

# 生产调度理论和方法研究综述

徐俊刚 戴国忠 王宏安

(中国科学院软件研究所 北京 100080)

(xujungang@vip.sina.com)

**摘 要** 生产调度理论与方法研究是非常困难的课题,但是对企业或行业提高生产效率和效益是至关重要的,特别是在当前市场经济时代.生产调度理论和方法的研究已经有 50 多年的历史,但是经典调度理论和实际调度问题之间仍然存在着鸿沟.针对这一特点,指出了当前实际生产调度存在的一些问题和需要考虑的各种因素,例举了主要的生产调度方法和典型应用,指出了各种方法的优缺点.最后,总结并提出了生产调度理论和方法的未来研究方向和今后工作的建议.

**关键词** 生产调度;智能调度方法;实时反馈控制;MAS

中图法分类号 TP301

## An Overview of Theories and Methods of Production Scheduling

XU Jun-Gang, DAI Guo-Zhong, and WANG Hong-An

(Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

**Abstract** Research on theories and methods of production scheduling is an intractable subject, but it is very crucial for improving productivities and benefits in one enterprise or industry, specially in the era of market economy nowadays. It has been more than 50 years since the beginning of the research on theories and methods of production scheduling, but till now there still exists the gap between classical scheduling theories and practical scheduling problems. Considering this characteristics, some existing problems and factors to be addressed in handling practical scheduling problems are specified, various methods for solving production scheduling problems and some typical applications of these methods are listed, and their advantages, disadvantages are also indicated. Finally, several future research trends of production scheduling theories and methods and proposals for the future research work are summarized and presented respectively.

**Key words** production scheduling; intelligent scheduling method; real-time feedback control; MAS

### 1 调度理论的起源和发展

在过去的几十年中,人们对调度问题进行了大量的研究工作.从上个世纪 50 年代起,调度问题的研究就受到应用数学、运筹学、工程技术等领域科学家的重视.科学家们利用运筹学中的线性规划、整数规划、目标规划、动态规划及决策分析方法,研究并

解决了一系列有代表意义的调度和优化问题.但是,人们普遍把 Conway, Maxwell 和 Miller 三人有关调度的研究工作<sup>[1]</sup>作为调度理论研究的正式开始.他们 3 人也被人们称为调度理论的奠基人.此后 30 多年的调度理论和应用研究都受到他们的影响.20 世纪 70 年代,人们开始注意并重视调度复杂性问题的研究,提出了用于研究算法有效性和问题难度的计算复杂度理论<sup>[2]</sup>,许多调度问题被证明为

NP 完全问题<sup>[3]</sup>。

20 世纪 70 年代后期,经典调度理论取得了重要进展,并且作为一门应用数学学科已经基本成熟,但是实际调度问题与经典调度问题还有相当的距离。人们经常会问到这样的问题:“调度理论的研究成果有多少已经应用到实际调度问题中,比如敏捷制造、实时系统、C<sup>4</sup>I、空中管制、自适应容错和机器人等领域中的调度问题”,这是一个很难回答的问题,因为调度研究的分类经常是模糊不清的,并且某些调度研究是在很具体的层次上,通用价值很小。有关调度理论没有在实践中大规模应用的原因有很多说法,一种比较有说服性的说法是这样的:现有的调度理论和方法对于解决实际调度问题仍然是不够的,需要重新考虑和进一步扩展<sup>[4]</sup>。当然,严重阻碍经典调度理论研究取得重大进展和突破的关键还是调度问题的 NP 性质,实际调度问题往往都是非常复杂的,没有确定的物理和自然规律可循,因此是非常难解的,并且大多是没有精确解的。因此,仅仅依靠经典调度理论中基于解析优化的技术和方法,试图解决属于 NP 完全问题的实际调度问题,不可避免地会遇到难以逾越的障碍。

因此,从 20 世纪 80 年代初开始,人们就一直在尝试并致力于解决实际调度问题,调度研究由理论研究转向应用研究阶段。在这样的历史背景下,应用人工智能、计算智能和实时智能研究成果,解决实际调度问题的智能调度方法就走上了历史的舞台。从大量的文献所反映的情况看,智能调度方法是解决实际调度问题最有效的途径和最有前途的调度方法之一。同时,基于反馈控制的实时调度算法也初步显示了解决实际调度问题的强大威力,尽管目前还处于研究的初步阶段,但是随着研究的不断深入和应用的开展,相信会取得重大的突破性进展。因此,可以说,智能调度方法和基于反馈控制的实时调度理论和方法为解决实际调度问题展示了光明的前景。

## 2 生产调度问题的定义和分类

### 2.1 生产调度问题的定义

生产调度问题是一类典型的实际调度问题。早在上个世纪初就受到了企业工程师和管理顾问的重视,但是当时只是一些简单的想法,并没有上升到理论的高度,也没有切实可行的实际应用,比如 Gantt<sup>[5]</sup>解释如何使用可视化的图表来表示生产状况,Coes<sup>[6]</sup>描述了一种机械的调度技术,它与现在的

“看板(Kanban)”系统<sup>[7]</sup>有许多共同特性。当时的企业工程师和管理顾问很清楚要对工厂中的繁杂问题做些什么:他们讨论的中心问题是如何“分派(dispatching)”工作以及能够胜任这种工作的“调度员(scheduler)”<sup>[4]</sup>。

第 1 节我们已经提到,在过去几十年间,人们主要从应用数学的角度来研究调度问题,调度问题通常被定义为“分配一组资源来执行一组任务”,也就是“排序(sequencing)”。在生产调度中,就可以这样来描述调度问题<sup>[4]</sup>:“在某一时间期限内分配一组机器来执行生产订单任务”。针对当今先进制造模式,可以把生产调度定义得更详细一些:“生产调度是针对一项可分解的生产任务,探讨在尽可能满足约束条件(如交货期、工艺路线和资源情况等)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、其加工时间及加工顺序,以获得生产任务执行时间或成本的最优化”。

但是,在工厂或者公司的整个生产计划范围内设计一个单一的调度方案也是不可能的。因此,调度问题的求解空间需要分解成生产单元以及计划区间,以利于求解<sup>[8]</sup>。同时,研究者也认识到把调度问题与企业的组织机构和决策层进行关联的重要性。

### 2.2 生产调度问题的分类

生产调度问题的分类方法很多,主要有以下几种:

(1) 根据加工系统的复杂度,生产调度可以分为单机调度、Job-shop 调度、Flow-shop 调度、Open-shop 调度、多机器并行加工( $K$ -machine in parallel)调度等几个基本类型<sup>[8,9]</sup>。单机调度是指所有的操作任务都在一台机器上完成,需要对任务进行优化排队;Job-shop 调度是最一般的调度类型,它是指由  $m$  个不同的机器加工  $n$  个有特定加工路线(顺序)的工件,不同工件的工序间没有顺序约束,工序加工不能中断;Flow-shop 调度假设所有工件都在同样的设备上加工,并有一致的加工操作和加工顺序;多机器并行加工调度是指多台机器并行加工工件,而且并行加工的机器和工件都是类似的。实际的调度问题通常是上述几种调度类型的组合,在此不再详述。

