

# 车间作业调度问题中调度规则算法的设计方法研究进展

范华丽,熊禾根,蒋国璋,李公法

武汉科技大学机械自动化学院,武汉 430081

**摘要** 调度规则是解决实际生产中的动态车间作业调度问题的有效方法,但它的效率取决于系统特征、加工条件参数和调度目标,因此没有一个规则在所有的调度环境下都比其他规则要好。综述了调度规则的发展、分类及特点,并对调度规则的设计方法进行总结。介绍了调度规则的设计方法,包括早期使用的手工方法和表现较好的智能方法,给出进化算法、遗传规划和数据挖掘方法,并分析比较了其优缺点。针对调度规则设计方法存在的不足,指出了未来的研究方向。

**关键词** 车间作业调度问题;调度规则;进化算法;遗传规划;数据挖掘

调度规则(dispatching rules, DR),也称为优先分配规则,是一种被广泛运用于求解调度问题的启发式调度规则。它是在机器空闲时,用来确定等待加工的工件队列的排序的。根据 Gere<sup>[1]</sup>的定义,调度规则是指一个或多个优先规则的组合,以及一个或多个启发式规则的组合,因此它是一种具有线性复杂度的构造性方法。

调度规则是优先规则<sup>[2]</sup>的一种特例,用来将工件分配给机器。每当有机器闲置时,它就给在队列中等待的每个工件分配一个优先值,这个优先值一般是基于工件、机器或者车间的特征信息的,然后为机器选择具有最高优先值的工件进行加工。较为常用的调度规则有 FCFS(first in first out)、SPT(shortest processing time)、EDD(earliest due date),以及 ATC(apparent tardiness cost)、WINQ(work in the queue)等, Panwalkar 等<sup>[3]</sup>对 113 种不同规则进行了总结和归纳。此外,文献[1]列出了 26 种基本的调度规则以及它们的优先值表达式和规则定义的详细描述。

车间作业调度问题的研究方法有许多<sup>[4]</sup>,其中一些算法结构复杂的元启发式算法<sup>[5,6]</sup>都取得了较为满意的结果,甚至突破了一些标杆问题的最优解。然而这些算法的求解大多是在仿真试验中的小规模问题环境下进行,实际生产中的调度问题,通常要面对更多的工件,更多样化的机器以及其他一些突发的工况,如机器故障、新工件到达等,因此车间环境多是动态的,且部分系统信息是不确定的并会随时间发生变化,工件往往会受到这些随机扰动的影响。对于此类问题,通常要求算法的求解速度较快,效率较高,并且能满足车间

中随工况变化而实时变化进行调度的要求,搜索算法由于算法求解的时间成本较高而不能满足需求。此时,调度规则<sup>[3,7,8]</sup>易于实现、具有较低时间复杂度以及拥有针对动态变化及时做出反应的能力,使它非常适于求解这种实际生产中高度复杂的动态环境下的调度问题。

## 1 调度规则的发展及分类

调度规则是最早提出的近似算法,由于其涉及的信息较多,已被广泛研究,因此可根据不同的优先属性对其进行分类。

根据是否与时间相关,调度规则可分为静态规则和动态规则<sup>[2]</sup>。根据是否与车间状态相关,可以分为状态相关规则和状态独立规则<sup>[9]</sup>。根据规则的结构特征,调度规则可分为简单优先规则、组合规则、加权规则和启发式规则。简单优先规则通常只包括一个车间系统参数,如加工工时、交货期、工序数量和到达时间,具体的规则有 SPT、EDD 等。但是没有一个简单优先规则能在所有的性能指标下都表现良好。为了克服这个局限,组合规则采取将简单优先规则中好的特性结合起来的方式以期取得满意的结果。研究表明,组合规则确实要比简单优先规则更有效,因为它在继承了简单优先规则简洁性的同时,还在车间规模扩大时获得了一定的可扩展性。加权规则是以计算权重将简单优先规则进行线性组合得到的,权值是根据具体的环境,由工件的重要程度决定的。启发式规则是依赖于系统配置的规则,通常与上述几种规则结合起来使用。启发式规则有时会使用人的经验知识,

