

基于Lingo对Y公司XK产品的线平衡研究

张 宇, 刘俊艳, 岳玲玲, 张 帆, 聂金玉

青岛科技大学经济与管理学院, 山东 青岛

Email: l_junyan@163.com

收稿日期: 2020年11月10日; 录用日期: 2020年12月16日; 发布日期: 2020年12月24日

摘 要

Y公司成品厂117号线存在人员等待浪费、动作浪费等问题, 故以产品工艺流程为切入点, 绘制工艺流程图, 运用连续测时法测得各工序时间, 与节拍时间相比较寻找瓶颈工序并计算线平衡率为67.90%, 因此得出产线不平衡是产线存在人员等待浪费和动作浪费的主要原因。运用Lingo软件进行产线平衡问题的求解, 依据所求最优节拍时间8.47 s对装配线进行工序流程再造, 并据此改进作业空间布局, 规范工装夹具和物料摆放, 改善后线平衡率为79.79%, 线平衡率较改善前提高11.89%; 117线的装配工人由原来的11人减少为9人; 运用动素分析法比较改善前后的加工动作, 左手无用动素比率减少了2%, 右手无用动素比率减少了12%。因此, 平衡产线在解决人员等待浪费和动作浪费等方面具有实际意义。

关键词

线平衡, 连续测时法, 瓶颈工序, 动素分析, Lingo软件

Research on Line Balance of XK Products of Y Company Based on Lingo

Yu Zhang, Junyan Liu, Lingling Yue, Fan Zhang, Jinyu Nie

College of Economics and Management, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao Shandong

Email: l_junyan@163.com

Received: Nov. 10th, 2020; accepted: Dec. 16th, 2020; published: Dec. 24th, 2020

Abstract

There have many wastes in 117 line of Y company factory, such as waiting wastes, action wastes and so on. Taking product process as the breakthrough point, drawing the process flow diagram, using continuous measurement method to measure the process time, comparing with the task time look-

ing for the bottleneck process and calculating the line balance rate that was 67.90%, it is found that the imbalance line was the main reason for wastes. Lingo software was used to solve the line balance. According to the optimal time of 8.47 s, the assembly line process flow was reconstructed, the work space layout was improved and the arrangement of fixtures and materials was standardized. The number of assembly workers on line 117 has been reduced from 11 to 9. By using actin-analysis method, the ratio of left and right actin reduced by 2% and 12% respectively. Therefore, balancing production line has practical significance in solving the waste of personnel waiting and action.

Keywords

Line Balance, Continuous Time-Measuring Method, Bottleneck Process, Dynamic Element Analysis, Lingo Software

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在当今竞争激烈的世界中，装配线的效率和生产率对于制造公司至关重要[1]。随着制造业的不断发展和竞争压力的提高，制造业企业对精益生产的需求不断增加，生产线平衡是达到精益生产的关键所在，因此，提高设备和人工利用率，消除各种“不经济、不均衡、不合理”，提高生产线平衡率已经成为各企业亟待解决的问题[2]。故越来越多的企业和学者开始注重产线平衡问题的研究，例如，以最小化工作站的效率为指标，来解决直线和 U 形线的简单装配线平衡问题[3]；最大限度地减少工作站的数量、基于对特定工作站的分配来提高产线平衡[4] [5]；通过优先淘汰非增值活动和减少操作员数量来提高生产率等研究[6] [7]。

而线平衡的提高需要基础 IE 手法的应用以及建模仿真、算法的结合，且 Lingo 软件在优化产线平衡方面起着一定作用。其中，贾舒媛等[8]通过 Lingo 法对电风扇装配线进行平衡率的改善提高。陈子昉等[9]运用工业工程的方法解决实际生产中的线平衡问题。贾舒媛等[10]通过连续测时法并建立模型，用 matlab 法进行工序再造，提高产线平衡。童晖[11]等通过鱼骨图和 OEE 找出生产中的浪费，以线平衡为工具，优化产线，提高产能。甘卫华等[12]运用工作方法解决实际生产中的线不平衡问题。孟英晨[13]等通过基础 IE 和仿真技术相结合的方法对手机装配线进行改善优化。李天阳等[14]利用 3P 精益布局思想与流程改进方法，对产线进行改善，提高产线平衡率。朱华炳等[15]运用 ECRS 原则和人机作业分析，对产线上瓶颈工位和生产能力过剩工位进行改善，同时引入 AGV 对物流路径和布局进行优化，旨在提高产能。由此可以看出，装配线作为制造业最重要的部分之一，产线平衡将会减少损失、提高生产率[16]。

