

混合型装配线平衡问题的不确定性仿真研究

于兆勤

广东工业大学, 广州, 510006

摘要:针对实际生产系统存在的不确定性因素,采用仿真实验方法研究混合型装配线平衡问题。对混合型装配线平衡问题进行数学建模,并对存在的不确定性因素进行分析;用 eM—Plant 仿真软件对混合型装配线进行仿真建模,通过仿真实验,研究不确定性因素对混合型装配线平衡问题的影响;通过仿真研究举例说明研究方法的有效性。

关键词:装配线平衡;系统仿真;多品种混合型;建模

中图分类号: TG95; F406.2

文章编号: 1004—132X(2008)11—1297—06

Simulation of Uncertainty for Mixed—model Assembly Line Balancing Problem

Yu Zhaoqin

Guangdong University of Technology, Guangzhou, 510006

Abstract: Considering real—word manufacturing systems contain one or more sources of uncertainty, the mixed—model assembly line balancing problem was studied by using simulation. First, mathematical model for the mixed—model assembly line was presented and the sources of uncertainty were analyzed. Second, simulation models for the mixed—model assembly line were built using eM—Plant simulation software. The influence of uncertainty sources on mixed—model assembly line balancing problem was studied by performing simulation experiments. Finally the approach for solving the mixed—model assembly line balancing problem was proposed based on the analysis.

Key words: assembly line balance; system simulation; mixed—model; modeling

0 引言

混合型装配线可在同一条生产线上混合连续地生产结构相似、工艺接近的不同品种的产品,其生产特点是产品的品种均匀混合流送,相间性地投产,因而减少了流水线上生产能力的浪费和在制品的占用量^[1]。为合理、有效地使用混合型装配线,必须解决混合型装配线平衡问题和排序问题^[2]。混合型装配线平衡问题是将产品装配过程的所有作业元素适当地安排到各个工作站中,使各工作站的作业时间接近;混合型装配线排序问题就是确定不同品种产品投入生产线的顺序。

本文的研究主要集中在混合型装配线平衡问题。国内外许多学者对混合型装配线平衡问题进行了大量研究^[3-9],目前的研究主要集中在两个方面:①对于给定生产节拍,最小化工作站数;②对于给定的工作站数,最小化生产节拍^[8]。所采用的研究方法主要是通过数学建模,并用各种启发式算法寻找最优解。由于实际生产中存在许多不确定性因素,如订单的随机性、装配工序时间的不确定性等,目前在混合型装配线平衡问题的求解方法的研究中很少考虑不确定性因素对装配线平衡的影响,因此研究成果与实际应用还有一定的

距离。本文采用仿真实验方法研究产品需求比例和各工作站作业时间的不确定性对混合型装配线平衡问题的影响,以补充混合型装配线平衡问题的数学建模与分析之不足。

1 问题的描述

假设有 M 种同系列产品同时在一条生产线上装配,整个装配过程包含 N 个作业元素,每个作业元素称为一个任务(task),按照装配工艺要求,这些任务需要满足先后顺序约束。不同品种的产品的装配所包含的任务不尽相同,有些任务是由该系列产品主要结构特征决定的,该系列所有品种的产品均包含这些任务,属于公共任务;而有些任务则是由用户的个性化需求决定的,不是所有品种产品都包含这些任务。产品装配中的作业任务及其先后顺序关系通常用作业顺序图描述,图 1 所示是两个品种产品的作业顺序图的例子,图中每个节点表示一个任务,节点间的连线表示作业任务的先后顺序关系。任务 1、2、7 是公共任务,而任务 3、4、5、6 是与产品品种相关的任务。图 2 是产品 A 和 B 的综合作业顺序图,图中包含了所有品种产品的全部作业任务。

为实现装配过程中工序的同期化,把各作业任务合并成工序(即将一道工序所包含的作业任

收稿日期:2007—08—29

基金项目:广东省科技计划资助项目(2006B12601002)

