

基于因素空间的规则调度决策模型

岳磊^{1,2}, 孙永刚³, 史海波², 刘昶²

(1. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 2. 中国科学院沈阳自动化研究所工业信息学重点实验室, 辽宁 沈阳 110016;
3. 黑龙江烟草工业有限责任公司, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 为解决在开发生产调度仿真系统时所遇到的复合调度规则仿真和复合规则决策问题, 提出了一种引入决策者偏好信息的生产调度决策模型. 在模型中, 采用了基于因素空间的知识表示方法, 并在此基础上提出了一种基于变权综合函数的调度决策方法, 使得该模型不但可以表达模糊调度规则中的模糊概念, 而且适用于复杂调度环境下的复合规则决策过程. 偏好信息的引入, 使得决策结果体现了决策者的意愿和兴趣, 调度仿真的结果更加贴近真实情况, 从而为决策者提供了令人满意的决策支持. 最后, 通过一个实际调度决策问题, 对模型进行了验证与评价, 结果表明了模型的有效性和可行性.

关键词: 生产调度决策; 调度规则; 因素空间; 知识表示; 变权

中图分类号: TP311.52

文献标识码: A

Rule-Based Scheduling Decision-Making Model Based on Factor Spaces

YUE Lei^{1,2}, SUN Yonggang³, SHI Haibo², LIU Chang²

(1. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
2. Key Laboratory of Industrial Informatics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;
3. Heilongjiang Tobacco Industry Co., Ltd, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to solve the problem of simulation of complex scheduling rules and decision by complex rules which occurs during the development of production scheduling simulation system, a decision-making model with preference information of decision-maker for production scheduling is proposed. In the model, a knowledge representation approach based on factor spaces is put forward, and on this basis, a scheduling decision-making method based on variable weight integrated function is proposed. So that the model not only allows the expression of fuzzy concept in the fuzzy scheduling rules, but also is applicable to the decision-making process on complex scheduling rules under complex scheduling environment. Because of incorporating preference information into the model, the decision results reflect the wish and interest of decision-makers, and the results of scheduling simulation are closer to the true situation, thus, a satisfying decision support is provided to decision-makers. Finally, the performance of the proposed model is verified and evaluated through a practical scheduling problem, and the results demonstrate the efficiency and feasibility of the proposed model.

Keywords: production scheduling decision; scheduling rule; factor space; knowledge representation; variable weight

1 引言 (Introduction)

规则调度方法是指系统运行时, 根据一定的规则或策略来决定下步操作的调度方法. 调度规则是人们为满足车间动态调度实时性要求而从具体生产管理实践中抽象提炼出来的若干经验方法和规则. 调度规则由于其简单明确、容易实现而被大量地用于调度的研究和实现中. 目前, MES (制造执行系统) 的日益复杂化和智能化已经对调度规则的仿真及运用提出了愈来愈迫切的需求. 调度仿真在 MES 中的应用主要分为两类: (1) 研究调度规则的比较,

这些调度规则在给定的一组任务和一定的处理参数下, 给出优良的加工操作; (2) 研究加工操作在给定的一组调度规则下对任务和处理参数的灵敏度, 评价调度规则对生产性能的影响. 无论是在 MES 中对调度规则进行仿真比较, 抑或是在 MES 中建立调度规则库, 甚至是在实际生产中利用调度规则进行优化决策, 都需要有调度规则参与和指导计算机程序进行大量的数据运算, 这在客观上要求调度规则需通过良好的方式进行形式化定义, 以便计算机程序利用规则来实现决策. 既然调度规则是存在于人脑

基金项目: 国家 863 计划资助项目 (2007AA040702); 国家自然科学基金资助项目 (60674114).

