

# 组合优化调度问题求解方法<sup>\*</sup>)

张居阳 孙吉贵

(吉林大学计算机科学与技术学院 长春 130012)

## The Approach to Solving Combinatorial Optimization Schedule Problems

ZHANG JU-Yang SUN Ji-Gui

(Department of Computer Science and Technology, Jilin University, Changchun 130012)

**Abstract** Optimization schedule problem is this kind of problem that people often meet in the field of industrial manufacture, transportation and traffic. A good schedule scheme can improve the efficiency of production and reduce the cost of production. So scholars in all of the related fields have high regard for schedule problem at all times. This paper describes the method and technology about combinatorial optimization schedule problems. The research state and advances in this field are reviewed and surveyed. At the end of the paper an approach to solving Job Shop problem, a representative paradigm in schedule problem, is introduced and discussed concretely.

**Keywords** Optimization, Schedule, Job-shop, Tabu search

### 1. 引言

优化是指一个从一组解中选取最优解或最适应解的过程。优化方法涉及的工程领域很广,问题种类与性质繁多。归纳而言,最优化问题可分为函数优化问题和组合优化问题。其中函数优化的对象是一定区间内的连续变量,而组合优化的对象则是解空间中的离散状态。函数优化问题通常可描述为:令  $S$  为  $R^n$  上的有界子集(即变量的定义域),  $f: S \rightarrow R$  为  $n$  维实值函数,所谓函数  $f$  在  $S$  域上全局最小化就是寻求点  $X_{\min} \in S$  使得  $f(X_{\min})$  在  $S$  域上全局最小,即  $X \in S: f(X_{\min}) \leq f(X)$ 。对函数优化的讨论通常以无约束问题为主。组合优化问题通常可描述为:令  $\Omega = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$  为所有状态构成的解空间,  $C(s_i)$  为状态  $s_i$  对应的目标函数值,要求寻找最优解  $s^*$ , 使得  $\forall s_i \in \Omega, C(s^*) = \min C(s_i)$ 。

优化技术是一种以数学为基础,用于求解各种工程问题优化解的应用技术。作为一个重要的科学分支一直受到人们的广泛重视,并在诸多工程领域得到迅速推广和应用,如系统控制、人工智能、模式识别、生产调度、VLSI 技术、计算机工程等等。实现生产过程的最优化,对提高生产效率与效益、节约资源具有重要的意义。需要指出的是,最优化分为最小化和最大化,由于两者可以互相转化,因此一般所指的最优化仅指最小化。优化算法是一种搜索过程或规则,它是基于某种思想和机制,通过一定的途径或规则来得到满足用户需求问题的优化解。

调度是为了实现某一目的而对共同使用的资源实行时间分配。一个调度满足问题(调度问题)是一个约束满足问题。它的一个状态是集合  $R$  和  $T$  间的二元关系。其中  $R$  是资源的集合(资源空间),  $T$  是任务的集合(任务空间)。调度问题的定义很简单,但调度问题本身并没有那么简单。调度问题可以说无处不在,无处不在。它涉及的领域包括制造业,交通运输业,经济金融业,管理领域等。现实世界中的调度问题各式各样,如 Time Table Scheduling(时间表调度)、Crew Scheduling(人员

调度)、Job Shop Scheduling(车间作业调度)等。整个人类社会的进化发展过程也是一个调度过程,其最终目标是一种低能平衡态。调度和优化有着密切的关系。优化是调度的目的,而调度又是优化的一种具体表现形式。要想对某一问题进行成功的调度,势必要运用先进和可行的优化方法。所以我们常称调度问题为优化调度问题。调度问题研究方法所涉及的学科非常广,它们包括:人工智能、专家系统、进化计算、运筹学、优化技术等。

至今为止,人们对优化和调度问题的研究已经相当深入,已经形成了较为系统的理论体系,并且很多研究成果得到了实际的应用。针对于不同的领域,如生产调度(InSol Ltd.)、良好活动调度(Saga 石油公司)、森林保护问题调度、引擎生产的规划(Dassault 飞机制造公司)和时间表调度问题,已经开发出很多基于约束的调度系统,如 ISIS、SOJA、FLYPAST、SONIA、DAS 和最近在基于工业的程序设计工具范围内资源约束的实现,如 CHIP、OZ、CLAIRE 和 ILOG SCHEDULE 等产品。

### 2. 调度问题

#### 2.1 调度问题的提出

敏捷制造作为 21 世纪企业的先进制造模式,综合了 JIT (Just-In-Time)、并行工程、精良制造等多种先进制造模式的哲理,其基本特征是采用标准化和专业化的计算机网络,在信息集成和共享的基础上,以分布式结构连接各类企业,构成虚拟制造环境,从而快速高效地实现企业内外部资源(包括管理、人、技术)合理、优化地配置,以便赢得市场竞争。在这种模式下如何进行组织管理,包括如何组织动态联盟、如何重构车间和单元、如何安排生产计划、如何进行调度都是我们面临的问题。其中车间作业调度与控制技术是实现生产高效率、高柔性和高可靠性的关键,有效实用的调度方法和优化技术的研究与应用已成为先进制造技术实践的基础。

生产调度问题主要集中在车间的计划与调度方面,许多

<sup>\*</sup>)国家自然科学基金、教育部骨干教师基金和吉林省自然科学基金资助课题。

学者作了大量研究,出了不少的研究成果。制造系统的生产调度是针对一项可分解的工作(如产品制造),探讨在尽可能满足约束条件(如交货期、工艺路线、资源情况)的前提下,通过下达生产指令,安排其组成部分(操作)使用哪些资源、其加工时间及加工的先后顺序,以获得产品制造时间或成本的最优化。在理论研究中,生产调度问题常被称为排序问题或资源分配问题。

## 2.2 调度问题的分类

调度系统的分类方法很多,主要有以下几种:(1)根据加工系统的复杂度,可分为单机、多台并行机、flow shop 和 job shop。(2)根据性能指标,分为基于调度费用和调度性能指标两大类。(3)根据生产环境的特点,可将调度问题分为确定性调度和随机性调度问题。(4)根据作业的加工特点,可将调度问题分为静态调度和动态调度。

## 2.3 调度问题的特点

实际的调度问题一般具有以下特点:

### (1)高复杂性

·建模复杂。由于装卸作业、装卸设备、库场、搬运系统之间相互影响、相互作用、每个作业又要考虑它的到达时间、装卸时间、准备时间、操作顺序、交货期等,因而实际调度问题相当复杂。这就使得要想精确地描述其间的各种各样的约束关系,建立其数学模型变得困难和复杂。

·计算复杂。由于调度问题是在等式或不等式约束下求性能指标的优化,在计算量上往往是 NP 完全问题,即随着问题规模的增大,对于求解最优化的计算量呈指数增长,使得一些常规的最优化方法往往无能为力,对于这一点 Garey 等<sup>[1]</sup>给出了明确的证明。对单机调度问题,如果考虑  $n$  个作业而每个作业只考虑加工时间及与序列有关的准备时间时,就等价于  $n$  个城市的 TSP 问题。对于一般的装卸系统,问题就变得更为复杂。