本文将运用工业工程基本方法和原理[17]，对现存问题进行分析，并结合 Lingo 软件求解最优工序，对产线进行工序再造，解决产线不平衡问题。在此基础上对作业空间布局进行改善，对工作台 U 型布置将有助于操作员有次序地工作，降低差错的发生概率[18]，故引进 U 型工作台装置。并从人的角度出发，考虑工人舒适度，改善工作姿势[19] [20]。使得理论得到很好实施，以提高产线整体线平衡率。

2. 案例背景

Y 公司是 EPS 废旧泡沫塑料解决方案的提供商，项目所在工厂属于 Y 公司成品分厂，主要负责将加工好的框条进行切割及组装成 XK 成品的生产加工。客户的个性化需求导致多品种、小批量的订单产生，

在生产过程中，需要频繁的换款，由于换款的时间大部分都在前两个工位的模具调试，后面工位备料结束后停工等待，时间浪费严重。线上各工序的加工时间不平衡，带来等待浪费，生产效率低下，产能利用不足，因此工厂一直积极导入精益生产管理方式，对生产进行改善。

针对上述问题，运用连续测时法、仿真布局、Lingo 软件模型求解等方法对装配线进行工序再造、布局规划，旨在解决人员等待浪费和线不平衡问题。

3. 工艺流程分析

根据客户订单和企业利润选取一类同工艺的主要产品进行分析(表 1)，此类产品有 10 款不同的 XK，其工艺为两人切框、两人钉框、放玻璃、放衬纸和中密度背板、安背板、钉钉、翻框、装盒、装箱 11 个工序，由 11 名工人完成。其中切钉工序为两人并行作业，故后续模型的建立采用切钉为两道工序的方法。

Table 1. Same process product series

表 1. 同工艺产品系列

同工艺产品系列	
名称	尺寸/inch
有切钉中密度背板产品	4 × 6
	5 × 7
	8 × 10
	11 × 14
	16 × 20
有切钉植绒背板产品	4 × 6
	5 × 7
	8 × 10
	11 × 14
	16 × 20

此类产品的工艺流程(图 1)为:

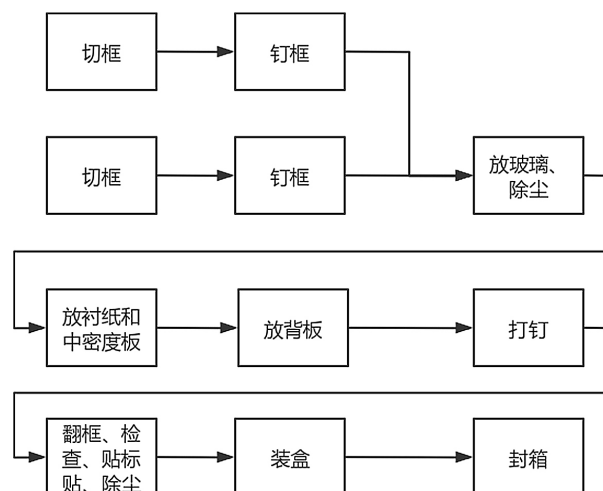


Figure 1. Process beat analysis

图 1. 工艺流程图

在此类产品中 5×7 inch 产品客户需求量最多, 因此, 本文将以 117 线生产的 5×7 inch 产品为例进行分析。

4. 工艺节拍分析

对 XK 生产线进行工时分析, 通过连续测时法对生产 XK 的 11 个工序进行 10 次连续测时, 取平均时间(图 2), 以 5×7 inch XK 为例:

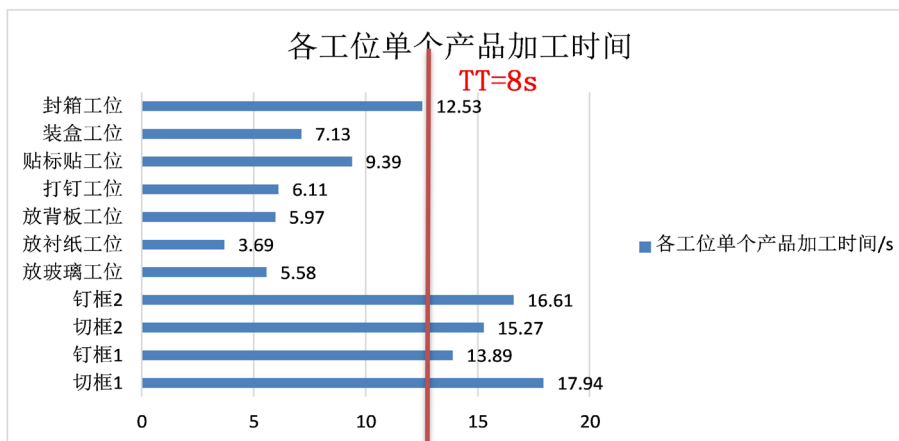


Figure 2. Product processing time

图 2. 产品加工时间

根据订单交期和客户需求量算出每日需要完成的计划量为 4500 件, 员工每人每天有效工作时间为 10 小时, 算出节拍时间为 8 s。由上图可见, 单人切框、钉框为瓶颈工序, 翻框、检查、贴标贴、除尘工位的加工时间为 9.39 s, 封箱的加工时间为 12.52 s, 均有可能成为瓶颈工序, 因此要对产线进行改善。

由于该款 XK 切框和钉框为并行作业, 所以产生一个 XK 的平均切框时间和钉框时间为 8.3 s 和 7.62 s。

对每个工位的作业人员的工序时间(从拿取物料到加工结束)进行测量, 通过每个工位的平均加工时间减去工序时间发现每个工序作业人员存在时间浪费, 具体数值如图 3 所示:

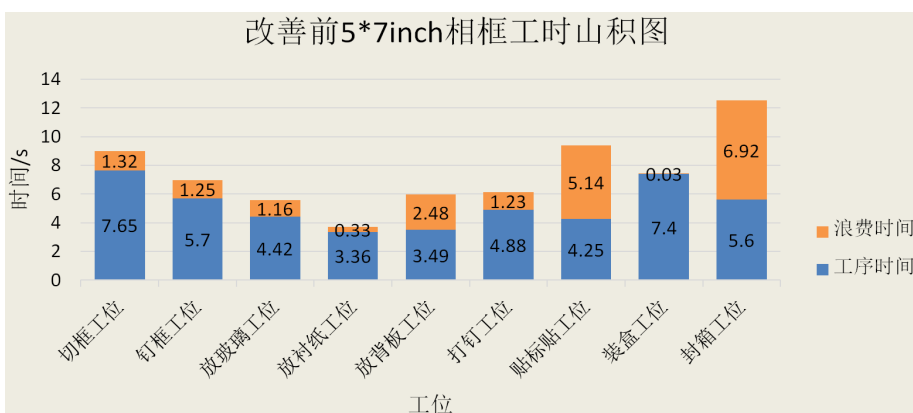


Figure 3. Improved front plot

图 3. 改善前山积图

经分析, 前五个工位是因物料摆放不合理带来了动作浪费; 打钉工序因打钉枪拿取不便, 存在加工浪费; 翻框、检查、贴标贴工序存在不良品的浪费; 封箱存在搬运的浪费。并进一步对线平衡率进行分析:

$$\text{线平衡率} = \frac{\text{各工序时间总和}}{\text{工序数} \times \text{瓶颈工序}} \times 100\% \quad (1)$$

计算线平衡率(公式(1))为 67.90%，线平衡率较低，产线不平衡，因此 117XK 生产线急需平衡改善。

5. Lingo 模型的建立与求解

本文在不改变产品工艺流程的情况下，通过 Lingo 软件求得最优节拍时间，并据此进行流程再造，求得一个平衡率更高的产线设计方案。

5.1. 数学模型的建立

Lingo 主要应用于求解数学模型，故平衡问题转换为数学模型。我们将给出以下定义： ct 为节拍时间， k 为工位数量， n 为第 n 个工位； t_i 为第 i 个工序的工序时间； i, j 为作业工序的序号； m 为工序个数； $pred$ 为工序的顺序，保证工序的顺序不变。

$$X_{in} = \begin{cases} 1 & \text{表示作业工序分配在工位} n \text{上} \\ 0 & \text{表示作业工序未分配在工位} n \text{上} \end{cases} \quad (2)$$