收稿日期:2015-08-20;修回日期:2015-12-01

基金项目:国家自然科学基金项目(71271160);湖北省教育厅科研计划重点项目(D20121102)

作者简介:范华丽,博士研究生,研究方向为车间作业调度及其智能算法,电子邮箱:fanhualiwust@foxmail.com;熊禾根(通信作者),教授,研究方向为车间作业调度及其智能算法,电子邮箱:xionghegen@126.com

引用格式:范华丽,熊禾根,蒋国璋,等. 车间作业调度问题中调度规则算法的设计方法研究进展[J]. 科技导报, 2016, 34(2): 33-38; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.2.003

例如,通过对一个调度方案进行目测,而将一道工序插入到一段空闲时间里。

根据规则中所包含和涉及的信息,调度规则可分为基于

到达时间的规则、基于加工工时的规则、基于交货期信息的规则、基于松弛时间的规则、基于花费或价值的规则和组合规则。具体分类信息如表1所示。

表1 调度规则的分类  
Table 1 Classification of dispatching rules

划分依据	分类	描述及特征	举例
是否与时间相关	静态规则	优先值保持不变,不随时间变化	SPT, ODD
	动态规则	优先值随时间变化	WINQ, SL
是否与车间状态相关	状态相关规则	使用车间当前状态信息	WINQ, SLACK
	状态独立规则	不使用车间当前状态信息	SPT, FCFS
结构特征	简单优先规则	只包括一个车间系统参数如加工工时、交货期、工序数量和到达时间等	SPT, EDD
	组合规则	简单优先规则的组合,组合形式包括用不同算子将不同信息组合或者依据不同情况采取不同的调度规则	FCFS/SPT, SOR
	加权规则	由简单优先规则或组合规则经加权组合后得到	RR, PT+S/OPN
	启发式规则	依赖于系统配置的规则,考虑更为复杂的因素,与上述几种规则配合使用	LA
规则涉及的信息	到达时间	规则中包含工件到达时间相关信息	FCFS, LCFS
	加工工时	规则中包含工件加工工时相关信息	SPT, LWKR
	交货期信息	规则中包含工件交货期相关信息	EDD, ODD
	松弛时间	规则中包含松弛时间相关信息	SL, S/OPN
	花费或价值	规则中包含花费或者价值的相关信息	Value, 1/C
	组合规则	上述几种规则的组合	PT+WINQ+SR

调度规则在许多文献中被大量研究,但是没有一个规则在所有的性能指标下都比其他规则要好。调度规则的效率取决于系统特征、加工条件参数和调度目标,当加工条件参数(如机器故障、交货期变化)或者调度目标发生变化时,当前所使用的调度规则可能就不再适用于新的车间环境。因此很多研究<sup>[10-12]</sup>表明,根据车间状态和调度目标的变化动态选择调度规则,要比保持使用同一个规则得到的结果更好。文献中常见的动态改变调度规则的方法有两种,即基于仿真的方法和人工智能方法。基于仿真的方法通过对一系列已有的调度规则进行仿真,并选择性能最好的那个,被选择的规则随后用于动态调度问题中与仿真系统环境相似的那一段调度过程中。人工智能方法是将已有的仿真结果作为训练数据,为每个未知系统状态确定相应合适的最好规则,训练数据用来训练机器学习算法获得制造系统的相关知识,随后基于这些知识做出智能决策。

调度规则的设计和选择方法是如今对于调度规则研究的两个热点,本文着重对调度规则的设计方法进行综述,给出一些已有的研究成果,对比分析不同设计方法的优缺点,并指出未来的研究方向。

