

# 作业车间调度问题综述

The Summarize of Job Shop Scheduling Problem

张守胜

Zhang Shousheng

(江西财经大学信息管理学院, 江西 南昌 330013)

(School of Information Management, Jiangxi University of Finance & Economics, Jiangxi Nanchang 330013)

**摘要:** 介绍了作业车间调度问题的理论、模型, 对当前求解作业车间调度问题的各种方法进行分类并逐一进行分析比较, 指出各种方法的优缺点。总结了今年在该领域取得的研究成果和存在的问题, 并对今后的发展方向进行了讨论。

**关键词:** 作业车间调度; 启发式; 调度算法; 近似算法

**中图分类号:** C931.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1671-4792-(2007)6-0080-05

## 1 引言

作业车间调度问题(JSSP)是一个NP难问题, 该问题是实现制造系统运筹技术, 交通运输及邮电通讯技术, 管理技术与组合优化技术发展的核心。随着现代工业的发展, 企业的生产正朝着多类型、小批量、有着不同完工时间和产品要求的方向发展, 从而使得企业的生产作业计划安排工作难度加大。寻找高效的调度算法, 可大大提高生产效益和资源利用率, 进而增强企业的竞争能力, 所以对该问题的研究具有重要的理论和实用价值。本文介绍了作业车间调度理论和模型以及对当前求解问题的方法进行分类, 总结了在该领域取得的成绩以及存在的问题, 并进一步讨论今后的研究方向。

## 2 作业车间调度问题的描述

作业车间调度问题可以描述如下: 给定一组作业, 要求在一组机器上加工完成, 要满足以下的约束条件:(a) 每个作业在机器上的加工次序给定;(b) 每台机器在任何时刻最多只能加工一个作业; 一个作业在一台机器上的加工称为一道工序, 工序加工的时间是固定的且工序一旦开始不能被中断。要找使所有作业加工完成的时间(makespan)最短的调度。

此外, 流水作业调度问题(FSSP)是JSSP问题的特殊形式(即所有工件有相同的加工工序), 柔性作业车间调度问题(FJSP)突破了资源惟一性限制, 每个工序可由多个不同的机器完成, 从而使作业车间调度问题更加符合生产实践。本文主要研究的是经典车间作业调度问题。

## 3 作业车间调度问题的模型

### 3.1 整数规划模型

整数规划模型由Baker<sup>[1]</sup>提出, 下面简单给出一个  $n / m / G / C_{max}$  调度问题的常用数学描述。

$$\begin{aligned} \text{Min } \max \{ \max c_{ik} \} & \quad (3-1-1) \\ \text{s.t. } c_{ik} - p_{ik} + M(1 - a_{ih}) & \geq c_{ih}, i=1, 2, \dots, n, h, k=1, 2, \dots, m \\ c_{jk} - c_{ik} + M(1 - x_{ijk}) & \geq p_{jk}, i, j=1, 2, \dots, n, k=1, 2, \dots, m \\ c_{ik} & \geq 0, i=1, 2, \dots, n, k=1, 2, \dots, m \\ x_{ijk} & = 0 \text{ 或 } 1, i, j=1, 2, \dots, n, k=1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (3-1-2)$$

其中, 式(3-1-1)表示目标函数, 即Makespan; 式(3-1-2)表示工艺约束条件决定的各工件的各操作的先后加工顺序以及加工各工件的各几的先后顺序。式中, 符号  $c_{ik}$  和  $p_{ik}$  分别为  $i$  工件在机器  $k$  上的完成时间和加工时间;  $M$  是一个足够大的正数;  $a_{ih}$  和  $x_{ijk}$  分别为指示系数和指示变量, 其意义为

$$a_{ih} = \begin{cases} 1 & \text{若机器 } h \text{ 先于机器 } k \text{ 加工工件 } i \\ 0 & \text{非上述情况} \end{cases} \quad (3-1-3)$$

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{若工件 } i \text{ 先于工件 } j \text{ 在机器 } k \text{ 上加工} \\ 0 & \text{非上述情况} \end{cases} \quad (3-1-4)$$

### 3.2 线性规划模型

Adams提出的线性规划模型<sup>[2]</sup>假定:  $J = \{1, 2, \dots, n\}$  代表工件集合;  $M = \{1, 2, \dots, m\}$  代表机器集合;  $V = \{0, 1, \dots, r+1\}$  表示工序集合, 其中, 0和 $r+1$ 分别代表开始和结束的哑工序;  $A$ 代表受条件 $a$ 限制的工序对的集合;

