

应用遗传算法求解第一类装配线平衡问题

范维博¹,周俊¹,许正良²

(1. 东南大学 复杂工程系统测量与控制教育部重点实验室, 江苏 南京 210096;

2. 海澜集团有限公司信息中心, 江苏 江阴 214426)

摘要: 装配线的负荷平衡对生产企业非常重要。负荷平衡的装配线可以使各工作站空闲时间减少,并使工作站之间负荷均匀,以保证装配线时间损失率最低。针对第一类装配线平衡问题,首先对该问题进行了分析,在此基础上,建立了问题的数学模型。进而给出求解该问题的遗传算法,设计了该遗传算法的编码模式和译码方法,构造了适应函数,确定了初始种群的选取方法和种群的选择机制,并给出了种群的交叉和变异方法。通过求解某实例的装配线平衡问题,显示了这种算法的有效性。

关键词: 遗传算法;装配线;负荷平衡

中图分类号: TP18

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2010)02-0194-03

Appication of Genetic Algorithm to Assembly Line Balancing

FAN Wei-bo¹, ZHOU Jun¹, XU Zheng-liang²

(1. Ministry of Education Key Laboratory of Measurement and Control of Complex Systems
of Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Information Center of Heilan Group Co., Ltd, Jiangyin 214426, China)

Abstract: The load smoothness of assembly line is very important for production factory. The assembly line which is more smoothful may have less idle time and less loss rate of time. The ALB(assembly line balancing) is analyzed. On this basis, the mathematical model is established. Then, the genetic algorithm for solving this problem is presented. The encoding and decoding method is designed, the fitness function is constructed, the initial population selection method and the choice mechanism of the population is determined. The crossover and mutation methods of the population is presented. Furthermore, the result show that the algorithm is practical and effective by solving the balancing problem of an assembly line.

Key words: genetic algorithms; assembly line; load smoothness

0 引言

装配线平衡问题实质就是把有限的工序集合在满足加工顺序条件下分配到有序工作站,使各工作站的作业时间尽量接近。由于其求解目标不同,装配线负荷平衡问题可分为两类^[1]:第一类是给定节拍时间,求最小工位数;第二类是给定工位,求最小节拍时间。装配线负荷平衡问题具有典型的 NP 特性^[2],国内外学者在这方面做了不少研究。文献[3~6]运用启发式算法来解决装配线平衡,而文献[7~9]提出了运用常规的精确算法来解决装配线问题。相对于其他算

法,遗传算法具有高效的并行全局搜索性能。鉴于此,笔者运用了改进的遗传算法,在建立了数学模型的基础上,对第一种类型的装配线平衡问题进行求解。实验表明,该算法很好地提高了装配线的负荷平衡性。

1 问题分析及数学模型的建立

文中研究的是第一种类型的装配线平衡问题,即装配线在给定生产节拍,满足工序约束图(参考图1、图2)约束条件下,把有限的工序分配到有序的工作站。在满足各个工作站的作业时间不超过生产节拍条件下,求装配线平衡指数和工作站的最小化。问题可由下面的数学模型描述。

已知工序集合 $E = \{1, 2, \dots, n\}$, 给定生产节拍为 CT^* , 完成第 i 道工序所需标准时间 T_i ($i = 1, 2, \dots, n$), 并可知工序优先关系矩阵 $M = (M_{ij})_{n \times n}$, 如果 $M_{ij} = 1$, 则第 i 道工序优于第 j 道工序完成。此关系矩

收稿日期: 2009-06-03; 修回日期: 2009-09-16

基金项目: 江苏省 2007 年工业科技攻关计划项目(BE2007002)

作者简介: 范维博(1985-), 男, 江苏宿迁人, 硕士研究生, 研究方向为计算机综合自动化; 周俊, 副教授, 研究方向为复杂控制、系统工程、计算机综合自动化。

阵即对应于工序约束图的矩阵。

设问题的有序工作站集合为 $D = \{1, 2, \dots, m\}$ 。定义 S_k 为各个工序在满足优先关系矩阵 M 的条件下划分到第 k 个工作站上的工序集合。则整条装配线工序集合 $S = \{S_k | k = 1, 2, \dots, m\}$ 。定义 $ST_i = \sum_{i \in S_k} T_i$, 即 ST_i 为集合 S_i 中包含工序在第 i 个工作站条件下所消耗时间之和。则实际生产节拍 CT 为

$$CT = \max(ST_i) \quad (1)$$

平衡指数 SI 可由下式表示:

$$\sqrt{\sum_{i=1}^m (CT - ST_i)^2} \quad (2)$$

文章要求工作站数和平衡指数的最小化,为了把多目标问题转化为单目标问题,构造目标函数:

$$\lambda m + \sqrt{\sum_{i=1}^m (CT - ST_i)^2} \quad (3)$$

λ 表示目标函数是装配线的负荷平衡指数和工作站数的线性组合。根据不同的实际情况, λ 的比重可由操作者自行设置。且目标函数满足约束条件:

$$CT \leq CT^* \quad (4)$$

集合 S 同时必须满足: (1) $S_i \cap S_j = \emptyset, (i \neq j; j = 1, 2, \dots, m)$, 即同一个工序不能被同时分在不同的工作站中; (2) $\bigcup_k S_k = E, k = 1, 2, \dots, m$, 即每一道工序必须被分配在一个工作站中。

