

混流装配线平衡问题的多目标优化方法研究

苏 平 于兆勤

广东工业大学, 广州, 510006

摘要:针对混流装配线上由于不同品种产品在作业时间上存在差异而导致装配线瞬时负荷不平衡的问题,研究了混流装配线平衡问题的多目标优化方法,提出了均衡各工作站的加权平均负荷、最小化装配线实际节拍和最小化工作站的空闲时间三个优化目标,建立了多目标优化模型,并采用遗传算法对多目标优化模型进行求解。通过多目标优化方法,可提高混流装配线的利用率和平衡率,达到加权平均负荷与瞬时负荷同时平衡的目的。算例分析验证了所提出方法的有效性。

关键词:混流装配线;平衡;多目标优化;遗传算法

中图分类号:F273

文章编号:1004—132X(2009)19—2342—06

Multi-objective Optimization for Balancing Problem of Mixed Model Assembly Line

Su Ping Yu Zhaoqin

Guangdong University of Technology, Guangzhou, 510006

Abstract: In mixed-model assembly lines, the workload assigned to a workstation may vary among the different models because each task processing time may vary among the different models. To balance instantaneous workload among workstations, multi-objective optimization for the mixed model assembly line balance problem was studied. Three objectives, such as balancing weighted average workload, minimize cycle time of assembly line and minimize idle time of workstation, were proposed. A mathematical programming model was built, and a genetic algorithm was used to solve the mathematical programming model. By multi-objective optimization, high line usage rate and line efficiency can be perceived and weighted average workload and instantaneous workload among workstations can be balanced. An example was given to show the efficiency of the approach.

Key words: mixed-model assembly line; balancing; multi-objective optimization; genetic algorithm

0 引言

混流装配线可在同一条装配线上混合连续地装配结构相似、工艺接近的不同品种的产品。无论是单一品种装配线还是混流装配线,装配线平衡问题都有两种表达形式,一种是对给定的装配流水线节拍,求出所需工作站数最少的方案;另一种是对确定的工作站数量,求出使装配流水线节拍最短的配置方案^[1-2]。这两种表达方式都

要通过作业任务在装配线上各个工作站中的合理分配,使各工作站的单件产品作业时间尽可能接近生产节拍,从而达到工作站的利用率最大化,提高生产效率。

混流装配线平衡问题不仅要考虑装配作业任务先后顺序的约束,而且要考虑不同品种产品所包含的作业任务在作业时间上的差异(如果某种产品不包含其中某项作业任务,则视该项作业任务的作业时间为零),以及不同品种产品之间的平衡,因此混流装配线平衡问题与单一品种装配线平衡问题相比要复杂很多。

收稿日期:2008—11—26

基金项目:广东省科技计划资助项目(2006B12601002)

- [8] Fanti M P. Event-based Controller to Avoid Deadlock and Collisions in Zone-control AGVS[J]. International Journal of Production Research, 2002, 40(6): 1453-1478.
- [9] Lehmann M, Grunow M, Gunther H O. Deadlock Handling for Real-time Control of AGVs at Automated Container Terminals [J]. OR Spectrum, 2006, 28(4): 631-657.
- [10] Wu N, Zhou M. Modeling and Deadlock Avoid-

ance of Automated Manufacturing Systems With Multiple Automated Guided Vehicles [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part B: Cybernetics, 2005, 35(6): 1193-1202.

(编辑 王艳丽)

作者简介:管贤平,男,1978年生。东南大学自动化学院博士研究生。研究方向为AGV系统设计与调度。发表论文3篇。
戴先中,男,1954年生。东南大学自动化学院教授、博士研究生导师。

