

7-2-2020

Optimization Simulation for Job-shop scheduling for Reducing Manufacturing Energy Consumption

Xiaoxia Li

1. *College of Information, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;;*

Xiaomao Huang

2. *College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;*

Jianxiao Liu

1. *College of Information, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;;*

Liu Feng

1. *College of Information, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Optimization Simulation for Job-shop scheduling for Reducing Manufacturing Energy Consumption

Abstract

Abstract: To reduce the energy consumption in the manufacturing process by optimizing job-shop scheduling, the process of the machines' energy consumption was divided into different stages. *The energy consumption of each stage was analyzed and modeled. The job-shop scheduling problem model for manufacturing energy consumption was developed. On the basis of the developed problem model, minimizing manufacturing energy consumption was used as the optimization goal and a simulated annealing algorithm was adopted to optimize the job-shop scheduling.* A job scheduling scheme was generated randomly according to the coding rule. The job scheduling scheme generated randomly was used as the initial solution, a simulated annealing algorithm was adopted to achieve the optimization of manufacturing energy consumption and the optimal job-shop scheduling scheme was obtained. The feasibility and effectiveness of the proposed method was verified by simulation experiments.

Keywords

job-shop scheduling, manufacturing energy consumption, sustainable manufacturing, simulated annealing

Recommended Citation

Li Xiaoxia, Huang Xiaomao, Liu Jianxiao, Liu Feng. Optimization Simulation for Job-shop scheduling for Reducing Manufacturing Energy Consumption[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(1): 114-120.

面向低制造能耗的车间作业调度优化仿真

李小霞¹, 黄小毛², 刘建晓¹, 刘峰

(1. 华中农业大学信息学院, 武汉 430070; 2. 华中农业大学工学院, 武汉 430070)

摘要: 为了通过优化车间作业调度降低制造过程中的能耗, 将车间机器资源的耗能过程划分为不同阶段。在对各阶段的能耗进行分析建模的基础上, 建立了面向低制造能耗的车间作业调度问题模型, 并在所建立模型的基础上, 以最小化制造能耗为优化目标, 采用模拟退火优化算法实现车间作业调度优化。按照编码设计规则随机生成车间作业调度方案, 将随机生成的车间作业调度方案作为初始调度方案, 采用模拟退火算法实现制造能耗优化, 得到最优车间作业调度方案。通过仿真实验验证了所提出方法的可行性和有效性。

关键词: 车间作业调度; 制造能耗; 可持续制造; 模拟退火

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2016) 01-0114-07

Optimization Simulation for Job-shop scheduling for Reducing Manufacturing Energy Consumption

Li Xiaoxia¹, Huang Xiaomao², Liu Jianxiao¹, Liu Feng¹

(1. College of Information, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: To reduce the energy consumption in the manufacturing process by optimizing job-shop scheduling, the process of the machines' energy consumption was divided into different stages. The energy consumption of each stage was analyzed and modeled. The job-shop scheduling problem model for manufacturing energy consumption was developed. On the basis of the developed problem model, minimizing manufacturing energy consumption was used as the optimization goal and a simulated annealing algorithm was adopted to optimize the job-shop scheduling. A job scheduling scheme was generated randomly according to the coding rule. The job scheduling scheme generated randomly was used as the initial solution, a simulated annealing algorithm was adopted to achieve the optimization of manufacturing energy consumption and the optimal job-shop scheduling scheme was obtained. The feasibility and effectiveness of the proposed method was verified by simulation experiments.

Keywords: job-shop scheduling; manufacturing energy consumption; sustainable manufacturing; simulated annealing

引言

近年来,在经济、环境以及法令法规的驱动下,



收稿日期: 2014-08-21 修回日期: 2014-12-14;
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51205150);
作者简介: 李小霞(1979-),女,河南南阳,博士,讲师,
研究方向为计算机集成制造系统和可持续设计与制造;
黄小毛(1983-),男,湖北浠水,博士,副教授,研
究方向为先进制造技术和现代农业装备设计与测控。

制造过程中的能耗问题受到了越来越多的关注^[1]。一方面,不断增加的产品需求、不断飙升的能源价格以及消费者逐步增强的绿色消费意识,都促使制造商不得不考虑降低制造能耗以提高竞争力;另一方面,为了节约能源保护环境实现可持续发展,不同国家或地区纷纷出台的相关法规条例^[2-4],对制造能耗进行限制。可见,如何降低制造能耗已经成为实现可持续制造所面临的一个关键问题。

