

文章编号: 2095-2163(2020)08-0202-05

中图分类号: TP273

文献标志码: A

基于 Lingo 的发动机装配线建模优化研究

姜晨光, 严广乐

(上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

摘要: 本文以 W 公司发动机装配线为例, 运用 IE 方法进行作业测定, 分析找出装配线存在的问题。基于 0-1 规划, 建立第 I 类和第 II 类装配线平衡问题数学模型。根据作业测定结果和装配作业优先顺序, 借助 Lingo.11 求出最小节拍, 进而得到最优的组合方案。重新对工序进行分配, 消除瓶颈, 使节拍最小化, 使装配线的各工位标准时间更加均衡。不仅减少了作业人员, 还使得装配线平衡率由原来的 63.20% 提高到 90.49%, 改善效果显著, 大幅度提高了装配线平衡率。

关键词: 装配线平衡; 0-1 规划; 装配线建模; LINGO

Research on modeling and optimization of engine assembly line based on Lingo

JIANG Chenguang, YAN Guangle

(Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

[Abstract] This paper studies the type I and type II balance problem of the W company's engine assembly line, establishes a mathematical model of assembly line balance through 0-1 planning, and obtains the minimum beat by using Lingo.11 according to the operation measurement results and assembly operation priority order, and then obtains the optimal combination plan. The process is reallocated to eliminate bottlenecks, minimize the beat and make the standard time of each station of the assembly line more balanced. In the end the number of operator is reduced and the balance rate of the assembly line increases from 63.20% to 90.49%. The improvement effect is remarkable.

[Key words] assembly line balance; 0-1 Programming; assembly line modeling; LINGO

0 引言

W 公司是一家以发动机装配为主的企业。汽车工业的装配线多采用大批流水的生产方式, 装配线存在不同程度的负荷不均和瓶颈影响装配效率的情况。常规的装配线平衡可以借助 IE 方法和仿真方法解决^[1], 对于装配工艺复杂, 工序较多的装配线平衡问题是一种典型的 NP 组合优化问题, 对于此类问题常用的是智能算法和数学分析法^[2]解决。常用的智能算法有: 多种群遗传算法求解混流装配线平衡的优化模型^[3]、人工蜂群算法求解装配线平衡问题^[4]、遗传算法考虑多目标优化^[5]和多目标蚁群算法对于空间约束装配线优化^[6], 部分研究者在平衡时考虑到作业疲劳度^[7]和其它的约束关系在内。智能算法建模过程复杂, 对编程能力要求较高, 相对来说 0-1 规划法将优化目标和约束关系进行量化, 借助计算机工具, 能较快而准确得到优化方案。

本文选取 WP 系列柴油发动机装配线作为改善的样板线。由于 WP 装配线产能不足市场需求, 现

场作业人员有大量的等待时间, 通过分析建立第 II 类平衡问题数学模型, 求出最小节拍和最优组合方案, 解决装配系统不平衡问题, 之后可以把 WP 装配线改善方法标准化后推广到其它的装配线, 全面解决装配系统不良问题。

1 装配线现状

该装配线为 U 型装配线, 有 13 个作业工位及 15 名作业人员, 其中工位 Z3 和 Z12 均为 2 人合作装配。当前装配线日产量为 62 台, 节拍为 895.9 s。

1.1 现存问题

通过对流程分析、工艺程序分析以及对装配线的现场了解, 可将装配线中存在的问题归纳如下:

(1) 装配线负荷不平衡状态。从装配现场来看, Z3 和 Z12 工位耗时长、包含作业元素多, 标准作业时间远高于其它工位, 导致装配线不平衡, 产能较低。

(2) 工位存在瓶颈问题。部分工位作业强度高, 如工位 Z2、Z9、Z10 的作业负荷远大于装配线的

基金项目: 上海高原学科建设项目(10-17-303-004)。

作者简介: 姜晨光(1995-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 生产系统优化、精益生产; 严广乐(1957-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 复杂系统、社会经济金融复杂系统、企业优化管理理论与应用等。

