

工作要素在装配线中分配与其平衡率的研究

高振豪¹, 苏贵影¹, 李彦华¹, 余燕尾²

(1. 中北大学经济与管理学院创新研究中心, 太原 030051; 2. 天津工业大学管理学院, 天津 300387)

摘要:随着信息与时代的飞速发展,我国电子产品的大量需求订单导致企业装配线超负荷运行,装配线“瓶颈”现象凸显。为了解决装配平衡问题,部分企业采用之前的启发式工位分配方法,但是未能达到最优状态。借助最大化候选原则和 Kilbridge&Wester 法安排工作要素,使用 Lingo11.0 求解构建数学模型的平衡率、平滑指数以及节拍做对比,以此发现三者之间工作要素的不同安排影响整个装配线平衡率,且构建数学模型求解的平衡率较高。通过电子仪器装配线实例分析,证明数学模型的有效性,能够满足各项工艺要求,求解结果能有效解决其装配线平衡问题。

关键词:工作要素;平衡率;最大化候选原则;Kilbridge&Wester 法

中图分类号:TH166;F242

文献标志码:A

引言

生产运作的高效、合理是精益制造的最终目标,是快速灵动的对各种需求做出相应的快速反应,并产出高品质产品的生产管理技术。在精益生产思想的指导下如何不断地优化装配线,减少浪费、令其能够充分发挥能力,保持高效运作的状态,达到最佳平衡,这是当今企业的研究热点。刘俨后等人针对装配线随机作业时间的装配线平衡问题,以最小节拍为优化目标,构建随机作业下的第二类装配线平衡模型,并提出双染色体 GA 算法对该平衡问题进行求解^[1]。张晓玲运用了传统工业工程中的程序分析和方法研究对装配线的平衡问题进行分析研究,并通过实际企业状况对装配线的平衡问题进行优化^[2]。李锋等采用多种群 GA 算法对已定工位

下装配线的生产节拍(CT)、工序分配(K)、工位负荷均衡(SI)、装配线平衡率(E_b)进行求解^[3]。装配线上的工作任务由多个独立不同工作要素组成,这些要素的执行顺序受到工艺流程的要求限制。装配线必须按照规定的生产率进行运作,使得循环周期缩短并达到稳定的平衡率^[4-5]。张惠等以机械式排种器为研究对象,对其装配线中工艺流程的改善、工位的划分及准时制物料配送方案进行研究,建立 JIT 物料配送数学模型,并使用 Lingo 软件求出最佳配送路径^[6]。该过程中需要解决装配线工作要素的分配问题,这直接影响优化资源配置,减少装配线的空闲时间,提高平衡率。在现实企业中,随着企业规模的增大,装配线也随之扩大,其中的工作元素也会变得复杂,最终会导致装配线平衡状况和设备利用率急速下降^[7-8]。因此,为了避免装配线平衡率下降、成本

收稿日期:2017-09-25

基金项目:山西省回国留学人员科研资助项目(2014-056);山西省留学回国人员科技活动择优资助项目(941303);山西省社会科学基金项目(201510ZB06);中北大学第十三届研究生科技立项项目(20161364)

作者简介:高振豪(1989-),男,河南鹤壁人,硕士生,主要从事供应链管理与精益生产方面的研究,(E-mail)zhenhaogaozhenhao@outlook.com

通信作者:苏贵影(1968-),女,福建永春人,副教授,主要从事系统工程与区域创新方面的研究。

浪费现象的出现,本文将运用最大化候选原则、Kilbridge&Wester 法和数学建模并且运用 Lingo 求解的方法^[9]探究该问题。

1 电子仪器装配线问题

一条单一产品装配线上生产一种小型电子仪器,该产品的工作元素见表 1。

表 1 工作元素

序号	工作要素	T/s	向前工序
1	将工件放入夹具并夹紧	12	—
2	把插头和锁扣安装到电源线上	24	—
3	把底座装到支架上	42	1
4	将电源线与电机连接	6	1,2
5	将电源与开关连接	18	2
6	把机械盘装到底座上	6.6	3
7	把闸刀盒装到底座上	19.2	3
8	把电机装到底座上	36	3,4
9	对准闸刀盒并装到电机上	16.2	6,7,8
10	在电机底座上安装开关	22.8	5,8
11	加盖,检查测试	30	9,10
12	放置与手托板上等待包装	7.2	11