通讯作者: 岳磊, yuelein@126.com 收稿/录用/修回: 2009-09-21/2009-12-14/2010-12-15

中的知识,那么调度规则的形式化表示问题自然要诉诸人工智能中的知识表示理论来解决。

常用的知识表示方法有多种,如一阶谓词逻辑表示法、产生式规则表示法、框架表示法、语义网络表示法和面向对象表示法等^[1-5]。这些表示方法分别从不同的角度出发描述知识,应用于相关领域的知识表示中,但还存在一些不足,如一阶谓词逻辑表示法虽然可以精确表示知识,但难于表示不确定性知识和启发性知识,在事实较多时推理易出现组合爆炸,且推理过程冗长、效率低;框架表示法不善于表示过程性知识;产生式规则表示法在组态求解时效率低下,当规则数量较多时,这些规则的一致性难以保持,且在表示知识时缺乏语义支持;面向对象表示法难于表现调度决策模型的形式化特征,缺乏严格的数学基础,不能实现有效的推理。近年来基于本体和 XML (extensible markup language) 的知识表示法成为国内外研究的热点^[6-9],该方法已经广泛应用于自然语言翻译^[10]、语义 Web、情报信息系统^[11]、地理信息系统^[12]、基因工程^[13]、生物信息系统^[14]和医药工程^[15]等,但由于本体知识的建立要求必须有专家的参与,描述对象的范围比较局限,因而不适用于开发具有跨行业特性的规则调度仿真平台。

针对上述方法的不足,本文采用基于因素空间的知识表示方法对调度规则做严格意义下的形式化定义,提出了一种引入决策者偏好信息的生产调度决策模型。因素空间是汪培庄教授 20 世纪 80 年代初提出的,其目的是解决知识表示的元描述问题,是一种建立在模糊数学基础上的新型知识信息表示方法,其新颖之处是将可测的自然信息作为知识概念的表现外延,如此可对概念进行量化描述,从而可用一系列数学手段进行处理。因此,因素空间在故障诊断、优化决策和专家系统自适应方面均有良好的应用前景。

2 基于因素空间的生产调度规则表示 (Production scheduling rule representation based on factor spaces)

2.1 调度规则集的代数结构

用于调度研究的决策规则可见文^[16-19], Panwalkar 和 Iskander 总结出 113 条规则,这些规则有的为了实现路径选择,根据条件选下一步的操作,有的为了实现工件选择,对各申请队列进行排序,还有的专门负责小车的运行和选择以及立体仓库进出方式的管理,然而不论何种形式的调度规则都是

对对象的各因素状态的判断。经过抽象得到了关于调度规则代数结构的一般性和普适性结论。

与一个实际生产问题有关的全部调度规则组成的有限集记为 S_{rule} , 其元素记为 $r \in S_{\text{rule}}$; 调度规则所关心的全部因素组成的有限集记为 F , 其元素记为 $f \in F$ 。构造映射 $l: S_{\text{rule}} \rightarrow F$, 它将某个调度规则 r 映射到 r 所涉及的因素 f , 即 $l: r \mapsto l(r)$ 。在 S_{rule} 中规定各规则之间满足结合律的复合运算 \circ , 称 r_3 为 r_1 和 r_2 的复合调度规则, 记作 $r_3 = r_1 \circ r_2$, 如果有 $l(r_3) = l(r_1) \vee l(r_2)$ 。称 $r \in S_{\text{rule}}$ 为简单调度规则, 如果 $\neg((\exists g \in F, g \neq 0)(l(r) > g))$, 相应的 $l(r)$ 称为原子因素。再规定 S_{rule} 中各规则之间的归约运算 \dagger , 称 r_3 为 r_1 和 r_2 的归约调度规则, 记作 $r_3 = r_1 \dagger r_2$, 如果有 $l(r_3) = l(r_1) \wedge l(r_2)$ 。引入符号 $r_\theta \in S_{\text{rule}}$, 它表示空规则, 它的定义很自然地为 $l(r_\theta) = \theta$, 其中 θ 是零因素, 并约定 $r \circ r_\theta = r_\theta \circ r = r$, $r \dagger r_\theta = r_\theta \dagger r = r_\theta, \forall r \in S_{\text{rule}}$ 。空规则 r_θ 并无实际物理意义, 在这里只作为一种纯粹的代数结构而存在。

不难证明, S_{rule} 关于二元运算 \circ 和 \dagger 做成一个布尔环 $B_1 = \langle S_{\text{rule}}, \circ, \dagger \rangle$, F 关于二元运算 \vee 和 \wedge 亦做成一个布尔环 $B_2 = \langle F, \vee, \wedge \rangle$ 。同时, 映射 l 是一个双射, 且对运算 \circ, \dagger 和 \vee, \wedge 分别保持, 所以 $\langle S_{\text{rule}}, \circ, \dagger \rangle$ 与 $\langle F, \vee, \wedge \rangle$ 是同构的。这表明, 生产调度规则系统可以由严谨的代数系统来形式化定义, 并且这种定义方式是良好的, 同时也说明对于调度规则系统的研究完全可以在计算机代数系统中展开。