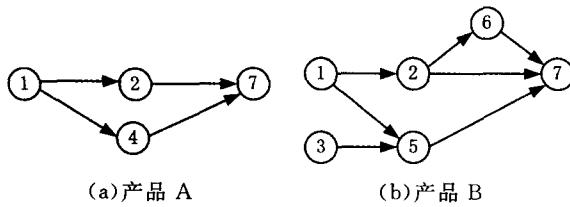


图1 作业顺序图

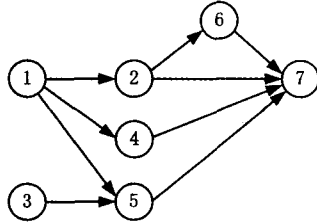


图2 产品A和B的综合作业顺序图

务分配到一个工作站中,一个工作站完成一道工序),以计划期为单位平衡各道工序所应完成的作业量。由于混合型装配线节拍是各种产品的平均节拍,不同品种产品所包含的作业任务可能不同,即使是公共任务,其作业时间也可能因产品品种的差异而有所不同,所以混合型装配线工序同期化工作较之单品种装配线要复杂得多。目前比较常用的方法是将综合作业顺序图中各作业任务的标准作业时间换算成各作业任务为完成计划期内各产品产量所需的作业量,并用作业任务在计划期内的作业量来平衡装配线内各工序负荷,从而实现工序同期化。

2 数学模型

设一个计划期 T 内,有 M 种产品同时在一条装配线上装配,各种产品总需求量为 D ,第 m 种产品需求量为 D_m , $D = \sum_{m=1}^M D_m$,第 m 种产品需求所占总需求量比例为 $q_m = D_m/D$, $\sum_{m=1}^M q_m = 1$,计划期内平均生产节拍为 $C = T/D$ 。产品装配中总作业任务数量为 N ,第 m 种产品的第 i 个任务的作业时间为 t_{mi} ($m = 1, 2, \dots, M; i = 1, 2, \dots, N$)。混合型装配线平衡问题可用下面的数学模型描述^[10]:

$$\min J = \sqrt{\frac{1}{S} \sum_{k=1}^S \left(\sum_{m=1}^M q_m T_{mk} - \frac{1}{S} \sum_{j=1}^S \sum_{m=1}^M q_m T_{mj} \right)^2} \quad (1)$$

$$\text{s. t. } \sum_{j=1}^S x_{ij} = 1 \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^S j x_{ij} \leq \sum_{l=1}^S l x_{kl} \quad i = 1, 2, \dots, N; k = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

$$T_{mj} = \sum_{i=1}^N t_{mi} x_{ij} \quad m = 1, 2, \dots, M; j = 1, 2, \dots, S \quad (4)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, S \quad (5)$$

$$C - \sum_{m=1}^M q_m T_{mj} \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, S \quad (6)$$

式中, S 为装配线上工作站数目。

目标函数式(1)用于平衡各工作站负荷,使各工作站负荷尽量接近平均值;约束条件式(2)保证每一项作业任务只能安排在一个工作站内;约束条件式(3)为作业任务的先后顺序约束,其中任务 i 是任务 k 的紧前作业;约束条件式(4)为第 m 种产品在工作站 j 中的总作业时间;约束条件式(5)表示作业任务在各工作站中的安排情况, $x_{ij} = 1$ 表示第 i 个任务被安排到第 j 个工作站中, $x_{ij} = 0$ 表示第 i 个作业没有被安排到第 j 个工作站中;约束条件式(6)表示各种产品在第 j 个工作站中的作业时间平均值不超过平均生产节拍 C 。

3 不确定性因素对装配线平衡的影响

混合装配线平衡问题是在装配线设计阶段考虑的问题,数学模型式(1)~式(6)是基于计划期内对各种产品需求量和需求比例一定、每个作业任务的作业时间一定等这样一种确定性的条件而建立的。在装配线投入生产运行以后可能会由于外部(如产品不同品种的需求比例变化)或内部(如作业任务的作业时间的变化)的原因导致装配线达不到设计的平衡水平,有时甚至相差甚远,从而使生产效率降低。由于导致装配线失去平衡的原因是在装配线设计过程中难以预测的,因此称其为不确定性问题,但投产以后,根据市场销售情况和装配线运行分析可以对一些不确定性问题在一定程度上做出预测。为使装配线能够对不确定性因素的作用做出反应,尽快达到新的平衡,应研究不确定因素对装配线平衡的影响,以期寻找装配线重新平衡的途径。本文分析不同品种产品需求比例的不确定性和作业时间的不确定性对装配线平衡的影响。

3.1 产品需求比例的不确定性对平衡的影响

对式(1)~式(6)求解后,得到各作业任务在各工作站中的分配方案。当第 m 种产品需求比例为 q_m 时,计划期内工作站 j 中总作业量为

$$T_j = D \sum_{m=1}^M q_m T_{mj} = D \sum_{m=1}^M q_m \sum_{i=1}^N t_{mi} x_{ij} \quad j = 1, 2, \dots, S \quad (7)$$