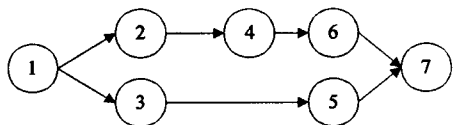


图1 装配工序图

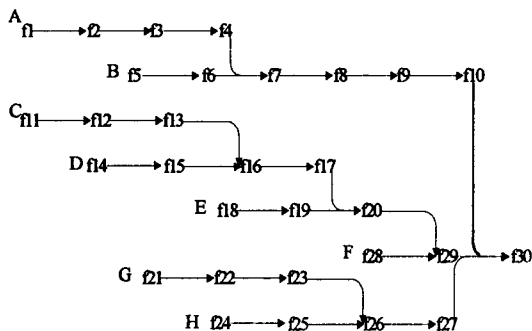


图2 某装配线工序图

2 应用遗传算法求解

遗传算法由美国芝加哥大学 Holland, J. H. 教授提出^[10], 是一种基于进化论优胜劣汰、适者生存的物种遗传思想的搜索算法。通过染色体的不断选择、交叉和变异, 从而产生适应度更大的染色体, 直到满足一定的约束条件为止。

实现遗传算法的主要技术问题包括: 编码; 译码;

适应函数的构造; 初始种群的选取; 选择策略; 交叉和变异策略; 算法终止条件。下面就上述问题进行讨论。

2.1 编码

装配线上工序之间的先后约束关系可由工序约束图来表示。图1为某装配线的工序约束图。图1中节点表示工序, 连接节点的弧表示工序顺序。装配线工序编排的问题属于一种组合优化问题, 以使各工序的顺序编码更为简单, 也易于理解。因此文中采用工序遍历次序的编码方法对染色体进行编码。按工序约束图中工序的先后顺序, 把工序排成一列, 每个工序对应于一个基因位。排好顺序的一列对应于一个染色体。图3为在图1的工序约束图下的一个染色体。

1	3	2	5	4	6	7
---	---	---	---	---	---	---

图3 工序图染色体

2.2 译码

译码的问题指在生产节拍给定的条件下, 根据染色体中工序号顺序求最小化工作站数和平衡指数的问题。问题可划分为两部分: 求工作站数和平衡指数。首先在满足给定的生产节拍条件下, 根据染色体中工序号排序顺序, 运用贪心算法把尽量多的工序划分到工作站, 求得工作站数工序的划分; 其次, 根据工作站上工序的划分求出各工作站作业时间, 依据式(2)求出平衡指数。步骤如下:

(1) 按照不超过给定节拍的原则和染色体中的工序顺序, 把尽量多的工序分配到工作站。记得出的工作站数为 m , 每个工作站的时间为 TS_1, TS_2, \dots, TS_m 。 $TS_k \leq CT^*$, 其中 $k \in (1, m)$ 。

(2) 代入式(2), 求得平衡指数 SI 。

2.3 适应函数的构造

考虑到适应度函数是求极大值问题, 而式(3)表述的目标函数为求极小值问题。为了把目标函数转化为求极大值问题, 文中构造如下适应函数:

$$f(i) = 0.95^{(\lambda m + SI)} \quad (5)$$

其中 $SI = \sqrt{\sum_{i=1}^m (CT - ST_i)^2}$ 为平衡指数, m 为工作站数。这样, 平衡指数越小, 工作站数越小的染色体其适应度越大。

2.4 初始种群的选取

初始化种群的染色体必须满足工序优先矩阵 M 的加工顺序约定。对于图1, (2134567) 这样的染色体显然违背了工序的加工顺序。文中采用图论中随机拓扑排序的方法进行种群的初始化。

(1) 初始化染色体为空队列。

(2) 随机选择工序图中入度为0的点进入染色体

队列。在图中删除此节点。

(3) 工序图中没有节点,则结束;否则转(2)。

其中入度为 0 的节点指此节点没有前序节点。如图 1 中,开始时只有节点 1 没有前序节点,则只能选择节点 1 进入染色体队列。第二步,删除节点 1,那么节点 2 和 3 都没有前序节点,可随机选择一个节点进行处理。如此循环,直到工序图中没有节点为止。