2.2 调度规则的推理机制

概念在因素空间中的描述是因素空间理论进行知识表示的核心内容, 它是人脑思维活动的基础, 也是知识形成的基本要素。调度规则同样由一系列基本概念组成。例如, 调度规则常常按某种原则对备选工件的优先级进行排序, 相应的决策结果就是优先级最高的那个工件。这里, “符合某原则的备选工件”和经排序后的“最优工件”都是调度规则中的概念, 但它们属于不同的论域。考虑这样一个关于调度规则“先到先服务”的三段论推理。

若 j 是最先进入缓冲站的工件, 则 j 是最优先被加工的工件; j^* 是最先进入缓冲站的工件, j^* 就是最优先被加工的工件。

将其符号化简为:

$$\begin{aligned} (\forall j)P(j) &\rightarrow Q(j) \\ P(j^*) & \\ Q(j^*) & \end{aligned}$$

一个调度规则可由联结两个概念 P 与 Q 的渠道来表示^[20], 而不用由联结两个命题 $P(x)$ 和 $Q(x)$ 的渠道表示, 如图 1 所示.

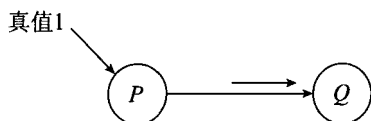


图 1 调度规则的推理渠道示意图

Fig.1 Inference channel of the scheduling rule

如果推理渠道被置于两个命题之间, 则渠道的功能是不明确的并且受到某种制约; 若把推理渠道置于两个概念之间, 那么渠道的功能便清晰有力; 基本原因在于, 我们必须把真值的产生与真值的传递区分开来. 事实上, 真值只有在存在一个对象 x 和一个概念 P 时才能产生; 将 x 与 P 搭配起来便得到一个命题 $P(x)$, 然后要判断 $P(x)$ 是否为真, 于是便出现了真值. 从图中可以看出, 因为概念 P 位于渠首, Q 位于渠尾, 所以 P 又称为渠首概念, 相应地 Q 称为渠尾概念.

2.3 基于因素空间的概念描述

在因素空间中描述概念是在“描述架”中完成的^[21-22]. 设在一个特定的调度问题中有概念集 $C = \{\text{最优工件}\}$, 显然论域 U 就是该问题中全部工件的集合. 取全部调度规则所关心的因素组成因素集 $F = \{f | f = l(r), \forall r \in S_{\text{rule}}\}$, 使其满足条件: $(\forall j_1, j_2 \in U)(\exists f \in F)(f(j_1) \neq f(j_2))$, 这时, 三元组 $(U, C, \{X(f)\}_{f \in F})$ 做成了 C 的一个描述架.

“最优工件”的概念在逻辑上满足排中律, 是一个清晰概念, 即一个工件的优先级要么最高, 要么不是最高, 除此二者并不存在第三种情况, 于是它在论域 U 中的外延是 U 的一个普通子集 $A \in P(U)$, A 是一个映射: $U \rightarrow \{0, 1\}$, $A(j)$ 叫做工件 j 对概念“最优工件”或其外延 A 的隶属度. 下面举例说明如何得到概念“最优工件”的表现外延.

设 S_{rule} 中有一条调度规则 r 为: 交货期最短的优先, 记作 r_{EDD} , 则 $(\exists! f \in F)(f = l(r_{\text{EDD}}))$, $\exists!$ 是存在且仅存在一个的缩写. 将该因素记作 f_{EDD} , 意为因素“交货期”. 对于概念“最优工件”, 因素 f_{EDD} 的状态空间 $X(f_{\text{EDD}})$ 叫做表现论域. 根据 Zadeh 扩展原理可以做出“最优工件”在表现论域 $X(f_{\text{EDD}})$ 中的表现外延. 置 $f_{\text{EDD}}(A) : X(f_{\text{EDD}}) \rightarrow \{0, 1\}$, $(f_{\text{EDD}}(A))(x) = \text{Sup}\{A(j) | f_{\text{EDD}}(j) = x\}$, $\forall x \in X(f_{\text{EDD}})$, 则 $f_{\text{EDD}}(A)$ 就是概念“最优工件”的表现外延. 事实上, f_{EDD} 是一个原子因素, 于是, $f_{\text{EDD}}(A)$ 就是一族只有一个分量的状态向量.