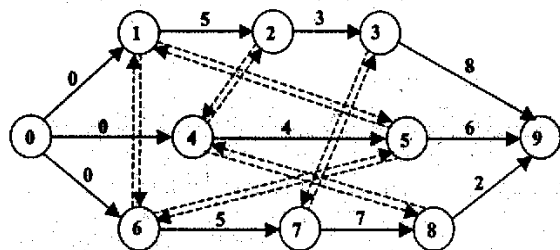
$V_k$  代表在机器  $k$  上加工的工序对的集合;  $E_k$  代表在机器  $k$  上加工的工序对, 因此要受条件  $b$  限制;  $d_v$  和  $t_v$  分别代表工序  $v$  的加工时间和开工时间。工序 0 和工序  $r+1$  的加工时间都是 0。则作业车间调度问题可以描述为:

$$\begin{aligned} \min \quad & t_{r+1} \\ t_j - t_i & \geq d_i \quad (i, j \in A) \\ t_j - t_i & \geq d_i \vee t_i - t_j \geq d_j \quad (i, j \in E_k, k \in M) \quad (3-2-1) \\ t_i & \geq 0 \quad (i \in v) \end{aligned}$$

任何满足式 (3-2-1) 的一组  $t_i (i = 0, 1, \dots, r+1)$  都称为一个调度, 问题的目标就是要找出一个  $t_{r+1}$  尽可能小的调度。

### 3.3 联络图模型

联络图是描述 JSSP 的常用工具<sup>[3]</sup>。对于  $n$  个工件、 $m$  台机器 (共  $N$  个操作) 的 JSSP, 所对应的联络图  $G=(V, A, E)$  如图一所示。其中,  $V$  为所有操作构成的顶点集, 包括 0 和  $N+1$  两个虚拟操作 (分别表示加工开始和结束);  $A$  为  $n$  条子边构成的边集, 子边 (实线) 表示某工件按约束条件在所有机器上从开始到结束的加工路径;  $E$  为  $m$  条子边构成的弧集, 子弧 (虚线) 表示同一机器上加工各操作的连接。



图三 一个作业、3个机器的联络图

## 4 求解作业车间调度问题的方法

作业车间调度算法大致分为两类, 一类是精确算法, 另一类是近似算法, 也称做启发式算法。早期的调度算法致力于寻求问题的精确解, 典型算法是整数规划法和分支定界法; 近似算法主要包括优先分配规则、拉格朗日松弛法、人工智能、神经网络、转换瓶颈程序、局域搜索方法。

### 4.1 精确算法

二十世纪六十年代, 这个时期人们倾向于  $P=NP$ , 因此就努力去设计具有多项式时间复杂度的确定型算法, 以期求出该问题的最优解, 精确算法能得到问题的一个最优解。整数规划法因为其变量和约束条件个数太多, 要实现它几乎是不现实的。对于一个作业数为 6、机器数为 5 的算例, 一个经过改进的整数规划算法还有多达 105 个变量和 174 个约束条件<sup>[4]</sup>。而用穷举法也是不现实的,  $n$  个作业有  $n!$  种加工顺序, 从而  $m$  台机器加工  $n$  个作业就有  $(n!)^m$  种加工顺序。因此采用新的枚举技术, Lomnicki 提出分支定界法<sup>[5]</sup>和 Golomb 等提出回溯算法<sup>[6]</sup>。但这些算法在人们可以接受的时间范围内,

它们所能够计算的实例的规模很有限, 实验报告表明, 即使使用当今的大型机器, 通常不超过 100 个工序。

### 4.2 近似算法

二十世纪七十年代后, 人们不再追求用精确的算法求出问题的最优解, 而是通过近似算法在可以接受的时间内寻求问题的满意解, 因此提出用启发式方法来解决这个问题。

#### 4.2.1 优先分配规则

优先分配规则是最简单的启发式方法, 最早的分派规则由 Jackson<sup>[7]</sup>和 Smith<sup>[8]</sup>等提出, Giffer 和 Thompson 的算法<sup>[9]</sup>是优先规则调度算法的典型代表。1977 年 Panwalker 和 Iskander 归纳了 100 多个<sup>[10]</sup>。最主要的有以下 8 个:

SPT (Shortest Processing Time) 法则, 即优先选择加工时间最短的工序;