因此，在给定工位数量下节拍时间尽可能的小，建立以下模型：

$$\begin{aligned} \text{Min } z &= ct \\ &\begin{cases} \sum_{n=1}^k X_{in} = 1 \\ \sum_{i=1}^m X_{in} t_i \leq ct \\ \sum_{n=1}^k (nX_{jn} - nX_{jn}) \geq 0 \\ (n \in k(i, j) \in pred) \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

其中目标函数 $Min z = ct$ 是追求 ct 时间最小；约束条件 $\sum_{n=1}^k X_{in} = 1$ 表示所有的工位都有相应的工序与之匹配，保证工序的完整性； $\sum_{i=1}^m X_{in} t_i \leq ct$ 表示每个工位的加工时间总和不能大于 ct 时间；约束条件 $\sum_{n=1}^k (nX_{jn} - nX_{jn}) \geq 0$ 保证了工艺流程的正确性。

5.2. 程序的编写和模型求解

根据数学模型编写求解程序如图 4 所示：

```

model:
  sets:
    task/1..9/:t;
    !工序
    a b c d e f g h i
    1 2 3 4 5 6 7 8 9 ;
    pred(task,task)/
    1,2
    2,3
    3,4
    4,5
    5,6
    6,7
    7,8
    8,9/;
    !工位数;
    station/1..7/;
    txs(task,station):x;
  endsets

```

```

data:
t=7.65 5.70 4.42 3.36 3.49 4.88 4.25 7.4 5.6;
enddata

@for(task(i):[must_assign_constraint]
    @sum(station(k):x(i,k))=1
);

@for(pred(i,j):[sequence_constraint]
    @sum(station(k):
        k*x(j,k)-k*x(i,k))>=0
);|

@for(station(k):[cycle_time_constraint]
    @sum(txs(i,k):t(i)*x(i,k))<=ct
);

min=ct;
@for(txs:
    @bin(x)
);

end

```

Figure 4. Write a program

图 4. 编写程序

输出结果如图 5 所示:

```

Global optimal solution found.
Objective value:                8.370000
Objective bound:                8.370000
Infeasibilities:               0.000000
Extended solver steps:         0
Total solver iterations:       378

```

Variable	Value	Reduced Cost
CT	8.370000	0.000000
T(1)	7.650000	0.000000
T(2)	5.700000	0.000000
T(3)	4.420000	0.000000
T(4)	3.360000	0.000000
T(5)	3.490000	0.000000
T(6)	4.880000	0.000000
T(7)	4.250000	0.000000
T(8)	7.400000	0.000000
T(9)	5.600000	0.000000
X(1, 1)	1.000000	0.000000
X(2, 2)	1.000000	0.000000
X(3, 3)	1.000000	0.000000
X(4, 3)	1.000000	0.000000
X(5, 4)	1.000000	3.490000
X(6, 4)	1.000000	4.880000
X(7, 5)	1.000000	0.000000
X(8, 6)	1.000000	0.000000
X(9, 7)	1.000000	0.000000

Figure 5. The output

图 5. 输出结果

Lingo 求得的最优节拍时间为 8.37 s, 根据输出结果对工序进行合并, 由表 1 可以看出, 第 3 道工序和第 4 道工序合并为一人完成, 第 5 道和第 6 道工序合并为一人完成(表 2)。作业时间最长的工位为第 4 工位, 作业时间最短的工位为第 7 工位。

Table 2. Solution results of the model

表 2. 模型求解结果

各工位	所含工序	作业时间/s
工位 1	工序 1	7.65
工位 2	工序 2	5.70
工位 3	工序 3、4	7.78
工位 4	工序 5、6	8.37
工位 5	工序 7	4.25
工位 6	工序 8	7.40
工位 7	工序 9	5.60

改善后线平衡率 = 79.79%, 线平衡率较改善前提高 11.89%。

6. 产线改善

6.1. 工序重组

运用 Lingo 软件求解产线平衡, 求得最优节拍时间为 8.37 s。根据模型求解结果通过工序重组将放玻璃、放衬纸(工序 3)和放中密度背板(工序 4)合并为一人完成, 放背板(工序 5)和打钉(工序 6)合并为一人完成。改善后产线有 9 个工位, 较之前 11 个工位减少两个工位。改善后线平衡率为 79.79%, 较改善前提高 11.89%。