## 2 调度规则的设计

由于调度规则具有在求解大规模动态调度问题时不可取代的优势,许多学者尝试用不同方法设计和生成了一些好的规则。这些方法中早期大多都是用手工方法对已有规则进行修正,如进行组合或截断形成新的规则,或是针对某个性能指标或者某个具体的调度环境提出新的规则。随着计算机技术和优化方法的不断发展,不少学者开始使用智能算法自动设计和生成调度规则。

### 2.1 手工方法

早期调度规则的设计一般采用手工方法,即对已有的基本调度规则进行修正,如组合、细化或者截断,从而形成新的规则,或是针对某个性能指标或者某种具体的调度环境提出新的规则。

Baker等<sup>[13]</sup>通过对SPT和EDD规则的性能进行观察,得出当交货期很紧时,SPT规则性能较好,当交货期很松时,EDD规则性能更好,因此它提出对两个规则进行组合也许能得到有效的调度方案的设想。基于这个思想,他设计了MDD规则,其优先值表达式为:  $z_{j(t)} = \max(d_j, t + p_j)$ ,即优先选择加工工时或者工件交货期中的较大者进行加工。修正的MDD规

则是简单优先规则SPT和EDD的组合,实际上体现了实际车间生产中的一种信息的更新。随后的仿真试验结果表明,组合规则MDD在工件拖期相关的性能指标下表现很好。

Conway等<sup>[14]</sup>对工件交货期 $d_i$ 进行细化进而提出了工序交货期 $d_{ij}$ 的概念,Baker等<sup>[15]</sup>在此基础上得到了改进的规则MOD(modified operation due date),其实质是将MDD规则优先值中的工件交货期改成了工序交货期,通过仿真试验结果证明其性能较好。文献[16]也是在工件松弛的基础上提出了工序松弛的概念,工件松弛是指工件交货期减去当前时间和该工件所有剩余加工工时。文中将工序松弛定义为工序交货期减去当前时间和工序加工工时,因此工序松弛越小,此工序就越紧急,也应具有最高的优先级从而最先被加工,这就是工序松弛规则SOP。仿真试验结果表明,SOP规则在以工件总拖期和拖期工件百分比为调度目标下性能都较好,且具有较好的鲁棒性。

此外,文献[17]针对具有不相等准备时间和再循环的车间作业调度问题,设计了一种能够最小化权重工件总延期的调度规则WBMR(the weight biased modified rule)。试验研究表明,它能在各种指定优先级阈值水平下灵活地最小化工件总拖期,并且在不同的车间拥塞水平和交货期宽裕程度下都具有较好的鲁棒性。此规则的基础是基于在最小化平均拖期性能指标方面,基于加工工时的规则在交货期较紧时性能表现更好,而基于交货期的规则则在交货期较松时性能表现较好。WBMR规则是Raghu等<sup>[18]</sup>所提出的RR规则的延伸扩展,不同之处在于它考虑了工件的权重,并且它是一个具有线性复杂度的构造型启发式调度规则。

手工方法具有简单易行的优点,同时所得到的规则形式简洁便于理解,但同时手工方法所存在的问题是它所生成的规则一般都不具有普适性,即规则对于问题环境和调度目标都具有很强的针对性,而实际生产中的调度问题多是不断变化的,因此一些能够根据调度环境自动设计和生成调度规则的智能方法开始出现。

## 2.2 智能方法

由于调度规则的发展是一个繁琐、耗费时间,并且通常是手工完成的工作,因此有学者提出了自动生成调度规则机制的概念,自动生成调度规则一般都使用人工智能方法。

人工智能方法<sup>[19]</sup>(artificial intelligence, AI)来源于人工智能领域,它通过先前的系统仿真得到训练样本,为每个可能的系统状态确定与之对应的最好规则。训练样本是通过建立一系列用来在每个特定时刻确定系统状态的控制属性来产生的。这些训练样本训练机器学习算法,使其获得制造系统的相关知识,之后用这些知识实时地来做智能决策。这样的系统也通常被称为基于知识的系统。Aytug等<sup>[20]</sup>和Priore等<sup>[21]</sup>对机器学习方法用于求解调度问题的研究做了综述。文献中常见的用于调度规则动态设计问题的人工智能方法有进化算法、遗传规划、数据挖掘等。

