

基于遗传分散搜索算法的装配排序优化

马 美, 严洪森, 李卫丽

(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;

东南大学 自动化学院, 江苏 南京 210096)

摘 要:航空发动机装配车间调度问题包括部件组装调度和试车台排序。其中试车台排序是一个关键问题,它直接影响生产效率和生产成本。为了提高生产效率、降低生产成本,文中针对航空发动机装配车间调度问题,依据实际情况,对其关键的试车台排序问题进行深入研究。在分析试车台排序特征的基础上,建立了试车台最优排序的旅行商模型,基于遗传分散搜索算法对该模型进行求解,为装配排序优化问题提供了一种科学的方法。最后通过算例比较表明该算法的适用性和优越性。

关键词:装配车间调度;试车台排序;遗传分散搜索算法

中图分类号: TP31

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2010)01-0014-04

Assembly Sequence Optimization Based on Genetic and Scatter Searching Algorithm

MA Mei, YAN Hong-sen, LI Wei-li

(Ministry of Edu. Key Lab. of Measurement and Control of CSE, Southeast University, Nanjing 210096, China;

School of Automation, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The scheduling problem of the aviatric engine assembly shop includes the scheduling of the partial assembly and the sequence of the test bed. The sequence of the test bed is the key of the scheduling problem of the aviatric engine assembly shop, which directly impacts on production efficiency and production cost. In order to increase production efficiency and reduce production cost, research the sequence of the test bed which is the key of the scheduling problem of the aviatric engine assembly shop according to the actual situation. The TSP (Traveling Salesman Problem) sequencing model of the test bed has been established and the genetic and scatter searching algorithm to solve this model is proposed on the basis of analyzing for characteristics of the test bed. It provides a scientific method for the optimization of planning and scheduling of the assembly sequence. Comparison between many computational examples of this algorithm is carried out, and the result confirms its adaptability and effectiveness.

Key words: assembly shop scheduling; test bed sequence; genetic and scatter searching algorithm

0 引 言

装配车间调度是企业顺利生产的前提,是提高企业经济效益的重要条件和保障。迄今对装配车间调度进行研究的方法有很多^[1,2],相对比较成熟。航空发动机总装配中试车台是其关键所在,它直接影响生产效率和生产成本。目前,现场主要根据调度人员的经

验进行调度排序,当发动机品种和批量增加时,只靠经验调度难以保证最优调度。因此,文中在已经对航空发动机总装车间的部件组装实现最优调度的基础上,针对关键的试车台调度问题进行研究。在分析了试车台排序特征的基础上,建立了试车台最优排序的旅行商问题(TSP)模型。旅行商问题模型^[3,4]已经被应用于解决排序优化问题,并取得了很好的效果。文中深入分析试车台排序实际特征,对试车台排序物理模型进行抽象和改进,通过引入一个虚节点,把试车台排序问题转化成 TSP 问题,并建立了适合实际问题的 TSP 模型。

目前有关解决装配排序问题的方法有很多,其中遗传算法应用非常广泛,但是遗传算法^[5](genetic algorithm, GA)解决诸如装配排序的组合优化问题时存在

收稿日期:2009-04-20;修回日期:2009-07-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50875046);国家 863 计划资助项目(2007AA04Z112)

作者简介:马 美(1982-),女,安徽宿州人,硕士研究生,研究方向为生产计划与调度;严洪森,博士,教授,博士生导师,研究方向为 CIMS 及 FMS 建模、生产计划、调度、控制、仿真,并行工程、敏捷制造和知识化制造。

收敛性能差,容易陷入局部最优等缺陷。近年来,国内外学者开始研究用分散搜索算法^[6,7](scatter searching algorithm, SS)解决组合优化问题,由于 SS 算法保持搜索在大范围内进行,增强了 GA 算法跳出局部最优的能力,改进了 GA 算法收敛性能差、需要时间长的不足,取得了很好的效果。因此文中采用基于 GA&SS 混合算法(称为遗传分散搜索算法)对该模型进行求解,为装配排序优化问题提供了一种科学的新方法。通过算例表明 GA&SS 算法比传统的遗传算法具有明显的优越性。