<http://www.china-simulation.com>

目前, 针对制造能耗的研究主要集中于 4 个层面: 机器设计、产品开发、加工过程和制造系统。前两个层面主要从设计更节能的机器^[1,4]和降低单位产品加工能耗^[5]的角度分别进行节能研究。第三个层面的研究大多致力于建立能耗模型, 实现对制造能耗的评估和预测。在已有的能耗模型中, 以文献[6-7]给出的模型最具代表性, 然而这些模型仅考虑了材料切削过程中的能耗, 因此不能用于调度环境实现总能耗优化。第四个层面的研究主要通过仿真和优化的方法来提高制造系统能效。该层面的研究以文献[8]给出的单机调度能耗优化模型和文献[9]给出的柔性车间能效调度方法最具代表性。然而, 这些工作均局限于某一特定的领域, 对于涉及多种机器和工件的调度环境并不适用。

另据研究表明, 直接用于加工工件的能耗仅占制造总能耗的很小一部分^[10], 尤其在大规模制造环境中, 85%的能耗并未直接用于加工工件^[11]。因此, 通过车间作业调度优化多个工件在多台机器上的加工过程, 对于降低制造能耗具有不可忽视的作用。然而, 现有的车间作业调度方法主要以加工时间和成本为优化目标^[12-13], 并未考虑制造能耗。

为了通过车间作业调度降低能耗实现可持续制造, 本文在现有研究的基础上, 提出了面向低制造能耗的车间作业调度模型, 以能耗为优化目标, 采用模拟退火算法对制造过程中的能耗进行优化, 并通过仿真实验, 验证了方法的可行性和有效性。

1 面向低制造能耗的车间作业调度问题描述及建模

1.1 面向低制造能耗的车间作业调度问题描述

如图 1 所示, 假设有 m 台机器, $M = \{M_1, M_2, \dots, M_m\}$ n 个待加工工件, $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ 工件 P_i 对应多道工序, $O_i = \{O_{i1}, O_{i2}, \dots, O_{ik}\}$ $k \geq 1$, 矩阵 JM 中存放每道工序可选用的加工设备, 即 JM 中任一元素 JM_{ij} , $1 \leq i \leq n$, $1 \leq j \leq k$, 表示第 i 个工件的第 j 道工序可选用的设备, 则可将面向低制造能耗的车间作业调度问题的求解目标描述如下:

在满足加工约束条件的基础上, 确定 m 台机器上 n 个工件的加工顺序, 并使 m 个机器完成 n 个工件的加工所消耗的能量达到最优。这里的加工约束条件一般包括:

- (1) 各工件之间无优先级;
- (2) 每个工件的各工序之间存在先后关系, 每道工序必须等到它前面的工序加工完毕后才能加工;
- (3) 在任一时刻, 每台机器只能执行一道工序, 且每道工序只能在一台机器上执行;
- (4) 每台机器在加工工序的过程中不会发生故障, 加工不会中断。