SLT (Longest Processing Time) 法则, 即优先选择加工时间最长的工序;

FCFS (First Come First Served) 法则, 即先来先服务;

MWKR (Most Work Remaining) 法则, 即优先选择余下加工时间最长的作业;

LWKR (Least Work Remaining) 法则, 即优先选择余下加工时间最短的作业;

FA (First Available) 法则, 即优先选择立即可以被加工的工序;

MOPNR (Most Operation Remaining) 法则, 即优先选择余下工序数最多的作业;

RANDOM 法则, 即随机地挑选一道工序。

这些规则按照某种方法对每一个将有可能被选取的操作作出相应的评价, 将一个数值作为满意度赋予该操作, 这样每一个可能被选取的操作都有一个满意度值, 再根据问题的需要选择满意度适宜的操作, 这类算法可以找到较好的近似解。但使用单一的优先规则得到的解不能满足要求, 如何把多个规则进行融合, 设置一个合理的满意度值是近期研究的方向, 同时, 为了得到更好的近似解, 研究者们都把基于优先分配规则得到的近似解作为初始解, 如禁忌搜索的初始解。

#### 4.2.2 拉格朗日松弛法

拉氏松弛技术作为一种求解复杂优化问题的近似算法, 由于其能在较短的时间内获得高质量的次优解, 并能进行性能评价等优点, 近年来受到学术界的广泛重视。将整数规划问题 IP 按照拉格朗日松弛方法转化为拉格朗日松弛, 扩大问题的解空间, 拉氏松弛算法得出问题的可行解是原问题的最优解的上界, 再求整数规划问题的相应的对偶问题的解, 它是原问题的最优解的下界, 最后通过解的转化使之成为原问题的可行解。文献<sup>[11]</sup>用它解决了单机调度与多台并行机调度问题。

#### 4.2.3 人工智能

80年代出现的人工智能和专家系统在调度研究中占据重要地位,可以产生比优先规则更复杂的基于对整个调度系统的启发式,并能从特殊数据结构中获取大量信息,缺点是计算比较耗时。ISIS<sup>[12]</sup>是最早基于AI技术解决特定JSSP的专家系统之一,使用约束指导的搜索方法,其目标约束基于交货期和在制品,把资源的处理能力作为物理约束。AI技术对如何协调各代理机制,目前还没有统一的设计和思路,对作业调度的集中化和分散化思想还在讨论之中。

#### 4.2.3 神经网络

神经网络应用于调度问题已有十几年的历史,目前应用最多的是BP网和Hopfield网。Y.P.S.Foo,和Y.Takefuji最早提出用Hopfield网求解JSP问题<sup>[13]</sup>,是一个比较有影响的方法。1999年Rovithakis.G.A<sup>[14]</sup>提出了神经网络用于FMS系统。2000年Yang.S.X<sup>[15]</sup>等采用了满足约束条件的神经网络和启发式算法用于通用车间的调度。但神经网络通过训练和学习来寻找输入和输出的关系,随着问题的规模增大,网络的规模也急剧地增大。把神经网络与其它启发式方法相结合仍然是现在研究的热点。

#### 4.2.5 转换瓶颈程序

Adams, Balas和Zawack在1988年首先提出了瓶颈机算法<sup>[2]</sup>(Shifting Bottleneck Machine Procedure)。他们提出一个给机器确定瓶颈度并优先给瓶颈度最高的机器排序(这里的给机器排序就是给在同一台机器上加工的工序确定一个先后次序)的方法。当用这种方法给所有的机器都排序后,整个调度问题就解决了。为了给机器排序,对于每一台还没有排序的机器都在松弛原问题之后来求解这个机器的单机调度问题,即每次只考虑一台机器的调度问题。用这些单机调度的所得到的时间跨度的大小来给这些还没有排序的机器确定优先级,优先级最高的机器的瓶颈度最高。优先给瓶颈度最高的机器排序。每当一台新的机器排序完成之后,对那些已经排好序的机器进行再优化,这样有可能通过再求解一次单机调度问题使最终求解的结果更优。当所有的机器的顺序都确定后,就可以很容易的求出调度的时间跨度了。但SB算法在计算大规模的( $10 \times 50$ )算例时出现得不到解的问题。黄文奇和尹爱华<sup>[16]</sup>提出两种新方法:一是用了改进的Calier单机调度方法,使用带扰动的Schrage算法求解单机调度问题,对转换瓶颈算法的改进保证算法一定能得到可行解,二是带部分回溯策略的改进算法。黄志等<sup>[17]</sup>对转换瓶颈算法的不可行解进行了探讨,找到一个反例证明用Calier算法做单机调度产生不可行解的情况。因此,转换瓶颈算法虽然是一个很好的启发式方法,但它在用Calier算法做单机调