1 装配车间调度的试车台排序优化模型

1.1 试车台排序问题的提出

航空发动机装配车间调度包括部件组装和试车两部分,实际情况中,试车直接影响生产效率和生产成本。因此文中在已经实现部件组装调度优化的基础上,对试车台进行排序优化。

1.1.1 试车台排序的特征

(1)需要试车的发动机种类多。

(2)不同种类的发动机之间转产需要重新调整试车台,而不同种类的发动机所需的调整时间不同。

1.1.2 试车台排序处理策略

(1)试车台排序问题可以简化为调整时间与加工顺序有关的单品种调度问题。

(2)单一品种发动机试车时,可以把每一批同品种的发动机看成一个工件,简化排序复杂度。

1.2 试车台排序的数学模型

1.2.1 目标函数的选取

对于这种排序问题,一批发动机经过试车台试车的最大完工时间不再是常数,它与试车顺序有关,以“()”表示一定的试车顺序,如 $T_{(1)}$ 表示第一位试车的发动机的完工时间。假设发动机到达时间为 0,各发动机的完工时间表示为^[3]:

$$T_{(1)} = w_{(0)(1)} + m_{(1)}$$

$$T_{(2)} = T_{(1)} + w_{(1)(2)} + m_{(2)}$$

$$T_{(i)} = T_{(i-1)} + w_{(i-1)(i)} + m_{(i)} \cdots$$

$$T_{(n)} = T_{(n-1)} + w_{(n-1)(n)} + m_{(n)}$$

其中 $w_{(0)(1)}$ 表示机器从闲置状态到第一台发动机被试车所需的调整时间, $w_{(i-1)(i)}$ 表示从测试第 $(i-1)$ 种发动机到测试第 i 种发动机所需的调整时间, $m_{(i)}$ 为每种发动机被测试的时间, $T_{(i)}$ 为第 i 种发动机的完工时间,这样最大完工时间为:

$$\begin{aligned} T_{\max} &= T_{(n)} = T_{(n-1)} + w_{(n-1)(n)} + m_{(n)} \\ &= w_{(0)(1)} + m_{(1)} + w_{(1)(2)} + m_{(2)} \cdots + w_{(n-1)(n)} + m_{(n)} \end{aligned}$$

$$= \sum_{i=1}^n w_{(i-1)(i)} + \sum_{i=1}^n m_{(i)}$$

上式中 $\sum_{i=1}^n m_{(i)}$ 为 n 种发动机被测试的时间之和,是常量,与发动机的试车顺序无关。因此要使最大完工时间最短,只需要 $\sum_{i=1}^n w_{(i-1)(i)}$ 最小。对于连续测试 n 种发动机的情形,可以假设第一种发动机无需调整试车台而直接被测试,即 $w_{(0)(1)}$ 忽略不计,这样就可以将试车台问题转化为 TSP 问题。 n 种发动机对应 n 个城市,不同种类发动机试车时所需要的调整时间对应城市间的旅行时间。

1.2.2 试车台排序的 TSP 模型

旅行商问题是一个闭合回路问题,而实际发动机试车台问题是一个开环问题,每个发动机只被试车一次,因此需要引入一个虚节点,从虚节点出发,然后再回到虚节点,这样就成功地把开环的实际问题转换成了闭环的 TSP 问题^[4]。

$$\min \sum_{i=1}^{n+1} \sum_{j=1}^{n+1} t_{i,j} X_{i,j} \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^{n+1} X_{i,j} = 1 \quad (j=1,2,\dots,n+1) \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^{n+1} X_{i,j} = 1 \quad (i=1,2,\dots,n+1) \quad (3)$$

$$t_{n+1,i} = 0 \quad (i \in \{1,2,\dots,n\}) \quad (4)$$

$$t_{j,n+1} = 0 \quad (j \in \{1,2,\dots,n\}) \quad (5)$$

其中 n 表示发动机的种类数; $t_{i,j}$ 表示从 i 种发动机转产到第 j 种的调整时间。

式(2),式(3)用于约束每次正在被试车和可直接转产的发动机只有一种;式(4),式(5)表示在实际问题中引入的虚节点应满足的条件,以将实际问题转化为 TSP 问题。