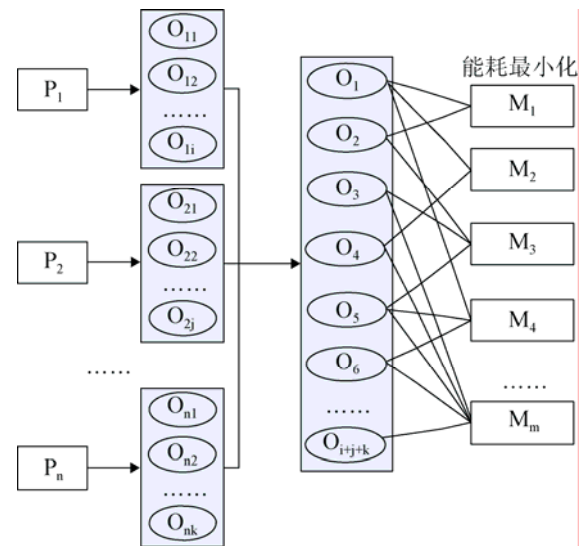


图 1 面向低制造能耗的车间作业调度问题描述

1.2 面向低制造能耗的车间作业调度问题建模

如前所述, 面向低制造能耗的车间作业调度以制造能耗为优化目标, 确定 m 台机器上 n 个工件的加工顺序, 即确定调度方案。根据所确定的调度方案, 一台机器从启动到关闭, 先后可能加工一道或多道工序。在此过程中, 若机器正在执行分配在其上的某道工序, 则机器处于工作阶段; 若上一道工序已完成, 而下一道工序尚未到来, 则机器处于闲置阶段; 当下一道工序到来时, 若需进行刀具更换, 则机器处于准备阶段。故而, 如图 2 所示, 可将第 i 台机器的耗能过程分为五个阶段: 启动阶段、闲置阶段、准备阶段、工作阶段和关闭阶段。

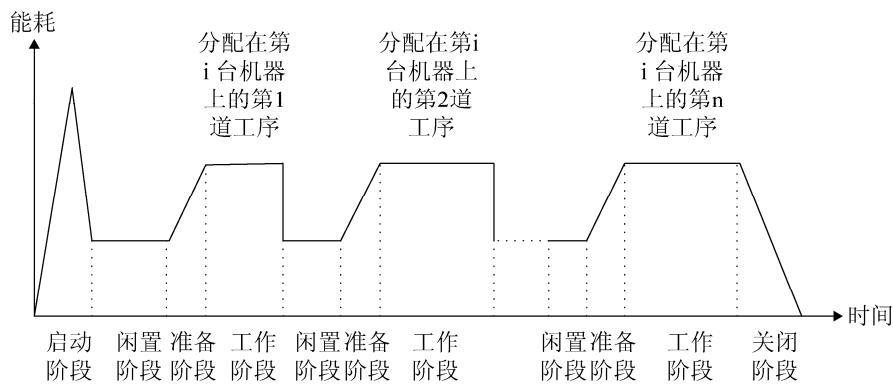


图 2 机器能耗的各阶段

根据以上对机器耗能过程的阶段划分，一台机器在调度过程中的能耗由相应 5 个阶段的能耗构成，即：启动阶段能耗 $E(M_i).startup$ 、闲置阶段能耗 $E(M_i).idle$ 、准备阶段能耗 $E(M_i).preparation$ 、工作阶段能耗 $E(M_i).working$ 和关闭阶段能耗 $E(M_i).shutdown$ 。各阶段能耗的计算公式如下：

$$E(M_i).startup = \int_{T_i}^{T_{i-1}} P_{startup}(M_i) dt \quad (1)$$

$$E(M_i).idle = P_{idle}(M_i) \times T_{idle}(M_i) \quad (2)$$

$$E(M_i).preparation = \sum_{j=1}^n \int_{T_{i-2}}^{T_{i-3}} P_{preparation}(M_i) dt \quad (3)$$

$$E(M_i).working = \sum_{j=1}^n E_j(M_i).working \quad (4)$$

$$E(M_i).shutdown = \int_{T_{i-4}}^{T_{i-5}} P_{shutdown}(M_i) dt \quad (5)$$

公式(1)中的 T_i 和 T_{i-1} 分别是启动阶段的起始和终止时间， $P_{startup}(M_i)$ 为第 i 台机器在启动阶段的功率。公式(2)中的 $P_{idle}(M_i)$ 为第 i 台机器在闲置阶段的功率， $T_{idle}(M_i)$ 为第 i 台机器在整个加工过程中的总闲置时间，可通过公式(6)计算得到。

$$T_{idle}(M_i) = \sum_{j=1}^n T_{j,j+1} \quad (6)$$

其中： n 为调度方案分配在第 i 台机器上执行的工序个数； $T_{j,j+1}$ 为在第 i 台机器在完成第 j 道工序与开始第 $j+1$ 道工序之间的空闲时间。

公式(3)中的 j 为在第 i 台机器上执行的工序序

号， n 为在第 i 台机器上执行的工序个数， T_{i-2} 和 T_{i-3} 分别是为第 j 道工序做准备的起始和终止时间，这里所进行的准备工作主要是指刀具的更换， $P_{preparation}(M_i)$ 是机器在准备阶段的功率。