若计划期内总需求量不变而需求比例发生变化,即由 q_m 变化到 q'_m ,则计划期内工作站 j 中总作业量为

$$T_j = D \sum_{m=1}^M q'_m T_{mj} = D \sum_{m=1}^M q'_m \sum_{i=1}^N t_{mi} x_{ij} \quad (8)$$

计划期内工作站 j 中总作业量的变化量为

$$\Delta T_j = T'_j - T_j = D \sum_{m=1}^M q'_m T_{mj} - D \sum_{m=1}^M q_m T_{mj} = D \sum_{m=1}^M \Delta q_m \sum_{i=1}^N t_{mi} x_{ij} \quad (9)$$

其中, Δq_m 为第 m 种产品需求比例的变化量,

$\Delta q_m = q'_m - q_m$ 。当 $\Delta q_m > 0$ 时, $\Delta q_m \sum_{i=1}^N t_{mi} x_{ij} > 0$,

即第 m 种产品在第 j 个工作站中的作业时间随着对第 m 种产品需求比例的增大而延长, 因为

$\sum_{m=1}^M q_m = 1$, 所以当有一种产品的需求比例增大

时, 必有另一种产品的需求比例减小, 它在第 j 个工作站中的作业时间也会随着需求比例的减小而

缩短。因此 ΔT_j 是正值还是负值由需求比例的变化量以及各种产品分配到第 j 个工作站中的作业

任务和作业时间决定。由上述分析可知, 用数学方法研究不同品种产品需求比例的不确定性对线平衡的影响的问题有相当的难度。

3.2 作业时间的不确定性对平衡的影响

设工作站 j 中任务 k 的作业时间变化为 t_{mk}^* , 则计划期内工作站 j 中总作业量为

$$T_j^* = D \sum_{m=1}^M q_m \sum_{i=1}^{k-1} t_{mi} x_{ij} + D \sum_{m=1}^M q_m t_{mk}^* x_{kj} + D \sum_{m=1}^M q_m \sum_{i=k+1}^N t_{mi} x_{ij} \quad (10)$$

由式(10)和式(7)可计算出计划期内工作站 j 中总作业量的变化量为

$$\Delta T_j^* = T_j^* - T_j = D \sum_{m=1}^M q_m t_{mk}^* x_{kj} - D \sum_{m=1}^M q_m t_{mk} x_{kj} = D \sum_{m=1}^M q_m \Delta t_{mk} x_{kj} \quad (11)$$

当 $x_{kj} = 0$ 时, 说明任务 k 没有被分配到工作站 j 中, $\Delta T_j^* = 0$, 即任务 k 的作业时间的变化对工作站 j 中总作业量没有影响; 当 $x_{kj} = 1$ 时, 说明任务 k 被分配到工作站 j 中, 工作站 j 中总作业量的

变化量为 $\Delta T_j^* = D \sum_{m=1}^M q_m \Delta t_{mk}$ 。当任务 k 的作业时间为随机变量时, 很难用解析法进行分析。

4 混合型装配线平衡问题的仿真研究

4.1 仿真模型的建立

由上述不确定性因素对装配线平衡的影响分析可知, 不确定性因素对装配线平衡的影响问题很难通过数学建模和求解的方法解决, 本文用离散事件仿真方法对不确定性因素对装配线平衡的影响进行分析, 试图通过仿真研究寻求一种问题

的解决途径。

eM-Plant 是一个面向对象的图形化的建模和仿真集成软件, 可以应用于制造系统的规划、仿真和优化。本文采用 eM-Plant 仿真软件对混合型装配线进行仿真建模及分析。图 3 所示为用 eM-Plant 仿真软件对混合型装配线建模的例子, 图中, Entrance 为仿真模型的实体“入口”, 在此设定实体的到达模式和排队规则, 本文中实体是待装配的产品, 按照等时间间隔到达并按照先进先出(FIFO)的排队规则接受装配线的服务; 表格 SeqTab 给出了不同品种产品的投产排序, 用于控制 Entrance 实体的到达顺序; workstation i ($i=1, 2, 3, 4$) 分别表示装配线上 4 个工作站, 每个工作站内包含若干装配作业任务, 每个工作站的单件作业时间等于分配到该工作站中所有作业任务的作业时间之和, 因为装配线上所有作业任务的操作顺序需要满足作业的先后顺序约束, 所以在分配作业任务时除了考虑各工作站作业量均衡外, 还要考虑作业的先后顺序约束; ProcTime i ($i=1, 2, 3, 4$) 用来定义工作站的服务模式, 分别为 4 个工作站设置不同品种产品在工作站中的单件作业时间所满足的概率分布。