2 算法设计

2.1 遗传算法(GA)的基本原理

遗传算法是 Holland 教授于 1969 年提出,后经 DeJong 等人归纳总结所形成的一类模拟进化算法。遗传算法的基本原理是模拟自然界遗传机制和生物进化论而形成的一种过程搜索最优解的算法。具体体现在遗传算法中初始种群的设定,初始种群内的个体之间交叉、变异、新个体的产生及种群的更新。种群在适应度函数的约束下不断进化最终得到最优或者次最优的个体。遗传算法最基本的要素为染色体编码、适应度函数、选择操作、交叉操作和变异操作。

2.2 分散搜索(SS)的基本原理

分散搜索是在禁忌搜索的基础上,最早由 Glove

于1977年在一篇文章中提出的。分散搜索的基本原理是首先产生一个初始种群,通过统一的规则组合一个参考解集,再按照一定选择规则从参考集中分别选出质量好的解组成子参考集1和多样性好的解组成子参考集2。将两个子参考集中的解通过组合机制产生新解,再对这些新解进行改进,然后把这些符合条件的新解加入参考集进行新的搜索,最终获得最优或者次最优的个体^[8]。

分散搜索是一种启发性质的算法,在这个算法中主要有解的组合方法、多样性产生方法、解的改进方法、子参考集的更新方法、子参考集产生方法^[8]。

SS算法参考集中解的数目相对较少(一般选择20个),用系统方法选择解进行组合产生新解。因此,SS算法既考虑了解的质量,又考虑了解的分散性。

2.3 GA&SS混合算法

SS算法主要由初始解的生成、参考集合的生成、组合产生新解、解的改进以及子参考集的更新5部分组成。GA&SS算法主要是将GA算法嵌套到SS算法框架中,由于SS算法保持搜索在大范围内进行,增强了GA算法跳出局部最优的能力,改进了GA算法收敛性能差、需要时间长的不足。现给出下面定义:

定义1 参考集 R 是一些可行解集合,按照一定选择规则从参考集 R 中选择 b_1 个质量好的解组成子参考集 R_1 ,选择 b_2 个分散性好的解组成子参考集 R_2 。

定义2 num 代表两个解的相同边数目,表示这两个解的分散性。 num 值越小,这两个解的分散性越好。

分散搜索算法每部分可以根据具体情况做出灵活的设计,文中的创新部分就是在子参考集组合产生新解和解的改进以及子参考集更新部分。

文中在通过组合机制产生新解时,选择运用GA算法:在参考集的两个子参考集中各选一条染色体作为父本,通过交叉、变异,产生新的染色体(即新解)并对新解进行改进,实现了GA&SS混合算法,并且获得了很好的效果。GA&SS算法步骤如下:

Step1:产生初始种群,初始化参数,生成初始解集合 P ,对 P 中的解进行改进,由改进后的解组成参考集 R 。

Step2:按照一定选择规则从参考集 R 中选择 b_1 个较好的解组成子参考集 R_1 ,选择 b_2 个较分散的解组成子参考集 R_2 ,且 $R = b_1 + b_2$ (一般为了效果更好,选择 $b_1 = b_2$)。保留当前参考集中最优函数值 current_best 和最优解 s_best 。