(2)多目标 实际的计划调度往往是多目标的,并且这些目标间可能发生冲突。Oraves 曾将调度目标分为基于调度费用和调度性能指标两大类;Alia 等人将调度目标分三类:基于作业交货期的目标、基于作业完成时间的目标、基于生产成本的目标。这种多目标性导致调度的复杂性和计算量急剧增加。

(3)动态随机性 在实际的生产调度系统中存在很多随机的和不确定的因素,比如作业到达时间的不确定性、作业的加工时间也有一定的随机性,而且生产系统中常出现一些突发偶然事件,如设备的损坏/修复、作业交货期的改变等。

## 2.4 调度问题的研究方法

经过 50 多年的发展,调度问题的研究方法经历了从简单到复杂、从单一到多元的过程。一般的调度问题都是对于具体生产环境中复杂的、多目标的、动态的调度问题的一种抽象和简化,因而一个调度算法可以通过其如何表述这些复杂性进行分类。由于实际中生产环境是千差万别的,那么一个调度算法就应该根据其是否能适合对应的生产环境的重要特征进行评估。在对调度问题进行研究的方法上,最初是集中在整数规划、仿真和简单的规则上,这些方法不是调度结果不理想就是难以解决复杂的问题。随着各种新的相关学科与优化技术的建立与发展,在调度领域也出现了许多新的优化方法,比如神经网络、模拟退火法、遗传算法、禁忌搜索法等,使得调度问题的研究方法向多元化方向发展。下面我们分别对这些方法进行总结:

(1)基于运筹学的方法 是将生产调度问题简化为数学规划模型,采用基于枚举思想的分枝定界法或动态规划算法进行解决调度最优化或近优化问题,属于精确方法。文[2~6]等提出了不同的分枝定界法(B&B),其不同点主要在于分析规则、定界机制和上界的产生这三方面存在差异。这类方法虽然从理论上能求得最优解,但由于其计算复杂性的原因,因而较难获得真正的实用。Lenstra 在文[7]中声明,对一个标准的 10 作业-10 设备问题进行求最优解,需要在 Prime 2655 计算机上运行 1 小时,并产生 22000 个节点。对于复杂的问题,这种纯数学方法有模型抽取困难、运算量大、算法难以实现的弱点,对于生产环境中的动态调度实现复杂,很难解决动态及快速响应市场的问题。

(2)基于规则的方法 对生产加工任务进行调度的最传统的方法是使用调度规则(Dispatching rules),已经有许多调度规则被应用,因其调度规则简单、易于实现、计算复杂度低等原因,能够用于动态实时调度系统中,许多年来一直受到学者们的广泛研究,并不断涌现出新的调度规则。许多学者在这方面已进行了探索及大量工作,如研究与制定较优的单元零件加工调度算法,在减少等待时间、提高生产率等诸多约束条件下达到了一种较为科学有效的调度效果。

Panwalkar 和 IskaDder 对于基于规则的方法总结了 113 条规则<sup>[8]</sup>,并将它们按形式分为了三类:简单规则、复合规则、启发式规则;Montazei 等列举了常见的 20 条规则,并针对一个实际的柔性制造系统(FMS- Flexible Manufacturing Systems),分析了这些规则对系统性能(如作业的平均等待时间、设备的平均利用率、作业总加工时间等)的影响;文[9]将多种规则组合起来实现调度;文[10]讨论了决策规则解决 FMS 车间调度问题的方法与规则库的具体实现,分析了各种规则与性能指标的关系,对如何合理地选用规则提出了建议;为了提高规则调度的质量,文[11]通过分析拖期时间与两个作业调度决策间的关系,提出了一种比较复杂的规则,并在以拖期时间最小的目标下,与 LST、LPT、LDD、LWR、LSWR、LSOR 等规则作了实验比较。随着计算机运算速度的飞速提高,人们希望寻找新的近似调度方法,它以合理的额外计算时间为代价,换得比单纯启发式规则所得到的调度更好的调度。在这方面比较有代表性的有移动瓶颈方法(Bottleneck Procedure),用来解决以最小化 Makespan 为目标的 Job Shop 调度问题,它通过不断地对移动的瓶颈设备进行单机调度,来获取更好的次优解。

总的说来,启发式规则直观、简单、易于实现。但是近十年的研究表明并不存在一个全局最优的调度规则,它们的有效性依赖于对特殊性能需求的标准及生产条件。它是局部优化方法,难以得到全局优化结果,并且不能对得到的结果进行次优性的定量评估。顾客需求的个性化及要求企业响应市场的敏捷性,往往在生产加工过程中加入了更多的不确定性及复杂性约束,寻找调度最优算法本身是一个 NP 完全问题,这些使得基于规则的调度思想在某些方面满足不了敏捷化制造的要求。

(3)系统仿真的方法 基于仿真的方法不单纯追求系统的数学模型,侧重对系统中运行的逻辑关系的描述,能够对生产调度方案进行比较评价,分析系统的动态性能,并选择系统的动态结构参数。由于制造系统的复杂性,很难用一个精确的解析模型来进行描述和分析。而通过运行仿真模型来收集资料,则能对实际系统进行性能、状态等方面的分析,从而,能对

系统采用合适的控制调度方法。仿真方法最早被用来作为测试调度启发式规则及分派规则的工具。后来,人们发现,通过将简单的优先权规则进行组合,或用一个简单的优先权规则将一些启发式规则进行组合,这样的调度优于单独的优先权规则。于是,仿真方法逐渐发展为一种人机交互的柔性仿真工具,并用来进行车间调度。这样,就能通过仿真而动态地展现 Job Shop 车间的状态,分析在不同的调度方法下的系统性能,并运用知识和经验去选择合适的调度方法(规则),从而改善调度性能。

Kiran 等回顾了总结了在动态环境下基于纯仿真模型的 Job Shop 调度问题的研究状况;Baker 等人研究表明:机器数目对生产的相对效率影响不大;Nanot 说明了优先规则的相对效率并不因机器的构成而改变;文[12]中提出了基于纯仿真模型的调度方法,即在一个较短的时间段内用仿真来评价一个分派规则集,选取最小代价的规则进行调度,以适应系统状态的变化;文[13]运用纯仿真模型,同时解决 FMS 中作业调度和搬运小车及刀具的资源分配问题;文[14]中提出了一种混合的仿真/解析模型,用于分析和设计具有缓存的不可靠生产线问题。

基于纯仿真法虽然可以包含解析模型无法描述的因素,并且可以提供给使用者一个调度性能测试的机会,但其不可避免地存在以下问题:1)鉴于其实验性,因此,很难对生产调度的理论做出贡献;2)应用仿真进行生产调度的费用很高,不仅在于产生调度的计算时间上,而且在于设计、建立、运行仿真模型上的高费用;3)仿真的准确性受编程人员的判断和技巧的限制,甚至很高精度的仿真模型也无法保证通过实验总能找到最优或次优的调度。