文献[3-6]根据多品种产品的综合作业顺序图及每个作业任务作业时间的加权平均值将多品种混流装配线等效为单一品种装配线,然后按照求解单一品种装配线平衡问题的方法求解多品种混流装配线平衡问题,其求解结果尽管可以使各工作站产品的平均单件作业时间比较均衡,但由于在装配线作业任务分配的优化过程中没有考虑到不同品种产品间的作业时间的均衡问题,因而使工作站内不同品种产品单件作业时间(或工作站之间的单件作业时间)存在较大的差异,导致装配线上瞬时负荷不平衡,使实际生产节拍在相当程度上长于设计节拍,装配线上各工作站利用率较低。文献[7]在求解混流装配线平衡问题时,设计了三个目标函数,第一个优化目标是工作站数最少,第二和第三个优化目标分别为各工作站间单件作业时间均衡以及工作站内不同品种产品的单件作业时间均衡,装配线平衡问题的优化目标函数为这三个目标函数之和。但由于第一个目标函数值与第二和第三个目标函数值在数值范围上相差较大,所以在优化过程中,第一个目标函数占据主导地位,而第二和第三个目标函数的作用较小。文献[8]对给定序列的混流品种装配生产线平衡算法进行了研究,其优化目标是各工作站剩余工作总量最小,使各工作站的单件产品作业时间接近生产节拍,解决的是瞬时负荷平衡问题,但由于其数学模型建立过程中对实际问题进行了相当大的简化,因此其方法距实际应用还有一定的距离。文献[9]为兼顾混合装配线平均负荷和瞬时负荷的平衡,提出了一种综合运用遗传算法和仿真分析的混合装配线平衡问题的求解方法,通过两阶段寻优,达到装配线上加权平均负荷和瞬时负荷的平衡,但该方法第二阶段的寻优依赖于第一阶段的求解结果,使其搜索范围受到一定的限制。上述方法对解决混流装配线瞬时负荷平衡问题都有一定的作用,但同时也各有局限。

本文从混流装配线加权平均负荷平衡和瞬时负荷平衡两个方面研究混流装配线平衡问题,建立了多目标优化模型,采用遗传算法对该模型进行了求解,并通过算例分析验证了所提出方法的有效性。

1 平衡问题的描述及其目标函数

1.1 问题描述

混流装配线的平衡问题与单品种装配线的平衡问题相比有如下特点:①由于混流装配线上不同品种产品所包含的作业任务的作业时间不尽相

同,所以在同一工作站中不同品种产品的单件作业时间可能不同,甚至可能相差甚远;②在混流装配线是各工作站同步传送产品(如通过传送带传送)的情况下,由于装配线的实际节拍等于任意品种产品在任意工作站中单件作业时间的最大值,当混流装配线上工作站中不同品种产品的单件作业时间相差较大时,装配线的实际节拍长于设计节拍。

在对混流装配线进行数学建模之前,对所研究的混流装配线平衡问题作如下假设:①混流装配线上的产品在各工作站间的传送是同步传送的;②在进行作业任务分配时,所有品种的相同作业任务,均分配到同一工作站中。

本文研究的混流装配线平衡问题同时兼顾装配线平衡问题的两种类型。先考虑第一种类型:给定生产节拍,最小化工作站数,根据计划期内对各个品种产品的需求量确定生产节拍,该生产节拍为设计节拍,在设计节拍确定的情况下,计算最小工作站数。再考虑第二种类型:在确定了最小工作站数的情况下优化生产节拍,使实际生产节拍达到最小,若由于不同品种产品差异较大,使优化后实际节拍仍大于设计节拍,则需逐一增加工作站数量,直到实际节拍能够满足设计节拍要求为止。

1.2 多目标优化问题

根据以上描述,混流装配线平衡问题可表达为如下多目标优化问题:

$$J_1 = \sqrt{\frac{\sum_{h=1}^S [\sum_{m=1}^M q_m T_{mh} - (\sum_{j=1}^S \sum_{m=1}^M q_m T_{mj})/S]^2}{S}} \quad (1)$$

$$J_2 = T_{mj\max} - \bar{T}_{mj} \quad (2)$$

$$J_3 = \bar{T}_{mj} - T_{mj\min} \quad (3)$$

$$\min J = w_1 J_1 + w_2 J_2 + w_3 J_3 \quad (4)$$

s. t.

$$\sum_{j=1}^S x_{ij} = 1 \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^S j x_{ij} \leq \sum_{t=1}^S t x_{it} \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

$$T_{mj} = \sum_{i=1}^N t_{im} x_{ij} \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (7)$$

$$\sum_{m=1}^M q_m T_{mj} \leq C_T \quad (8)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad (9)$$