(2) 根据优化准则,可以分为基于代价和性能的调度两大类。代价包括为了实现调度方案所消耗的各种费用和所造成的损失,如运行费用、运输费用、存储费用和延期交货损失等。性能主要包括设备利用率、最大完成时间、拖延加工任务的百分比等。虽然在理论分析上,大部分只注意调度的性能,

但在实际生产中,通常要综合考虑代价和性能两方面因素。

(3) 根据生产环境的特点,可将调度分为确定性调度和随机性调度。前者是指加工时间和其他参数是已知的、确定的量,而后的加工时间和有关参数是随机的变量。

(4) 根据加工任务或被加工工件的特征,可将调度分为静态调度和动态调度。静态调度是指所有待安排加工的工件均处于待加工状态,因而进行一次调度后,各作业的加工被确定,在以后的加工过程中就不再改变。动态调度是指作业依次进入待加工状态,各种作业不断进入系统接受加工,同时完成加工的作业又不断离开,还要考虑作业环境中不断出现的不可预测的动态扰动,如作业的加工超时、设备的损坏等。

实际的生产调度问题往往是由 Job-shop 和 Flow-shop 型等基本调度类型组合而成,基于代价且是随机性的、动态的。

### 3 生产调度方法综述

在对调度问题进行研究的方法上,最初是集中在数学规划、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调度问题。随着各种新的相关学科与优化技术的建立与发展,在调度领域出现了许多新的优化方法,比如基于人工智能、计算智能和实时智能的各种调度方法,这些方法已经成为调度方法的主流。

#### 3.1 数学规划方法

数学规划方法就是第 1 节中提到的运筹学方法,它将生产调度问题简化为数学规划模型,采用整数规划、动态规划以及决策分析等方法来解决调度最优化或近似优化问题,也称为优化调度方法。生产调度中广泛使用的是混合整数线性规划(mixed integer linear programming, MILP)和混合整数非线性规划(mixed integer non-linear programming, MINLP)方法。典型应用有:Coxhead<sup>[10]</sup>使用几个经典的 MILP 模型对炼油厂的调度优化进行建模;Schuster 和 Aller<sup>[11]</sup>建立了一个线性规划模型来分配食品加工厂的稀有资源;Adelman 等人<sup>[12]</sup>采用整数规划技术来分配电缆生产厂里的光纤;Roslof 等人<sup>[13]</sup>开发了一种基于 MILP 的算法来求解生产调度和重调度(re-scheduling)问题,并且在造纸厂和制药厂进行了应用等等。

数学规划方法的优点是任务分配和排序的全局性比较好,所有的选择同时进行,因此可以保证求解凸和非凸问题的全局优化。但是,数学规划方法是一种精确求解方法,它需要对调度问题进行统一的建模,任何参数的变化会使得算法的重用性很差,因此,对于复杂多变的生产调度来说,单一的数学规划模型不能覆盖所有的因素,存在求解空间大和计算困难等问题。

#### 3.2 启发式搜索方法

启发式搜索方法最初是作为人工智能中问题求解程序的搜索器而被开发出来的。启发式搜索方法依靠任务无关信息来简化搜索过程,在很多情况下,问题求解可视为系统化地构造或查找解答的过程。典型应用有:Jänicke<sup>[14]</sup>提出了一种针对多目标车间短期调度的基于启发式算法的关键路径方法;衣杨和汪定伟<sup>[15]</sup>使用启发式方法对并行多机成组工作总流水时间调度问题进行求解;Tadei 等人<sup>[16]</sup>提出了一种针对食品工业生产计划和调度的分区算法(partitioning algorithm)和本地搜索(local search)技术等等。

启发式搜索方法的优点是利用了面向特定问题的知识和经验,因而可以产生好的解决方案,求解时间也可以接受。启发式搜索方法的缺点是用来评估解决方案的质量手段还较少,如何提高搜索效率并减少内存使用以解决规模较大的问题,还需要进一步探索。

#### 3.3 系统仿真方法

基于仿真的方法不单纯追求系统的数学模型,它侧重于对系统中运行的逻辑关系的描述,而且与数学规划采用全局的而且经常是简化的视图相比,它对所有分配、排序和时间选择决策的结果提供局部的分析,通过分析能够对生产调度方案进行比较评价,并选择效果最优的生产调度方法和系统动态参数。系统仿真方法经常与其他方法结合使用,文献[17]给出了一个数学规划方法和仿真方法结合使用的例子;Artiba 和 Riane<sup>[18]</sup>利用专家系统技术、仿真技术、优化算法和启发式算法开发了一个化工厂的生产计划和调度系统等等。

由于生产系统的复杂性,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数据,则能对实际系统进行性能和状态等方面的分析,从而能对系统采用合适的控制调度方法。之所以把仿真方法与其他方法结合使用,是因为纯仿真方法有以下局限性:应用仿真方法进行生产调



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、建立和运行仿真模型上;仿真的准确性受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。

### 3.4 人工智能方法

人工智能在 20 世纪 60 年代就将计划和调度问题作为其应用领域之一,但直到 20 世纪 80 年代,以 Carnegie Mellon 大学的 M Fox 为代表的学者们开展基于约束传播的智能调度和信息系统(intelligent scheduling and information system, ISIS)的研究<sup>[19]</sup>为标志,人工智能才真正开始应用于实际调度问题。基于人工智能的调度方法主要有智能调度专家系统、约束规划(constraint programming, CP)及基于 Multi-Agent 技术(multi-agent system, MAS)的合作求解方法等。

#### 3.4.1 智能调度专家系统

专家系统在 20 世纪 80 年代早期和中期非常流行,它在许多领域也得到了应用。如果要建立一个专家系统,首先需要构建相关的知识库,就是从知识源获取知识然后以数字化形式存储它们,在调度问题中,知识源一般指的是人类专家和模拟数据。前面提到的 ISIS<sup>[19]</sup>是第 1 个旨在解决 Job-shop 调度问题的专家系统。ISIS 使用面向约束的推理方法,它基于 3 类约束:组织上的目标、物理限制和临时约束,并使用有关约束的知识来维护调度的一致性。此外,黎志成等人<sup>[20]</sup>提出了一种基于专家仿真系统的生产重调度方法;O'Grady 和 Lee<sup>[21]</sup>提出了一种称做 PLATO-Z 的单元控制系统,它使用了一个基于规则的专家系统和一个多黑板/角色模型,主要的功能由 4 个黑板子系统来完成:调度、操作分配、监控和故障处理。