(4)基于离散事件动力学系统的解析模型方法 由于制造系统是一类典型的离散事件系统,因此可以用研究离散事件系统的解析模型和方法去探讨车间调度问题,诸如排队论、极大/极小代数模型、Petri 网等。调度中的排队论方法是一种随机优化方法,它将每个设备看成一个服务台,将每个作业作为一个客户。作业的各种复杂的可变特性及复杂的路径,可通过将其加工时间及到达时间假设为一个随机分布来进行描述。文[15]针对 FMS 中一类特殊的 DEDS,利用了极大代数方法对其进行建模,并进行了系统的稳定性分析。文[16]针对有阻塞的这类最优调度问题,给出了最优调度目标函数的具体形式,指出它不是凸函数,在一个变量时给出了最优调度的公式解,在多个变量时得到了一个迭代寻优的算法。

总的说来,排队网络模型由于从随机统计的角度来描述 FMS,难以表述系统中存在的某些特性(如有限的缓存空间等),同时,产生的输出是基于系统稳态操作的平均量,因此,很难得到比较具体的细节。Petri 网作为一种图形建模工具可以形象地表示和分析 FMS 中加工过程的并发和分布特征以及多项作业共享资源时的冲突现象,具有很强的建模能力,对于描述系统的不确定性和随机性也具有一定的优越性。在制造自动化领域,利用 Petri 网及其扩展形式的模型进行死锁分析、调度决策和性能评价等已有大量理论研究文献。赋时 Petri 网是在以往 Petri 网的基础上又引入了时间元素,使其能够用于 FMS 中加工的组合优化、生产进程的实时调度和性能估计等。Tien-Hsiang Sun 等人用赋时 Petri 网为 FMS 建模,它包括两个主要的子模型:静态的传送模型和变化的加工流模型。通过嵌入一个基于 A\* 搜索算法,最后得到一个满意的作业加工调度。在此基础上还进行了一个实例研究。部分学

者用赋时 Petri 网为 FMS 建模,通过优化变迁的发生序列来产生的搜索可标识集,从而得到较优的调度结果;甚至用赋时扩展着色 Petri 网模拟 FMS 的动态运行。

目前,Petri 网模型用于 FMS 的调度还存在以下的问题:1)节点语义的单义性,使得所携带的系统信息量不够丰富。2)重用性差。Petri 网多是基于 FMS 中作业的加工流程建模,当作业需求或工艺稍有变动时,必须修改模型结构,这难于适应 FMS 中存在的确定因素。3)不能对高级的调度规则加以建模,通常只能用禁止弧机制体现一些低级控制。

(5)基于排序的方法 该方法是先有可行性加工顺序,然后才确定每个操作的开工时间,并对这个顺序进行优化,它虽然属于近似算法,但有可能达到最优的调度方案。它主要包括邻近搜索法,它在生产调度领域得到了相当广泛的应用。在搜索解空间时,仅对选定的成本函数值的变化做出响应,因而通用性强。这类方法包括局部搜索(Local Search)、模拟退火法(Simulated Annealing)、列表寻优法(Table Search)、遗传算法(Genetic Algorithms)等。邻近搜索虽然可能得到最优的调度方案,但也存在各自的不足,很多学者采取混合算法来弥补单一方法的不足之处<sup>[17~19]</sup>。

·启发式图搜索法。对于表述为整数规划的调度问题,最初采用分枝定界法来解决,而后其它的启发式图搜索法也被应用于求解调度问题。在文[12]中 Balas 将调度排序问题用一个析取图来表示,首先构造一个可行解,采用基于隐枚举的搜索方法不断提高解的次优性;在文[20]中采用束搜索法(beam search)来识别瓶颈机器,进行调度;为了解决搜索空间太大的问题,在文[21]中通过对分枝定界法和束搜索法进行系统的分析,提出了一种过滤束搜索法(filter beam search),用来解决单台机器提前/延期问题和加权延期的 Flow Shop 问题;文[21,9]中研究了基于 A\* 的优先树搜索法的优化作业排序问题;文[22]中针对基于树搜索的优先 A\* 算法需要海量存储器的问题,提出了一个图搜索法,并对两种方法作了比较,为解决 Job Shop 调度问题对 A\* 算法作了两点改进:1)在搜索过程中只展开有限节点;2)采用加权的评价函数。对于图搜索算法,如何提高搜索效率并减少内存使用以求解规模较大的问题,还需要进一步探索。

·模拟退火法。模拟退火算法(SA)将组合优化问题与统计力学中的热平衡问题模拟,另辟了求解组合优化问题的新途径。它通过模拟退火过程,可找到全局(或近似)最优解。其基本思想为:把每种组合状态  $S_i$  看成某一物质系统的微观状态,而将其对应的目标函数  $C(S_i)$  看成该物质系统在状态  $S_i$  下的内能;用控制参数  $T$  模拟温度,让  $T$  从一个足够高的值慢慢下降,对每个  $T$ ,用 Metropolis 抽样法在计算机上模拟该体系在此  $T$  下的热平衡态,即对当前状态  $S_i$  作随机扰动以产生一个新状态  $s'$ ,如果  $C(s') < C(s)$ ,则接受  $s'$  为下一状态,否则以概率  $e^{-(c(s')-c(s))}$  接受。经过一定次数(称为 Markov 链长)的搜索,认为系统在此温度下达到平衡,则降低温度  $T$  再进行搜索,直到满足结束条件。

模拟退火法的几个重要部分为:生成函数(generation)、容忍函数(acceptance function)、Markov 链长、降温过程和结束准则。模拟退火法的改进算法有加温退火法、有记忆的模拟退火法等。文[9]中为 Flow Shop 问题求解构造了一类模拟退火法,并通过六种不同的随机抽样方式分析了算法渐近收敛于全局最优解,分别用于具有最小 Makespan 指针且具有无限中间存储(UIS)、有限中间存储(FIS)和无中间存储(NIS)

的 Flow Shop 排序问题的求解;文[23]提出了一种改进的模拟退火法,用来求解具有最小 Makespan 指针的 Flow Shop 排序问题,并与禁忌搜索法等进行了比较;文[10]用模拟退火法进行机器分组;文[13]用模拟退火法求解有资源约束的调度问题。另外,模拟退火法也可与其它方法相结合进行求解,如文[24]中先用贪心法(greedy 法)搜索,将得到的作业序列作为初始解,再用模拟退火法求解单机调度问题,其结果表明这种方法比单纯用模拟退火法和贪心法要好;文[25]中提出了将模拟退火法与启发式算法相结合的方法,求解具有交货期约束的 Job Shop 调度问题。由于模拟退火法能以一定的概率接受差的能量值,因而有可能跳出局部极小,但它的收敛速度较慢,较难用于实时动态调度环境。