### 2.2.1 进化算法

进化算法是受到自然进化启发而形成的一种迭代局部

搜索方法。每次迭代过程中,性能较好的解被选择作为父代,并通过交叉和变异来产生新的子代。随着不断进化,会进化出性能越来越好的解,就像自然中新个体会越来越适应环境一样。进化算法对问题的整个参数空间给出一种编码方案,而不是直接对问题的具体参数进行处理,也不是从某个单一的初始点开始搜索,而是从一组初始点搜索。搜索中用到的是目标函数值的信息,可以不必用到目标函数的导数信息或与具体问题有关的特殊知识,因而进化算法具有广泛的应用性、高度的非线性、易修改性和可并行性。Eiben等<sup>[22]</sup>对进化算法做了较为详细的介绍。

文献[23]用进化方法来寻找已有规则表现差的环境下的问题实例,由此得出此规则的不足之处,并分析得到规则在此环境下性能较差的原因,这样就能确定那个错误的决策和所生成问题实例的条件,这些观察到的结论可以被用于新规则生成的过程中,因此进化算法能作为超启发式算法来寻找有效的调度规则。文中将这种方法用于Rajendran等<sup>[24]</sup>所设计的动态Job-shop调度问题相似的仿真案例中,用进化算法来生成对于PT+WINQ规则难的问题实例,已有文献表明PT+WINQ规则在最小化平均流程时间方面性能较好。然后对自动生成的问题实例进行分析,得到有用的信息并用它们生成了两个新的规则。仿真试验表明,其中一个规则在动态Job-shop调度问题中进行测试时,在平均流程时间性能指标方面比以往所有的规则都更好,这也验证了进化算法用于支持生成调度规则的有效性。

进化计算是一种具有鲁棒性的方法,能适应不同环境下的问题,而且在大多数情况下都能得到比较满意的有效解。进化算法通常包括遗传算法、进化策略、进化规划和遗传规划4种典型方法,其中遗传规划方法由于其具有灵活的个体编码形式有利于调度规则的生成,因此也被不少学者用于调度规则的设计。

### 2.2.2 遗传规划

遗传规划<sup>[25]</sup>属于进化计算方法,它是基于达尔文的适者生存学说。遗传规划受到生物进化的启发,在遗传规划过程中首先产生一组个体,这些个体通过进化过程得到更高的适应度。进化过程中每一代的每个个体都通过给定的适应度方程对其进行评价,以确定这个个体完成指定任务的能力。计算过程中得到的个体的适应度值决定了个体在下一代中生存和繁殖的机会。与遗传算法不同,遗传规划过程中每个个体并不由给定长度的基因来表示,而通常以具有不同长度的树的形式来表示个体。

一些学者用遗传规划方法将基本的工件、机器、车间等系统特征加入到优先值表达式中以生成新的调度规则。文献[26]~[28]和文献[29]分别在各种单机调度问题和Job-shop调度问题中测试了这种方法。

文献[29]通过遗传规划方法来生成调度规则以求解多目标柔性车间作业调度问题。文中提到简单优先规则缺乏全局观念,但由人类经验组合生成的调度规则更为有效,因此文中通过遗传规划方法寻找合适的参数和算子空间来自动



生成组合调度规则,这些规则是加工工时、投放期、交货期、当前时间、工序数量和每个工件的平均加工工时等参数的组合。随后的仿真试验分析了由遗传规划方法所生成的5个组合调度规则在不同车间柔性程度和交货期宽裕程度下的性能表现,并将已有文献中较为常用的5种调度规则作为标杆规则,对比分析和评价了它们的性能表现。结果表明,综合考虑最小流程时间、平均拖期和平均流程时间3个性能指标方面时所生成的5个规则,在流程时间、平均拖期、平均流程时间和拖期工件百分比的性能指标下都要优于已有的5个规则,并且文中进一步对规则进行的敏感性分析也表明所生成的规则具有较好的鲁棒性。