6.2. 作业空间布局改善

由于通过 Lingo 软件对原有工序进行重组, 原有的作业空间不适合新的加工方式, 故对作业空间布局进行改善。

- 1) 放置 U 型工装台(图 6), 摆放物料(玻璃、画芯、瓦楞板、背板), 便于双手作业, 减少人员浪费。

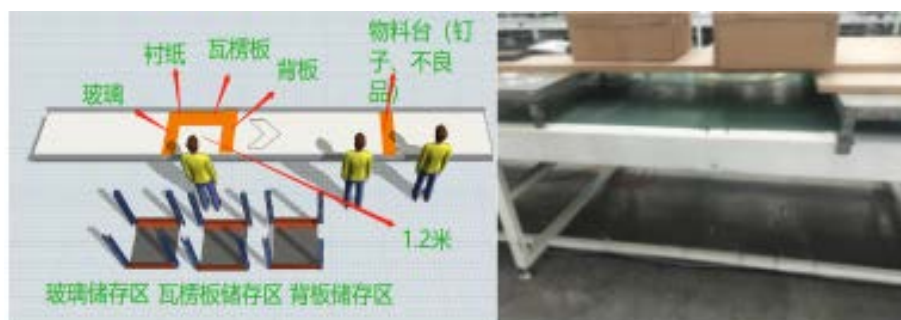


Figure 6. U-shaped table settings

图 6. U 型台的设置

- 2) 在产线前方放置物料台(图 7), 待加工的物料到达后可暂放于此, 换款时减少工人的搬运距离。

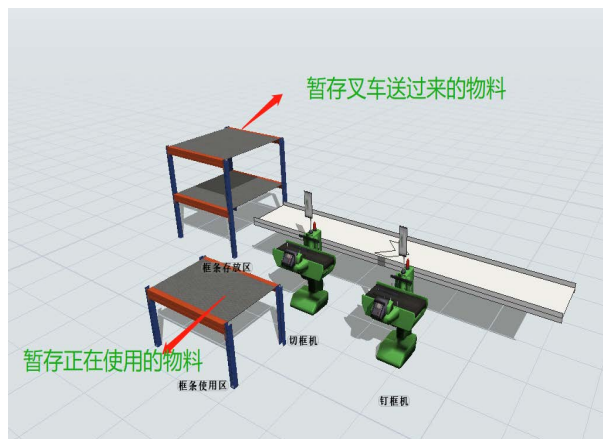


Figure 7. The position of the frame car
图 7. 框条车的位置

3) 缩短成品架与包装台的距离(图 8)，便于搬运。

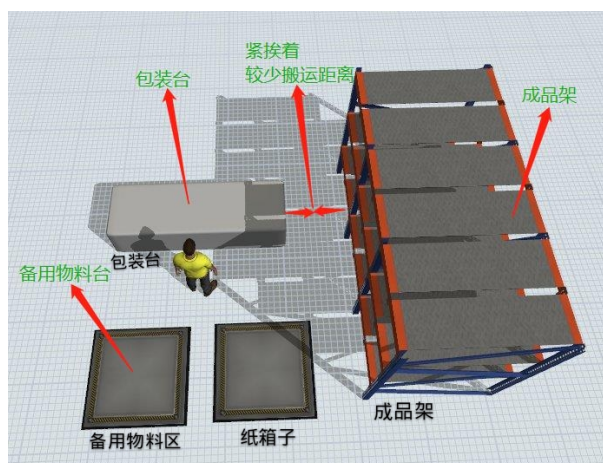


Figure 8. Package area improvement
图 8. 包装区的改善

6.3. 动素分析对比

Table 3. Motilin analysis and comparison before and after improvement
表 3. 改善前后动素分析比较