• 禁忌搜索法。对于复杂的组合优化问题,禁忌搜索也是一种通过邻域搜索以获取最优解的方法,Glover 曾在文[24,20]中叙述了它的基本原理。禁忌搜索是一种迭代方法,它开始于一个初始可行解  $S$ ,然后移动到邻域  $N(S)$ 中最好的解  $s'$ ,即  $s'$  对于目标函数  $F(S)$ 在邻域  $N(S)$ 中是最优的。然后,从新的开始点重复此法。为了避免死循环,禁忌搜索把最近进行的  $T$  个移动( $T$  可固定也可变化)放在一个称作 tabu list 的表中(也称短期记忆),在目前的迭代中这些移动是被禁止的,在一定数目的迭代之后它们又被释放出来。这样的 tabu list 是一个循环表,它被循环地修改,其长度  $T$  称作 tabu size。最后,还须定义一个停止准则来终止整个算法。由于 tabu list 的限制,使其在搜索中有可能跳出局部极小。文[15,26]分别提出了求解 Flow shop 调度问题的禁忌搜索算法。在文[27]中为了更有效地搜索解空间,引入了插入和移动相结合的机制提高了搜索效率。文[10]中采用了并行禁忌搜索法以加快搜索速度。文[13]中针对求解公共交货期下带有等待时间惩罚的提前/拖期单机调度问题,提出了一种禁忌搜索法。文[28]提出了一种融入了 hash 技术的改进的禁忌搜索算法。

• 神经网络优化。Hopfield 神经网络模型的提出为求解各种有约束优化问题开辟了一条新途径,用 Hopfield 网络解决 TSP 问题就是其在组合优化问题中的最成功的应用之一。它的主要思想是:通过一个 Lyaplmov 能量函数构造网络的极值,当网络迭代收敛时,能量函数达到极小,使与能量函数对应的目标函数得到优化。文[25]介绍了一种随机 Hopfield 网络来求解 Job Shop 调度问题的方法;文[22]中为了解决大规模问题,又提出一种改进的 Hopfield 网络的整数线性规划神经网络方法来求解 Job Shop 调度问题;文[14]中也提出了一种用于解决 Job Shop 调度问题的神经网络方法。文[29]提出解决具有开、完工期限限制的约束 Job shop 生产调度问题的一种神经网络方法。

• 遗传算法。美国 Michigan 大学的 Holland 于 70 年代提出了一种新的并行优化搜索方法:遗传算法(Genetic Algorithm),它是一种基于进化论优胜劣汰、自然选择、适者生存和物种遗传思想的随机优化搜索算法,通过群体的进化来进行全局性优化搜索。它以其很强的并行性和很高的计算效率正日益受到人们的关注。它对组合优化问题求解的主要过程是:给定一组初始解作为一个群体,通过选择、交叉和变异等遗传操作符来搜索问题的最优解。Goldberg 首先将 GA 应用到实际工程系统的优化当中,由于 GA 在理论上和经验上被证实能提供在复杂空间中的鲁棒搜索,因而被广泛应用于机器学习、控制、优化等领域。GA 在生产调度中的应用也已很

多,但这些大都以传统的 Flow shop 或 Job shop 为背景。文[27]中提出了一种基于遗传算法的启发式方法,用于求解以最小化 Makespan 为指针的 Flow shop 调度问题;文[30,31]用遗传算法求解了 Job shop 调度问题。

总的来说,遗传算法的最大优点是通过群体间的相互作用,保持已经搜索到的信息,这是基于单次搜索过程的优化方法所无法比拟的。但是,遗传算法对某些问题存在着计算速度较慢的问题和早熟问题。

(6)基于智能的调度方法。近年来受实际需要的推动,基于知识的智能调度系统和方法的研究取得了很大的进展。人工智能在 60 年代就将计划问题作为其应用领域之一,但直到 80 年代,以 Carnegie-Mellon 大学的 Fox 为代表的学者们开展基于约束传播的 ISIS(Intelligent Scheduling and Information System)的研究为标志,人工智能才真正开始应用于调度问题。此后该大学与 IBM 联合研究了 PATRI-ARCH 系统。基于知识的调度方法是用专家系统自动产生调度或辅助人去调度。它是将传统的调度方法与基于知识的调度评价相结合的方法。在八十年代后期,几位学者先后开展了基于调度系统处于不同的状态,采用不同的调度规则策略的动态调度方法的研究。它们研究的共同特点是:在支持某些活动发生的资源条件具备时(称为决策点),根据系统当时所处的属性状态,决定采取何种规则(策略),确定或选择活动发生的顺序和时间,即状态指导的智能调度方法。

文[22]中探讨了一种基于知识推理的专家系统模型,以实现作业排序问题的求解,并给出了采用三种不同知识表示方式和分段推理的排序知识处理方法。文[21]用黑板模型来组织和维护动态数据库、在规画层用数学规划求解、在调度控制层用基于知识的调度方法。文[32]介绍了动态 Job Shop 调度的工具软件 OCS,提供了 Job Shop 调度管理中的集成决策支持系统,它既能用专家知识自动产生和评价调度,也能提供图形接口使用户能进行手工调度。文[33]中介绍了我国清华大学自动化系设计开发的具有机器学习能力的智能规则调度系统。另外还有基于 Petri 网的决策支持系统、用专家系统实现的调度模型 SOJ437D、以及利用启发式知识进行资源优化分配。

总的来说,主要包括智能调度专家系统、基于智能搜索的方法及基于多代理技术(Multi-Agent System,简称 MAS)的合作求解的方法等。其中,智能调度专家系统是人工智能应用的体现,由于专家系统中知识获取和推理速度这两个瓶颈,使得神经网络逐渐被采用,但还存在训练速度慢、搜索能力弱等缺点。基于多代理技术的合作求解方法是较新的智能调度方法,它提供了一种动态灵活、快速响应市场的生产调度机制,以分布式人工智能(Distributed Artificial Intelligence,简称 DAI)中的多代理机制作为新的生产组织与运行模式,通过代理(Agent)之间的合作以及 MAS 系统协调来完成生产任务的调度,并达到预先规定的生产目标及生产状态。在这种研究方法中,在 Agent 内部也可采用基于规则及智能推理相结合的混合方法,来构造基于 MAS 的生产调度系统。文[34]中提出了综合运用多代理机制与规则调度实现敏捷化制造车间生产过程动态调度的方法。

(7)基于约束程序的方法。基于约束的程序设计也是一种问题解决的方法,它把一个问题的解决明确划分为两个方面:一是待解决问题中约束的准确定义;二是关于算法和启发式的选择、排序、删除的求解决策过程。

应用于实际的调度问题,基于约束的程序设计有助于生成精确、高效、可行、可扩充的调度系统。ILOG Solver 和 Schedule 是针对资源分配、计划和调度问题设计的 C++ 库。ILOG 产品是当前最著名的用于求解商业领域中约束问题的工具。它可以帮助你削减复杂冗余的编码,缩短产品生产周期。其跨平台的可扩充组件,允许用户求解各类的商业问题。