公式(4)中的 $E_j(M_i).working$ 是第 i 台机器执行分配在其上的第 j 道工序的能耗，可通过公式(7)计算得到。

$$E_j(M_i).working = V_j \times SEC \quad (7)$$

其中： V_j 为第 j 道工序的切削体积； SEC 为切削 1 cm^3 材料的能耗，根据文献[12]， SEC 可通过公式(8)计算得到。

$$SEC = C_0 + \frac{C_1}{MRR} \quad (8)$$

其中，参数 C_0 和 C_1 随机器的不同而不同，文献[10]中提供了多台机器的相应参数可供参考， MRR 为机器工作阶段的材料移除率，可通过加工过程中所采用的切削深度、切削宽度以及切削速度获取。

公式(5)中的 T_{i-4} 和 T_{i-5} 分别是机器在关闭阶段的起始和终止时间， $P_{shutdown}(M_i)$ 为关机功率。

在以上公式的基础上，可得第 i 台机器在相应调度方案下的总能耗 $E(M_i)$ 的计算公式如下：

$$E(M_i) = E(M_i).startup + E(M_i).idle + E(M_i).preparation + E(M_i).working + E(M_i).shutdown \quad (9)$$

因此, 在相应调度方案下, m 台机器的总能耗 $E(\text{Group})$ 可以通过公式(10)计算得到。

$$E(\text{Group}) = \sum_{i=1}^m E(M_i) \quad (10)$$

根据对面向低制造能耗的车间作业调度问题的分析描述可知, 在求解面向低制造能耗的车间作业问题时, 采用最小化制造能耗 $E(\text{Group})_{\min}$ 作为调度目标, 应满足公式(11)。

$$E(\text{Group})_{\min} = \min(E(\text{Group})) \quad (11)$$

2 模拟退火算法

模拟退火算法(*Simulated Annealing, SA*)是一种典型的启发式算法, 其通过模拟金属退火的过程搜索最优解。目前模拟退火算法已经应用于解决多种组合优化问题, 得到了较好的优化结果, 展现出了其较强的局部搜索能力。为了发挥模拟退火算法的优势, 本文将模拟退火算法应用于面向低制造能耗的车间作业调度优化。

2.1 编码设计

采用基于待加工工件对应工序的编码方式: $S = [s_{11} s_{12} \dots s_{1K} s_{21} s_{22} \dots s_{2K} s_{31} s_{32} \dots s_{3K}]$ 。编码的总长度为 $3 \times K$, 其中 K 为所有待加工工件对应的工序数之和。

编码共由 3 个部分组成, 第 1 部分 $[s_{11} s_{12} \dots s_{1K}]$ 用于存放待加工工件的序号, 工件序号出现的次数即为工件的工序编号, 第 2 部分 $[s_{21} s_{22} \dots s_{2K}]$ 用于存放第 1 部分中各工序所选用的机器在矩阵 JM 中对应子矩阵第 1 行的序号, 编码中第 j ($j < K$) 个位置的工序选用的机器号存放在编码的第 $j+K$ 位置上, 编码的第 3 部分 $[s_{31} s_{32} \dots s_{3K}]$, 存放的是第 1 部分中各工序选用的刀具在矩阵 JM 中对应子矩阵第 2 行的序号, 编码中第 j ($j < K$) 个位置的工序选用的刀具号存放在编码的第 $j+2 \times K$ 位置上。需要说明的是, 矩阵 JM 中任一元素 JM_{ij} ($1 \leq i \leq n$, $1 \leq j \leq k$) 的第 1 行和第 2 行中分别存放第 i 个工件的第 j 道工序可选用的机器和刀具的序号。

如图 3 所示, 由文献[14]提供的 3 个测试工件组成工件集(P_1, P_2 和 P_3), 这 3 个工件对应的工序数分别为 14, 12 和 12, 其编码长度为 114。其中, 前 38 位对应为各工件的工序, 中间 38 位和后 38 位分别为前 38 位相应工序选用的机器号和刀具号。