在许多实际问题中, 需要同时考虑的因素比较繁复, 常常利用复合规则进行调度决策. 然而, 因素越复杂, 其状态空间就越难把握, 显然给计算机的智能调度决策带来很大不便. 因此, 需要对状态进行综合.

3 基于变权综合函数的调度决策模型 (Scheduling decision-making model based on variable weight integrated function)

在处理较复杂的状态信息时, 容易想到, 把复杂的因素分解为若干较简单因素. 正因为复合调度规则均可以分解为若干简单调度规则, 即对于 $\forall r \in S_{\text{rule}}$, 存在一族简单调度规则 $\{r_i\}_{i \in I} \subset S_{\text{rule}}$ (I 是指标集), 使得 $r = \bigcirc_{i \in I} r_i$, 所以相应地, 必然存在一族原子因素 $\{l(r_i)\}_{i \in I} \subset F$ (I 是指标集), 使得 $l(r) = \bigvee_{i \in I} l(r_i)$. 在实际应用中, 指标集 I 常常是有限集, 设为 $I = \{1, 2, \dots, m\}$. 这时 $l(r) = \bigvee_{i=1}^m l(r_i)$, 故

$$X(l(r)) = \prod_{i=1}^m X(l(r_i)) \\ = \{(x_1, x_2, \dots, x_m) | x_i \in X(l(r_i)), 1 \leq i \leq m\}$$

$\forall j \in U$, 只要确定了 $(l(r_i))(j)$, $1 \leq i \leq m$, 便知

$$(l(r))(j) = ((l(r_1))(j), (l(r_2))(j), \dots, (l(r_m))(j)) \quad (1)$$

如何把式 (1) 变为既不损失信息又便于处理的形式呢? 最有效的方法就是“降维”, 即将高维的状态空间 $\prod_{i=1}^m X(l(r_i))$ 降为某个低维的状态空间 $X'(l(r))$, 用 $X'(l(r))$ 近似代替 $X(l(r))$, 如图 2 所示.

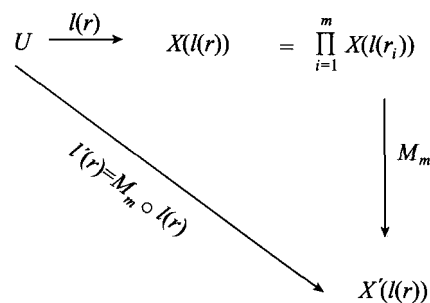


图 2 “降维”映射示意图

Fig.2 Dimension mapping of reducing

降维映射 M_m 的功能实际上是把 m 维的点 $(l(r))(j) = ((l(r_1))(j), (l(r_2))(j), \dots, (l(r_m))(j))$ 综合为一维的点, 故称为综合函数^[23].

鉴于车间调度问题的代表性, 本文以某客车厂涂装车间的一个带有并行机的非抢占式车间调度问题为背景, 将该车间当下采用的调度决策规则作为

实例，对基于变权综合函数的调度决策算法进行详细探讨。该调度问题中有如下简单调度规则：

- r_1 ：有磷化工序的工艺车优先加工
- r_2 ：有罩清漆工序的工艺车优先加工
- r_3 ：有复杂彩条的工艺车优先加工
- r_4 ：计划号小的工艺车优先加工

于是， $S_{rule} = \{r_1, r_2, r_3, r_4, r_1 \circ r_2, r_1 \circ r_3, r_1 \circ r_4, r_2 \circ r_3, r_2 \circ r_4, r_3 \circ r_4, r_1 \circ r_2 \circ r_3, r_1 \circ r_2 \circ r_4, r_2 \circ r_3 \circ r_4, r_1 \circ r_2 \circ r_3 \circ r_4\}$ ，由同构映射 l 可做出因素集：

$$F = \{l(r_1), l(r_2), l(r_3), l(r_4), l(r_1) \vee l(r_2), l(r_1) \vee l(r_3), l(r_1) \vee l(r_4), l(r_2) \vee l(r_3), l(r_2) \vee l(r_4), l(r_3) \vee l(r_4), l(r_1) \vee l(r_2) \vee l(r_3), l(r_1) \vee l(r_2) \vee l(r_4), l(r_2) \vee l(r_3) \vee l(r_4), l(r_1) \vee l(r_2) \vee l(r_3) \vee l(r_4)\}$$