式中, M 为混流装配线上产品的品种数目; N 为混流装配线上的产品装配所包含的作业任务数目,若某种产品不包含其中的某项作业任务,则视该项作业任务的作业时间为0; S 为装配线上工作站数目; t_{im} 为第 m 种产品的第 i 项作业任务的作业时间; q_m 为对第 m 种产品的需求比例;

T_{mj} 为第 m 种产品在第 j 个工作站中的单件作业时间;
 $T_{mj\max}$ 、 $T_{mj\min}$ 分别为 T_{mj} 中的最大、最小值; \bar{T}_{mj} 为 T_{mj} 的
 平均值, $\bar{T}_{mj} = (\sum_{j=1}^S \sum_{m=1}^M T_{mj}) / (SM)$; w_1 、 w_2 、 w_3 为权重。

式(1)为第一个目标函数(J_1),其优化目标是使各工作站中产品的平均单件作业时间的均方差最小,即各工作站的加权平均负荷均衡^[9];式(2)为第二个目标函数(J_2), J_2 是 T_{mj} 中的最大值 $T_{mj\max}$ 与平均值 \bar{T}_{mj} 之差,因为装配线实际节拍 C_T 等于 T_{mj} 中的最大值 $T_{mj\max}$,所以目标函数 J_2 的优化目标是最小化装配线实际节拍 C_T ,亦即在工作站数目确定的情况下最小化生产节拍;式(3)为第三个目标函数(J_3), J_3 是 T_{mj} 的平均值 \bar{T}_{mj} 与最小值 $T_{mj\min}$ 之差,因为工作站的空闲时间为 $C_T - T_{mj\min}$,故 $T_{mj\min}$ 越小,工作站的空闲时间越长,工作站的利用率越低,目标函数 J_3 的优化目标是最小化平均值 \bar{T}_{mj} 与最小值 $T_{mj\min}$ 之差,亦即最大化 $T_{mj\min}$,从而使工作站的空闲时间最短,工作站的利用率最高;式(4)为综合目标函数(J), J 是三个目标函数的加权和,最小化 J 可以同时实现各工作站加权平均负荷均衡、装配线节拍最小、各工作站的利用率最高。

采用上述多目标优化方法,可以提高混流装配线的平衡率,达到加权平均负荷与瞬时负荷同时平衡的目的。约束条件式(5)确保每一个作业任务只能且必须安排在一个工作站中;约束条件式(6)确保作业任务的安排满足作业优先顺序,其中任务 k 是任务 i 的后续任务;约束条件式(7)计算第 m 种产品在工作站 j 中的单件作业时间;约束条件式(8)确保每个工作站中产品的平均单件作业时间不超过设计节拍 \bar{C}_T ;约束条件式(9)给出了 x_{ij} 的取值范围,当第 i 个任务被安排到第 j 个工作站时, x_{ij} 取值为 1,否则取值为 0。

设在计划期 P 内,对第 m 种产品的需求量为 D_m ,则对 M 种产品的总需求量为 $D = \sum_{m=1}^M D_m$ 。在一个最小生产循环内,对第 m 种产品的需求量 $d_m = D/r$ (r 为 D_1 、 D_2 、 \dots 、 D_m 的最大公约数),在一个最小生产循环内,对 M 种产品的总需求量为 $d = \sum_{m=1}^M d_m$,对第 m 种产品的需求比例为 $q_m = d_m/d$ 。