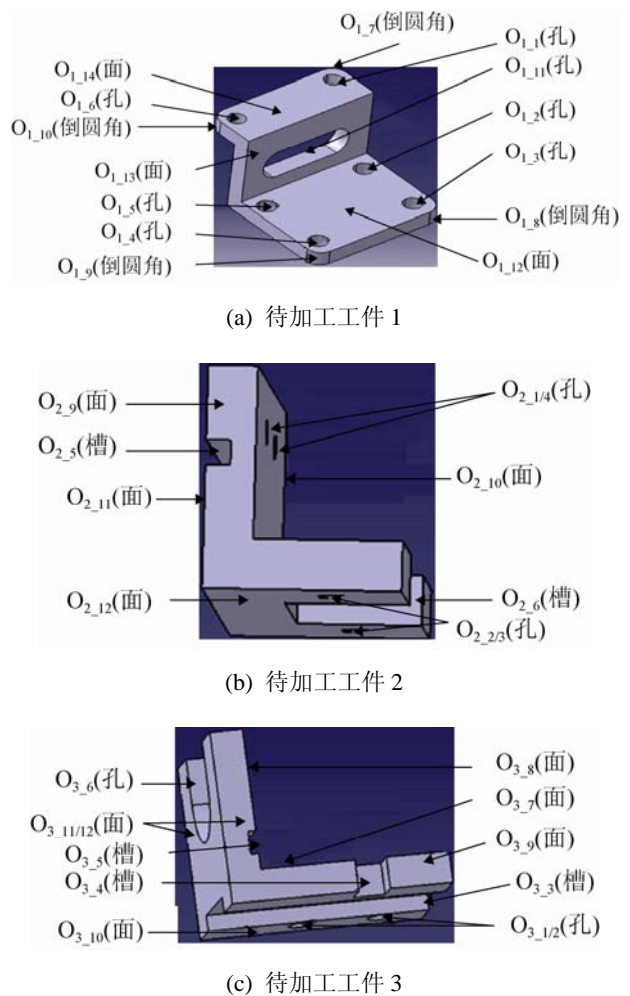


图 3 待加工工件集

2.2 算法的关键步骤

模拟退火算法是通过模拟金属退火的过程实现寻优的, 具体包括以下几个关键步骤:

步骤 1: 初始化。将随机生成的调度方案作为模拟退火算法的初始调度方案 S_0 , 并设置初始温度 T_{start} 和终止温度 T_{end} , 将 T_{start} 作为当前温度 T 。

步骤 2: 生成新的调度方案。首先随机选择 2

个工件所对应的两道工序对当前调度方案 S 的相应基因进行交换产生一种新解, 另随机选择一个工件的某一道工序, 改变 S 中该工序所选用的机器和刀具, 从而产生另一种新解, 然后, 对这两个新解的适应度值进行比较, 留下较优的解作为新的调度方案 S 。

步骤 3: 判断是否接受新生成的调度方案。若新生成的调度方案 S' 比当前调度方案 S 更优, 则用 S' 替代 S , 否则, 依据 *Metropolis* 准则判断是否采用 S' 代替 S 。具体步骤如下:

```

 $\Delta = f(S') - f(S)$ 
If  $\Delta \leq 0$  ||  $e^{-\frac{abs(\Delta)}{T}} > rand$ 
 $S = S'$ 
End
 $T = \alpha \times T$  //  $0 < \alpha < 1$ 

```

步骤 4: 判断 T 是否 $\leq T_{end}$, 若是, 则重复执行步骤 2-3, 否则, 结束退火。

3 仿真实验与实验结果

3.1 仿真实验设计

为了验证所提出方法的有效性, 分别以 3/4 和 3/8 车间作业调度为测试用例, 进行了两组仿真实验。两组测试用例分别来源于文献[14]和文献[15]中提供的待加工工件, 两组测试用例中选用的机器均来源于文献[6], 其中机器 M_1 - M_8 的能效依次降低。

仿真实验在 *matlab* 中进行, 实验中每道工序可选用的机器和刀具均存放在矩阵 JM 中, 即 JM 中任一元素 JM_{ij} ($1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq k$), 的第 1 行和第 2 行分别用于存放第 i 个工件的第 j 道工序可选用的机器和刀具。另外, 实验中每道工序在相应设备上的加工时间存放在矩阵 T 中, 即 T 中任一元素 T_{ij} ($1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq k$), 存放的是第 i 个工件的第 j 道工序在相应设备上加工所需的时间。

在实验中, 对上一节给出的模拟退火算法进行了实现, 算法中采用的初始温度和终止温度分别设

置为 1 000 和 $1.7479e-43$, 降温速度设置为 0.9。为了验证选用模拟退火算法的优势, 同时实现了遗传算法和由文献[9]提出的遗传-模拟退火混合算法。遗传算法中采用的交叉概率、变异概率、最大迭代代数及代沟分别为 0.8, 0.6, 1 000 和 0.9。遗传-模拟退火算法是上述 2 种算法的混合, 包括 2 个阶段, 第 1 阶段采用遗传算法, 最大迭代代数为 500, 其他参数不变; 第 2 阶段将第 1 阶段优化所得的最优调度方案作为初始调度方案, 采用模拟退火算法, 实现进一步优化, 终止温度设置为 $1.3221e-20$, 其他参数不变。