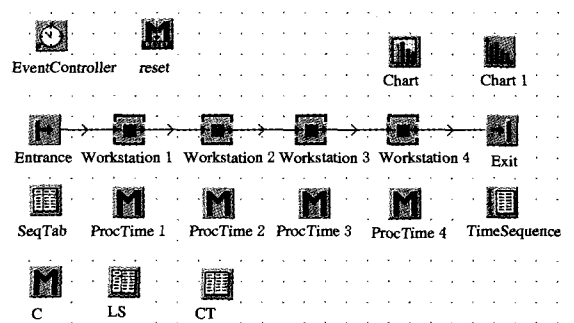


图3 混合型装配线仿真模型举例

为观察装配线上各工作站“工作”、“等待”和“阻塞”的情况, 以便于分析引起装配线不平衡的原因, 本文设计的装配线模型采用自由节拍方式, 即各工作站按非同步方式传送产品。工作站工作状态是指工作站正在进行作业任务的操作; 等待状态是指本工作站当前的作业任务已完成, 但紧前工作站当前的作业任务尚未完成而处于工作状态, 需要等待紧前工作站完成当前的作业任务后将产品传送到本工作站; 阻塞状态是指本工作站已经完成了当前作业任务, 可以将产品向其后续工作站传送, 但其后续工作站正处于工作状态, 无法接受本工作站传送的产品, 因此该产品只能留在原处等待, 在这种情况下, 虽然本工作站不进行任何操作, 但也不能接受其紧前工作站传送的产品, 所以处于阻塞状态。Chart 用于显示各工作

站的工作率、等待率和阻塞率,当装配线平衡时,各工作站工作率接近;Chart1 用于显示生产节拍随时间的变化情况。

4.2 不确定性问题的仿真研究

本文主要研究产品需求比例的不确定性和作业时间的不确定性对装配线平衡的影响。首先,根据预测的计划期内产品需求比例和产品装配中各作业任务的标准作业时间对式(1)~式(6)进行求解,确定装配线上的作业任务在各个工作站的分配方案,并由此确定每个品种产品在各个工作站内的单件作业时间,将上述相关数据输入图 3 所示的模型中作为仿真研究的基础模型;然后分别将产品需求比例的变化和作业时间的变化加到基本模型上,研究产品需求比例的不确定性和作业时间的不确定性对装配线平衡的影响,解决装配线的再平衡问题。

4.2.1 产品需求比例的不确定性问题的仿真研究

由于不同品种产品所包含的作业任务和作业时间不尽相同,所以当产品的需求比例发生变化时,各工作站的作业量会随之相应地改变。为研究不同品种产品需求比例的不确定性对混合型装配线平衡的影响,首先对基础模型进行仿真实验,观察各工作站的工作率、等待率和阻塞率,由于基础模型对应某一种产品需求比例经过了装配线平衡优化,所以各工作站的工作率较高,而且各工作站的工作率比较接近;其次,在基础模型的基础上,通过修改表格 SeqTab 改变产品需求比例,运行仿真模型,观察需求比例改变前后各工作站的工作率、等待率和阻塞率,通过观察各工作站的工作率、等待率和阻塞率的变化,分析需求比例改变对装配线平衡的影响,从而找出使装配线达到新的平衡的作业任务调整方案。用同样的方法,分析各种不同的产品需求比例对装配线平衡的影响,研究产品需求比例的不确定性对混合型装配线平衡的影响,并寻求达到新的平衡的解决方案。

4.2.2 作业时间不确定性问题的仿真研究

在装配线上,有些作业任务的作业时间与作业者的熟练程度以及其他一些因素有关,应属于满足某种概率分布的随机变量。为研究作业时间不确定性对混合型装配线平衡的影响,首先通过作业测定,确定作业时间的随机分布模型,然后通过多次仿真实验,逐一分析各工作站作业时间的随机变化对装配线平衡的影响程度,并从中找出作业时间变化对装配线平衡影响最大的工作站,即最敏感工作站,以便采取相应对策,减少因生产