依据表 1 工作要素作前向次序图(图 1),节点表示工作要素,箭头表示工作要素的顺序,每个节点上方数值为工作要素的时间。

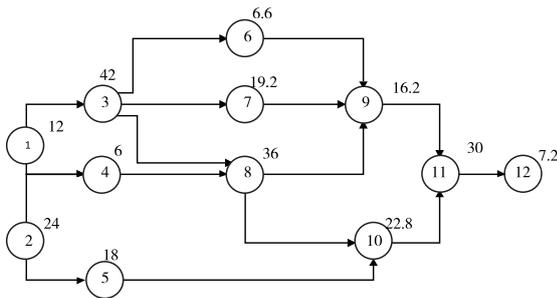


图 1 前向次序图

2 线平衡算法

彭运芳等考虑到各类产品不同的交货期限,深入研究了在不确定条件下的作业车间调度问题,用三角模糊数表示产品装配时间,构建调度问题的模型,并结合模糊理论设计一种改进的 GA 算法进行求解^[10]。企业装配线平衡的目标就是使装配线上的总工作量尽可能均衡分配到每个工位中去,这个目标可以表示两种数学上等价的形式: $\min(wT_s - T_{WC})$ 或 $\min \sum_{i=1}^w (T_s - T_{si})$; 需要满足两个条件:(1) $\sum_{k \in i} T_s \leq T_{si}$, (2) 满足所有前向次

序约束。其中: w 表示工人数量, T_s 表示允许最大服务时间, T_{wc} 表示工作内容时间, T_{si} 表示服务时间。再次利用两种启发式方法,它们都是建立在常识和实验的基础上,而不是数学优化的基础上。在每种算法中,假设人员配备水平是 1,因此,当确定工位 i 时,就确定了工位 i 的工人的数量^[3,11]。在计算线平衡率的同时,常借助平滑指数 SI : 负荷均衡程度表示每个工作站之间的工作载荷程度, SI 指标越小则表示装配生产线工作站的负荷越

$$\text{稳定均衡, } SI = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^K (CT - T_k)^2}}{k}$$

2.1 最大候选规则

在这种方法中,工作要素根据 T_{ek} 值按递减的顺序排列,如图 2 所示。算法步骤^[12-13]:(1)从工作要素时间最大的开始(列表的顶部),选择满足装配顺序对的第一个要素且小于节拍,固定到第一个工位,同时不会使该工位的总 T_{ek} 超过所允许的 T_s ; 工作要素分配之后,重新从列表顶部开始,继续分配下一个工作要素;(2)在满足不超过 T_s 的条件下,列表中没有要素可以分配时,继续下一个工位的位置;(3)按顺序对其他工位重复第一步和第二步的操作,直到所有要素都被分配完为止。按照最大候选原则可知平衡率: $E_B = \frac{4.0}{5 \times 1.0} = 80.0\%$, 其中,节拍 $CT =$

$$60 \text{ s, 平衡迟滞 } d = 20.0\%, SI = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^K (CT - T_k)^2}}{k} =$$

2.04, 图 2 显示线平衡的解。

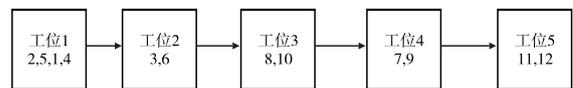


图 2 最大候选原则分配工作元素

2.2 Kilbridge&Wester 法

在 Kilbridge&Wester 法中,前向次序图中的工作要素被安排成纵列,依据它们的列按照先列先排的次序组织到一个表中^[14-15]。假如给定的工作要素可以被分配到不止一列中,则需要列出这个元素所在的所有列。在列表中,给定列中的要素按照 T_{ek} 值的顺序排列,即在每列内部应用最大候选原则,因此每个工位 T_{ek} 和 T_s 更加接近。此时的线平衡率也是 80.0%, 平衡迟滞 $d = 20.0\%$, 节拍 $CT = 60 \text{ s}$, 但是其工位中作业元素不相同

且平滑指数 $SI = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^K (CT - T_k)^2}}{k} = 1.93$ 。图3为

Kilbridge&Wester法分配工作元素。

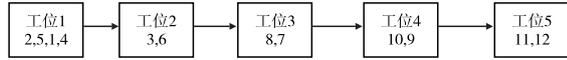


图3 Kilbridge&Wester法分配工作元素

2.3 数学建模

从建立模型到最终的求解模型过程就是从实际企业或具体的情境中抽象数学问题,用数学符号建立方程式、不等式或函数等数量关系^[9]。但模型中需要进行几个基本假设:(1)假设装配线中没有缓冲区,人员充足;(2)研究对象是一条固定节拍,固定工位数的连续装配线;(3)任何一个工序都必须符合优先关系顺序,当所有前顺序工序完成后,后续工序才可以开始操作;(4)每个独立的工序只能在一个工位上,不能重复多个工位;(5)在特定每一刻,工位中只能有一个工序在操作。给定的参数如下:

Tasks: $Tasks = \{1, 2 \dots 12\}$ 作业集合。

N: 作业元素的个数;

i, j : 作业元素的序号(指标),表示作业元素 $i, j; i, j = 1, 2 \dots 12$ 。

t_i : 第 i 个作业元素额定时间, $i = 1, 2 \dots 12$ 。

Pred: 作业元素的优先关系集合, $Pred = \{(i, j) | \text{作业元素 } i \text{ 是作业元素 } j \text{ 的紧前作业}\}$ 这里无需假设优先关系图中有一个唯一的终点。

K : 给定的工作站数, k 为工作站位的序号(指标),表示第 k 个工作站, $k = 1, 2, \dots K$ 。

决策变量: x_{ik} 为 0-1 变量,当作业元素 i 被分派到第 k 个工作站是 $x_{ik} = 1$, 否则为 0。

CT : 装配线的节拍,实数。

约束条件:

$$\text{目标函数: } \min = CT \tag{1}$$

$$\sum_{k=1}^K x_{ik} = 1 \text{ (每个工作元素只在一个工位上)} \tag{2}$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ik} t_i \leq CT \text{ (每个工位上所有工作元素时间之和小于节拍)} \tag{3}$$

$$\sum_{k=1}^K (kx_{jk} - kx_{ik}) \geq 0 \text{ (工序优先顺序)} \tag{4}$$

$$K = 1, 2 \dots 5; i, j = 1, 2 \dots 12 \tag{5}$$

$$x_{ik} = \begin{cases} 1, \text{第 } i \text{ 工作元素在第 } k \text{ 工作站上} \\ 0, \text{反之} \end{cases} \tag{6}$$

依据约束条件和目标函数,利用 lingo11.0 软件在 window10 平台,处理器 Intel (R) core (TR) i5 - 4258U WCPU@2.4 GHz,64 位操作处理器,进行优化求解,图4为运行结果,Lingo11.0 运行程序:

```

model:
SETS:
TASK/1..12/:T;
PRED(TASK,TASK)/1,2,3 1,4 1,4 2,5 2,6 3,7
3,8 3,8 4,9 6,9 7,9 8,
10 8,10 5,11 9,11 10,12 11/;
STATION/1..5/;
TXS(TASK,STATION):X;
ENDSETS
DATA:
T=0.2 0.4 0.7 0.1 0.3 0.11 0.32 0.6 0.27 0.38
0.5 0.12;
enddata
@FOR(TASK(I):@SUM(STATION(K):X(I,K))
=1);
@FOR(PRED(I,J):@SUM(STATION(K):K * X
(J,K) - K * X(I,K)) > =0);
@FOR(STATION(K):@SUM(TXS(I,K):T(I) *
X(I,K)) < = CyCTime);
MIN = CYCTIME;
@FOR(TXS:@BIN(X));
END
    
```

在 Lingo11.0 的环境下,求解模型得到全局最优解,求解目标函数为 54 s,比之前的 60 s 减少 6 s。同时通过对程序运行结果工序分配的分析,可得图5 工位分配图:

该模型求解的节拍 CT 为 54 s,平衡率 $E_B = \frac{4.0}{5 \times 0.9} = 88.9\%$,平衡迟滞 $d = 11.1\%$,比启发式算法 80.0% 有

所提高,平滑指数 $SI = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^K (CT - T_k)^2}}{k} = 0.899$,



图 4 运行结果图

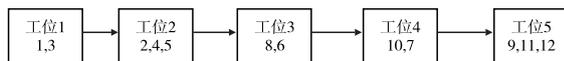


图 5 Lingo 求解工位分部图

相比启发式方法降低,说明装配线更加均衡。无论平衡率、平滑指数还是节拍都比启发式算法有所优化,装配线的工作效率显著提高。

3 结束语

本文结合某电子元器件装配线,通过运用最优候选法、Kilbridge&Wester 法以及数学建模的方法对工作元素分配的工位计算平衡率、平滑指数以及节拍,进行对比发现利用数学建模与 Lingo 联用的方案比较优化,详细对比见表 2。

表 2 三种线平衡法参数对比

线平衡法	节拍 (CT)	平衡率 (E_b)/%	平滑指数 (SI)	平衡迟滞 (d)/%
最优候选法	60	80.0	2.04	20
Kilbridge&Wester 法	60	80.0	1.93	20
数学建模的方法	54	88.9	0.899	11.1

虽然数模建模与 Lingo 求解最优,但是由于线性规模存在一定局限性,本文只研究了在一定条件下的单一目标求最优解情形。下一步研究需要利用其它计算方法辅助以弥补该线性问题的局限性,求解更多目标的装配线平衡问题。

参考文献:

[1] 刘伊后,左敦稳,张丹.随机作业时间的装配线平衡

问题[J].计算机集成制造系统,2014,20(6):1372-1378.

