站上的装配任务时间总和与节拍的偏差,是衡量工作站负荷的指标;式(4)确保每项装配任务仅能被分配到其中的一个工作站,且决策变量 x_{ik} 属于 0/1 型, $i = 1,2,\dots,N$;式(5)保证装配任务被分配时必须遵循工序优先级关系, $PRE(j)$ 表示按任务的先后顺序, i 先于任务 j 完成的任务集合。

2 遗传算法设计

2.1 算法编码设计

采用二进制编码方式对装配线平衡问题进行编码,即通过二进制字符集 $\{0,1\}$ 产生 0/1 字符串来表示问题空间的候选解。

译码过程是按照基因位次将工序分配到各个工作站,其操作步骤如下:

步骤 1 初始化节拍。计算理论最小节拍 $C_{\text{theory}} = \sum_{i=1}^N t_i / K$,令 $CT^* = C_{\text{theory}}$;

步骤 2 以 CT^* 为当前节拍,并将工序集合 N 按照基因位次分配到 K 个工作站中, K 个工作站的时间分别为 $T_1, T_2, \dots, T_m, \dots, T_K$; if $T_m \leq CT^*$, 则 CT^* 为该排序下的最小节拍,即可停止搜索;否则,进行步骤 3;

步骤 3 计算各工序的潜在增量 $\Delta p_r, \Delta p_r (r = 1,2,\dots, K)$ 表示第 $k+1$ 个工作站的第 1 个作业元素时间;

步骤 4 令 $CT = \max \{ T_m \}$, $CT^* = \min \{ T_m + \Delta p_r \}$, if $CT \leq CT^*$, 则 CT^* 是该排序下的最小节拍,停止搜索;否则,进行步骤 2。

本文研究的问题属于多目标函数情形,在求解最优方案须将多目标问题转化为单目标问题,通过考虑各目标函数式(1)、式(2)、式(3)将其设计成单目标评价函数 f ,定义如下:

$$f_{\min} = \alpha * CT + \beta * E^* + \gamma * H$$

其中, α, β, γ 为权重系数,且 $\alpha + \beta + \gamma = 1$ 。

2.2 常规遗传算法操作

1) 初始化种群

利用随机法生成规模为 Size 的初始种群,其操作步骤如下:

步骤 1 按照工序逻辑优先关系矩阵对工序作有序分配;

步骤 2 将矩阵中已分配的工序对应的行和列均划去,

表1 H产品装配工序顺序

编号	工序名称	紧后工序	工序时间/s	编号	名称工序	紧后工序	工序时间/s
1	准备材料	2,4	30	28	电池焊接	35	15
2	A面印刷	3	20	29	电池组装	30	20
3	A面贴片	6	20	30	电池测试	36	10
4	B面印刷	5	20	31	信号器安装	35	20
5	B面贴片	6	20	32	前壳检查	33,34	10
6	主板焊接	7	20	33	安装听筒	36	20
7	焊接检测	8,9	15	34	安装按键	36	10
8	软件载入	10,11,12	30	35	组装主板	29	30
9	标序列号	13	10	36	组装前后壳	37	30
10	检查主板	13	30	37	固定螺钉	38,39	15
11	测试主板	13	30	38	功能测试	40	30
12	LCM测试	15	20	39	测信号器	40	15
13	检查外观	14	10	40	外观检查	41,45,46	10
14	贴膜片	15	10	41	安装镜片	42	10
15	焊接LCM	16	20	42	标IMEI	43	10
16	贴保护棉	17	10	43	检查IMEI	44	10
17	检查功能	18,19,22,24,27,31,32	10	44	贴标签	47	10
18	摄像头焊接	35	10	45	FQC检查	44	30
19	咪头加锡	20	15	46	充电检查	44	10
20	咪头焊接	21	30	47	放器件	48	10
21	咪头测试	35	15	48	贴标贴	49	15
22	马达加锡	23	10	49	放证书	50	10
23	马达焊接	35	10	50	检查	51,52	10
24	喇叭加锡	25	10	51	贴条码	53	15
25	喇叭焊接	26	10	52	放说明书	53	10
26	喇叭测试	35	10	53	称重装箱		20
27	电池加锡	28	30				