3.2 实验结果分析

图 4~5 分别给出了采用模拟退火算法, 对能耗的优化过程, 以及在对能耗优化的同时, 加工时间和机器使用的变化趋势(为了更清楚显示结果, 图中将时间和机器使用的情况均放大了 3 倍)。从图 4 可以看出, 能耗与时间呈现出相似的变化趋势, 这是由于通过调度减少机器和刀具的更换次数, 在降低模型中准备阶段能耗的同时, 也减少了加工时间。然而, 除准备阶段能耗外, 能耗模型中的其他阶段能耗受到机器功率和材料移除率等因素的影响, 因此, 能耗与时间的变化趋势并不完全一致。在图 5 中, 能耗与机器使用率呈现出相反的变化趋势, 这反映出, 频繁使用高效机器在降低模型中准备阶段和工作阶段的能耗的同时, 也带来了机器资源的不均衡使用。如图 6 和 7 所示, 能耗与时间的相似变化趋势以及能耗与机器使用的冲突关系在第 2 组实验中再次得到了验证。

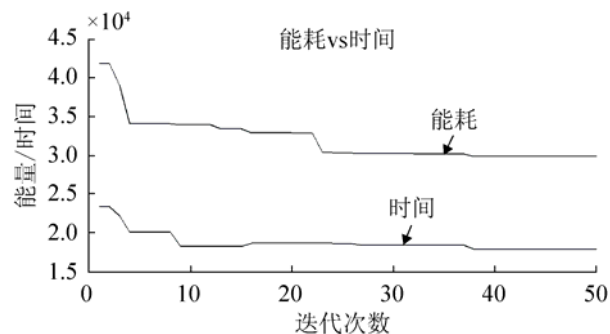


图 4 第一组实验中能耗与时间变化趋势比较

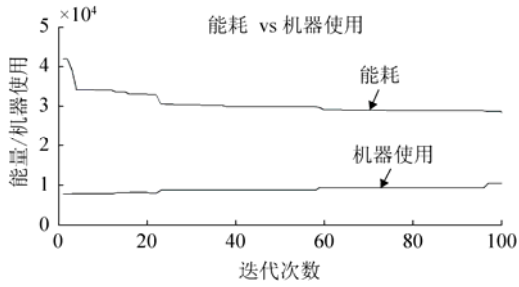


图 5 第一组实验中能耗与机器使用趋势比较

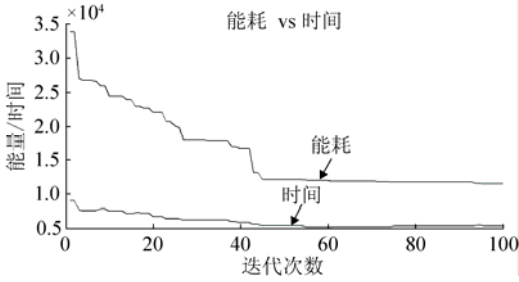


图 6 第二组实验中能耗与时间变化趋势比较

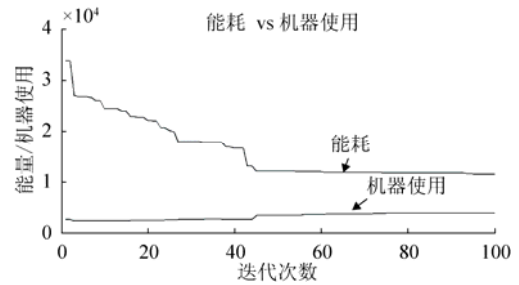


图 7 第二组实验中能耗与机器使用趋势比较