其中， $l(r_1) = \{\text{有无磷化工序}\}$ ， $l(r_2) = \{\text{有无罩清漆工序}\}$ ， $l(r_3) = \{\text{彩条数}\}$ ， $l(r_4) = \{\text{计划号}\}$ 。规则 r_3 的渠首域概念是一个模糊概念，因而其表现外延是一模糊子集。为了信息处理上的方便，我们取表现外延的截集，规定：

$$l(r_3)_\lambda(j) = \begin{cases} 1 & l(r_3)(j) \geq \lambda \\ 0 & l(r_3)(j) < \lambda \end{cases} \quad (\forall j \in U)$$

其中的 λ 是阈值，由经验给出。于是得到了一个开关型因素 $l(r_3)_\lambda = \{\text{有无复杂彩条}\}$ 来取代变量型因素 $l(r_3)$ ，变化后的因素仍然记为 $l(r_3)$ ，因素集记作 F' 。若取缓冲站中待加工的工艺车集合为论域 U ，则 U 与 F' 做成一个左配对 (U, F') 。表 1 直观地表示了 (U, F') 的结构。

表 1 左配对 (U, F') 的结构
Tab.1 Structure of left pair (U, F')

$U \backslash F'$	$l(r_1)$	$l(r_2)$	$l(r_3)$	$l(r_4)$
工艺车 1	1	1	0	0.87
工艺车 2	0	1	1	0.50
工艺车 3	0	0	0	0.70
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

限于篇幅，表 1 只截取了缓冲站部分工艺车的状态值信息。因“计划号”为变量型因素，所以通过反正切转换函数对其进行了一化处理。对于渠尾域概念“最优工件”而言，完全表现论域为 $X(l(r_1) \vee l(r_2) \vee l(r_3) \vee l(r_4)) = \{(1, 1, 0, 0.87), (0, 1, 1, 0.50), (0, 0, 0, 0.70), \dots\}$ 。构造可加型变权综合函数 $M_4 : [0, 1]^4 \rightarrow [0, 1]$ 如下：

$$M_4(x_1, x_2, x_3, x_4) = \sum_{i=1}^4 w_i(X) x_i \quad (x_i \in X(l(r_i)))$$

其中， $w_i(X) = w_i \cdot s_i(X), i = 1, 2, 3, 4$ 称为变权。若令 $\mathbf{W}(X) = (w_1(X), w_2(X), w_3(X), w_4(X))$ ，则 $\mathbf{W}(X) = (w_1, w_2, w_3, w_4) \circ (s_1(X), s_2(X), s_3(X), s_4(X))$ ， $\mathbf{W} = (w_1, w_2, w_3, w_4)$ 叫做因素常权向量，它与状态的变化无关，因此体现了诸因素的相对重要性。 $\mathbf{S}_X = (s_1(X), s_2(X), s_3(X), s_4(X))$ 叫做状态变权向量，它是状态的函数，因此体现了对目标值组态的均衡效果。在考虑因素相对重要性时，根据决策者的偏好，取 $\mathbf{W} = (0.3, 0.3, 0.3, 0.1)$ 。在考虑状态均衡程度时，由于 $l(r_1), l(r_2), l(r_3), l(r_4)$ 之间不存在相互制约关系，且 $l(r_1), l(r_2), l(r_3)$ 对决策目标是激励性的，而 $l(r_4)$ 是惩罚性的，所以取 $\mathbf{S}_X = (1, 1, 1, \frac{x_{\min}}{x_4^2})$ ， x_{\min} 为样本最小值。故，在表 1 给出的算例中取 $M_4(x_1, x_2, x_3, x_4)$ 最大者为优先级最高的工艺车。不难验证，在完全表现论域中，由状态向量 $(1, 1, 1, x_{\min})$ 组成的单点集就是理论上复合调度规则 $(r_1 \circ r_2 \circ r_3 \circ r_4)$ 之渠尾域概念“最优工件”的表现外延。