ILOG Solver 是第三代约束处理器,允许开发者对资源分配问题简单地建模和求解。现实世界中的问题具有庞大的解空间,所以用传统的计算技术显然不太现实。ILOG Solver 具备的面向对象技术可以对问题中的关系和约束进行精确的建模。然后它的边削减约束传播 (cutting-edge constraint propagation) 和搜索树 (tree-search engine) 策略可以很快地找到解。

ILOG Scheduler 是对 ILOG Solver 的扩充。它采用了最新的调度和运筹学中的算法,可以帮助用户较快求得最优解。ILOG Scheduler 允许直接且直观地表示资源和作业问题,比如,资源分类结构,任务分类结构,原料和加工清单,产品工序,库存等。

(8)混合算法。由于各种调度算法都不同程度地存在着这样那样的优缺点,除了传统组合的启发式规则外,近来人们开始把各种近似算法的混合应用研究作为热点,以弥补各自的缺点,发挥各自的优势,达到高度次优化的目标。这其中尤其以各类算法和遗传算法的混合应用研究较为深入,下面就做一些介绍。

有的学者将遗传算法与图搜索法相结合,利用遗传算法进行知识的推理、启发,再用过滤束搜索法 (filter beam search) 进行优化搜索,以得到高质量的 FMS 静态调度;文 [5] 提出了一种并行遗传算法,试图解决常规遗传算法在解决 FMS 调度问题时产生的计算速度较慢及过早收敛等问题;文 [35] 提出一种结合禁忌搜索算法和递推遗传算法的禁忌-递阶遗传算法,该算法能在一定程度上克服早熟问题,通过求解复杂的非线性系统分整增广 GARCH-M 模型的参数优化问题,表明该算法具有较高的精确性和可行性;文 [36] 提出一种遗传分枝定界算法求解 3 机 Flow-shop 调度问题,该算法类似于遗传局部算法和遗传动态规划算法;文 [37] 提出并设计了一种遗传算法和单纯形法相结合的优化方法,通过遗传算法的染色体随机产生一个模式,每一个这样的模式,对应生成一个线性规划模型,采用单纯形法,对线性规划模型求解,其结果作为遗传算法的适应度函数,使用遗传算子对群体中的染色体进行选择、变异、杂交操作,经过这样多次迭代操作,求得最后结果。

目前,各种算法的混合应用已成为解决优化调度问题很有前途的方法。

(9)其他方法。除了前面叙述的一些有代表性的求解调度问题的方法之外,近些年来有一些跨学科的方法出现在优化调度领域:一个就是元胞自动机 (Cellular Automata) 方法,这一概念是 von Neumann 最早提出来的。起初用于模拟生命系统所具有的自复制功能,后来被用于模拟其他的物理系统和自然现象。从本质上来看,元胞自动机与神经网络是互通的,但由于其离散化形式,因此更容易在计算机上快速实现;另一个就是基于混沌理论的方法,在神经网络中引用混沌思想而产生的混沌神经网络,对于优化调度问题的求解也有一些初步结果。但对于这些新兴的方法主要还停留在理论研究,缺少实际的应用,国内外一些学者正在做这方面的工作。

## 2.5 调度方法存在的问题

调度领域中的大部分问题是 NP 问题,虽然对它的研究已有几十年的历史,但至今理论研究与实际应用之间还存在着很大差距。尤其随着 JIT (Just-In-Time) 思想的广泛采用, E/T (Earliness/Tardiness) 调度问题,即使得工件尽量按交货期完成,变得越来越突出。实际应用中的调度方法能够响应系统的动态变化,但不能保证得到好的调度:一些理论上的最优化方法能提供最优调度,但由于其计算的复杂性,并且忽略了很多实际因素,离实际运用还有较大距离。基于最优化的方法,诸如动态规划算法与分枝定界算法等等,由于其大多数是建立在可能对调度的部分枚举上,因此只能解决小规模调度问题。由于大多调度问题属于一类 NP 困难组合问题,因此寻找具有多项式复杂性的最优算法几乎是不可能的。但因其解的最优性,至今仍激发着学者们进行不断的探索。各种近似/启发式方法,诸如基于规则的算法等,由于能在合理的时间内产生比较满意的调度,因此广泛应用于实际调度中,但其往往对所得的调度解的次优性不能进行评估。在这方面有必要探索更好的近似最优调度算法,可以考虑增加合理的计算时间代价,提高解的次优性。各种基于统计优化的方法,诸如模拟退火法、遗传算法等,提供了一种解决调度优化问题的新途径,但同别的优化算法类似,也存在着一定程度的枚举,一般来说收敛到最优解很慢,并且对于判断解的最优性也很困难。在这方面也需要做进一步的研究。在实际车间调度中,车间计划与车间调度往往是分层进行的,但这可能造成计划在实际调度中的不可行问题,如何将计划与调度结合考虑,以求总体的优化也是需要进一步研究的。另外,还有很多有待进一步研究的问题,比如实际车间调度的多目标性等。调度理论、方法与应用的研究是一项非常艰巨的工作,目前人们还在进行各种各样的探索性研究工作。

## 3. JOB-SHOP 调度问题

### 3.1 JSSP 的特点

车间作业调度问题 (JSSP: Job Shop Scheduling Problem) 是为了处理多项不同的事务而如何分配作为共同资源的机械设备,并使总的作业时间最少的问题。

一般性的 Job Shop 调度问题,具体地说它有以下的特点:

- 1) 有 M 台机器,每台机器可加工若干工序,不同的机器能加工的工序不全相同,且不同的机器完成相同的工序的加工时间也不全相同。
- 2) 有 k 类工件,每类有若干数目的工件,每个工件有若干工序,各工序间的顺序不可以改变,不同工件所需的工序也不完全相同。
- 3) 工件在机器上加工时,工件的安装时间与此机器前一加工工序有关,这是因为在 FMS 中机器能加工不同的工序是通过更换刀具来实现的,恰当的工序序列能使机器减少刀具的更换,从而减少工件的安装时间。
- 4) 每个工件有到期时间,相同类工件的到期时间相同,不同类别的工件的到期时间不同。工件的到期时间在加工过程中可以发生改变,但工件到期时间发生改变时,属此类的所有工件的到期时间变化相同。
- 5) 在零时刻所有工件都处于待加工状态。

对于要求工件的加工时间最短,同时要使工件尽量不超期(不超过到期时间),为此对超期工件在性能指标中加入惩罚项,这一性能指标可写为

$$\min C = \max_{i \in S_M} L_i + \alpha \sum_{j \in S_J} \max(0, t_{ij} - t_{dj}) \quad (1)$$

其中  $\alpha$  为惩罚项加权系数,  $S_M$  为机器集,  $S_J$  为工件集,  $L_i$  为第  $i$  台机器完成所有工序加工的时间,  $t_{ij}$  为第  $j$  个工件完成加工的时间,  $t_{dj}$  为第  $j$  个工件的到期时间。要求合理地将工件分配到相应的机器上,并恰当安排每台机器上工件的加工次序和每个工序的开始加工时间,在满足工序顺序约束的同时,使性能指标得到优化。