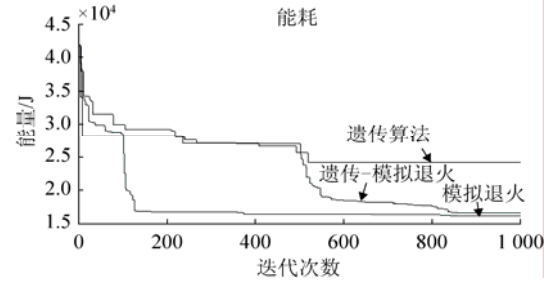


图 8 第一组实验制造能耗优化过程

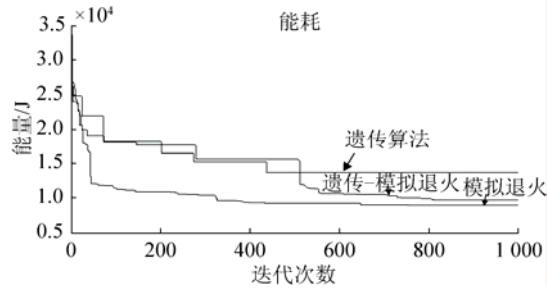
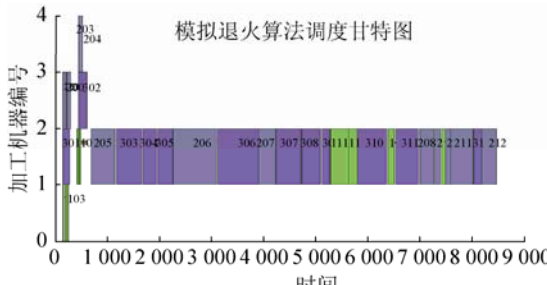
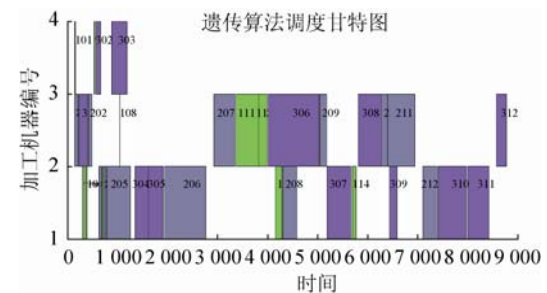


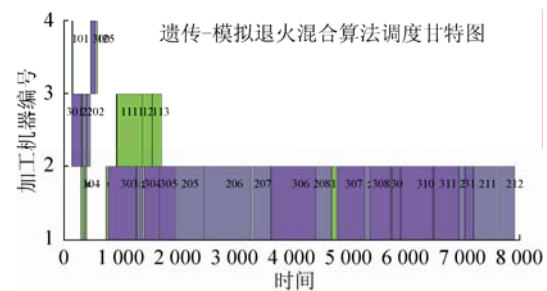
图 9 第二组实验制造能耗优化过程



(a) 模拟退火算法调度甘特图



(b) 遗传算法调度甘特图

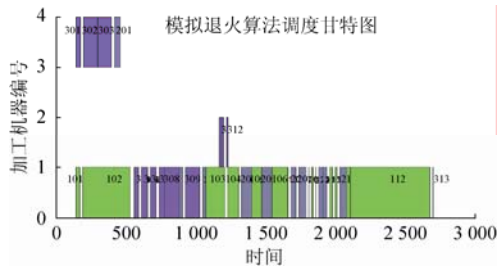


(c) 遗传-模拟退火混合算法调度甘特图

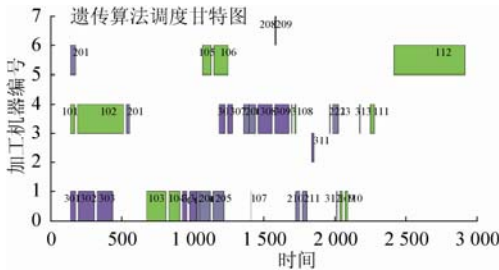
图 10 第 1 组实验中各算法调度甘特图

图 8~9 同时给出了模拟退火、遗传算法以及遗传-模拟退火混合优化算法, 实现两组测试用例中待加工工件所有工序的调度优化过程。从实验结果上看, 模拟退火算法能够得到比另外两种算法更好的优化结果。与两组实验结果相对应的调度甘特图分别如图 10~11 所示, 通过比较可以发现, 开关机次数、待机时间、机器更换次数越少, 使用高效率机器越频繁的调度方案所对应的能耗越少。两组实验同时验证了, 所提出的五阶段能耗模型的可行性和有效性。