表2 算法对测试问题的运行结果

问题	求解算法	工作站数	节拍CT/s	平衡率E/%	平滑指数H
Jackson	分支定界法		10	92.00	1.58
	GA	5	10	92.00	1.45
	GA-TS		10	92.00	1.23
Buxey	分支定界法		34	95.29	2.00
	GA	10	34	95.29	1.83
	GA-TS		34	95.29	1.34
H产品 装配线		9	125	78.22	35.79
	GA	10	120	73.33	22.36
		11	100	80.00	34.06
		9	100	97.78	3.54
	GA-TS	10	90	97.78	3.33
	11	85	94.12	6.12	

经表2结果可看出,GA-TS算法、GA算法与分支定界法(B-and-B)在工作站数K相同的情形下求解Jackson和Buxey问题,GA-TS算法求解效果较好于GA算法和B-and-B算法得到最优解,表明GA-TS算法、GA算法的求解结果均准确。

在不同工作站数K的情形下分别采用GA-TS算法和GA算法对H产品装配线平衡问题进行优化求解。当工作站数取值相同时,GA-TS算法优化求解的节拍CT、平滑指数H均低于GA算法的结果,且平衡率E*较好于GA算法得到的解,表明GA-TS算法得到的解更优,效果更佳。

在实际生产中,给定的H产品工作站数K=10,GA算法获得最优解对应的工位图,如图4所示,其中图4中的[(39,15),station1]表示编号为39且时间为15s的工序被分配到工作站1。GA算法得到的最优解节拍CT=120,平滑指数H=22.36,生产线平衡率E*=73.33%未达到装配线平衡最优准则要求,即生产线平衡率只有在85%以上时,生产系统是按照“一件流”的生产模式^[14]运行。

为了满足生产要求,在GA算法最优解的基础上,提出利用IE技术对H产品装配线再改善思想,则构成两阶段体

系模型,其中第1阶段,利用GA算法对装配线平衡问题进行优化求解,第2阶段,应用IE技术针对第1阶段算法求解的不符合要求的最优工位作瓶颈分析,并进行持续性改善,得到满意的再平衡方案,如图5所示。

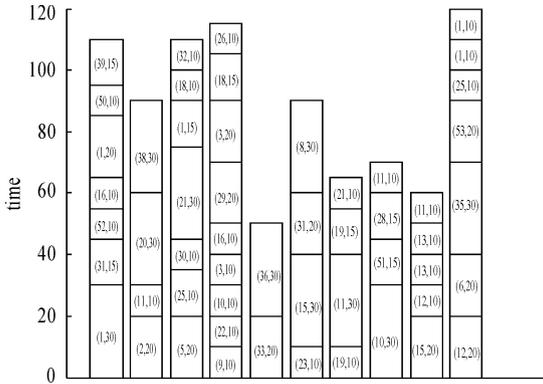


图4 GA算法最优解对应的工位图

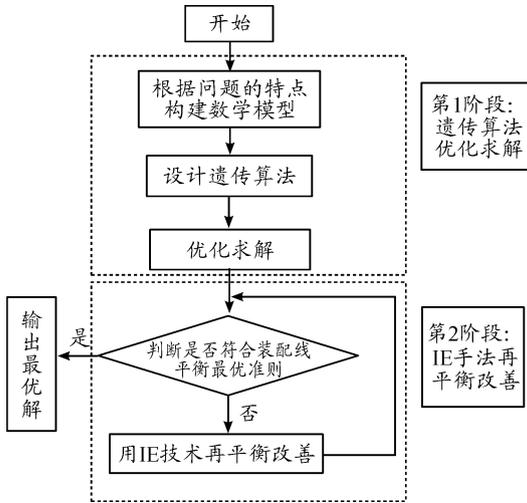


图5 两阶段体系模型

3.2 IE技术再平衡改善

由图4可知,第1,3,4,10工位的加工时间比较长,处于忙碌状态,是整个流程的瓶颈环节,也是造成后续工位高空闲率的因素。因为工作站负荷不均衡,限制了装配线的整体产出效率,对其余工位的生产能力产生了瓶颈效应,因此,利用工业工程(Industrial Engineering,简称IE)技术^[15]对第1、3、4、10工位的工序进行重点再改善。