调度专家系统主要的优点有:在决策过程中,它既可以使用定量的知识,又可以使用定性的知识;它能够产生比简单的分配规则复杂得多的启发式规则。然而,调度专家系统也有其不可克服的缺点:构建和验证系统比较耗费时间;难以维护和升级;求解结果可能会严重偏离最优解或次优解;知识获取和推理速度存在瓶颈。

#### 3.4.2 约束规划

约束规划是一种旨在应用限制变量选取顺序和变量赋值顺序来减少搜索空间有效大小的方法。当一个值赋给一个变量时,产生的不一致性就消除了。消除不一致性的过程称做一致性检测,而消除以前

做的工作称做回溯。早期的基于约束规划的调度系统的例子有 Fukumori<sup>[22]</sup>的训练调度方案、Bullers 等人<sup>[23]</sup>基于逻辑的系统以及 Vere<sup>[24]</sup>的称做“Deviser”的计划方法。ILOG 约束规划优化包(ILOG CPLEX)是一个应用于制造业生产计划和调度的成功描述约束传播问题的软件包,它提供一个使用搜索方法、问题缩减方法和 LP 求解器进行合作求解的策略。对上一节提到的 ISIS 的修改产生了生产调度系统 OPIS 产品族<sup>[25]</sup>。

约束规划可以用来实施柔性的和有效的调度系统,因为它把各种不同的算法包装成传播器,使得可以对可重用的求解器进行规划。约束规划不局限于一定的约束集合,因为它使用了一个纯声明的(declarative)模型,每一个传播器定义问题的一个独立视图。但是这一方法的求解代价比较大,而且由于考虑了多种约束,求解难度很大。

#### 3.4.3 基于 MAS 的合作求解方法

专家系统很难用来解决大规模的复杂的实际调度问题,因为它们的知识和问题求解能力是有限的。为了解决这些复杂问题,研究人员使用“分而治之(divide and conquer)”的方法来开发分布式调度系统,这需要一种分解调度问题的技术以及能够协作求解整个问题的相关的知识系统的集合。这些可以通过 MAS 来实现。典型研究和应用有:Grace Yuh-jun 等人<sup>[26]</sup>在其提出的 MAS 框架中将制造系统中各个功能和实体(机器设备、任务、数据库等)都予以 Agent 化,并采用基于价格机制的市场模型实现 Agent 之间的协商;王艳红等人<sup>[27]</sup>研究了敏捷制造环境下制造车间生产过程的动态调度问题,提出了综合运用 Multi-Agent 技术与规则调度解决这一动态调度问题的方法;赵博<sup>[28]</sup>在调度算法分类的基础上,提出用 MAS 技术实现各种调度算法的集成,主要方案是针对不同类别算法的不同结构,定义不同的 Agent,它们本身是通用的,但是在不同的环境中,它们可以运用相应的知识进行协作来解决具体的调度优化问题等等。

MAS 技术可以弥补调度理论的不足,可以增强调度理论在实际应用中的灵活性;MAS 可以和其他各种生产控制技术如企业资源计划(enterprise resources planning, ERP)、最优生产技术(optimized production technology, OPT)和制造执行系统(manufacturing executing system, MES)等结合起来使用。MAS 的不足之处就是在理论上有待进一步完善,标准化工作不够,导致重复劳动。

### 3.5 计算智能方法

计算智能是在神经网络、模糊系统、进化计算 3 个分支发展相对成熟的基础上,通过相互之间的有机融合而形成的新的科学方法,也是智能理论和技术发展的崭新阶段。这些不同的成员方法从表面上看各不相同,但实际上它们是紧密相关、互为补充和促进的,因而,将三者结合起来研究已经成为一种发展趋势。主要的计算智能调度方法有人工神经网络、混沌搜索、模拟退火和随机机、禁忌搜索、模糊逻辑、遗传算法、进化规划和进化策略等。我们在此只介绍其中几种主要的方法。

#### 3.5.1 人工神经网络

“人工神经网络”(artificial neural network, ANN)是在对人脑组织结构和运行机制认识理解的基础上模拟其结构和智能行为的一种工程系统。早在 20 世纪 40 年代初期,心理学家 McCulloch 和数学家 Pitts 就提出了人工神经网络的第 1 个数学模型,从此开创了神经科学理论的研究时代。其后, Rosenblatt, Widrow 和 Hopfield 等学者又先后提出了各种人工神经网络模型,其中 Hopfield 对神经网络的复兴作出了重大贡献,他的成果展示了模拟神经网络所具有的强大计算能力。典型应用有: Foo 和 Takefuji<sup>[29]</sup>使用 Hopfield 网络来解决 Job-shop 调度问题,但是他们提出的方法对于求解大规模问题有一定难度; Zhou 等人<sup>[30]</sup>通过使用一个线性代价函数修正了这一方法,使得不仅能够产生更好的结果而且降低了网络复杂性;王浩波<sup>[9]</sup>用神经网络求解一种扩展 Job-shop 调度问题;王万良等人<sup>[31]</sup>对作业车间调度问题的换位矩阵表示方法进行了改进,提出了改进的 Hopfield 神经网络作业车间调度方法;S Yang<sup>[32]</sup>等人使用基于神经网络和启发式搜索的混杂方法来求解 Job-shop 调度问题。

人工神经网络具有很强的分布式存储能力和很大的存储空间,而且具有自学习能力;再者容错性好,其特有的高维空间使多体效应更加复杂和显著,易于分类。但是,人工神经网络在实际生产中的应用不是很多,而且存在学习效率比较差、难以表达符号知识以及其他知识、计算速度比较慢和计算精度不高等缺点,这些都需要进一步改进。

#### 3.5.2 模拟退火方法

自从 Kirkpatrick, Gelatt Jr 和 Vecchi 在前人对统计力学研究的基础上发表了他们开创性的论文“Optimization by Simulated Annealing”<sup>[33]</sup>以来,模拟退火算法(simulated annealing, SA)被赞誉为解决

许多高难度调度和组合优化问题的“救星”,它是根据液态和固态材料中粒子的统计力学规律与复杂组合优化问题求解过程的相似之处而提出来的,已经应用到许多领域。典型研究和应用有: Yamada<sup>[34]</sup>建立了一种称做临界区模拟退火(critical block simulated annealing, CBSA)的方法,它嵌入了一个来源于临界区的邻域结构到 SA 框架中,初始温度和最终温度按照用来改善搜索的退火过程的接受率来确定; Szu 和 Hartley<sup>[35]</sup>设计了一种为了加速收敛而允许偶然的长步长跳跃的快速模拟退火(fast simulated annealing, FSA)方法; Sridhar 等人<sup>[36]</sup>使用 SA 方法进行单元制造系统的调度;张雪江等人<sup>[37]</sup>提出了一种基于 SA 的知识获取方法; Raaymakers 等人<sup>[38]</sup>使用 SA 来解决无等待约束的多目标流程企业的调度问题等等。