最后，本文采用面向对象设计技术和先进的 WPF (Windows presentation foundation) 程序设计技术开发了生产调度仿真原型系统，并运用该原型系统对上述涂装车间 6 个关键工序上的 10 辆工艺车的生产过程进行了仿真。本仿真实例选取两组备选调度方案，在并行机处采用随机调度规则，得到了不同权重组合下的调度甘特图，如图 3 所示。

图 3(a) 是因素常权向量 $\mathbf{W} = (0.3, 0.3, 0.3, 0.1)$ 时的甘特图，总加工时间为 293 min，图 3(b) 是 $\mathbf{W} = (0.1, 0.1, 0.1, 0.6)$ 时的甘特图，总加工时间为 278 min，若以总加工时间为性能指标进行评价，则第 2 组调度方案优于第 1 组方案。仿真结果表明，在选定一个性能评价指标的基础上，通过本文提出的调度决策仿真方法，的确可以比较出不同调度方案的优劣，从而验证该模型在用于软件实施时的可行性和仿真结果的有效性。多性能指标评价调度方案问题将是本文的后续工作和今后研究的重点。

4 结论 (Conclusion)

针对以往研究的不足，本文对调度决策知识的形式化说明技术和可嵌入 MES 平台的规则调度决策模型进行了研究。针对问题的特点，引入了基于因素空间的分析方法来解决调度规则的形式化描述问题，从调度规则集的代数结构入手，给出了调度规则的形式化定义和与其同构的数学模型，阐述了调度规则的推理实质上是真值在命题中流动的过程，最后详细讨论了调度规则在因素空间中的表达方法，并在表达的基础上建立了基于变权综合函数的调度决策模型。该模型的特点是将决策函数归

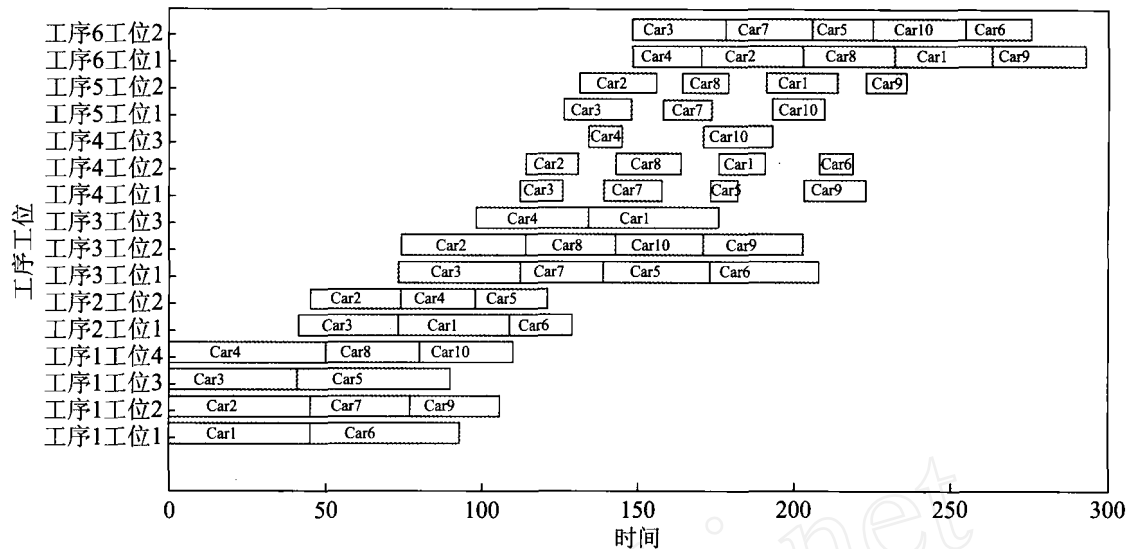
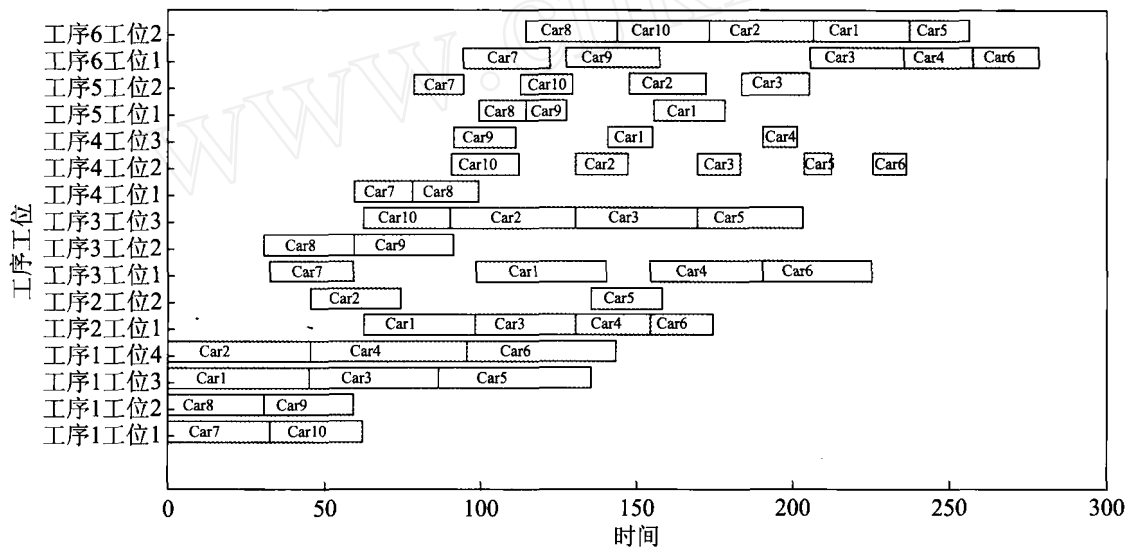
(a) 第1组方案 $W = (0.3, 0.3, 0.3, 0.1)$ (b) 第2组方案 $W = (0.1, 0.1, 0.1, 0.6)$