通讯作者: 姜晨光 Email: jcg_forwork@163.com

收稿日期: 2020-06-26

平均水平, 作业人员长期处于疲劳状态。

(3) 作业人员存在不合理动作。根据现场观察, 由于工具的吊装和摆放不合理, 超出作业人员动作范围外, 作业人员走动过多, 影响工作效率。

(4) 设备和人员配置不当。作业人员在和自动化设备协同工作时, 人和设备相互都有不同的等待时间存在, 这部分等待时间是非增值时间, 也是造成效率低下的部分原因。

(5) 标准作业时间存在问题。管理人员在对各工序进行工时测量时测量次数较少, 在求平均值时没有考虑剔除异常。

1.2 平衡评价指标

装配线平衡是各工作站在固定周期内效率达到最高的状态, 将装配线上的所有基本工作单元分派到各个工作站, 使每个工作站在工作站周期内都处于繁忙状态, 以完成最多的操作量, 从而使各工作站的闲置时间最少^[8]。装配线的评价指标主要有产线平衡率(LB)、平滑指数(SI)、节拍、装配瓶颈、空闲时间等。

$$(1) LB = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{P \cdot N} \times 100\% \text{ 产线平衡率(LB) 计算公式:}$$

$$LB = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{P \cdot N} \times 100\% \quad (1)$$

其中, LB 表示生产线平衡率; P 表示瓶颈工位作业时间; T_i 各工位作业时间; N 工位数; 生产线平衡损失率用 d 表示, 其公式如下。

$$d = 1 - LB. \quad (2)$$

(2) 平滑性指数 (SI) 的计算公式为

$$SI = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C - T_i)^2}{N}}. \quad (3)$$

其中, SI 表示作业时间的平滑性指数; N 表示总工位数; C 表示生产节拍。

表 1 装配线平衡率评价表

Tab. 1 Assembly line balance rate evaluation table

生产线平衡率 (LB)	评价标准	效果
LB ≥ 90%	自动化程度高	优
80% ≤ LB ≤ 90%	精益生产管理	良
70% ≤ LB ≤ 80%	一般生产管理	一般
LB ≤ 70%	管理方案未落实	较差

(3) 优化目标。基于 IE 方法对装配线进行作

业测定^[9], 然后在作业装配优先图条件下, 通过 0-1 规划对发动机装配线建模求解, 可以得到作业单元的最优组合方式, 为装配线平衡提供数据依据, 分解瓶颈工序, 提高效率, 满足产能要求。装配线目前的平衡率为 63.20%, 节拍为 867.9 s。平衡的目标是将装配线平衡率提高到 85% 以上, 节拍时间降为 580.0 s (满足日产 93 台的市场需求), 看板拉动, 基本实现一个流生产。

(4) 优化原则。考虑 W 公司的实际情况, 在解决装配线平衡和布局等方面的问题时, 制定装配线平衡优化方案要遵循以下基本原则:

① 为了客观体现装配线优化前后的对比情况, 不改变当前的作业时间机制及排班情况。

② 在进行优化时主要是工序重组和装配流程的优化, 不改变产品的工艺和原设计。

③ 优化方案的方向是低投入高产出, 不购置大机器设备, 不投入大额资金, 尽量在现有生产成本上进行优化改善。

④ 优化结果需要量化, 能直观反映优化前后的效果对比。

⑤ 优化方案的制定要具有操作性, 易于进行大规模的培训指导, 使生产管理人员和操作工人更加容易接受。

2 建立数学模型

2.1 模型建立的假设

在对装配线平衡问题建立数学模型时, 需满足以下条件:

(1) 作业单元之间仅存在装配优先关系约束, 无其它的先后约束关系或其它约束关系忽略不计, 并且现有的作业单元的排布情况符合装配优先关系。具体的装配优先关系如图 1 所示。

(2) 在进行作业测定环节, 保证装配线各作业单元的作业时间被准确测量, 且后期处理作业时间没有错误。

(3) 装配线的瓶颈工位作业时间不超过实际生产节拍 CT。

(4) 装配线柔性强、产品工艺流程确定, 装配同一种或同一系列的产品。

模型相关参数见表 2。表 2 中, $x_{ik} = 0$ 表示作业单元 i 未被划分到第 k 个工位, $x_{ik} = 1$ 表示作业单元 i 被划分到第 k 个工位, $A_k = 0$ 示第 k 个工位没有作业单元被划分, $A_k = 1$ 表示第 K 个工位有作业单元被划分。