模拟退火算法显示出了求解优化问题的强大威力,它可以突破局域搜索的限制,转移到代价较高的解答,而且如果选择参数得当,会在很快的时间内收敛。但是,模拟退火算法在实际应用中往往不能产生较优的结果,而且各个参数选择起来比较困难,如果选择不得当,就会使得计算时间很长,而且可能得不到好的结果。模拟退火算法和其他算法结合使用会得到很好的效果,如和遗传算法、人工神经网络结合等。

#### 3.5.3 模糊逻辑

1965 年,美国控制论专家 Zadeh 教授首先提出模糊集合的概念,发表了开创性论文“模糊集合论(fuzzy sets)”<sup>[39]</sup>。他提出,模糊数学的核心思想就是运用数学手段,仿效人脑思维,对复杂事物进行模糊处理。1973 年, Zadeh 教授又提出模糊逻辑(fuzzy logic)的理论,并积极倡导将模糊理论向人工智能方向发展。模糊集理论对于建模和求解 Job-shop 调度问题是非常有用的,因为它就具有许多模糊特征,比如不确定的加工次数、不确定的约束数量以及不确定的加工时间等。典型应用有: Chang 和 Yi<sup>[40-41]</sup>使用一种机器学习方法来为一个看板系统开发模糊规则库; Tsutomu 等人<sup>[42]</sup>使用模糊容许时间和模糊资源约束来求解 Open-shop 调度问题等等。

模糊系统的显著特点是能够直接地表示逻辑,适于高级知识表达,具有较强的逻辑功能。但它没有本质的获取知识的能力,模糊规则的确定也比较困难,通常需要领域专家知识的指导,因此如何实现模糊规则的自动提取和模糊变量隶属度函数的自动生成及优化,一直是一个难题。模糊调度方法通常

和其他方法结合使用,如模糊神经网络和基于模糊规则的分枝定界法等。

### 3.5.4 遗传算法

美国 Holland 教授 1975 年首次提出的遗传算法(genetic algorithm, GA)<sup>[43]</sup>是一类通过模拟生物界自然选择和遗传机制的随机搜索算法。遗传算法对求解问题本身一无所知,它所需要的仅是对算法所产生的每个染色体进行评价,并根据适应性进行选择,使适应性好的染色体比适应性差的染色体有更多的繁殖机会,经过反复迭代,直到达到某种形式的收敛。遗传算法尤其适用于处理传统搜索方法难以解决的复杂的非线性问题,可广泛用于组合优化、机器学习和规划设计等领域。已经有一些研究人员把遗传算法应用到生产调度问题中,使用遗传算法求解生产调度问题的主要工作有:生产问题到遗传编码的转换、字符串操作符的选择和限制搜索空间的约束描述等。典型研究和应用有:Starkweather 等人<sup>[44]</sup>在一个啤酒厂中应用遗传算法解决了多目标 Job-shop 调度问题,这些目标包括工厂中平均存货时间的最小化和客户订单平均等待时间的最小化等。刘民等人<sup>[45]</sup>用遗传算法解决并行多机调度问题。张纪会等人<sup>[46]</sup>用遗传算法进行生产动态调度知识获取,并用实例说明了其可行性。Amancio 等人<sup>[47]</sup>用遗传算法来解决流程工业中能量和生产的调度优化问题等等。

遗传算法已经成为一种比较通用的优化算法,主要原因是其编码技术和遗传操作比较简单,优化不受限制性条件的约束。但是遗传算法也有其明显的不足之处:对于大规模的组合优化问题,搜索空间大,搜索时间较长;往往会出现早熟收敛的情况;对初始种群很敏感,初始种群选择不好会影响解的质量和算法效率。为了进一步改进遗传算法,人们主要从两方面入手:一是对遗传算法本身进行改进;二是与其他算法结合,取长补短。

### 3.6 实时智能方法

将实时技术和人工智能相结合,形成一个新的技术领域,人们称之为“实时智能”。可以这样通俗地定义实时智能<sup>[48]</sup>：“实时智能是指在一定的时间范围内能够实现的人工智能”。实时智能主要应用于实时系统的调度中,其中的调度算法又是实时调度的核心部分,也是实时系统的研究热点。有些生产调度问题对实时性要求很高,因此,研究实时智能方法在生产调度中的应用也是非常必要的。

从 L. 等人<sup>[49]</sup>在 1973 年发表第 1 篇系统研究

实时系统调度算法的文献至今,已经出现了很多经过深入研究的调度算法及策略。这其中包括解决静态调度的禁忌搜索算法、模拟退火算法、阈值接受算法和遗传算法等,以及面向单机动态调度的比率单调(rate monotonic, RM)算法<sup>[49]</sup>、最早截止期优先(earliest deadline first, EDF)算法<sup>[50]</sup>、最小延迟优先(last laxity first, LLF)算法<sup>[51]</sup>和 IADSH 算法<sup>[52]</sup>等,并且已经大量地应用到各种实时系统之中。

尽管传统的实时调度方法,如 EDF 和 RM 等调度算法能够支持复杂的任务集特征(如截止期、优先约束和共享资源等),但它们都是“开环”的调度算法。所谓“开环”调度是指一旦调度形成了,它们不能通过连续反馈进行调整。当静态或动态系统中的任务集能够被精确地建立模型时,开环的调度算法就能完成得很好,但在复杂的和不可预测的动态系统中,任务集不能精确建模,这时开环的调度算法就完成得不好。

近几年,针对实时应用环境大多不可预测,且任务的工作负载和时间约束常常不明确的这一特点,人们又提出了一些闭环式或称为基于反馈控制的实时调度算法。第一次明确提出完整的基于反馈控制的实时调度思想及对反馈控制实时调度进行深入研究的是 Stankovic 及其领导的研究小组<sup>[53-55]</sup>。这种实时调度方法通过监测预先定义的调度误差,进而连续调整调度算法或任务集合以达到提高系统性能的目的。由于这类研究刚刚起步不久,因而还有待对其理论体系进行完善和实验验证。

目前已经开发出一些实时智能系统软件产品,如实时智能系统开发平台 G2、基于 Agent 的计划与调度系统 ResponseAgent 以及复杂实时系统的开发工具包 RTWorks 等,它们都在生产调度领域有大量应用。此外,王宏安<sup>[48]</sup>研究了实时智能技术在流程企业中的应用,提出了一种适合于流程企业生产计划和调度优化的实时智能系统体系结构,并且基于这种结构开发了炼油厂生产实时智能管理原型系统。