度求解JSP问题时可能会出现不可行解。

#### 4.2.6 局域搜索方法

##### (1) 遗传算法

Davis<sup>[18]</sup>首次将遗传算法(GA)用于解决调度问题。它将问题的求解表示成染色体的适者生存过程,通过染色体群的一代代不断进化,包括选择、交叉和变异等操作,最终收敛到“最适应环境”的个体,从而求得问题的最优解或满意解。近年来,GA得到了较为广泛和深入的研究。苏子林<sup>[19]</sup>提出了采用海明距离的概念对种群进行修正,在进化过程中,不断淘汰较差的个体,不断引入修正种群,保持了种群的多样性。李钢等<sup>[20]</sup>提出的是混合的遗传算法,通过与其它算法的结合弥补在局部搜索和早熟方面的缺陷。许晓栋等<sup>[21]</sup>提出一种基于免疫原理的遗传算法。当前使用的编码方法主要有9种<sup>[22]</sup>,研究者们通过对遗传算子进行设计来不断改进。GA原理和操作简单,通用性强,不受限制性条件的约束,且具有隐含并行性和全局解空间搜索能力,但GA的早熟和搜索效率低问题是它的主要缺陷。

##### (2) 模拟退火算法

模拟退火算法<sup>[23]</sup>(Simulated Annealing Algorithms, SA)是1982年Kirkpatrick等人将金属热加工中的退火工艺的思想应用于组合优化问题领域而提出的一种新的搜索技术。SA算法采用Metropolis接受准则,以一组冷却进度表参数控制算法过程,可以在多项式时间内找到近似最优解。SA算法是针对局部搜索算法(Local Search Algorithm)改进而提出的,它是一种通用、高效、健壮、可行的拟物型随机近似算法。SA算法可以较容易地并行<sup>[24][25]</sup>实现,赵良辉等<sup>[26]</sup>对该算法进行了改进,提出了记忆回火和快速退火的模拟退火算法,分别适合于求解精度要求较高的调度和大规模的调度,同时还与遗传算法相结合组成遗传退火算法。但如果要得到一个高质量的近似解,需要花很长时间进行退火<sup>[27]</sup>,SA能较好地避免局部最优,但算法的收敛速度很慢,搜索空间过于庞大下降温度难以掌握。这成为进一步应用的阻力

##### (3) 禁忌搜索方法

禁忌搜索(Tabu Search)是一个为优化组合问题寻求近似最优解的启发式算法。它由Glover提出并形式化<sup>[28]</sup>,Barnes and Nowicki对TS作了改进<sup>[29][30]</sup>。TS是为跳出局部最优而设计的一种确定性算法,在陷入局部最优时做上升移动,它能找到调度问题中一些实例的最优解。禁忌搜索是一个效率较好的启发式算法,它能找到调度问题不少算例的最优解。但禁忌搜索要面对很多的问题,如初始解问题,邻域结构问题,搜索策略和禁忌表的长度问题等等。只有很

好地解决了这些问题,禁忌搜索算法才能表现得更好。尹爱华是提出了禁忌搜索的一种新的邻域结构<sup>[31]</sup>,用改进的转换瓶颈算法得到初始解和对搜索策略进行了改进<sup>[32]</sup>,实验结果表明该算法性能很好,特别是发现一个实例的更低的上界。

#### 4.2.7 其它方法

近年来,一些近似方法的综合应用,比如局部邻域搜索结合移动瓶颈过程的算法<sup>[33]</sup>、禁忌搜索结合移动瓶颈过程<sup>[34]</sup>,取得了很好的效果。

黄文奇首先提出用拟物拟人的方法求解组合优化问题<sup>[35]</sup>,后来又提出一种基于拟物策略求解 JSSP 的快速算法<sup>[36]</sup>,其效率优于其它启发式算法,因为它是有针对性地为具体的问题找到非常贴切的物理世界,而不是像遗传算法、神经网络方法、模拟退火方法那样依赖于某个唯一的、始终不变的因而往往是不贴切的生物的或者物理的体系。然后拟人策略更是添加人类的智慧,利用人类的丰富经验往往会得出好的启发式方法。拟物拟人方法是一个新的思想,它尚未得到人们的广泛认同。