[2] 张晓玲.装配线平衡问题不同算法性能比较研究—以 H 厂涡轮增压器装配线为例[D].衡阳:南华大学,2016.

[3] 李锋,邢静忠,刘伟.基于多种群遗传算法的装配线平衡问题研究[J].四川理工学院学报:自然科学版,2015,28(2):30-38.

[4] 郭湛皓.基于精益生产的手机装配线平衡研究与应用[D].南昌:南昌大学,2012.

[5] 徐发平,唐秋华,刘海.基于分枝定界法的装配线第一类平衡问题研究[J].机械设计与制造,2012(2):204-206.

[6] 张惠,李成松,李玉林,等.基于准时制物料配送的机械式排种器装配线规划研究[J].制造业自动化,2015,37(8):103-107.

[7] 吴隆,余海明,吴媛媛.基于 LINGO 汽车装配线平衡与研究[J].工业工程与管理,2008(6):74-107.

[8] 陈心德.生产运营管理[M].北京:清华大学出版社,2005.

[9] 谢金星.优化建模与 LINDO/LINGO 软件[M].北京:清华大学出版,2015.

[10] 彭运芳,高雅,夏蓓鑫.不确定条件下基于遗传算法的作业车间调度问题研究[J].上海大学学报:自然科学版,2016,22(6):793-803.

[11] 殷旅江,何波,杨立君.多类指派约束下汽车总装装配线平衡优化[J].制造业自动化,2014,36(12):41-44.

[12] 杜运普,杨月新.装配生产线的平衡问题研究[J].机械设计与制造,2003(2):104-106.

[13] YUAN B,ZHANG CY,SHAO XY.An effective hybrid honey bee mating optimizationalgorithm for balancing mixed-model two-sided assembly lines [J].Computers & Operations Reseach,2015(53):32-41.

[14] CHUNG C L, SHIN W L, KUO C Y. Minimizing worst-case regret of makespan on a single machine with uncertain processing and setup times [J]. Applied Soft Computing,2014,23:144-151.

[15] KILBRIDGE M,WESTER L.A Heuristic Method of Assembly Line Balancing[J].Journal of Industrial Engineering,1961,12(6):292-298.

Research on the Distribution of Working Elements in the Assembly Line and Its Balance Rate

GAO Zhenhao¹, SU Guiying¹, LI Yanhua¹, YU Yanwei²

(1. School of Economics and Management Innovation Research Center, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. School of Management, Tianjin University of Technology, Tianjin 300387, China)

Abstract: With the rapid development of information age, China's electronic products in the times with the times, the market demand for a large number of orders led to overloading the enterprise assembly line, along with the assembly line "bottleneck" phenomenon. In order to solve the problem of assembly balance, the previous heuristic station allocation method is used, but failed to achieve the optimal state. So the maximization candidate principle and the Kilbridge & Wester method are used to arrange the work elements, and then Lingo11.0 is used to solve the construction of the mathematical model of the balance rate, smoothness index and beat. And the balance rate, smoothness index and beat are compared to find the effect to the entire assembly line balance rate of the three elements between the different arrangements, and to construct the mathematical model with higher equilibrium rate. Through the analysis of electronic equipment assembly line, the validity of the mathematical model is proved to meet the requirements of the process, and the solution can effectively solve the problem of its assembly line balance.

Key words: working elements; balance rate; maximization of candidate principles; Kilbridge & Wester method

(上接第 87 页)

[21] 邢家省, 杨义川, 王拥军. 函数列的黎曼积分的极限定理及其应用[J]. 四川理工学院学报: 自然科学版, 2017, 30(3): 73-78.

[22] 高建全, 邢家省, 杨义川. 两无穷区间上广义积分交换次序定理[J]. 河南科学, 2017, 35(6): 845-851.

The Osgood Theorem of Uniformly Convergent Functions

XING Jiasheng^{1,2}, YANG Yichuan^{1,2}

(1. School of Mathematics, Beihang University, Beijing 100191, China; 2. LMIB of the Ministry of Education,

Beijing 100191, China)

Abstract: Considering the theoretical method of uniformly convergent functions, Osgood theorem and the Dini theorem on the finite interval are given to judge the uniform convergence of Function column. Then two proof methods of Osgood theorem and its inference are given. And through the examples, the theoretical value of Osgood theorem is illustrated. Discriminant theorem of uniform convergence of function in open or infinite interval have been given and applied in studying the uniform convergence of generalized integrals with parametric variables which theoretically communicating the intrinsic relations between the uniform convergence of the function and the uniform convergence of the parameter generalized integral, and forming a set of theoretical method system.

Key words: uniform convergence of function; uniform equicontinuous; Osgood theorem; Dini theorem