最小工作站数由下式计算^[6]:

$$S_{\min} = \text{ceil}(\sum_{m=1}^M d_m \sum_{i=1}^N t_{im} / (\bar{C}_T \sum_{m=1}^M d_m)) \quad (10)$$

$$\bar{C}_T = P/D$$

式中, $\text{ceil}(\cdot)$ 为向上取整函数。

2 求解方法

2.1 求解步骤

求解混流装配线平衡问题时,首先根据计划期内对各品种产品的需求量计算设计节拍 \bar{C}_T , \bar{C}_T 是保证完成计划期内产品产量所必须达到的生产节拍。 \bar{C}_T 确定后,所要解决的混流装配线平衡问题就是第一类装配线平衡问题,即给定生产节拍,最小化工作站数。然后,根据式(10)计算 S_{\min} ,将 S_{\min} 作为求解最小工作站数的初值,再采用遗传算法求解多目标优化问题。在遗传进化过程中,通过作业任务的合理分配,实现各工作站之间加权平均负荷均衡、装配线实际生产节拍最短、工作站利用率最高这三个优化目标,同时,由于目标函数式(2)和式(3)的最小化,使所有品种产品在各工作站的单件作业时间 T_{mj} 与平均值 \bar{T}_{mj} 最大限度地接近,从而实现了装配线瞬时负荷均衡,但这种均衡只是相对的均衡,也就是说,由于不同品种所包含的作业任务的作业时间不尽相同,在同一工作站中,不同品种的单件作业时间可能不同,采用上述目标函数和求解算法,将这种差异降到最低。当不同品种产品所包含的作业任务的作业时间相差较小时,装配线瞬时负荷均衡性较高,反之,装配线瞬时负荷均衡性会相对低一些,这时,装配线的实际节拍 C_T ($C_T = T_{mj\max}$) 可能会长于设计节拍 \bar{C}_T ,当 $C_T > \bar{C}_T$ 时,说明实际节拍不能满足装配线的设计要求,为此需要通过增加工作站来缩短节拍。因为本文所研究的混流装配线平衡问题属于第一类装配线平衡问题,所以在增加工作站时要逐一增加,直到满足 $C_T \leq \bar{C}_T$ 为止,从而获得满足设计节拍 \bar{C}_T 下的最小工作站数,解决了第一类混流装配线平衡问题。事实上,由于混流装配线上不同品种产品的结构和工艺接近,所以它所包含的作业任务的作业时间的差异不会很大,因此,最小工作站数从初始值 S_{\min} 开始增大,到最终其增加量也不会很大。

根据上述分析,给出混流装配线平衡问题的求解步骤:

- (1) 确定生产节拍 \bar{C}_T , $\bar{C}_T = P/D$;
- (2) 由式(10)计算最小工作站数 S_{\min} ;
- (3) 令工作站数 $S = S_{\min}$;
- (4) 用遗传算法求解混流装配线平衡问题;
- (5) 对求得结果验证实际生产节拍 C_T ,若 $C_T > \bar{C}_T$,则令 $S = S + 1$,转向步骤(4),否则进入步骤(6);
- (6) 给出求解结果,结束。

2.2 遗传算法设计

2.2.1 编码方法

染色体基因的编码为一 S 行 N 列的矩阵,矩阵中每一元素表示一个基因座,基因座中的基因值为 1 或 0,当第 j 行、第 i 列的基因值为 1 时,表示第 i 个作业任务被分配到第 j 个工作站中;反之,若第 j 行、第 i 列的基因值为 0,则表示第 i 个作业任务没有被分配到第 j 个工作站中。图 1 所示为一混流装配线的综合作业顺序图,图中圆圈表示作业任务,圆圈中的数字表示作业任务序号,圆圈之间的连接弧线表示了作业任务之间的先后顺序关系。图 2 表示该混流装配线平衡问题的一个解的基因编码与解码示意图。这种编码方式的优点是便于计算各工作站负荷。