#### 5 问题讨论与展望

纵观研究 JSSP 的发展,经历了三个阶段。从最初的精确算法到基于简单的优先分配规则的启发式算法,再到转换瓶颈和超启发式方法,取得了丰硕的成果,但也存在许多尚未解决的问题。近似算法能在可接受的时间范围内找到问题的满意解,计算时间短,效率高,精度不如精确算法。衡量一个调度算法的好坏的标准是解的优度和计算时间。基于简单优先分配规则的算法计算时间短,但解的优度不如其它启发式算法;拉格朗日松弛法由于其本身的限制使适用范围有限,且搜索效率低,可行调度的构造有待进一步研究;神经网络的计算量随问题的规模急剧增大,如何实现并行结构和并行处理以减小计算量是今后研究的方向,同时如何使其更好地学习、训练进行自适应和自组织也是提高其计算能力的方面。转换瓶颈算法的致命弱点在于不能总保证能得到可行解;邻域搜索以一定的概率接受劣解,从而逃离局部最优,但其主要缺点是需要多步实现,如何选择邻域,使其具有强化性和多样性的搜索机制这一点很重要,又由于引入随机的概念,存在求解性能稳定性的问题。拟物拟人算法的关键是到自然界寻找解决问题的贴切的模型不是一件容易的事。

今后研究可以从以下几个方面进行:

①借鉴解决其它组合优化问题的方法。

②将现有多种启发式方法进行混合可能更有利于求解。集成各种调度算法求解作业车间调度问题以适应复杂调度环境,充分发挥各种调度算法自身的优势。

③需要对局部搜索算法的限制条件以及加强收敛性和计算速度的进一步研究。对局部搜索算法的邻域选择进行进一步的研究,当陷入局部最优解时,要设计合理的跳坑策略,

使其能顺利跳出。

④寻找新的拟物模型,借助其它学科的理论知识和技术和拟人的策略设计算法。

⑤不局限于调度问题本身进行理论研究,应将理论与生产调度的实际相结合,设计出符合生产实际的高效算法。

#### 6 结束语

总结了 JSSP 问题的基本理论和技术方法,分析列举了现有的方法及其优缺点。讨论今后研究应注意的问题和研究方向。

#### 参考文献

- [1] Baker K. Introduction to Sequencing and Scheduling[M]. New York: John Wiley & Sons, 1974.
- [2] J. Adams, E. Balas and D. Zawack. The Shifting Bottleneck Procedure for Job Shop Scheduling[J]. Management Science, 1988, 34(3): 391~401.
- [3] E. Balas. Machine sequencing via disjunctive graphs: an implicit enumeration algorithm [J]. Operations Research, 1969, 17: 941~957.
- [4] A. S. Manner. On the Job-Shop Scheduling Problem. Operations Research, 1960, (8): 219~223.
- [5] Z. Lomnicki. A Branch and Bound Algorithm for the Exact Solution of the Three Machine Scheduling Problem. Electrical Engineering, 1965, 19(2): 87~101.
- [6] S. W. Golomb and L. D. Baumert. Backtrack Programming. Journal of ACM, 1965, (12): 516~524.
- [7] J. R. Jackson. Scheduling a Production Line to Minimize Maximum Tardiness, Research Report 43, Management Science Research Projects[R]. Los Angeles, USA: University of California, 1955.
- [8] W. E. Smith. Various optimizers for single stage production[J]. Naval Research Logistics Quarterly, 1956, 3: 59~66.
- [9] B. Giffler and G. L. Thompson. Algorithms for solving production scheduling problems[J]. Operations Research, 1960, (8): 487~503.
- [10] S. S. Panwalker and W. Iskander. A Survey of Scheduling Rules[J]. Operations Research, 1977, 25: 45~61.
- [11] Luh P. B., Hoitomt F. J., Max E. Scheduling generation and reconfiguration for parallel machines. IEEE Trans Robotics and Automation, 1990, 6(6): 687~696.
- [12] Fox M. S., Smith S. F. IS-1S: A knowledge-based system for factory scheduling[J]. Expert System,

1984, 1(1): 25~49.