## 4 典型生产调度系统和工具包介绍

前面第 3.4.2 节提到 ILOG CPLEX 是法国 ILOG 公司生产的一个软件包,现在 ILOG CPLEX 已发展成为用来求解线性规划、混合整数二次规划的灵活鲁棒性优化工具。ILOG 公司是世界上提供企业优化和可视化软件的主要供应商,目前其产品已在通信、制造业、交通运输和国防等领域得到了广



泛应用。除了 ILOG CPLEX 之外, ILOG 公司的优化产品<sup>[56]</sup>还有 ILOG Solver, ILOG Scheduler, ILOG Dispatcher, ILOG Configurator, ILOG JConfigurator, ILOG OPL Studio 和 AMPL 等, 这些产品主要是用来定义和求解一些和数学规划有关的生产调度问题, 有其局限性。有兴趣的读者可以到其网站了解更多相关内容。此外, 求解数学规划调度问题的工具包还有美国 Illinois 大学的 BARON<sup>[57]</sup>, 美国 Dash Optimization 公司的 Xpress-MP<sup>[58]</sup>, 美国 COSYTEC 公司的使用第 2 代约束规划技术的 CHIP V5<sup>[59]</sup> 等等。

当前, 世界上比较著名的生产调度系统主要有: BMC 公司的业务集成调度解决方案 CONTROL-MC<sup>[60]</sup>; Preactor 公司的系列调度产品<sup>[61]</sup>, 包括 Preactor Lite, Preactor FCS, Preactor APS 等; Arima 公司的 SYNCRUN 调度软件<sup>[62]</sup>; Madrigal 公司提供的资源调度软件 ResSched<sup>[63]</sup>; MST 公司的企业资源管理系列软件<sup>[64]</sup>; AppliTech 公司的供用户自主开发生产调度系统的工具 Schedule Builder<sup>[65]</sup> 等等。

此外, MathWorks 公司著名的可视化建模和仿真工具 Matlab<sup>[66]</sup> 提供神经网络和模糊逻辑等工具箱供用户开发相关的调度和控制模块, 并可以集成到相应的生产调度系统中去; 美国海军实验室 (Naval Research Laboratory) 的信息技术部门 (information technology division) 提供遗传算法源程序列表<sup>[67]</sup>, 大家可以用来说设计自己的遗传算法应用程序, 并根据需要嵌入到相应的生产调度系统中。Synaps 公司的 Pointer<sup>[68]</sup> 是一个自动参数化的遗传算法工具包, 可以用来求解大规模的调度优化问题。其他的生产调度系统和工具包还有很多, 在此就不一一介绍了。

## 5 生产调度理论和方法的未来研究方向

通过对生产调度理论和方法的综述, 总结出生产调度理论和方法的几个未来研究方向。

### (1) 生产调度问题框架及形式化研究

文献 [4] 中提到了调度理论和实践的统一问题, 指出了调度理论和调度实践之间存在的巨大差距, 并试图统一调度理论和实践。文中针对生产调度问题提出了调度问题的组织视图和任务视图的概念, 指出要从这两个方面来考虑生产调度问题, 而不能像原有调度理论那样只考虑任务视图。基于这两个视图, 作者提出了一个生产调度问题的基础框架。

但是作者只是从描述的层次上提出了这个生产调度基础框架, 还没有形式化, 而且这个框架依然有很多需要补充和完善的地方。因此, 建立和完善生产调度问题的基础框架, 并且对其进行形式化是将来生产调度理论研究的重要方向之一。

### (2) 调度问题的建模和描述

建模是生产调度与过程优化的基础, 统一的系统模型使调度问题的集成优化分析和设计较为容易, 有利于调度和优化分析算法的实现。现有建模方法最主要的问题是难以同时处理数据和语言两方面的信息, 并且缺少统一的系统模型。对于这个问题, 国内外已做了很多研究, 提出了很多方法, 特别是近年来发展起来的神经网络、模糊规则等建模方法等, 但是还没有针对生产调度问题的神经网络、模糊规则建模标准。Purdue 大学的研究人员开发了一种专门面向生产调度的建模和描述语言——RCSpec<sup>[69]</sup>, 它可以用来对复杂的生产调度问题进行建模和描述, 然后通过专门的编译器, 转换成数学规划模型, 它独立于要转换成的模型形式, 是一种通用的生产调度问题描述语言, 但是, 到其他类型模型的转换还有待进一步开发。因此, 研究如何对生产调度问题进行建模和描述也是生产调度理论和方法的研究方向之一。

### (3) 调度算法和调度系统的深入研究和开发

虽然已经有了很多针对生产调度问题的调度算法和调度系统, 也已经取得了不错的效果, 但是由于调度问题的 NP 性质, 不可能在短期内取得突破性进展, 这就要求人们进一步拓宽研究范围和思路, 在原来调度算法的基础上继续寻找可行的能够获得最优解而且求解速度快的调度算法。就拿计算智能中的进化计算来说, 目前尚停留在较浅的进化层次, 可以借鉴生物进化的微观和宏观机理进一步挖掘其“进化”潜力, 以提高算法的求解能力和效率。基于人工智能、计算智能和实时智能的智能调度算法将会是未来调度算法的主流, 是非常有前途的调度算法。调度系统是应用各种调度算法求解实际调度问题的计算机系统, 因此除了使用的调度算法之外, 还有很多相关的技术问题需要解决, 这也是调度和计算机等领域的专家需要进一步考虑的问题。

### (4) 调度专家的作用问题研究

当前, 大多数生产调度还是要依赖于调度员长期积累的经验。同时, 生产调度系统也逐渐地应用到生产实际中, 尽管还有很多不如意的地方, 但是不管调度系统发展到什么地步, 都不能忽略人类调度

专家的作用,他们具有丰富的经验,因为纯粹的自动化调度是不现实的,也是非常难实现的.因此,生产调度理论和方法的研究与应用在什么时候都不能忽略具有最终决策职责的调度专家的重要作用.所以,研究调度专家的作用以及如何与调度系统的协调等问题也是一个重要的研究方向.

#### (5) 多种调度方法的结合问题

在过去几十年中,人们将许多算法应用于调度领域,并且研究和开发了许多新的调度算法,这些工作形成并丰富了调度理论.但是,当前人们使用的各种调度算法需要特定的应用环境,并不能简单地拿来应用于生产调度领域.这使得一些调度算法不能完全发挥它们的作用.调度理论和实践的不一致性严重阻碍了调度理论和应用的发展.如果找到一种能够集成不同调度算法以适应复杂调度环境的机制就好了.文献[45]就对调度算法的集成问题进行了比较深入地研究.因此,集成各种调度算法求解生产调度问题,充分发挥各种调度算法自身的优势,是今后研究和解决实际调度问题的重要方向之一.