线不平衡所造成的损失。

5 仿真研究举例

假设某产品族有三种产品,分别为产品 A、B、C,在同一条生产线上进行装配。一天(480min)的需求量是产品 A 需要 40 件,产品 B 需要 20 件,产品 C 需要 20 件。整个装配过程共包含 20 个作业任务,即 $N=20$,三种产品的综合作业图见图 4,每种产品各作业任务的作业时间如表 1 所示。

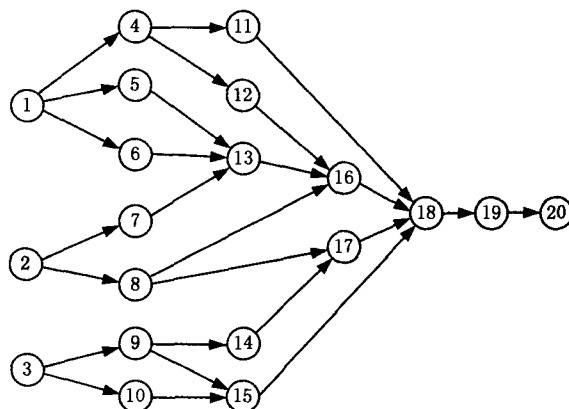


图 4 产品 A、B、C 的综合作业顺序图

表 1 作业任务的作业时间

任务 i	t_{Ai} (s)	t_{Bi} (s)	t_{Ci} (s)	任务 i	t_{Ai} (s)	t_{Bi} (s)	t_{Ci} (s)
1	18	18	18	11	13	0	0
2	12	12	0	12	18	0	0
3	0	24	24	13	12	12	12
4	17	0	0	14	0	25	25
5	12	12	12	15	0	0	18
6	20	20	0	16	12	12	12
7	0	23	0	17	0	18	18
8	18	18	0	18	11	11	11
9	0	12	12	19	5	5	5
10	0	0	18	20	14	14	14

5.1 需求不确定性的仿真研究

混合型装配线平衡问题数学模型式(1)~式(6)的解是作业任务在各工作站中的分配方案,表 2 列出了本例的一个解,称其为分配方案 1。根据产品计划期产量、不同产品需求比例以及表 2 所示的混合型装配线平衡问题的解,按照上面介绍的仿真建模方法对混合型装配线建立仿真模型并运行仿真模型,仿真结果如图 5 所示,各工作站工作率的平均值为 75.84%,装配线不平衡率为 5.9%。

表 2 分配方案 1 的分配结果

工作站 j	1	2	3	4	5	6
任务 i	1, 6	2, 3, 5	4, 7, 8, 9	10, 11, 12, 14	13, 16, 17	15, 18, 19, 20

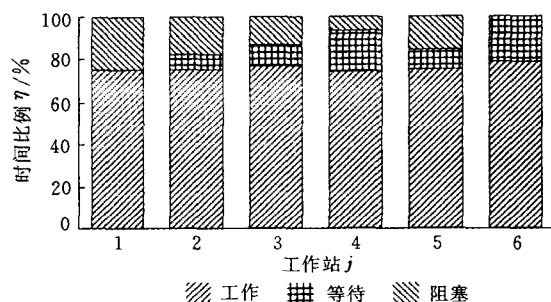
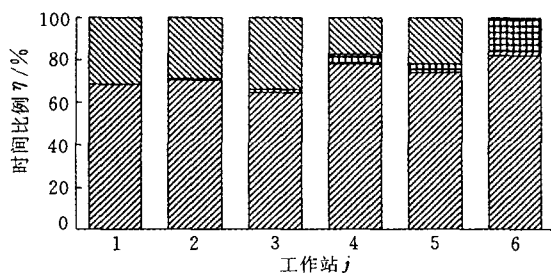
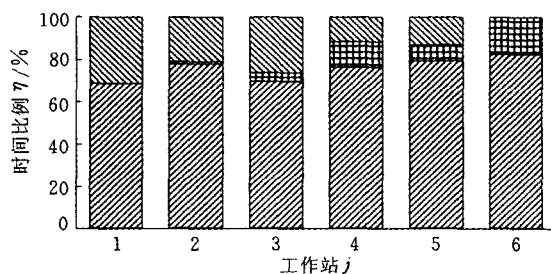