以第10工位中的6号工序为例进行双手作业分析,对多余及无效的动作进行改善,其改善前的双手作业分析结果,如图6所示。

通过对H装配线不合理现象的分析,利用“6W1H”提问技术和“ECRS”原则对6号工序进行双手作业改善,其中提问技术从生产作业的七个方面(作业要完成什么(what)、在何地做(where)、何时做(when)、何人做(who)、为谁做(for whom)、作业方法(how)和为何这样做(why))有序的探寻问题的根源,能够快速准确地对生产作业现存的问题作出定

位,并发现问题产生的原因。再通过“ECRS”原则对提问技术找到的作业问题进行取消(Eliminate)、合并(Combine)、重排(Rearrange)、简化(Simplify)5个环节的调整,使得6号工序时间由20s降低到14s,其结果如图7所示。

依据6号工序的改善思路对第10工位的其余工序及第1、3、4工位进行改善,其结果如表3所示。

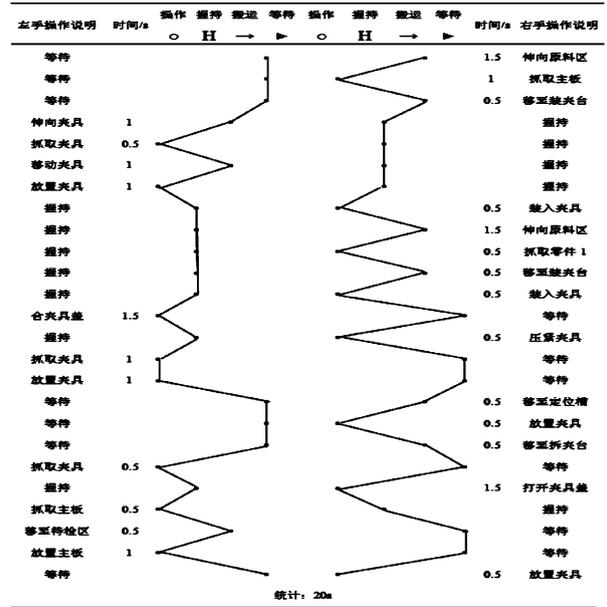


图6 改善前主板焊接双手作业分析

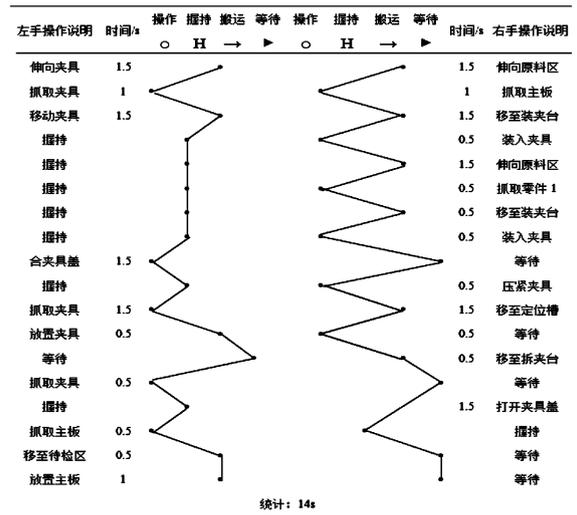


图7 改善后主板焊接双手作业

表3 瓶颈工序改善前后对比结果

工位编号	作业时间/s	
	改善前	改善后
工位1	110	96
工位3	110	92
工位4	115	98
工位10	120	100

经过对瓶颈工序进行改善,瓶颈节拍 CT 由原来的 120 s 变为 100 s,平滑指数 H 由 22.36 变为 18.65,平衡率 E^* 由 73.33% 变为 88.00%,符合“一件流”的生产模式要求。

3.3 验证两阶段法求解程度

为了证实两阶段法的求解效果是非最优解一猜想,提出直接利用改进遗传算法对 H 产品装配线平衡问题寻优求解。在工作站数 $K = 10$ 时,瓶颈节拍 $CT = 90$ s,平滑指数 $H = 3.33$,平衡率 $E^* = 97.78\%$,其最优解对应的工位图,如图 8 所示。将两阶段法和改进遗传算法求解结果对比,结果表明:两阶段法得到的结果是非最满意解,但是一个有效可行解;改进遗传算法寻优效果较好,但未能从作业操作改善的角度提升生产线效率。