基于遗传规划方法自动生成调度规则的一个难点就是需要确定一系列合适的属性。一方面需要把所有与问题环境相关的特征包括在内,另一方面搜索空间会随着方程中特征数量的增长而呈指数增长。此外,由遗传规划方法生成的调度规则通常比较复杂,并且它不能给出较为直观的解释。

### 2.2.3 数据挖掘

数据挖掘是从存储在数据库的大量信息中发现有趣知识的过程。数据挖掘方法主要运用在难以准确地将系统模型化的大型复杂的生产环境中。数据挖掘可以被认为是专门对训练数据集进行分析的工具,用来确认未知的或者隐藏但可能有用的数据信息,并且发现这个数据集中不同元素间的关系,其目的是通过这些新发现的关系映射,对测试数据集中的案例进行分类,将历史数据、实时数据及相关调度仿真数据综合分析,建立技术数据挖掘的生产过程相关调度模型,以获取生产过程全局或局部调度性能指标及其相关调度特征指标。发现知识的过程称为描述性数据挖掘,用发现的关系来对测试数据进行分类的过程可以称为预测性知识挖掘。

Kuisak<sup>[30]</sup>指出数据挖掘技术在20世纪90年代被用于制造系统中,由于设计和制造过程包含大量数据,因此它们是数据挖掘应用的主要领域。运用较广泛的数据挖掘算法有决策树、回归树、聚类、贝叶斯算法、神经网络等。被发现的知识通常用判断语句“if-then else”来表达,它是具有高水平象征性的知识表示形式,因此有利于知识的可理解性。文献[31]列出了数据挖掘在各种制造工程中的应用。Li等<sup>[32]</sup>提出了一种基于决策树的算法用于从单机调度问题的生产数据中发现调度规则。Koonce等<sup>[33]</sup>提出了用基于数据挖掘的方法

在由遗传算法调度工序时产生的数据中探索模式,以生成接近遗传算法调度方案的规则集。Noorul等<sup>[34]</sup>用人工神经网络方法在流水车间作业调度问题中以最小化流程时间和总流程时间为目标进行调度。Saravanan等<sup>[35]</sup>用分散算法在流水作业车间中最小化流程时间。

在Job-shop车间调度中,数据挖掘的目的是从车间作业调度中抽取有用的信息或知识,用以确定如何在指定时间内将特定任务分派至指定的设备上,以此制定生产计划。生产调度是一个基于知识的决策过程,它需要以大量的数据为基础。在实际生产过程中,数据挖掘技术可以处理大量历史数据和实时数据,从中发现隐含的信息和规律。

如文献[36]以数据挖掘为基础,从调度历史数据中找出隐含的排序规则来解决Job-shop调度问题的方法。文中针对基于规则的调度方法,将数据挖掘运用于优先规则的提取中,从较成功的调度实例中总结出组合优先规则,解决工件争夺同一设备的排序问题。

文献[37]针对Job-shop问题提出了一种基于数据挖掘的框架,详细解释了系统框架各组件的结构和功能,并给出了车间实例的研究结果。方法集中在关键参数的识别和构成有效解的特定动态调度环境的状态上。虽然由于不断变化的车间环境的存在,使得系统并不是总能得到实际生产中的复杂动态车间作业调度问题的最优解,但是通过这种方法可以提出一些足够有效的近优解进行替代。此外,文中还提到,相比后期调度决策,如果系统不能在早期调度阶段有良好的性能表现,系统性能会显著降低。这是由于Job-shop调度问题的天性即后期调度决策会受到早期调度决策的严重影响,因此是合理的。