Step3:调用遗传算法对两个子参考集中的染色体按一定交叉概率和变异概率进行交叉、变异,生成新的染色体。

Step4:计算目标函数值,如果 $f(s_j) < f(s_best)$,则更新当前最优函数值 $\text{current_best} = f(s_j)$ 、更新当前最优解 $s_best = s_j$;否则转 Step5。

Step5:分别计算 s_j 与参考集中各解之间的 num ,取其中最大值 $\text{num}_{\max}(s_j)$,当 $f(s_j) < \max\{f(s_j)\}$ 时,用 s_j 更新子参考集 R_1 中的解 s_i ;如果 $\text{num}_{\max}(s_j) < \max_{i \in R_2} \{\text{num}_{\max}(s_i)\}$,则用 s_j 更新子参考集 R_2 中的解 s_i 。否则调用GA程序,产生一个新解,转 Step4。

Step6:计算和更新参考集中当前最优函数值 current_best 和最优解 s_best 。

Step7: $k = k + 1$,若 $k < \text{NC}_{\max}$,则重复 Step3 ~ Step7;否则转 Step8。

Step8:输出结果。

具体的GA&SS混合算法流程图如图1所示。

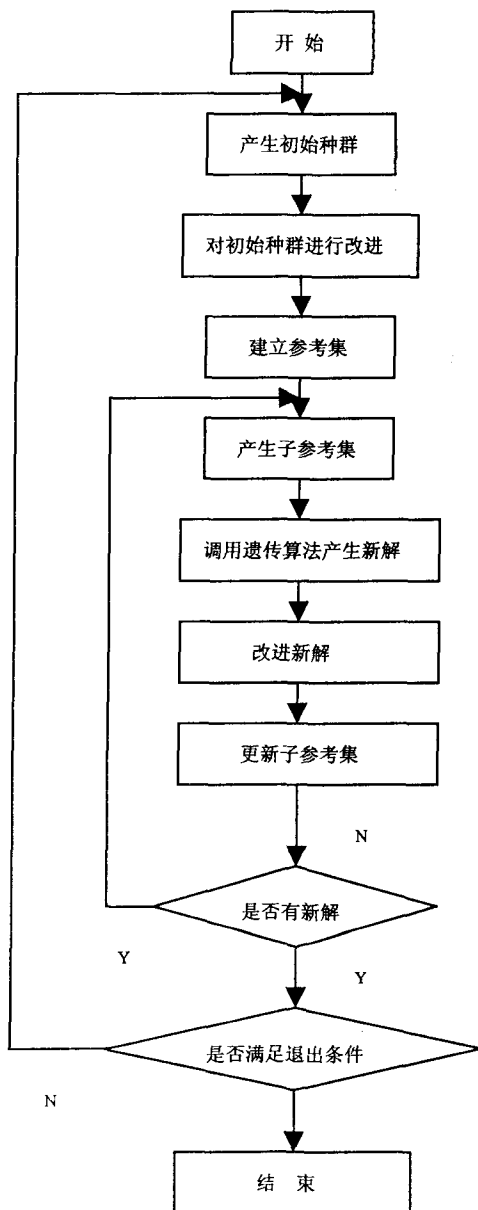


图1 GA&SS混合算法流程图

3 实例求解和分析

文中针对某航空发动机总装配车间实际情况,进行数学模型的建立,采用文中上述的 GA&SS 算法对模型进行求解,并采用 C++ 编程实现。

3.1 实例求解

下面简要介绍运用 GA&SS 算法求解某航空发动机总装配车间试车台排序优化模型的核心步骤,也是该算法不同于传统 GA 算法和 SS 算法的地方。

(1) 子参考集组合产生新解。

传统 SS 算法,从子参考集解中选择一对解(类似于遗传算法的父代),对它们进行凸或非凸线性组合,产生新解(类似遗传算法的后代);在文中描述的 GA&SS 算法中,以选出的一对解作为父代,运用遗传算法,对它们按一定交叉概率进行交叉,按一定的变异概率进行变异,产生的后代就是新解。