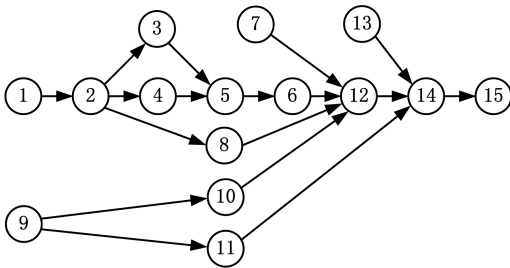


图 1 混流装配线综合作业顺序图举例

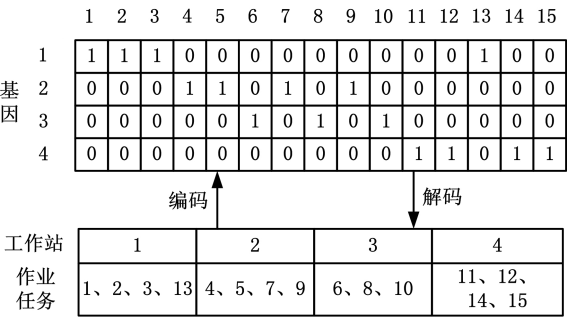


图 2 基因编码与解码

以 A 表示基因编码的矩阵,即

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdots & A_{1N} \\ A_{21} & A_{22} & \cdots & A_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ A_{S1} & A_{S2} & \cdots & A_{SN} \end{bmatrix} \tag{11}$$

以 t 表示各作业任务作业时间的加权平均值向量:

$$t = [t_1 \quad t_2 \quad \cdots \quad t_N]^T \tag{12}$$
$$t_i = \sum_{m=1}^M q_m t_{im} \quad i = 1, 2, \dots, N$$

以 t_m 表示第 m 种产品各作业任务的作业时间向量:

$$t_m = [t_{1m} \quad t_{2m} \quad \cdots \quad t_{Nm}]^T \tag{13}$$

则各工作站中产品的平均单件作业时间(各工作站的加权平均负荷)向量为

$$T = At = [T_1 \quad T_2 \quad \cdots \quad T_S]^T \tag{14}$$

第 m 种产品在各工作站的单件作业时间向量为

$$T_m = At_m = [T_{m1} \quad T_{m2} \quad \cdots \quad T_{mS}]^T \tag{15}$$

根据式(14)、式(15) 计算结果可以方便地计算出目标函数值 J_1 、 J_2 、 J_3 及 J 。

2.2.2 适应度函数

由于数学模型所描述的问题是最小值问题,故将适应度函数设计为^[9]

$$f(J) = 1 - \frac{J}{\mu}$$

式中, μ 为不小于 J_{\max} 的常数。

在遗传进化的过程中,种群中个体适应度之间的差异随进化过程的不同而变化。在进化初期,种群中个体适应度差异较大,而到进化后期,个体适应度差异较小。为保证在遗传进化初期能够在较大范围选择个体(以保持种群中个体的多样性),而在进化后期能够突出优良个体(以提高个体的竞争性),本文采用适应度尺度变换的方法,在遗传进化初期缩小个体适应度间的差异,而在遗传进化后期扩大个体适应度的差异^[9]。

2.2.3 选择操作

选择操作采用精英选择与轮盘赌选择相结合的方法,首先将种群中若干个精英个体直接复制到下一代种群中,其余个体采用轮盘赌法进行选择。这种方法既可以保留种群中的优良个体,又可以保持种群中个体的多样性。

2.2.4 交叉和变异操作

在遗传操作中,分别以交叉概率 P_c 和变异概率 P_m 进行交叉和变异操作。在交叉和变异操作后,需要对新产生的个体进行有效性检验,以检验新生个体所代表的解是否满足作业先后顺序约束(即式(6)),若能满足,说明新产生的个体是有效的,若不能满足,说明新产生的个体无效,需要对其进行调整,通过对部分作业重新分配,将其调整为有效基因。

3 算例分析

为验证所提出的方法的有效性,本文采用文献^[9] 给出的算例进行分析。设三种产品 A、B、C 在同一条装配线上混流装配,一个工作日(8h 或 28 800s) 中这三种产品的计划产量分别为 $D_A = 400$ 、 $D_B = 200$ 和 $D_C = 300$ 。设计节拍 $\bar{C}_T = P / \sum_{m=1}^M D_m = 32s$,三种产品的综合作业顺序图如图 3 所示,每个任务的作业时间如表 1 所示。

在一个最小生产循环中,对每一种产品的需

表 3 单目标优化求解结果

编码	1 1 1 1 1 2 2 2 2 3 4 3 4 4 2 5 5 2 6 2 3 4 5 5 6 2 6 5 6 6 6 6 5 4 6 6 6 6 6																															
工作站序号 j	1				2				3				4				5				6											
作业任务 i	1、2、3、4、5				6、7、8、9、15、 18、20、26				10、12、21				11、13、14、22、 34				16、17、23、24、 28、33				19、25、27、29、30、 31、32、35、36、37、 38、39											