图5 需求比例为4:2:2情况下的仿真结果

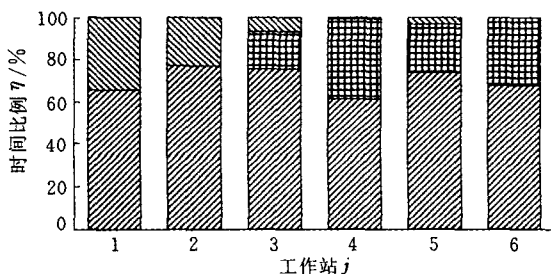
为研究需求比例变化对装配线平衡的影响,分别对产品A、B、C的需求比例4:1:3、3:2:3、2:4:2等情况进行仿真,仿真结果如图6所示,可以看出,产品需求比例发生变化后,各工作站的工作率、等待率和阻塞率都发生了变化,由于平均负荷和瞬时负荷的不平衡,使阻塞率增大,工作率减小。表3所示为4种需求比例仿真结果对照表,可以看出,需求比例的改变对装配线上各工作站的工作率和不平衡率都有不同程度的影响,其中对不平衡率的影响较大,使不平衡率大大增大。



(a)需求比例为4:1:3



(b)需求比例为3:2:3



(c)需求比例为2:4:2

工作 等待 阻塞

图6 3种需求比例下的仿真结果

表3 4种需求比例仿真结果对照表

需求比例	工作率平均值(%)	不平衡率(%)
4:2:2	75.84	5.90
4:1:3	73.05	24.88
3:2:3	75.55	18.37
2:4:2	70.28	22.64

仿真结果不仅显示出产品需求比例变化对装配线平衡的影响,同时也为重新平衡装配线指出了改善方向。以产品需求比例2:4:2为例,从图6c可以看出:瓶颈工作站是工作站2和工作站3;工作站1阻塞率很高,工作率很低;工作站4等待率很高,工作率很低。仿真结果说明,对于产品需求比例2:4:2,分配方案1不合理,工作站2和工作站3中分配的作业量较高,而工作站1和工作站4中分配的作业量较低。为平衡装配线,实现工序同期化,需要在分配方案1的基础上对部分作业任务的分配进行调整,调整结果如表4所示,调整后的仿真结果如图7所示,各工作站工作率的平均值为73.21%,生产线不平衡率为9.8%,与表3中结果比较,各工作站平均工作率提高了,生产线不平衡率下降了。

表4 分配方案2的分配结果

工作站j	1	2	3	4	5	6
任务i	1, 3	2, 6, 5	7, 8, 9	4, 10, 11, 12, 14	13, 16, 17	15, 18, 19, 20

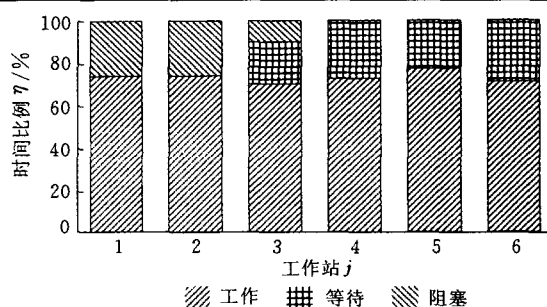


图7 分配方案2的仿真结果

通过上述分析看出,利用仿真方法研究需求不确定性对混合型装配线的影响,可以通过对改变产品需求比例的仿真结果的分析找到瓶颈工序,为重新平衡装配线指明改善方向。

5.2 作业时间不确定性仿真研究

为研究作业时间的不确定性对装配线平衡的影响,在产品需求比例为4:2:2、作业任务按方案1分配到各工作站内的条件下,将某个工作站内作业任务的作业时间由常数改为满足平均值为原设定值的负指数分布的随机变量,研究装配线平衡对各工作站内作业时间变化的敏感性,找出对装配线平衡最敏感的工作站。