(2) 子参考集的更新。

传统 SS 算法中,在每次所有新解生成以后,利用一些准则^[5](如贪婪删除算法)确定是否有改善了解可以用来更新子参考集;在文中所描述的 GA&SS 算法中,采用动态的方法更新子参考集。每产生一个新解,就用上文算法步骤中的一些约束去判断该解是否可以用来更新子参考集。这种动态更新子参考集的方法,有助于加快算法收敛。

3.2 实例分析

某航空发动机总装配车间,共装配 5 种发动机,每种发动机都要经过试车台试车后才能出厂。不同种类发动机经过试车台转产时所需要的调整时间如表 1 所示。

表 1 各品种发动机间转产调整时间(h)

转产后(种类)		1	2	3	4	5
转 产 前 种 类	1	0	1.3	1.5	2.1	0.8
	2	1.3	0	0.6	2.7	1.0
	3	1.5	0.6	0	1.2	1.8
	4	2.1	2.7	1.2	0	1.2
	5	0.8	1.0	1.8	1.2	0

3.2.1 仿真结果

(1)采用 GA&SS 算法。

计算结果最优试车台排序为:1-5-2-3-4。
最优试车台序列对应的调整时间最优值是:3.6h。

(2)采用 GA 算法。

计算结果最优试车台排序为:1-5-2-3-4。
最优试车台序列对应的调整时间最优值是:3.6h。

3.2.2 算法比较

表 2 仿真实验 5 次运行结果

次数	1	2	3	4	5	平均值
目标函数最小值 (GASS)	3.6	3.6	3.9	3.6	3.6	3.66
目标函数最小值 (GA)	3.9	3.9	3.6	4.0	4.1	3.9

表 2 的结果表明在 5 次运行中,GA&SS 算法 4 次达到最优值 3.6h,而 GA 算法只有 1 次达到最优值。GA&SS 算法 5 次运行的平均值是 3.66h,比 GA 的平均值 3.9h 小,而且非常接近最优值,因此可以得出结论:GA&SS 混合算法比传统的 GA 算法在解决组合优化问题时更有优越性和稳定性。

4 结束语

文中以某航空发动机总装配车间试车台排序优化问题为研究对象,提出采用 GA&SS 混合算法进行优化,详细介绍了算法步骤,并进行了仿真分析。通过仿真结果对比分析,表明 GA&SS 算法整体优化效果优于 GA 算法,该算法克服了 GA 算法易陷入局部最优的不足,提高了全局寻优能力。GA&SS 混合算法,也为解决组合优化问题提供了新思路。

参考文献:

[1] 严洪森,夏琦峰,朱旻如,等.汽车装配车间生产计划与调度的集成优化方法[J].自动化学报,2002,28(6):911-919.

[2] Yan Hongsen, Xia Qifeng, Zhu Minru, et al. Integrated production planning and scheduling on automobile assembly lines [J]. IIE Transactions,2003(35):711-725.

[3] 唐立新,张国范,杨自厚,等.热轧钢管轧批排序模型及算法[J].经济与管理,1999,34(4):73-76.

[4] 唐立新.轧钢厂的精轧工序轧制批量调度的优化模型[J].东北大学学报:自然科学版,1998,19(6):624-626.

[5] 丁惠敏,李蓓智,周亚琴.基于遗传算法的装配序列规划[J].东华大学学报:自然科学版,2001,27(6):10-13.

[6] Haq A, Vivekraj A, Saravanan M. A scatter search approach for general flowshop scheduling problem [J]. International Journal Advanced Manufacturing Technology, 2007,31(7):731-736.

[7] 袁 鹏,刘海明,胡跃明.基于伞布搜索的贴片机贴装顺序优化算法[J].电子工艺技术,2007,28(6):316-320.

[8] Marti R, Laguna M, Glover F. Principles of scatter search [J]. European Journal of Operational Research, 2004,169:359-372.