表 4 多目标优化结果

品种	各工作站负荷(s)						平衡率 (%)	装配线利用率 (%)
	工作站 1	工作站 2	工作站 3	工作站 4	工作站 5	工作站 6		
加权平均	29.2222	29.0556	29.3889	30.2778	30.0000	29.6667	97.77	92.51
品种 A	28.0000	27.5000	27.5000	29.5000	31.0000	29.0000	92.74	
品种 B	32.0000	31.5000	31.5000	31.5000	28.0000	29.0000	95.57	
品种 C	29.0000	29.5000	30.5000	30.5000	30.0000	31.0000	97.04	

表 5 单目标优化结果

品种	各工作站负荷(s)						平衡率 (%)	装配线利用率 (%)
	工作站 1	工作站 2	工作站 3	工作站 4	工作站 5	工作站 6		
加权平均	30.2778	29.2222	29.7778	30.0000	29.3333	29.0000	97.77	81.10
品种 A	24.5000	27.0000	29.0000	35.0000	28.0000	29.0000	82.14	
品种 B	32.5000	31.0000	31.0000	32.0000	28.0000	29.0000	94.10	
品种 C	36.5000	31.0000	30.0000	22.0000	32.0000	29.0000	82.42	

基于各工作站负荷数据,可分别计算出采用多目标优化方法及单目标优化方法得到的装配线加权平均负荷的平衡率和各个品种负荷的平衡率及装配线利用率(表 4、表 5)。对比表 4 与表 5 可以看出,采用多目标优化方法,虽然装配线在加权平均负荷平衡率方面与单目标优化方法的结果没有什么区别,但每个品种的平衡率和装配线利用率都有显著的提高。

4 结 论

本文在文献[9]研究的基础上,对混流装配线平衡问题的优化模型进行了改进,分别以均衡各工作站的加权平均负荷、最小化实际节拍 C_T 和最小化工作站的空闲时间为优化目标,建立了多目标优化模型,并采用遗传算法对多目标优化模型进行求解。算例分析表明,在混流装配线平衡问题的求解中,多目标优化方法与单目标优化方法相比,前者在提高装配线利用率、缩短实际节拍、实现混流装配线加权平均负荷和瞬时负荷同时平衡等方面效果显著。

&. Industrial Engineering,2004, 47: 391-407.

[3] 曹振新,朱云龙,赵明扬,等. 混流装配线负荷平衡与投产排序的优化研究[J]. 信息与控制,2004, 33(6): 660-664.

[4] 宋华明,韩玉启. 基于 GA—SA 混流 U 型装配线平衡[J]. 运筹与管理,2002,11(4):69-76.

[5] Bukchin J, Dar — El E M, Rubinovitz J. Mixed Model Assembly Line Design in a Make—to—order Environment[J]. Computers & Industrial Engineering,2002, 41: 405-421.

[6] 陈心德,吴忠. 生产运营管理[M]. 北京:清华大学出版社,2005.

[7] 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.

[8] 卫东,金烨. 给定序列的混合品种装配生产线平衡算法[J]. 机械工程学报,2004,40(4):135-138.

[9] 于兆勤,苏平. 基于遗传算法和仿真分析的混合装配线平衡问题研究[J]. 计算机集成制造系统,2008, 14(6):1120-1129.

(编辑 卢湘帆)

参考文献:

[1] 陈荣秋,马士华. 生产与运作管理[M]. 北京:高等教育出版社,1999.

[2] Simaria A S, Vilarinho P M. A Genetic Algorithm Based Approach to the Mixed — model Assembly Line Balancing Problem of Type II [J]. Computers

作者简介:苏 平,女,1960 年生。广东工业大学机电工程学院教授。主要研究方向为生产计划、调度、离散事件系统仿真。发表论文 20 余篇。于兆勤,男,1960 年生。广东工业大学机电工程学院教授。