### 3.2 若干重要概念

**定义 1** 称一个调度为活动调度(AC),如果在推迟其它操作的或破坏优先级顺序的条件下,其中没有一个操作可以提前加工。

**定义 2** 称一个调度为半活动调度(SAC),如果在不变机器加工顺序的条件下,其中没有操作可以提前。

**定义 3** 称一个调度为非延迟调度(ND),如果至少存在一个工件等待加工时,对应地不存在相应地处于空闲的机器。

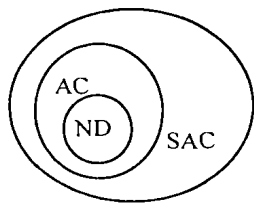


图 1 三种类型调度的关系

\* 对于正规调度指标,如最大完成时间,业已证明最优调度必为活动调度。因此,如果将搜索空间限于活动调度集,不仅能保证自由化调度的存在,而且能够提高优化效率。

### 3.3 JSP 的描述

1. OPL (Optimization Programming Language) 描述 优化编程语言 OPL 从严格意义上说并不是一种计算机编程语言,而是一种允许人们应用约束程序和数学规划技术的语言<sup>[38]</sup>。OPL 于 1999 年面世,其设计者为 Van Hentenryck。

2. 析取图描述 析取图是描述 JSP 的常用工具。对  $n$  工件、 $m$  台机器(共  $N$  个操作)的 JSP,对应的析取图  $G = (V, A, E)$  如图 2 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(分别表示加工的开始和结束);  $A$  为  $n$  条子弧构成的弧集,子弧(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  $m$  条子边构成的边集,子边(虚线)表示同一机器上加工各操作的连接。

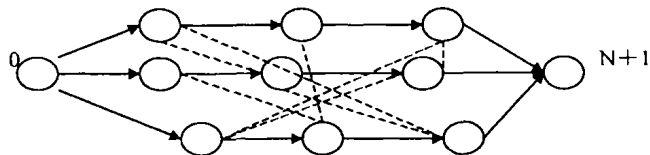


图 2 3 工件、3 机器 JSP 的析取图表示

现取最大完成时间(makespan)为指标,那么对 JSP 的求解就归结为找到各边(即机器)上作为优先决策的各操作的一组顺序(即走向),当同一机器上有多个操作出现冲突时,上述顺序用于决定各操作的先后,最后得到各操作间没有冲突的一个有向非循环图,而其关键路径长度为 makespan。

### 3.4 用 TS(Tabu Search)求解 JSSP

#### 1. 概念和术语

TS 是一种人工智能算法,是局部搜索算法(Local Search)的扩展。TS 的特点是采用了禁忌技术,所谓禁忌就是禁止重复前面的工作。TS 应用的记忆含明确记忆和属性记忆。属性记忆用来引导搜索。TS 引入的记忆功能使其避免陷入局部最优。以下给出 TS 中的几个概念:

(1)初始解: TS 是一种迭代算法。一个较好的初始解能提高搜索速度。

(2)目标函数:在组合优化问题中,目标函数可为单目标函数,也可为多目标函数。下式表示一个组合优化问题

$$\text{Minimize } C(x) \quad x \in X$$

式中,  $C(x)$  为目标函数,可以是线性函数或非线性函数。

(3)移动:移动是把一个解变成另一个解的函数,使搜索过程最终能找到最优解。移动  $s$  表示为:  $s: X(s) \rightarrow X$ 。式中  $X(s)$  为集合  $X$  的子集。

(4)邻域函数:为可应用于当前解的移动  $s$  的集合。

(5)禁忌表:是对已搜索过的先前路径的记忆,换而言之是移动的子集。其元素称为禁忌交换。

(6)渴望水平:用于决定在何种情况下禁忌无效。

(7)停机准则:禁忌搜索的停止条件。

#### 2. 算法描述<sup>[39]</sup>

**STEP1** 选定一个初始解  $x^{now}$  及给以禁忌表  $H = \Phi$ ;

**STEP2** 若满足停止规则,停止计算;否则,在  $x^{now}$  的邻域  $N(H, x^{now})$  中选出满足禁忌要求的候选集  $Can\_N(x^{now})$ ;在  $Can\_N(x^{now})$  中选一个评价最佳解  $x^{next}$ ,  $x^{now} = x^{next}$ ;更新历史记录  $H$ ,重复 STEP2。

\* 禁忌算法的 STEP2 中,  $x^{now}$  的邻域  $N(H, x^{now})$  中满足禁忌要求的元素包含两类:一类是那些没有被禁忌的元素,另一类是可以被解除禁忌的元素。

#### 3. 实例

1)变量的定义:设  $J$  代表  $n$  个工件的集合,则  $J$  可表示为  $J = \{1, 2, 3, \dots, n\}$ 。设  $M$  代表  $m$  个设备的集合,则  $M$  可表示为  $M = \{1, 2, 3, \dots, m\}$ 。设  $o$  代表每个工件总工序数的集合,则  $o$  可表示为  $o = \{o_1, o_2, \dots, o_n\}$ 。设  $O$  代表总的工序集合,则  $O$  可表示为  $O = \{1(1), 1(2), \dots, 1(o_1), 2(1), 2(2), \dots, 2(o_2), \dots, n(1), n(2), \dots, n(o_n)\}$ 。则工件的工序阵  $JO$  可表示为:

$$JO = \begin{bmatrix} 1(1) & 1(2) & \dots & 1(k) \\ 2(1) & 2(2) & \dots & 2(k) \\ 3(1) & 3(2) & \dots & 3(k) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ n(1) & n(2) & \dots & n(k) \end{bmatrix}$$

矩阵中元素  $I(j)$  表示工件  $I$  的第  $j$  道工序(在本例中我们假定每个工件的工序数都相同即为机器数  $K$ )。

工件的工序加工机器阵可表示为:

$$OM = \begin{bmatrix} 1(1) & 1(2) & \dots & 1(k) \\ 2(1) & 2(2) & \dots & 2(k) \\ 3(1) & 3(2) & \dots & 3(k) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ m(1) & m(2) & \dots & m(k) \end{bmatrix}$$

矩阵中元素  $I(j)$  表示加工第  $I$  个工件第  $j$  道工序所需的机器号。

设工件的工序起始时间矩阵  $ST$ , 终止时间矩阵  $ET$ , 加工过程时间矩阵  $PT$ 。

设 MO 代表机器加工工序排序阵,其中 MO<sub>i</sub> 代表第 i 台机器上的加工工序排列阵。

$$MO = \begin{bmatrix} MO_1 \\ MO_2 \\ \dots \\ MO_m \end{bmatrix}$$

2) 初始解的选取。我们借助于启发式规则,通过插入法来产生一个较好的初始解。步骤如下:

**Step0:** 首先找出工件中加工时间最长的工件,先排其各工序在机器上的顺序。排序的同时产生最初的起始时间矩阵 ST、终止时间矩阵 ET 和机器加工工序排序阵。

**Step1:** 从工件的工序矩阵 JO 中逐列取工序。

**Step2:** 判断此工序在哪台机器上加工,此机器上现有多少道工序,然后往已有的工序中插空,得出使当前目标函数最小的插入位置。

**Step3:** 往矩阵中加入此工序,同时更新起始时间矩阵和终止时间矩阵。

**Step4:** 若还有工序未被排入,则返回 Step1。

3) 邻域构造<sup>[39]</sup>。在应用禁忌搜索之前,由于车间作业的邻域构造有较强的代表性,我们首先考虑问题的邻域构造。

第一种方法是选一台机器上的两个工序交换位置加工,如一台机器上原有的加工序为(a,b,c,d,e),交换ac的序后,新的加工序为(c,b,a,d,e)。这样的邻域映像使得一个解有  $\sum_{i=1}^n C_n^2$  个邻居。进一步推广上面的方法,可以使得若干个位置交换。一种特殊的情况是将一个工序移到另一个位置加工,如在一台机器上原有的加工序是(abcdef),现将 f 移到第一个位置加工,则加工序为(fabcde)。这些是我们常见的方法。

第二种方法是关键路(critical path)法,这种方法所依赖的一个基本思想是:在第一种方法中,一些交换对目标没有影响,这些交换浪费时间,应抓住最长的、加工中没有空闲的一条路(即关键路),交换同在这条路上且同在一台机器上加工的两个加工工件的位置。

**定义 4** 在关键路上,满足下列条件的相邻节点集称为块(block):(1)由关键路上的相邻节点组成,至少包含两个工序;(2)集合中的所有工序在一台机器上加工;(3)增加一个工序后,不满足(1)或(2)。

**定理 1** 若某一解的关键路不包含块,则一定是最优解。

**定理 2** 若 y 和 y' 是车间作业调度的两个可行解,且 y 和 y' 对应的有向图为 S 和 S'。若 y' 改进 y,则一定满足下面的两个条件之一:

(1)至少有一个工序,它在 y 的一块 B 中且不是 B 块中的第一个工序,但在 y' 中它在 B 的其它工序之前加工;

(2)至少有一个工序,它在 y 的一块 B 中且不是 B 块中的最后一个工序,但在 y' 中它在 B 的其它工序之后加工。

通过定理 2,我们给出基于关键路的邻域构造方法。

邻域 N: 设 y' 为一个可行解,若 y' 是 y 的关键路中一个块中的作业前移或后移的所有可能位置加工,则称 y' 为 y 的一个邻居。所有这样的移动组成集合为 y 的邻域。

4) 禁忌表长度及渴望水平的确定。禁忌表长度(T)太小,有可能使搜索陷入循环;太大,又会使之跳过好解。在实验的基础上,一般取 T=7;渴望水平取当前最优解的终止时间矩阵中的最大值;取一个最大迭代次数作为停机准则。

图 3 是算法具体流程<sup>[40]</sup>。

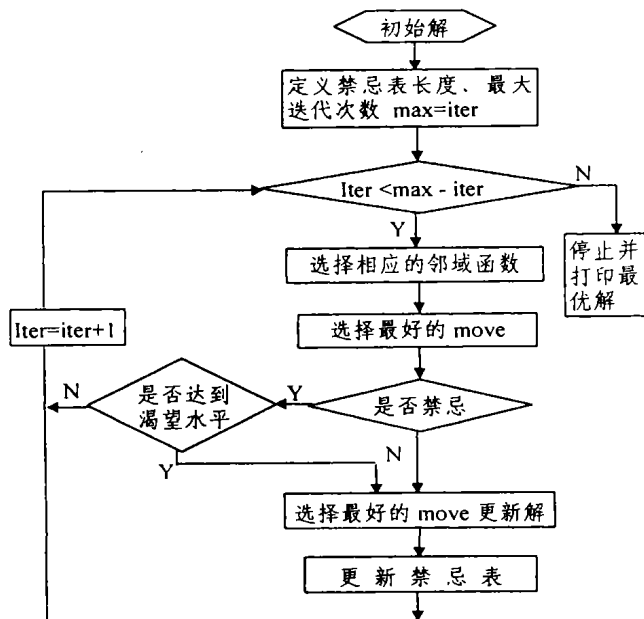


图 3 算法流程图

**结束语** 本文主要分为两个部分。在第一部分中主要介绍了优化调度的基本概念和目前该领域国内外的研究现状和一些成果;在第二部分中主要介绍了如何用禁忌搜索法来解决调度问题中的一类典型问题——Job Shop 问题。我们说实际的 Job Shop 调度问题非常复杂,文中的实例只是一种简化模型,针对实际问题,应该运用不同的求解方法,甚至同时运用不同的方法,即混合式算法。这也是新兴的优化求解方案的新特点和发展趋势。

### 参考文献

- 1 Garey M R, Johnson D S, Sethi, R. The complexity of flow shop and job shop scheduling. *Mathematics of Operations Research*, 1976
- 2 Doublgeri Z, D'alessandro G, Magaletti N. A hierarchical knowledge-based scheduling and control for FMSs. *Int. J. Computer integrated Manufacturing*, 1993, 6(3)
- 3 Wu, David S-Y, Wysk R A. An application of discrete-event simulation to on-line control and scheduling in flexible manufacturing. *Int. J. Prod. Res.*, 1989, 27(9)
- 4 Jiang, Chang-Qing, Singh, Madan G, Hindi, Khalil S. Optimized Routing in flexible manufacturing systems with blocking. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, 1991, 21(3)
- 5 Lee D Y, Dicesare F. Scheduling flexible manufacturing systems using petri nets and heuristic search. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 1994, 10(2)
- 6 Ow, Peng Si, Morton T E. Filtered beam search in scheduling. *Int. J. prod. Res.*, 1988, 26(1)
- 7 Lawler E L, et al. *Sequencing and Scheduling: Algorithms and Complexity*. *Operations Research and Management Science*, Vol. 4, Edited by S. C. Graves
- 8 Jeffcoat, David E, Bulfin R L. Simulated annealing for resource-constrained scheduling. *European Journal of Operational research*, 1993, 70
- 9 Taillard E. Some efficient heuristic methods for the flow shop sequencing problem. *European Journal of Oper. Res.*, 47/1, 1990
- 10 Languna, Manuel, Barnes J W, Glover F. Intelligent scheduling with tabu search: An application to jobs with linear delay penalties and sequence-dependent setup costs and times. *Journal of Applied Intelligence*, 1993, 3