设工作站1内作业任务的作业时间满足均值

务的作业时间为常数,运行仿真模型,得到如图 8 所示的仿真结果,各工作站工作率平均值为 69.01%,生产线不平衡率为 6.04%,与图 5 相比各工作站工作率平均值降低了 6.83%,生产线不平衡率增加了 0.14%。仿真结果显示工作站的等待率、阻塞率增加,工作率下降,说明由于工作站 1 的作业时间的随机性造成了各工作站间瞬时负荷不平衡以至于工作站的等待率、阻塞率增加,工作率下降。用同样方法依次改变第 2 至第 6 个工作站中的一个站的作业时间(令其满足负指数分布),其他站作业时间不变,仿真结果如表 5 所示,表中第一行为作业时间满足负指数分布随机变量的工作站,第二行为各工作站工作率平均值,第三行为装配线不平衡率,从表 5 可以看出装配线平衡对各工作站内作业时间变化的敏感性,最敏感的工作站是工作站 4,其作业时间改变使工作站工作率平均值下降最多,说明由于瞬时负荷的不平衡导致的堵塞率和等待率较高。通过敏感性分析,找出使装配线平衡最敏感的工作站,以便采取应对措施。

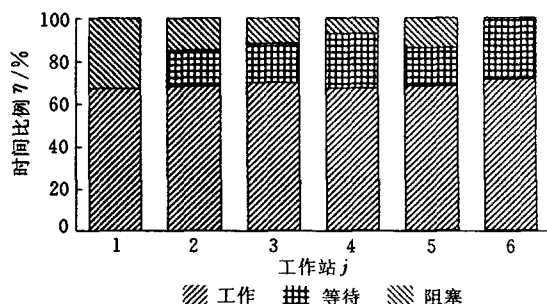


图 8 工作站 1 的作业时间为随机变量的仿真结果

表 5 作业时间为随机变量的仿真结果对照表

工作站 i	1	2	3	4	5	6
工作率平均值(%)	69.01	69.59	69.14	67.32	69.75	70.74
不平衡率(%)	6.04	7.29	5.94	6.58	8.11	4.50

6 结语

与单一品种装配线平衡问题相比较,多品种混合型装配线平衡问题求解难度增大很多,采用数学建模及求解的方法对实现多品种混合型装配线的平衡有重大指导意义。仿真研究是对数学建模及求解方法的一个重要补充,通过仿真研究可以找出影响混合型装配线平衡问题的诸多因素。本文研究的产品需求比例的不确定性和作业时间的不确定性都是现实生产中常见的情况,而这些不确定性因素对装配线平衡的影响很难用数学模型进行分析,文中的仿真研究举例说明了仿真方法对研究不确定性因素对装配线平衡的影响的有效性。

参考文献:

- [1] 陈心德,吴忠. 生产运营管理[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
- [2] Miltenburg J, Sinnamon G. Scheduling Mixed Model Multi-level Just-in-time Production Systems[J]. International Journal of Production Research, 1989, 27: 1487-1509.
- [3] Bukchin Y, Rabinowitch I. A Branch-and-bound Based Solution Approach for the Mixed-model Assembly Line-balancing Problem for Minimizing Stations and Task Duplication Costs[J]. European Journal of Operational Research, 2006, 174: 492-508.
- [4] Matanachai S, Yano C A. Balancing Mixed-model Assembly Lines to Reduce Work Overload[J]. IIE Transactions, 2001, 33(1): 29-42.
- [5] Vilarinho P M, Simaria A S. A Two-stage Heuristic Method for Balancing Mixed-model Assembly Lines with Parallel Workstations[J]. International Journal of Production Research, 2002, 40(6): 1405-1420.
- [6] Karabati S, Sayin S. Assembly Line Balancing in a Mixed-model Sequencing Environment with Synchronous Transfers[J]. European Journal of Operational Research, 2003, 149(2): 417-429.
- [7] Zhao X, Ohno K, Lau H S. A Balancing Problem for Mixed Model Assembly Lines with a Paced Moving Conveyor[J]. Naval Research Logistics, 2004, 51: 446-464.
- [8] Simaria A S, Vilarinho P M. A Genetic Algorithm Based Approach to the Mixed-model Assembly Line Balancing Problem of Type II[J]. Computers & Industrial Engineering, 2004, 47: 391-407.
- [9] 宋华明,韩玉启,杨慧. 多品种混合型装配流水线的平衡设计[J]. 中国机械工程, 2003, 14(6): 475-478.
- [10] Su P, Lu Y. Combining Genetic Algorithm and Simulation for Mixed-model Assembly Line Balancing Problem[C]//Proceedings of the Third International Conference on Natural Computation, ICNC. Piscataway: IEEE Computer Society, 2007: 314-128.

(编辑 苏卫国)

作者简介:于兆勤,男,1960年生。广东工业大学机电学院副教授。主要研究方向为生产计划、调度、超精密加工。发表论文 20 余篇。