但同时数据挖掘方法的局限之处在于,调度目标的合适特征选择是系统框架成功实现的关键因素,不同调度目标的特征选择以及它们的结合方式需经过认真研究才能得到紧凑有效的调度规则集。同时,用作训练的案例问题的规模以及测试数据集对于所提出系统的性能也起着关键作用。由于调度规则通常用于大型动态调度系统中,因此仿真调度系统中调度规则的性能相对于它的实际性能表现存在一定偏差。

表2列出了调度规则的设计方法,并对比分析了各种方法用于调度规则的选择时所具有的优缺点。

表2 调度规则设计方法的分类和比较

Table 2 Classifications and comparisons of the design methods of dispatching rules

方法	具体类别	方法描述	优点	缺点
手工方法	细化、截断、组合	对已有的基本调度规则进行修正从而形成新的规则	方法简单易行,规则形式简洁便于理解	所生成规则不具有普适性,一般只针对具体的问题环境和调度目标
	进化方法	作为超启发式算法来寻找有效的调度规则	具有鲁棒性,适应性较强	需要确定合理的参数,而参数的确定较难找到准确的依据
智能方法	遗传规划	迭代局部搜索方法	灵活的个体编码形式	需要确定合适的属性;生成的规则比较复杂
	数据挖掘	从大量信息中发现有趣知识的过程	处理大量数据,从中发现隐含规律	调度目标的特征选择、结合方式、训练案例的规模以及测试数据集会影响系统的性能

### 3 结论

针对求解动态车间作业调度问题的调度规则算法,介绍了它的发展过程及分类。调度规则经过不断发展已有上百种,其中根据规则的结构特征,调度规则可分为简单优先规则、组合规则、加权规则和启发式规则。

重点介绍了调度规则的设计方法,即手工方法和智能方法。调度规则的手工方法多是对已有规则的修正,如进行组合或截断形成新的规则,或者针对某个性能指标或是某个具体的调度环境提出新的规则。智能方法主要包括进化算法和数据挖掘方法,进化算法中使用较多的是遗传规划方法,文中给出了上述算法用于调度规则设计的已有研究成果,并对这些方法的性能进行了评价。

调度规则求解速度快,具有容易实现和较小时间复杂度的优点,是实际应用中解决调度问题的常用方法。但同时它也有一些难以克服的缺点,如简单调度规则具有短视的天性,比如它只考虑机器的当前状态和紧邻的车间环境,其解的质量通常留有较大的改善空间,并且随着问题规模的加大,解的质量也不断下降。而由智能方法所生成的组合调度规则,虽然考虑了更多的车间信息,改善了简单调度规则的短视天性,却由于具有太过复杂的结构而牺牲了调度规则简洁易行的天性,今后在研究中应从以下几个方面进行改善:

1) 可考虑将已有的调度规则智能设计方法用于其他类型的Job-shop调度问题,或者考虑其他更多性能指标,使生成的规则包含更多因素以使其性能更为有效。值得注意的是,需要在规则所包含的较为完善的信息与它的结构的复杂度之间权衡。如果所生成的调度规则在形式上太过复杂,可考虑使用代数简化工具简化其形式以使其更为简洁并且具有意义。

2) 一些调度规则的智能设计方法对算法参数较为敏感,因此可进一步设计仿真试验,包含更为密集的参数,研究参数对模型和性能的影响,为今后仿真试验中选择合适参数提供依据,以进一步改善所生成规则的性能。

3) 可考虑将调度规则的智能设计方法与其他方法相结合,生成鲁棒性更好、效率更高的调度规则。比如可用进化算法与遗传规划方法相结合,用进化算法找到难的问题实例,同时用遗传规划方法生成有效的规则以解决这个难的问题实例,使得所生成的规则效率更高且具有更好的鲁棒性。