- 11 尹新,杨自厚. 用 Tabu Search 方法解带有等待时间惩罚的提前/拖期调度问题. 系统工程理论方法应用,1995,4(1)
- 12 Balas E. Machine-Sequencing via Disjunctive Graphs: An Implicit Enumeration Algorithm. Oper. Res. ,1969,17
- 13 Garcia, Bruno-laurent, Potvin, Jean Yves and Rousseau, Jean-Marc. A parallel Implementation of the tabu search heuristic for vehicle routing problems with time window constraints. Computers Ops. Res. ,1994,21(9)
- 14 Foo Y S,Takefuji Y. Integer linear programming neural networks for job-shop scheduling. IEEE Int. Conf. On NNS, San Diego, 1988
- 15 高红,熊光榜. 决策规则在仿真调度中的应用. 控制与决策, 1995,10(2)
- 16 陈文德. 一类 DEFS 最优调度问题的解法. 自动化学报,1997, 23(5)
- 17 李大卫,王梦光. 一种改进的混合遗传算法. 信息与控制,1997,26 (6)
- 18 丁立功,钱跃辉,翟中牛. 遗传/禁忌组合算法在发电机组优化组合中的应用. 电力学报,2000,15(4)
- 19 杨圣祥,汪定伟. 用约束满足自适应神经网络和有效的启发式算法解 Job-shop 调度问题. 信息与控制, Apr. ,2000
- 20 Sen A K, Bagchi A, Sinha B K. Admissible search for minimum penalty sequencing of jobs with setup times on two machines. In: Proc. IJCAI-91, Int. Joint Conf. Artificial Intellig. Sydney, Aug. 1991
- 21 Glover F. New Approaches for Heuristic Search: A Bilateral Linkage with Artificial Intelligence. European Journal of Oper. Res. ,1989,39
- 22 Widmer M, Hertz A. A new heuristic method for the flow shop sequencing problem. European Journal of Oper. Res. ,1989, 41 (2)
- 23 He Zesheng, Yang Taeyong, Tiger A. An exchange heuristic imbedded with simulated annealing for due-dates job-shop scheduling. European Journal of Oper. Res. ,1996,91
- 24 Ishibuchi H, Misal S, Tanaka H. Modified simulated annealing algorithms for the flow shop sequencing problem. European Journal of Oper. Res. ,1995,81
- 25 Glover F. Future Paths for Integer Programming and Links to Artificial Intelligence. Computer & Oper. Res. ,1986,13(5)
- 26 王家钦. 生产调度的一种启发式规则. 清华大学学报,1995,35 (5)
- 27 Kouikoglou V S, Phillis Y A. An Exact Discrete-Event Model and Control Policies for Production Lines with Buffers. IEEE Trans. On automatic control,1991,36(5)
- 28 童刚,李光泉,刘宝坤. 一种用于 Job-Shop 调度问题的改进禁忌搜索算法. 系统工程理论与实践,2001
- 29 于海斌,薛劲松,王浩波. 一种基于神经网络的生产调度方法. 自动化学报,1999,25(4)
- 30 刘瑞华,涂奉生. Fork-Join 排队网络的建模与稳定性. 控制与决策,1994,9(3)
- 31 景艳艳,张永刚,孙吉贵. 用遗传算法求解调度问题. 吉林大学学报(理学版),2002(2)
- 32 Leung L C, Maqnheshwari S K, Miller W A. Concurrent part considerations. Int. J. Prod. Res. ,1993,31(1)
- 33 熊光榜,龚宁. 具有机器学习能力的智能车间调度系统. 计算机集成制造系统,1996(2)
- 34 王艳红,尹朝万,张宇. 基于多代理和规则调度的敏捷调度系统研究. 计算机集成制造系统,2000,6(4)
- 35 柯珂,张世英. 禁忌-递阶遗传算法研究. 控制与决策,2001,16 (4)
- 36 陈雄,汤光强,吴启迪. 一种求解 3 机 Flow-shop 调度问题的遗传算法. 同济大学学报,2001,29(8)
- 37 乔建忠,雷为民,李本忍,滕弘飞. 混合遗传算法研究及其在应用. 小型微型计算机系统,1998,19(12)
- 38 Lustig I J, Ave L V. Program  $\neq$  Program: Constraint Programming and its Relationship to Mathematical Programming
- 39 邢文训,谢金星. 现代优化计算方法. 清华大学出版社,1999,第一版
- 40 刘宝坤,王冬梅,童刚. Windows 环境下的禁忌搜索法解 Job-Shop 问题. 自动化与仪表,2000,15(1)

(上接第 4 页)

网络管理的核心问题,因此,对 Internet 服务管理的研究也会越来越深入. 本文对服务管理的初步研究为我们选择不同环境下的服务管理模型提供理论依据. 该课题受诺基亚中国研究中心“移动 IPv6 服务质量”项目资助. 下一步我们要结合移动 IPv6 网络环境来研究移动用户如何在任何时间、任何地点使用 Internet 上提供的各种服务的服 务管理问题.

### 参 考 文 献

- 1 van der Waaij ir B D, Gaidukov ir A V, Jansen ir J A. Internet Next Generation Management--Quality-based Service Management
- 2 IETF. Differentiated services. <http://www.ietf.org/index.html>, 2000
- 3 Sprenkels R A M, et al. A Customer Service Management Architecture for the Internet. <http://ing.ctit.utwente.nl/>
- 4 Sun, Technical White Paper: Jini Architectural Overview. <http://www.sun.com/nini/>,1999
- 5 Universal Plug and Play Forum. Universal Pug and Play Device Architecture. Version 0. 91, March 2000
- 6 Salutation Consrtium. White Paper: Salutation Architecture: Oview. <http://www.salutation.org/whitepaper/originalwp.pdf>,1998
- 7 The Internet Engineering Task Force (IETF). <http://www.ietf.org>
- 8 Guttman E, Perkins C, Veizades J, Day M. ,Service Location Protocol, Version 2
- 9 ITU Telecommunication Standardization Sector (ITU-T). <http://www.itu.int/ITU-T/>
- 10 Aiko Pras. Introduction to TMN. <http://www.simpleweb.org/tutorials/tmn/>,1999
- 11 ITU-T, Recommendation F. 435. Message Handling: Electronic Data Inter-change Messaging Service. Geneva, 1991
- 12 ITU-T, Recommendation X. 161. Definition of Customer Network Management Services for Public Data Networks. Geneva, April 1995
- 13 ITU-T, Recommendation X. 162. Definition of Management Information for Customer Network Management Service for Public Data Networks to be used with the CNMc Interface. Geneva, April 1995
- 14 ITU-T, Recommendation X. 163. Definition of management information for customernetwork management service for public data networks to be used with the CNMe interface. Geneva, April 1995
- 15 ITU-T, Recommendation X. 711. Common Management Information Protocol Specification For CCITT Applications. Geneva, 1991.
- 16 ITU-T, Recommendation F. 435. Message Handling: Electronic Data Inter-change Messaging Service. Geneva, 1991
- 17 Jini™ NETWORK TECHNOLOGY, Jini home page. <http://www.sun.com/jini/>. IETF, RFC 2608, June 1999. Available at: <http://www.rfc-editor.org/rfc/rfc2608.txt>.
- 18 Bluetooth home page. <http://www.bluetooth.com/>
- 19 Salutation home page. <http://www.salutation.org/>
- 20 IrDA home page. <http://www.irda.org/>
- 21 Understanding Universal Plug and Play White Paper. <http://www.upnp.org/resources/whitepapers.asp>