#### (6) 与其他系统的集成问题

目前制造业,特别是流程工业中生产调度和过程优化控制相互脱节,在过程控制和管理信息系统之间存在着“信息鸿沟”<sup>[70]</sup>,割裂了流程企业经营管理与生产控制,如过程优化控制往往强调“卡边生产”,只考虑单一品种、满负荷生产、稳定工况条件下的线性最优控制,以追求最大产量,但在目前市场经济条件下,应该综合考虑销售、产量、质量、原料消耗、环境保护等情况,以取得最大的经济效益和社会效益.但这两个领域的研究是孤立地进行的,缺少面向生产调度和过程控制集成技术的研究,从而难以真正实现计算机集成优化生产.因此,只有将调度和控制综合考虑,实现信息与功能的集成,才能形成一个适应生产环境不确定性和市场需求多变性的全局优化的高质量、高柔性、高效益的智能生产系统<sup>[71]</sup>.因此,调度系统应能与现有企业的信息基础结构进行通信与信息交换,并作为信息基础结构的一部分,这也是生产调度理论和方法的研究方向之一.

#### (7) 基于反馈控制的实时调度

前面提到的基于反馈控制的实时调度算法对于求解动态复杂环境下的调度问题具有强大的计算和调度能力,Stankovic 领导的研究小组从 1998 年明确提出这一理论以来,做了很多研究,首先从单处理器的实时调度开始,接着进行了分布式多处理器实

时调度的研究.

由于基于反馈控制的实时调度是近几年才出现的调度理论和方法,在国外对其进行研究的报道尚不多见,目前仅有 Stankovic 的研究小组,而国内至今罕有单位对其展开深入的研究.王宏安领导的研究小组自 1999 年开始针对实时异构系统的集成动态调度算法进行了研究<sup>[52]</sup>,提出了实时异构系统的智能动态调度框架——FIDSH 框架;并在此基础上,提出了一种新的实时异构系统的可适应性集成动态调度算法——IADSH 算法;并针对基于水箱模型的实时异构系统的调度问题进行了研究,提出了基于反馈控制的实时异构系统的动态调度问题框架.

但是从总体来说,基于反馈控制的实时调度理论和方法还处于研究的初步阶段,对反馈调度的体系结构、反馈调度的性能指标分析、反馈控制方法在实时调度,特别是在实时生产调度中的应用等方面都需要进一步探索,因此此类课题有着很好的研究与应用前景.

#### (8) MAS 理论和实时调度的结合

传统的 Agent 没有考虑时间概念,只是一个具有推理能力的知识系统,MAS 理论的提出和发展为解决调度问题提供了灵活方便的实现机制,但是一开始也没有考虑时间约束,即使著名的“开放 Agent 体系结构”(open agent architecture, OAA)“规范对实时约束考虑也较少,只在请求服务中提供一个时间参数指明完成请求的截止期,但在发布 Agent 能力的服务中没有提供明确的实时服务信息.在实际的生产调度,特别是流程企业的生产调度中,生产任务大多是动态的,往往需要对它们进行实时监控和调度,以满足任务的截止期.近几年,人们开始关注 MAS 和实时调度的结合问题,文献[72]中提出了一种基于公共对象请求代理体系结构(common object request broker architecture, CORBA)的实时 MAS 系统体系结构,在其中的实时服务 Agent 中集成了 EDF 算法,并且给出了原型实现.文献[73]中也提出了实时 Agent 和实时 Agent 调度的模型,并且基于启发式算法开发了一种实时调度算法应用于这些模型.因此,把 MAS 理论和实时调度结合使用,充分发挥两者的优势,也是未来生产调度理论和方法研究的方向之一.

## 6 今后工作的建议

对于今后有关生产调度领域的研究工作,有以



下一些建议,供大家参考:

### (1) 理论和实践紧密结合

前面已经提到,在调度理论和实际应用之间存在鸿沟,为了更好地在企业中应用,就需要计算机专家、调度专家和现场调度员进行紧密的合作,研究并开发面向实际生产调度的理论和应用软件。

### (2) 规范和描述生产调度框架是当务之急

就像软件工程中的需求分析一样,对生产调度任务和环境建立完整可行的框架是非常重要的,如果这方面的工作做不好,就会影响以后的各个环节。当前的情况就是如此,人们还没有对生产调度框架进行规范,这是一项有意义的研究工作。

### (3) 优先选取智能调度方法

基于人工智能、计算智能和实时智能的智能调度方法已经显示出其优越性,应该优先选取这些方法,如实时 MAS、模糊神经网络、遗传算法等。当然也并不排斥与其他方法一起使用。

### (4) 加强基于反馈控制的实时调度方法在生产调度领域的研究和应用

目前基于反馈控制的实时调度方法的研究还主要集中在处理器调度方面,对其在生产调度领域的应用研究还基本没有,因此建议在这方面开展一些有价值的研究,以最终应用到实际生产调度中。

### (5) 加强流程工业生产调度理论方法和应用的研究工作

从阅读的大量文献来看,人们对离散制造业中的生产调度问题研究得很多,也有不少实际应用的商品化软件,但是对于流程工业中的生产调度问题研究得还不是很多。流程工业基础自动化水平相对较高,在流程工业中实现综合自动化和优化调度所取得的经济效益和社会效益,会比离散型工业取得的效益更明显和迅速。因此,加强流程工业生产调度理论、方法和应用的研究也是非常必要的。