		第一类动素						第二类动素						第三类动素						
动素符号		9	0	∩	e	+	∞	∪	≡	∩	∩	→	8	ε	∩	ε	∩	∩	∩	多余动素比率
改善前	左手	0	0	7	7	0	3	7	0	7	0	0	0	0	0	0	0	6	18	0.44
	右手	0	0	10	9	3	4	7	4	8	0	0	0	1	0	0	0	4	5	0.16
动素符号		9 <th>0</th> <th>∩</th> <th>e</th> <th>+</th> <th>∞</th> <th>∪</th> <th>≡</th> <th>∩</th> <th>∩</th> <th>→</th> <th>8</th> <th>ε</th> <th>∩</th> <th>ε</th> <th>∩</th> <th>∩</th> <th>∩</th> <th></th>	0	∩	e	+	∞	∪	≡	∩	∩	→	8	ε	∩	ε	∩	∩	∩	
改善后	左手	0	0	8	6	0	2	6	0	6	0	0	0	0	0	0	0	5	15	0.42
	右手	0	0	10	8	3	3	9	3	9	0	0	0	1	0	0	0	0	2	0.04

经过改善前后的动素对比(表 3) (图 9), 第三类动素左手等待从 6 个减少为 5 个, 右手等待从 4 个减少为 0 个, 左手持住由 18 次减少为 15 次, 右手持住从 5 次减少为 2 次。左手无用动素比率减少了 2%, 右手无用动素比率减少了 12%, 减少了多余的动作, 从而降低了由于操作不当带来的动作浪费。

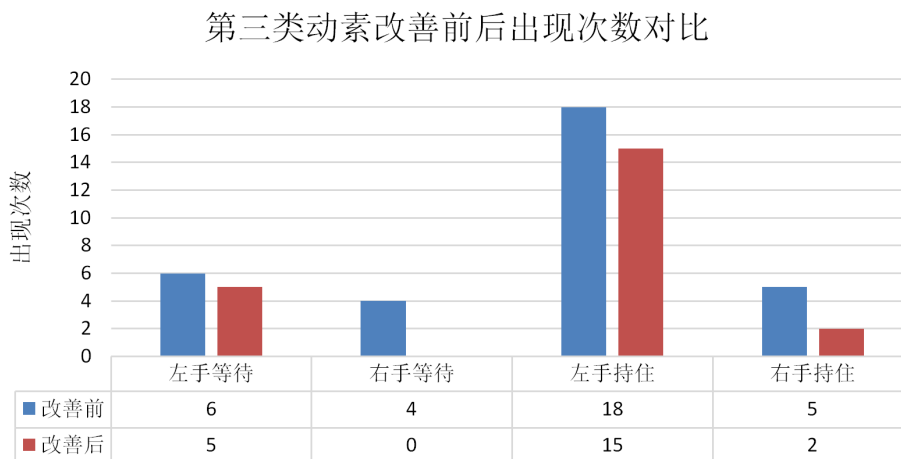


Figure 9. The third type of actin was compared before and after improvement

图 9. 第三类动素改善前后对比

实施数据显示, 经改善前后对比, 线平衡率提高了 11.89%。

7. 总结

本文主要针对 Y 公司 117 号线存在的工序时间不平衡、人员等待浪费、线边物料堆放杂乱等问题, 通过数据采集、Lingo 软件最优化求解以及工业工程手法来进行分析, 紧密结合现场实际的情况, 运用科学方法, 提出解决方案; 通过问题的分析与解决过程得出, 现场产线平衡的改善首先要以客户节拍 TT 时间为改善基准, 其次通过工艺流程分析进行流程再造, 进行工艺再分配从而达到均衡工时节拍的目的; 流程再造后, 需跟进作业空间的优化使其符合改善后的工艺布局要求; 这样就可以达到调整产线平衡的目的, 进而减少等待浪费与在制品的积压。这里需要指出的是, 不可追求绝对的产线平衡, 产线平衡的关键是尽量保证均衡生产, 当现场管理技术或管理能力不够强大时, 过度追求产线平衡会给生产和管理带来非常大的负作用, 反而降低管理效率。因此, 产线平衡的控制需要根据管理水平逐步提升。