#### 参考文献(References)

- [1] Gere W S. Heuristics in job shop scheduling[J]. Management Science, 1966, 13(3): 167-190.
- [2] Haupt R. A survey of priority rule-based scheduling[J]. Operations Research Spektrum, 1989, 11(1): 3-16.
- [3] Panwalker S S, Iskandar W. A survey of scheduling rules[J]. Operations Research, 1977, 25(1): 45-61.
- [4] 张超勇. 基于自然启发式算法的作业车间调度问题理论与应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.  
Zhang Chaoyong. A heuristic-based research for the theory and application of Job shop scheduling problem[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006.
- [5] 刑文训, 谢金星. 现代优化计算方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.  
Xing Wenxun, Xie Jinxing. Modern optimization and computing method [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001.
- [6] Glover F, Greenberg H J. New approaches for heuristic search: A bilateral linkage with artificial intelligence[J]. European Journal of Operations Research, 1989, 39 (2): 119-130.
- [7] Blackstone J H, Phillips D T, Hogg G L. A state-of-the-art survey of dispatching rules for manufacturing job shop operations[J]. International Journal of Production Research, 1982, 20(1): 27-45.
- [8] Oliver H, Chandrasekharan R. Efficient dispatching rules for scheduling in a job shop[J]. International Journal of Production Economics, 1997, 48(1): 87-105.
- [9] Ramasesh R. Dynamic job shop scheduling: A survey of simulation research[J]. Omega, 1990, 18(1): 43-57.
- [10] Grady O P, Lee K H. An intelligent cell control system for automated manufacturing[J]. International Journal of Production Research, 1988, 26(5): 845-861.
- [11] Pierrelval H. Expert system for selecting priority rules in flexible manufacturing systems[J]. Expert Systems with Applications, 1992, 5(1-2): 51-57.
- [12] Pierrelval H, Mebarki N. A real-time scheduling approach based on a dynamic selection of dispatching rules[J]. International Journal of Production Research, 1997, 35(6): 1575-1591.
- [13] Baker K R, Bertrand J W M. A dynamic priority rule for scheduling against due-dates[J]. Journal of operations management, 1982, 3(1): 37-42.
- [14] Conway R W, Maxwell W L, Miller L W. Theory of scheduling[M]. Addison-Wesley, Reading, MA, 1967.
- [15] Baker K R, Kennet J J. Job shop scheduling with modified due dates [J]. Operations Management, 1983, 4(1): 11-22.
- [16] 范华丽, 熊禾根, 钱国洁, 等. 工序松弛规则及其在动态Job Shop调度问题中的应用仿真研究[J]. 制造业自动化. 2015, 37(3): 61-64.  
Fan Huali, Xiong Hegen, Qian Guojie, et al. Research on Slack-of-operation rule and the simulation of its application in dynamic job shop scheduling problem[J]. Manufacturing Automation, 2015, 37(3): 61-64.
- [17] Chen B, Matis T I. A flexible dispatching rule for minimizing tardiness in job shop scheduling[J]. International Journal of Production Research, 2013, 141(1): 360-365.
- [18] Raghu T S, Rajendran C. An efficient dynamic dispatching rule for scheduling in a job shop[J]. International Journal of Production Economics, 1993, 32(3): 301-313.
- [19] Atabakhsh H. A survey of constraint based scheduling systems using an artificial intelligence approach[J]. Artificial Intelligence in Engineering, 1991, 6(2): 58-73.
- [20] Aytug H, Bhattacharyya S, Koehler G J, et al. A review of machine learning in scheduling[J]. IEEE Transactions on Engineering Management, 1994, 41(2): 165-171.
- [21] Priore P, De La Fuente, D Gómez, et al. A review of machine learning in dynamic scheduling of flexible manufacturing systems[J]. Artificial Intelligence for Engineering Design Analysis and Manufacturing, 2001, 15(3): 251-263.
- [22] Eiben A E, Smith J E. Introduction to evolutionary computing[D]. 1st ed. Berlin/Heidelberg: Natural Computing Springer, 2003.