## 参 考 文 献

- 1 R N Conway, W L Maxwell, L W Miller. Theory of Scheduling. Reading, MA: Addison Wesley, 1967
- 2 R E Miller, J W Thatcher. Complexity of Computer Computations. New York: Plenum Press, 1972
- 3 S A Cook. The complexity of theorem-proving procedures. In: Proc of the 3rd Annual ACM Symp on Theory of Computing. New York: ACM Press, 1971. 151~158
- 4 K N McKay, V C S Wiers. Unifying the theory and practice of production scheduling. Journal of Manufacturing System, 1999, 18(4): 241~255
- 5 H L Gantt. Organization for Work. London: Allen and Unwin, 1919
- 6 H V Coes. Mechanical scheduling. In: H F Dutton ed. 110 Tested Plans that Increased Factory Profits, Selected Ideas from Factory and Industrial Management. Chicago: McGraw-Shaw Co, 1928
- 7 T Chang. A fuzzy rule-based methodology for dynamic Kanban control in a generic Kanban system[ Ph D dissertation ]. Purdue University, West Lafayette, 1996
- 8 陈荣秋. 排序的理论和方法. 武汉: 华中科技大学出版社, 1987  
(Chen Rongqiu. Theories and Methods of Sequencing (in Chinese). Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1987)
- 9 王浩波. 基于人工神经网络的调度方法研究与应用[ 硕士论文 ]. 中国科学院沈阳自动化研究所, 沈阳, 1997  
(Wang Haobo. Research on artificial neural network based scheduling method and its applications[ Master dissertation ] (in Chinese). Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, 1997)
- 10 R E Coxhead. Integrated planning and scheduling systems for the refining industry. In: T A Ciriani, R C Leachman eds. Mathematical Programming and Modeling Techniques in Practice, Vol 2. Chichester: John Wiley & Sons, 1994. 186~199
- 11 E W Schuster, S J Allen. Raw material management at Welch's, Inc, Interfaces, 1998, 28(5): 13~24
- 12 D Adelman, G L Nemhauser, M Padron *et al.* Allocating fibers in cable manufacturing. Manufacturing and Service Operations Management, 1999, 1(1): 21~35
- 13 J Roslof, I Harjunkoski, J Bjorkqvist *et al.* An MILP-based reordering algorithm for complex industrial scheduling and rescheduling. Computers and Chemical Engineering, 2001, 25(4/6): 821~828
- 14 W Jänicke. On the solution of scheduling problems for multi-purpose batch chemical plants. Computers and Chemical Engineering, 1984, 8(6): 339~343
- 15 衣杨, 汪定伟. 并行多机成组工作总流水时间调度问题. 计算机集成制造系统, 2001, 7(7): 7~11  
(Yi Yang, Wang Dingwei. Scheduling grouped jobs on parallel machines with setups. Computer Integrated Manufacturing Systems (in Chinese), 2001, 7(7): 7~11)
- 16 R Tadei, M Trubian, J L Avendano *et al.* Aggregate planning and scheduling in the food industry: A case study. European Journal of Operational Research, 1995, 87(3): 564~573
- 17 G V Reklaitis. Scheduling approaches for the batch process industries. ISA Transactions, 1995, 34(4): 349~358
- 18 A Artiba, F Riane. An application of a planning and scheduling multi-model approach in the chemical industry. Computers in Industry, 1998, 36(3): 209~229
- 19 M Fox. Constraint-directed search: A case study of job shop scheduling [ Ph D dissertation ]. Carnegie-Mellon University,

- Pittsburgh, 1983
- 20 H Li, Z Li *et al.* A production rescheduling expert simulation system. *European Journal of Operational Research*, 2000, 124(2): 283~293
  - 21 P O'Grady, K H Lee. An intelligent cell control system for automated manufacturing. *International Journal of Production Research*, 1988, 26(5): 845~861
  - 22 K Fukumori. Fundamental scheme for train scheduling. Artificial Intelligence Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA, Tech Rep: AI Memo No 596, 1980
  - 23 W I Bullers, S Y Nof, A B Whinston. Artificial intelligence in manufacturing planning and control. *AIIE Transactions*, 1980, 12(4): 351~363
  - 24 S Vere. Planning in time: Windows and durations for activities and goals. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1983, 5(3): 246~267
  - 25 S F Smith, M S Fox, P S Ow. Constructing and maintaining detailed production plans: Investigations into the development of knowledge-based factory scheduling systems. *AI Magazine*, 1986, 7(4): 45~61
  - 26 L Grace Yuh-jiun, J James Solberg. Integrated shop floor control using autonomous agents. *IIE Transactions*, 1992, 24(3): 57~71
  - 27 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): 45~49  
(Wang Yanhong, Yin Chaowan, Zhang Yu. Multi-agent and rule based dynamic scheduling system for agile manufacturing job shop. *Computer Integrated Manufacturing Systems* (in Chinese), 2000, 6(4): 45~49)
  - 28 赵博. 结构化集成调度系统理论及基于该理论的虚拟车间智能支撑平台的体系结构研究 [博士学位论文]. 大连理工大学, 大连, 2000  
(Zhao Bo. Researches on structured and integrated scheduling system theory and structure of SISST-based intelligent supporting platform for virtual workshop [Ph D dissertation] (in Chinese). Dalian University of Science and Technology, Dalian, 2000)
  - 29 Y S Foo, Y Takefuji. Stochastic neural networks for solving job-shop scheduling. In: *Proc of IEEE Int'l Joint Conf on Neural Networks*. New York: IEEE Press, 1988. 275~282
  - 30 D N Zhou, V Cherkassky, T R Baldwin *et al.* A neural network approach to job-shop scheduling. *IEEE Trans on Neural Networks*, 1991, 2(1): 175~179
  - 31 王万良, 吴启迪. 基于 Hopfield 神经网络求解作业车间调度问题的新方法. *计算机集成制造系统*, 2001, 7(12): 7~11  
(Wang Wanliang, Wu Qidi. A new method solving job-shop scheduling problems based on Hopfield neural networks. *Computer Integrated Manufacturing Systems* (in Chinese), 2001, 7(12): 7~11)
  - 32 S Yang, D Wang. A new adaptive neural network and heuristics hybrid approach for job-shop scheduling. *Computers & Operations Research*, 2001, 28(10): 955~971
  - 33 S C Kirkpatrick, C D Gelatt Jr, M P Vecchi. Optimization by simulated annealing. *Science*, 1983, 220(4598): 671~680
  - 34 T Yamada, B E Rosen, R Nakano. A simulated annealing approach to job-shop scheduling using critical block transition operators. In: *Proc of IEEE ICNN '94 Int'l Conf on Neural Networks*. New York: IEEE Press, 1994. 4687~4692
  - 35 H Szu, R Hartley. Fast simulated annealing. *Physics Letters A*, 1987, 122(3/4): 157~162
  - 36 J Sridhar, Rajendran. Scheduling in a cellular manufacturing system: A simulated annealing approach. *International Journal of Production Research*, 1993, 31(12): 2927~2946
  - 37 张雪江, 朱向阳, 钟秉林等. 基于模拟退火算法的知识获取方法的研究. *控制与决策*, 1997, 12(4): 222~228  
(Zhang Xuejiang, Zhu Xiangyang, Zhong Binglin *et al.* Research on knowledge acquisition method based on simulated annealing approach. *Control and Decision* (in Chinese), 1997, 12(4): 222~228)
  - 38 W H M Raaymakers, J A Hoogeveen. Scheduling multi-purpose batch process industries with no-wait restrictions by simulated annealing. *European Journal of Operational Research*, 2000, 126(1): 131~151
  - 39 L A Zadeh. Fuzzy sets. *Information and Control*, 1965, 8(3): 338~353
  - 40 S Chang, Y Yih. A fuzzy rule-based approach for dynamic control of Kanbans in a generic Kanban system. *International Journal of Production Research*, 1998, 36(8): 2247~2257
  - 41 T Chang, Y Yih. Constructing a fuzzy rule system from examples. *Journal of Integrated Computer-Aided Engineering*, 1999, 6(2): 213~221
  - 42 K Tsutomu, I Hiroaki. An open shop scheduling problem with fuzzy allowable time and fuzzy resource constraint. *Fuzzy Sets and Systems*, 2000, 109(1): 141~147
  - 43 J H Holland. *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence*, 2nd edition. Cambridge, MA: MIT Press, 1992
  - 44 S Starkweather, D Whitley, K Mathias *et al.* Sequence scheduling with genetic algorithms. In: G Fandel, T Guldedge, A Jones eds. *Proc of the 1st Joint US/German Conf on New Directions for OR in Manufacturing*. New York: Springer Verlag, 1992. 130~148
  - 45 刘民, 吴澄, 蒋新松. 用遗传算法解决并行多机调度问题. *系统工程理论与实践*, 1998, 18(1): 14~17  
(Liu Min, Wu Cheng, Jiang Xinsong. Parallel multiple machines scheduling with genetic algorithms. *Systems Engineering-Theory & Practice* (in Chinese), 1998, 18(1): 14~17)
  - 46 张纪会, 徐新和. 基于遗传算法的动态调度知识获取. *计算机集成制造系统*, 1999, 5(3): 64~68  
(Zhang Jihui, Xu Xinhe. Dynamic scheduling knowledge acquisition based on genetic algorithms. *Computer Integrated Manufacturing Systems* (in Chinese), 1999, 5(3): 64~68)
  - 47 S Amancio, D Antonio. Global optimization of energy and production in process industries: A genetic algorithm application.