参考文献

- [1] Yasir, A.S.H.M. and Mohamed, N.M.Z.N. (2018) Assembly Line Efficiency Improvement by Using WITNESS Simulation Software. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **319**, 012004. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/319/1/012004>
- [2] 冯磊, 汪星星. 某空调企业生产线产线平衡改善与优化[J]. 科技经济市场, 2017(3): 116-118.
- [3] Fathi, M., Fontes, D.B.M.M., Moris, M.U. and Ghobakhloo, M. (2018) Assembly Line Balancing Problem: A Comparative Evaluation of Heuristics and a Computational Assessment of Objectives. *Journal of Modelling in Management*, **13**, 455-474. <https://doi.org/10.1108/JM2-03-2017-0027>
- [4] Bongomin, O., Mwasiagi, J.I., Nganyi, E.O. and Nibikora, I. (2020) Improvement of Garment Assembly Line Efficiency Using Line Balancing Technique. *Engineering Reports*, **2**, 1-18. <https://doi.org/10.1002/eng2.12157>
- [5] Buchari, Tarigan, U. and Ambarita, M.B. (2018) Production Layout Improvement by Using Line Balancing and Systematic Layout Planning (SLP) at PT. XYZ. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **309**, 012116. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/309/1/012116>
- [6] Hasta, A. and Harwati (2019) Line Balancing with Reduced Number of Operator: A Productivity Improvement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **528**, 1-8. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/528/1/012060>

- [7] Fansuri, A.F.H., Rose, A.N.M., Ab Rashid, M.F.F., *et al.* (2018) Productivity Improvement through Line Balancing at Electronic Company—Case Study. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **409**, 012015. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/409/1/012015>
- [8] 贾舒媛, 田亚凤, 彭玲玲, 杜倩, 顾永虎. Lingo 法在装配线平衡设计中的应用[J]. 制造业自动化, 2018, 40(10): 125-127.
- [9] 陈子昀, 刘琛, 陈小峰. 基于工业工程的生产线平衡的研究与改善[J]. 当代化工研究, 2019(12): 125-126. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1435.TQ.20191030.0903.118.html>, 2019-11-22.
- [10] 贾舒媛, 曹琬琳, 董学文, 唐周, 李杰思. KKCQ-2A 空调遥控器装配线平衡分析与改善[J]. 制造业自动化, 2019, 41(6): 96-98.
- [11] 童晖. 包装线平衡改善研究——以苏州市大金电器机械有限公司为例[J]. 安徽职业技术学院学报, 2017, 16(3): 25-28.
- [12] 甘卫华, 王茹红, 车鹏飞, 游锦宁. N 企业新生产线产线平衡率分析[J]. 南昌航空大学学报(社会科学版), 2015, 17(4): 62-71.
- [13] 孟英晨, 李乃梁, 栾本刚, 李博杨. 基础 IE 及仿真技术在手机装配线优化中的应用[J]. 机械设计与制造, 2017(6): 252-255.
- [14] 李天阳, 罗建强, 顾刘栋. 中吨位起重机底盘产线生产布局分析与改善方案——基于 3P 精益布局的流程改进[J]. 经济研究导刊, 2019(3): 43-47, 52.
- [15] 朱华炳, 王龙, 涂学明, 余锋. 基于 ECRS 原则与工序重组的电机装配线产线平衡改善[J]. 机械设计与制造, 2013(1): 224-226, 229.
- [16] Sarmah, R.R. and Gogoi, D. (2019) A Review on Assembly Line Balancing. *International Journal of Advanced Research*, **7**, 465-470. <https://doi.org/10.21474/IJAR01/9685>
- [17] 易树平, 郭伏. 基础工业工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013: 30-188.
- [18] Zhang, Z.K., Tang, Q.H., Ruiz, R. and Zhang, L.P. (2020) Ergonomic Risk and Cycle Time Minimization for the U-Shaped Worker Assignment Assembly Line Balancing Problem: A Multi-Objective Approach. *Computers and Operations Research*, **118**, 104905. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2020.104905>
- [19] Anghel, D.-C., Nițu, E.-L., Rizea, A.-D., *et al.* (2019) Ergonomics Study on an Assembly Line Used in the Automotive Industry. *MATEC Web of Conferences*, **290**, 12001. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929012001>
- [20] Salehi, H., Pennathur, P.R., Da Silva, J.P. and Herwaldt, L.A. (2019) Examining Health Care Personal Protective Equipment Use through a Human Factors Engineering and Product Design Lens. *American Journal of Infection Control*, **47**, 595-598. <https://doi.org/10.1016/j.ajic.2018.10.008>