- [23] Branke J, Pickardt C W. Evolutionary search for difficult problem instances to support the design of job shop dispatching rules[J]. *European Journal of Operations Research*, 2011, 212 (1): 22–32.
- [24] Rajendran C, Holthaus O. A comparative study of dispatching rules in dynamic flowshops and jobshops[J]. *European Journal of Operational Research*, 1999, 116(1): 156–170.
- [25] Koza J. Genetic programming: On the programming of computers by means of natural selection[M]. Cambridge, MA: MIT Press, 1992.
- [26] Dimopoulos C, Zalazala A M S. Investigating the use of genetic programming for a classic one-machine scheduling problem[J]. *Advances in Engineering Software*, 2001, 32(6): 489–498.
- [27] Geiger C D, Uzsoy R, Aytug H. Rapid modeling and discovery of priority dispatching rules: An autonomous learning approach[J]. *Journal of Scheduling*, 2006, 9(1): 7–34.
- [28] Geiger C D, Uzsoy R. Learning effective dispatching rules for batch processor scheduling[J]. *International Journal of Production Research*, 2008, 46(6): 1431–1454.
- [29] Tay J C, Ho N B. Evolving dispatching rules using genetic programming for solving multi-objective flexible job-shop problems[J]. *Computers and Industrial Engineering*, 2008, 54(3): 453–473.
- [30] Kusiak A. Data mining: Manufacturing and service applications[J]. *International Journal of Production Research*, 2006, 44(18): 4175–4191.
- [31] Harding J A. Data mining in manufacturing: A review [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2006, 128(4): 969–976.
- [32] Li X, Olafsson S. Learning effective new single machine dispatching rules from optimal scheduling data[J]. *International Journal of Production Research*, 2010, 128(1): 118–126.
- [33] Koonce D A, Tsai S C. Using data mining to find patterns in genetic algorithm solution to a job shop schedule[J]. *Computers and Industrial Engineering*, 2000, 38(3): 361–374.
- [34] Nooml H A, Radha R T. A bicriterion flow shop scheduling using artificial neural network[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2006, 30(11–12): 1132–1138.
- [35] Saravanan M, Noorul H A, Vivek raj A R, et al. Performance evaluation of the scatter search method for permutation flow shop sequencing problems[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008, 37(11–12): 1200–1208.
- [36] 王尧. 基于数据挖掘的Job-Shop调度规则研究[J]. *江苏科技信息*, 2010, 12: 49–51.  
Wang Yao. A data mining-based research of dispatching rules in Job-Shop scheduling[J]. *Jiangsu Science & Technology Information*, 2010, 12: 49–51.
- [37] Shahzad A, Mebarki N. Data mining based job shop dispatching using hybrid simulation-optimization approach for shop scheduling problem [J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2012, 25(6): 1173–1181.

## Design of dispatching rules in dynamic job shop scheduling problem

FAN Huali, XIONG Hegen, JIANG Guozhang, LI Gongfa

College of Machinery and Automation, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China

**Abstract** The dispatching rule is an effective tool for solving the dynamic job shop scheduling problem in practical productions. However, no single rule can outperform others under various scheduling circumstances, as the effectiveness of the dispatching rule depends on the shop configurations, the operating conditions and the performance measures. To study the dynamic job shop scheduling problem in practical productions, the methods for the development and the design of dispatching rules are reviewed in this paper. The development, the classification and the characteristics of dispatching rules are discussed, and the research hotspots of dispatching rules and the design methods are summarized. The design methods of dispatching rules include the popular manually performed method and the effective artificial intelligence method. In addition, the research results and the conclusions of the evolutionary algorithm, the genetic programming and the data mining methods for the design of dispatching rules are presented. The advantages and disadvantages of these methods are analyzed and compared. Finally the direction of future researches is pointed out.

**Keywords** job shop scheduling problem; dispatching rules; evolutionary algorithm; genetic programming; data mining

(责任编辑 吴晓丽)