2.5 选择机制的确定

文中采用经典的赌轮选择机制,采用该方法,各个体的选择概率和其适应度值成比例。设种群数量为 t ,群体中第 i 个个体的适应度值为 f_i ,染色体的选择可按下面步骤进行:

(1) 计算群体总适应度值:

$$F = \sum_{i=1}^t f_i$$
 (6)

(2) 计算第 i 个个体被选择的概率:

$$P_{si} = f_i / F$$
 (7)

(3) 计算第 i 个个体的累积概率:

$$P_{ci} = \sum_{j=1}^i P_{sj}$$
 (8)

(4) 产生 0 到 1 之间随机数 p ,若 $p \leq P_{c1}$,则第一个个体被选择;否则若 $P_{c,i-1} \leq p \leq P_{ci}$,则第 i 个个体被选择。

(5) 重复步骤(4),直到选择够 t 个个体为止。

2.6 交叉和变异

交叉:按照交叉概率,随机从种群中选出两个染色体作为双亲,并随机地产生和染色体基因位数相同的二进制字符串。取出对应于二进制字符串中为 1 的基因位,使得这些基因位的排列顺序按另一双亲中对应的排列顺序排列,其余部分的排列顺序不变。因为双亲都是可行解,则通过这样的方法产生的后代也必然是可行解。用这种交叉方法可以大大减少计算量,加快程序的进程。交换过程如图 4 所示。

二进制串	0	1	0	1	1	0	1
父代1	1	2	4	6	3	5	7
父代2	1	3	2	4	5	6	7
子代1	1	3	4	2	6	5	7
子代2	1	4	2	3	5	6	7

图 4 染色体交叉示意图

变异:常用变异方法是采用调换染色体中基因位置的方法。这种方法要保证交换基因后的染色体是按照工序约束图所约定的顺序排列。这在算法上需要引入相应的判断机制,相对比较复杂。文中采用产生新染色体来取代要变异的染色体来完成变异操作。当满

足变异概率时,用随机产生的一个新的染色体去替代原染色体。这和调换基因位置的方法在变异效果上差别不大,但在算法实现上相对来说较为简单,可以提高算法的执行效率,节省算法运行时间。

2.7 算法终止条件

算法在进化 1000 代后结束。

3 实验结果

初始化种群规模为 50,取适应度函数中的 λ 为 0.01,交叉概率为 0.8,变异概率为 0.2。取文献[11]中工序图作为示例,运用文中改进的遗传算法排程结果与可能的手工排程结果(初始化种群中的最优个体)的比较如表 1。运动工序图如图 2^[11],各工序的平均作业时间 T 参见文献[11]。算法程序用 C++ 语言编写。关系矩阵 M 由工序图得出。

从表 1 可以看出,相对于手工排程,改进遗传算法的作业排程能使得制衣的装配线更加平衡,同时减小了工作站数,这将使得装配线时间损失率降低,大大地提高了生产效率。

表 1 实验数据

CT	手工排程			改进 GA		
	各工作站时间	工位数	平衡指数	各工作站时间	工位数	平衡指数
40	37, 40, 36, 27, 34, 36, 34, 39, 22, 38, 40, 28, 24, 30	14	33.3317	39, 35, 40, 36, 39, 37, 37, 33, 36, 37, 39, 27, 30	13	20.1246
45	39, 37, 44, 36, 40, 32, 42, 38, 29, 27, 26, 45, 30	13	40.0000	37, 40, 40, 40, 40, 40, 40, 40, 39, 34, 45, 30	12	24.9199
50	46, 41, 43, 44, 40, 42, 50, 37, 43, 49, 30	11	31.0644	48, 47, 47, 48, 47, 49, 50, 49, 50, 30	10	20.9045
54	45, 44, 38, 48, 48, 45, 46, 46, 51, 54	10	26.9629	52, 51, 51, 51, 51, 52, 51, 52, 54	9	7.54983
60	54, 59, 57, 45, 51, 49, 49, 47, 54	9	28.2666	59, 59, 59, 58, 59, 57, 57, 57	8	5.91608
70	68, 61, 57, 51, 58, 56, 57, 57	8	35.9583	68, 69, 68, 68, 68, 67, 57	7	13.9642

4 结束语

目前,国内外学者在装配线负荷平衡方面做了不少研究。我国是制造业大国,因而对于我国,装配线负荷平衡问题显得异常重要。然而,我国尚有一部分制造业企业在作业排程时,运用粗放型的手工排程方法,

(下转第 201 页)