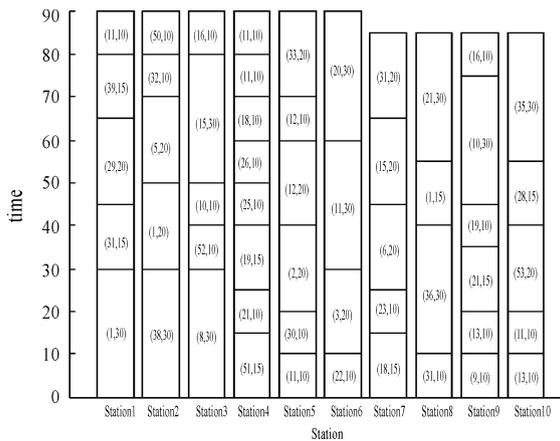


图 8 改进遗传算法最优解对应的工位图

4 结论

本文通过构建以装配线平衡损失率、装配节拍和站间平滑指数为最小优化目标的第 II 类装配线平衡模型,通过实例验证了 GA 算法和改进 GA 算法的准确性。根据实际问题的特点,利用 GA 算法优化 H 产品装配线,其最优解未能符合“一件流”的生产模式要求,提出了 IE 技术与 GA 算法相结合的再平衡改善策略,使得装配线效率从 73.33% 提升到了 88%,且将 GA-IE 两阶段法和改进 GA 算法的求解结果作对比,结果表明:GA-IE 两阶段法求解效果符合生产活动要求,但获得的是可行解,非最优解。两阶段法可以为生产管理人员在装配线规划方面提供方法支持。

参考文献:

[1] 吴永明,戴隆州,罗利飞,等. 求解第 II 类装配线平衡的改进粒子群算法[J]. 机械设计与制造,2017(2):124-127,131.

[2] 姚寿文,林博,王瑀,等. 传动装置高沉浸虚拟现实交互装配技术研究[J]. 兵器装备工程学报,2018,39(4):118-125.

[3] 胡俊逸,张则强,金初云. 求解双边装配线第二类平衡问题的一种蚁群算法[J]. 组合机床与自动化加工技术,2016(2):149-152.

[4] 鲁素丽,唐秋华,李明. 基于元胞自动机的第 II 类装配线平衡问题求解[J]. 中国机械工程,2013,24(5):654-658.

[5] 李梓响,唐秋华,林斌,等. 第二类双边装配线平衡的混合粒子群算法[J]. 机械设计与制造,2015(1):113-116.

[6] 李英德,鲁建厦. 求解第二类装配线平衡问题的改进蚁群算法[J]. 计算机集成制造系统,2012,18(4):754-760.

[7] MIRALLES C, GARCÍA-SABATER J P, ANDRÉS C. Branch and bound procedures for solving the Assembly Line Worker Assignment and Balancing Problem: Application to Sheltered Work centres for Disabled [J]. Discrete Applied Mathematics,2008(3):352-367.

[8] 刘雪梅,贾勇琪,兰琳琳,等. 基于多目标遗传算法的柔性加工线平衡优化[J]. 同济大学学报(自然科学版),2016,44(12):1910-1917.

[9] 刘海江,汤伟,张含叶. 基于改进粒子群算法求解第二类装配线平衡问题[J]. 中国工程机械学报,2014,12(6):508-513.

[10] 司徒洁芸,俞永伟,杨海仕,等. 基于改进遗传算法的流水线第 II 类平衡问题优化研究[J]. 轻工机械,2018,36(1):99-102.

[11] 李书全,孙雪,孙德辉,等. 遗传算法中的交叉算子的述评[J]. 计算机工程与应用,2012,48(1):36-39.

[12] JACKSON J R. A computing procedure for a line balancing problem[J]. Management Science,1956(2):261-271.

[13] Ruey-Hsun LIANG. Application of grey relation analysis to hydroelectric generation scheduling[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems,1999,21(5):357-364.

[14] 陈星宇. 基于改进遗传算法的装配生产线平衡技术研究[D]. 上海:上海交通大学,2011.

[15] 齐二石,霍艳芳. 工业工程(第一讲) 工业工程及其在中国企业中的应用[J]. 工程机械,2005(9):75-77,105.

(责任编辑 杨继森)