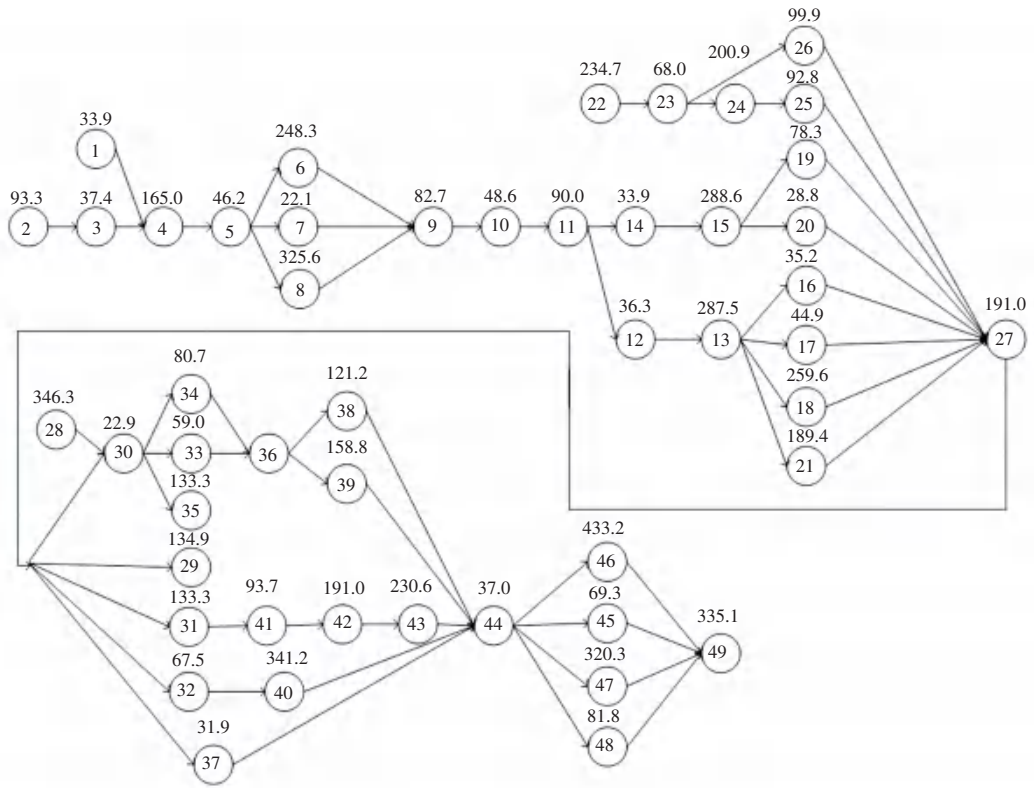


图1 装配作业优图

Fig. 1 Assignment priority sequence diagram

表2 模型相关参数表

Tab. 2 Model related parameter table

参数符号	参数含义
C	装配线节拍
K	工位数
k	工位序号, $k = 1, 2, \dots, K$
i	第 i 个作业单元 ($i \in I$)
j	第 j 个作业单元 ($j \in J$)
m	作业单元的个数
x_{ik}	作业单元 i 分派给工位 k 时为 1, 否则为 0
x_{jk}	作业单元 j 分派给工位 k 时为 1, 否则为 0
A_k	第 k 个工位被占用时为 1, 未被占用则为 0
$Pred$	作业单元的顺序集合
t_i	第 i 各作业单元的作业时间

2.2 第 I 类装配线平衡问题 0-1 规划模型

第 I 类平衡问题是指, 已知装配线节拍, 求最小工位数。一般发生在装配线的设计规划之初, 已知的是市场需求预测和设备能力估算, 最小化工位数就是最小化设备和人员, 通过最小化设备和人员从而缩短生产流程, 减少生产成本。

$$\min = \sum_{k=1}^K A_k, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{s.t. } & \sum_{k=1}^K X_{ik} = 1 \quad \forall_i = I, \\ & \sum_{i=1}^m X_{ik} \cdot t_i \leq C \quad \forall_k \in K, \\ & \sum_{k=1}^K (kX_{jk} - kX_{ik}) \geq 0 \quad \forall_{(ij)} \in Pred, \\ & \sum_{k=1}^K X_{ik} \leq n A_k. \end{aligned}$$