上位机接受到数据包后会触发工件线程,工件线程会向机械手控制程序下达指令,将工件移入公共缓冲区。

如当工件1进入生产系统则此时共享内存区中的数据相应发生变化,工件1所在的缓冲区会由300变为1,这显示工件已经进入公共缓冲区。当上位机控制程序判别缓冲区中的工件满足加工条件,机器线程会向机械手控制程序下达加工指令,此时共享内存中的数据会发生相应变化,工件所在机器变为1,缓冲区变为300(即工件不在缓冲区中)。

当工件加工完毕,机器线程会向机器人下达加工完毕指令,由机械手将工件移动入公共缓冲区中,当前工件所有的工序都加工完毕,则将工件送入缓冲区2中。

当共享缓冲区中对应每个工件当前所在缓冲区都为2,即所有工件当前都已经进入缓冲区2,则说明所有的工件均已加工完毕。

4 结束语

文中基于单件生产实验系统的实际提出了用多线程的方法实现生产线的控制,鉴于单件生产实验系统没有机器的实际情况,通过将控制与仿真相结合,在没有机器的情况下用线程对机器进行模拟,实现了单件生产实验系统的控制。在实现过程中,通过采用多线程的方法真正实现控制与仿真的并发运行,比传统的

仿真方法,逻辑上更加清晰,相关变量的耦合度要小得多,不会因为局部的错误导致整个程序严重的逻辑错误,并且更加贴近生产线工作实际。通过采用文中的控制方法,可以较好地实现单件生产实验系统的实时控制。

参考文献:

- [1] 阎有运,郭晨宇,钟欠根.多线程技术在远程实验监控软件开发中的应用[J].河南理工大学学报,2007,26(1):56-59.
- [2] 张程,汪秉文.多线程技术在工业控制中的应用[J].工业控制计算机,2002,15(3):28-30.
- [3] 王维平,朱一凡,华雪倩,等.离散事件系统建模与仿真[M].长沙:国防科技大学出版社,1997.
- [4] 卫军胡,韩九强.离散事件系统仿真技术在制造系统调度中的应用[J].系统仿真学报,2000,12(1):27-30.
- [5] Kaubisch W H, Hoare C A R. Discrete event simulation based on communicating sequential processes[R]. Belfast, N. Ireland: Dep. Comput Sci The Queen's Univ, 1983:39-65.
- [6] Bagrodia R L, Chandy K M, Isra J M. A message based approach to discrete event simulation[C]//IEEE SE213. [s. l.]:[s. n.], 1987:654-665.
- [7] Misra J. Distributed discrete - event simulation[D]. Austin: Univ. of Texas at Austin, 1986:39-85.
- [8] 曹阳,张维民.基于消息的离散事件仿真方法[J].小型微型计算机系统,2007,21(7):749-751.

(上接第196页)

造成高的时间损失率和低的生产效率。在当前经济危机的大背景下,这对于提高制造业企业国际竞争力是相当不利的。基于上述事实,有理由期待装配线平衡方法的下一步工程应用。

参考文献:

- [1] Hackman S T, Magazine M J, Wee T S. Fast, effective algorithms for simple assembly line balancing problems[J]. Journal of Operational Research, 1989, 37(6):916-924.
- [2] Gutjahr A L, Nemhauser G L. An algorithm for the line balancing problem[J]. Management Science, 1964, 11(2):308-315.
- [3] 梁燕,金焯.基于工位约束快速启发式算法的混合装配线分段优化[J].上海交通大学学报,2007,41(9):1501-1505.
- [4] Scholl A, Becker C. State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing[J]. European Journal of Operational Research, 2006, 168(3):666-

693.

- [5] Lapierre S D, Ruiz A, Soriano P. Balancing assembly lines with tabu search[J]. European Journal of Operational Research, 2006, 168:826-837.
- [6] 吴君华,夏巨谌,曹山河. ALB问题的数学模型及其优化算法的研究[J].系统仿真学报,1999,11(5):358-360.
- [7] Baybars I. A survey of exact algorithms for the simple assembly line balancing problem[J]. Management Science, 1986, 32:900-932.
- [8] Johnson R V. Optimally balancing large assembly lines with FABLE[J]. Management Science, 1988, 34:240-253.
- [9] Klein R, Scholl A. Maximizing the production rate in simple assembly line balancing - a branch and bound procedure[J]. European Journal of Operational Research, 1996, 91:367-385.
- [10] 张文修,梁怡.遗传算法的数学基础[M].西安:西安交通大学出版社,2003.
- [11] 高建坤,周俊,许正良.自适应遗传算法在服装缝纫装配线平衡中应用[J].江苏纺织,2008(12):50-54.