- Control Engineering Practice, 1999, 7(4): 549~554
- 48 王宏安. 实时智能技术及其在流程工业中的应用研究 [博士论文] 中国科学院软件研究所, 北京, 1999  
(Wang Hongan. Researches on real-time intelligence technology and its applications in the process industry [Ph D dissertation] in Chinese). Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 1999)
- 49 C L Liu, J W Layland. Scheduling algorithm for multi-programming in a hard-real-time environment. Journal of the ACM, 1973, 20(1): 46~61
- 50 J Stankovic, M Spuri, M D Natale *et al.* Implications of classical scheduling results for real-time systems. IEEE Computer, 1995, 28(6): 16~25
- 51 M Dertouzos, A K Mok. Multi-processor online scheduling of hard real-time tasks. IEEE Trans on Software Engineering, 1989, 15(12): 1497~1506
- 52 乔颖. 实时异构系统的集成动态调度算法研究 [博士论文] 中国科学院软件研究所, 北京, 2001  
(Qiao Ying. Research on integrated dynamic scheduling for real-time heterogeneous systems [Ph D dissertation] in Chinese). Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 2001)
- 53 C Y Lu, J Stankovic, G Tao. Design and evaluation of a feedback control EDF scheduling. The 20th IEEE Real-Time Systems Symposium, Phoenix, Arizona, 1999
- 54 J Stankovic, T He, T Abdelzaher *et al.* Feedback control scheduling in distributed real-time systems. The 22nd IEEE Real-Time Systems Symposium, London, England, 2001
- 55 C Y Lu, J Stankovic, G Tao *et al.* Feedback control real-time scheduling: Framework, modeling, and algorithms. Real-Time Systems Journal, Special Issue on Control-Theoretical Approaches to Real-Time Computing, 2002, 23(1/2): 85~126
- 56 ILOG optimization suite. Paris, France: ILOG Inc, 2003. <http://www.ilog.com/products/optimization>
- 57 BARON user's manual (Forth edition). Urbana, Illinois, USA: Department of Chemical Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2000
- 58 Modeling with Xpress-MP. Englewood Cliffs, New Jersey, USA: Dash Optimization, 2002
- 59 Production scheduling. Paris, France: Complex Systems Technologies (COSYTEC), 2003. <http://www.cosytec.com/resources-management/production-scheduling.htm>
- 60 Products & solutions. Houston, USA: BMC Software, 2003. <http://www.bmc.com/products>
- 61 The preactor product family. Wiltshire, UK: Preactor International, 2003. <http://www.preactor.com/products.asp>
- 62 SYNCRUN—Production planning & scheduling. Quebec, Canada: ARIMA Company, 2003. <http://www.arimasoft.com/eng/client/detailproduit.asp>
- 63 ResSched. Victoria, Canada: Madrigal Soft Tools, 2003. <http://www.madrigalsoft.com/fresmulti.html>
- 64 Product portfolio. New York, USA: MedSynTech (MST), 2003. <http://www.medsyntech.com/prodportfolioschedule.htm>
- 65 Schedule builder. Ohio, USA: Applitech Incorporated, 2003. <http://www.applitech.net>
- 66 Products. Michigan, USA: MathWorks Inc., 2003. <http://www.mathworks.com/products>
- 67 The genetic algorithms archive. Washington DC, USA: Naval Research Laboratory, 2001. <http://www.aic.nrl.navy.mil/galist>
- 68 Pointer. Atlanta, USA: Synaps Inc, 2003. <http://www.synaps-inc.com/products/pointer/optimize/index.html>
- 69 M G Zentner, A Elkamel, J F Pekny *et al.* A language for describing process scheduling problems. Computer Chemical Engineering, 1998, 22(1/2): 125~145
- 70 戴国忠, 王晨升, 王宏安. 系统集成与企业优化. 北京: 经济出版社, 1999  
(Dai Guozhong, Wang Chensheng, Wang Hongan. System Integration and Enterprise Optimization (in Chinese). Beijing: Economy Press, 1999)
- 71 王万良, 吴启迪, 赵燕伟等. 流程工业 CIMS 中生产调度研究进展. 机电工程, 1999, 16(5): 13~16  
(Wang Wanliang, Wu Qidi, Zhao Yanwei *et al.* Advances in production scheduling in process industry CIMS. Mechanical and Electrical Engineering (in Chinese), 1999, 16(5): 13~16)
- 72 L C DiPippo, V F Wolfe, L Nair *et al.* A real-time multi-agent system architecture for e-commerce applications. University of Rhode Island, Tech Rep: TR00-280, 2000
- 73 E Hodys. A scheduling algorithm for a real-time multi-agent system [Master dissertation]. University of Rhode Island, Kingston, 2000



徐俊刚 男, 1972 年生, 博士研究生, 主要研究方向为智能调度方法和 Agent 理论及应用等。



戴国忠 男, 1944 年生, 研究员, 博士生导师, 现为中国科学院软件研究所总工程师, 主要研究方向为人机交互技术、智能信息处理和 CIMS 理论及应用等。



王宏安 男, 1963 年生, 博士, 研究员, IEEE Computer Society 会员, 现为中国科学院软件研究所人机交互技术与智能信息处理实验室主任, 主要研究方向为实时交互计算、实时数据库系统、实时智能调度和人机交互技术等。