2.3 第 II 类装配线平衡问题 0-1 规划模型

第 II 类装配线平衡问题是指, 已知最小工位数, 求最小装配线节拍。通常出现在装配线正式投产后, 人员和设备基本稳定。随着时间推移, 工作人员的技能不断成熟, 劳动定额有所变化, 在人员和设备确定的情况下, 求最小节拍就是追求单位时间产出最大化。

$$\min = C, \quad (5)$$

$$\text{s.t. } \sum_{k=1}^K X_{ik} = 1 \quad \forall_i = I,$$

$$\sum_{i=1}^m X_{ik} \cdot t_i \leq C \quad \forall_k \in K,$$

$$\sum_{k=1}^K (kX_{jk} - kX_{ik}) \geq 0 \quad \forall_{(ij)} \in Pred.$$

根据第一类装配线求解结果可知, 当装配线的

节拍 $CT = 580$ s 时, LINGO 求得的最小工位数 $N = 14$, 此时各工位的作业时间均小于 580 s, 工作负荷均衡, 可减少 1 名作业人员, 但需要增加 1 个工位, 此时的节拍能够满足目标要求。

3 第 II 类装配线平衡问题模型 LINGO11.0 求解

3.1 LINGO 程序语言

根据上述建立的第 II 类装配线平衡问题的 0-1 规划模型, 按编程规则将数学模型转化为 LINGO 可识别计算的程序语言。部分代码如下:

MODEL:

! 发动机装配线平衡模型;

SETS:

! 任务集合, 有一个完成时间属性 T;

TASK/S1 S2 S3 S4 S5 S6 ...S49/: T;

! 任务之间的优先关系集合 (A 必须完成才能开始 B, 等等);

PRED(TASK, TASK)/ S1, S4 S2, S3 S3, S4 S4, S5 S5, S6 ...S48, S49/;

STATION/1..14/;

TXS(TASK, STATION): X;

ENDSETS

DATA:

! 任务 S1 S2 S3 S4 S5 S6 ...S49 的完成时间估计如下;

T = 33.9 93.3 37.4 165.0 46.2 248.3... 335.1;

END DATA

@ FOR(TASK(I): @ SUM(STATION(K): X (I, K) = 1);

! 对于每一个存在优先关系的作业对来说, 前者对应的工位 I 必须 小于后者对应的工位 J, 即满足约束②;

@ 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);

! 目标函数是最小化装配线平衡率;

MIN = CYCTIME;

@ FOR(TXS: @ BIN(X));

END

3.2 运行状态

LINGO 程序语言编写完毕后, 接下来就是运行程序。运行状态图和运行结果如图 2、图 3 所示。

3.3 模型求解结果

根据运行结果可知, 当装配线的工位数 $N = 13$

时, LINGO 求得的最小节拍 $CT = 599.7$ s, 大于需求节拍, 不能满足市场的需求。当 $N = 14$ 时, 求得最小节拍 $CT = 555.2$ s, 满足需求。各作业单元经组合优化后各工位的作业时间, 见表 3, 各工位的作业时间山积图如图 4。



图 2 第 II 类装配线平衡问题运行状态

Fig. 2 The running state of the balance problem of assembly line II

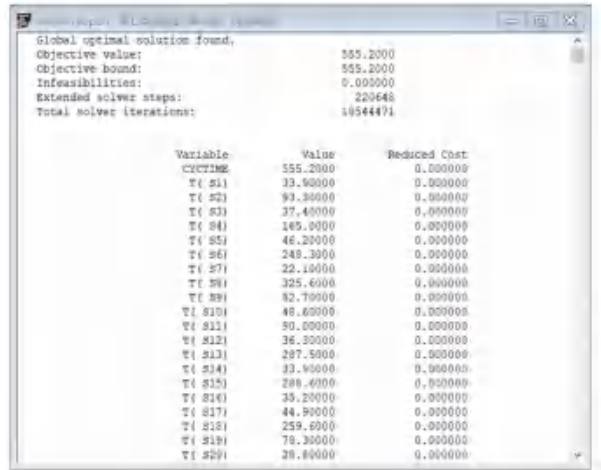


图 3 第 II 类装配线平衡问题运行结果

Fig. 3 Operation result of the balance problem of assembly line II

4 效果评价

由第 I 类装配线平衡问题 0-1 规划模型 LINGO 求解结果可知, 满足需求节拍 $CT = 580.0$ s 时, 最小工位数为 $N = 14$, 优化后的装配线只需 14 个作业人员, 作业人员数相比优化前的 15 人减少 1 人。从第 II 类装配线平衡问题 0-1 规划模型 LINGO 求解结果来看, 工位数 $N = 14$ 时, 此时节拍 $CT = 555.2$ s, 相比未优化前节拍 895.9 s 减少 304.4 s, 优化后节拍时间显著减少, 满足了当下生产要求。

(下转第 211 页)