[13] Y.P.S.Foo, Y.Takefuji. Integer Linear programming Neural Network for Job-Shop Scheduling. In: Proc. Of the 1988 International IEEE Conference on Neural Networks. San Diego, California: IEEE San Diego Section and IEEE TAB Neural Network Committee, 1988

[14] Rovithakis, G.A., Gaganis, V.I and et al. Neuron schedulers for Flexible Manufacturing Systems[J]. Computers in Industry, 1999, 39(4): 709~716.

[15] Yang, S.X., Wang, D.W. Constraint Satisfaction Adaptive Neural Network and Heuristics Combined Approaches for Generalized Job-Shop Scheduling[J]. IEEE Trans NN, 2000, 11.

[16] Huang Wenqi, Yin Aihua. An Improved Shifting Bottleneck Procedure for the Job Shop Scheduling Problem[J]. Journal of Computers and Operations Research, Vol(31), No.12, 2004: 2093~2110.

[17] 黄志, 黄文奇. 作业车间调度转换瓶颈算法的不可行解问题[J]. 计算机工程与应用, 2005, 41(5): 53~56.

[18] L. Davis. Job Shop Scheduling with Genetic Algorithm. Proceeding of an International Conference on Genetic Algorithms and their applications, 1985, 136~140.

[19] 苏子林. 求解作业车间调度问题的一种改进遗传算法[J]. 计算机工程与应用, 2006, 42(22): 196~198.

[20] 李钢, 李金勇. 混合遗传算法求解车间作业调度问题[J]. 天津大学学报, 2003, 36(2): 239~242.

[21] 许晓栋, 李从心. 免疫遗传算法在车间作业调度中的应用[J]. 东南大学学报, 2006, 36(3): 437~441.

[22] Cheng, R., Gen, M., Tsujimura, Y. A tutorial survey of job-shop scheduling problems using genetic algorithms-I. representation[J]. Computers & Industrial Engineering, 1996, 30(4): 983~997.

[23] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, Jr., M. P. Vecchi. Optimization by Simulated Annealing. Science, 1983, 220: 671~689.

[24] H. C. Matsuo, C. J. Suh, and R. S. Sullivan. A Controlled Search Simulated Annealing Method for General Job Shop Scheduling Problem. International Journal of Production Research, 1995, 33(3): 705~728.

[25] 吴大为, 陆涛栋等. 求解作业车间调度问题的并行模拟退火算法[J]. 计算机集成制造系统, 2005, 11(6): 847~850.

[26] 赵良辉, 邓飞其. 解决 Job Shop 调度问题的模拟退火算法改进[J]. 计算机工程, 2006, 32(21): 38~40.

[27] 赵天玉. 模拟退火算法及其在组合优化中的应用[J]. 计算机与自动化, 1999, (61): 17~20.

[28] Fred Glover. Tabu Search-Part I. Orsa Journal on Computing, 1989, 1(3): 190~206.

[29] J.W. Barnes and J. B. Chambers. Solving the Job Shop Scheduling Problem Using Tabu Search. IIE Transactions, 1995, 27: 257~263.

[30] E. Nowicki and C. Smutnicki. A Fast Taboo Search Algorithm for Job Shop Problem. Management Science, 1996, 42(6): 797~813.

[31] Aihua Yin. A New Neighborhood Structure for the Job Shop Scheduling Problem, In: D. S. Yeang and X. Z. Wang eds. Proceedings of the 3rd International conference on Machine Learning and Cybernetic, Shanghai.

[32] Aihua Yin. A Heuristic Algorithm for the Job Shop Scheduling Problem, In: H. Jin ed. Proceedings of the IFIP International conference on Network and Parallel Computing, Wuhan 2004. Press by Springer Verlag in the LNCS series: 118~128.

[33] E. Balas, A. Vazacopoulos. Guided local search with shifting bottleneck for job shop scheduling[J]. Management Science, 1998, 44(2): 262~275.

[34] F. Pezzella, E. Merelli. A tabu search method guided by shifting bottleneck for the job shop scheduling problem[J]. European Journal of Operation Research, 2000, 120(2): 297~310.

[35] 黄文奇, 詹叔浩. 求解 Packing 问题的拟物方法[J]. 应用数学学报, 1979, 2(2): 80~84.

[36] 黄文奇, 周立刚. 一种基于拟物策略求解 JSSP 的快速算法[J]. 交通与计算机, 2003, 21(2): 3~5.

# 作者简介

张守胜 (1978—), 男, 湖北汉川人, 在读硕士. 主要研究方向: 求解 NP 难问题的近似算法.