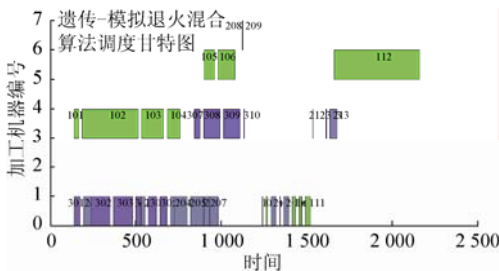
与已有的用于评估切削能耗的模型相比, 所给出的模型实现了对调度过程总能耗的评估, 这其中不仅包含切削能耗, 还包括调度过程的其他阶段能耗。与应用与特定领域的能耗模型相比, 本模型将适用范围扩展至多机多工件的调度环境。



(a) 模拟退火算法调度甘特图



(b) 遗传算法调度甘特图



(c) 遗传-模拟退火混合算法调度甘特图

图 11 第 2 组实验中各算法调度甘特图

4 结论

本文建立了面向低制造能耗的车间作业调度模型,并在所建立模型的基础上,以最小化制造能耗为优化目标,采用模拟退火优化算法,实现制造能耗的最小化,最后通过仿真实验验证了所提出方法的有效性。然而,在能耗的优化过程中,将制造能耗作为唯一优化目标,并未考虑平衡机器使用、加工时间等其他优化目标,实现多目标优化;另外,对于制造过程中可能发生的动态因素(例如:机器故障、作业取消等)也未予以考虑,因此多目标优化和面向低制造能耗的动态车间作业调度还有待今后进行更深入研究。

参考文献:

[1] Dufloy J R, Sutherland J W, Dornfeld D. Towards energy and resource efficient manufacturing: a processes and systems approach [J]. CIRP Annals-Manufacturing

Technology (S0007-8506), 2012, 61(2): 587-609.

[2] EN 16001: 2010, Energy Management Systems-Requirements with Guidance for Use [S].

[3] ISO 14044: 2006, Environmental Management - Life Cycle Assessment - Requirements and Guidelines [S].

[4] ISO 14955-1: 2014, Environmental Evaluation of Machine Tools-Part 1: Design Methodology for energy-efficient Machine Tools [S].

[5] Seow Y, Rahimifard S. A framework for modelling energy consumption within manufacturing systems [J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology (S1755-5817), 2011, 4(3): 258-264.

[6] Li W, Kara S. Unit Process Energy Consumption Models for Manufacturing Processes [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology (S0007-8506), 2011, 60(1): 37-40.

[7] Li L, Yan J, Xing Z. Energy requirements evaluation of milling machines based on thermal equilibrium and empirical modeling [J]. Journal of Cleaner Production (S0959-6526), 2013, 52(1): 113-121.

[8] Mouzon G, Yildirim M B. A framework to minimise total energy consumption and total tardiness on a single machine [J]. International Journal of Sustainable Engineering (S1939-7038), 2008, 1(2): 105-116.

[9] Dai Min, Tang Dunbing, Giret A. et al. Energy-Efficient Scheduling for a Flexible Flow-Shop Using an Improved Genetic-Simulated Annealing Algorithm [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing (S0736-5845), 2013, 29(5): 418-429.

[10] Li W, Zein A, Kara S, et al. An Investigation into Fixed Energy Consumption of Machine Tools [C]// Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering. Germany: springer (Jürgen Hesselbach, Christoph Herrmann), 2011: 268-273.

[11] Institute for European Environmental Policy 2010: Energy Efficiency in the EU: an introduction [R/OL]. (2012-02-20) [2014-08-21]. http://www.lowcarbonoptions.net/Downloads/files/Energy_Efficiency_in_the_EU.pdf.

[12] Wang Jinfeng, Fan Xiaoliang, Wan Shuting. A Graph-based approach for flexible job-shop scheduling problems [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2013, 25(10): 2499-2502.

[13] 徐新黎, 郝平, 王万良. 多Agent动态调度方法在染色车间调度中的应用 [J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(3): 611-620.

[14] Zhang Y F, Saravanan A N, Fuh J Y H. Integration of Process Planning and Scheduling by Exploring the Flexibility of Process Planning [J]. International Journal of Production Research (S0020-7543), 2003, 41(3): 611-628.

[15] Li W D, McMahan C A. A simulated annealing-based optimization approach for integrated process planning and scheduling [J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing (S0951-192X), 2007, 20(1): 80-95.