图3 调度甘特图

Fig.3 Gantt chart of scheduling

结为一类可加型变权综合函数，为决策方法提供了一个统一的模型框架；同时将易变的个人偏好作为参数附加在模型的外部，不但提高了模型的通用性和可扩展性，而且使得软件设计工作简单易行，为开发调度决策人机交互程序提供了极大的便利；基于因素空间的调度决策知识表达方法更贴近于人类的思维模式，在进行软件实施时，易于借助面向对象分析技术进行编码设计，为开发具有一定通用性的规则调度仿真平台提供了一个新的思路。

参考文献 (References)

- [1] Marinov M. Using frames for knowledge representation in a CORBA-based distributed environment[J]. Knowledge-Based Systems, 2008, 21(5): 391-397.
- [2] Sorenson D, Grissom C K, Carpenter L, et al. A frame-based representation for a bedside ventilator weaning protocol[J]. Journal of Biomedical Informatics, 2008, 41(3): 461-468.
- [3] Xu W L, Kuhnert L, Foster K, et al. Object-oriented knowledge representation and discovery of human chewing behaviours[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2007, 20(7): 1000-1012.
- [4] Khalifa M, Liu V. Semantic network representation of computer-mediated discussions: Conceptual facilitation form and knowledge acquisition[J]. Omega, 2008, 36(2): 252-266.
- [5] 年志刚, 梁式, 麻芳兰, 等. 知识表示方法研究与应用[J]. 计算机应用研究, 2007, 24(5): 234-236, 286. Nian Zhigang, Liang Shi, Ma Fanglan, et al. Study and application of knowledge expression[J]. Application Research of Computers, 2007, 24(5): 234-237.
- [6] Gruber T R. Towards principles for the design of ontologies used for knowledge sharing[J]. International Journal of Human Computer Studies, 1995, 43(5/6): 907-928.
- [7] Yang D, Dong M, Miao R. Development of a product configuration system with an ontology-based approach[J]. Computer-aided Design, 2008, 40(8): 863-878.

- [8] Protege. Ontology modeling tool[EB/OL]. [2007-12-15]. <http://protege.stanford.edu/>.
- [9] 冯志勇, 李文杰, 李晓红, 等. 本体论工程及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
Feng Zhiyong, Li Wenjie, Li Xiaohong, et al. Ontology and its applications[M]. Beijing: Tsinghua University, 2007.
- [10] Chandrasekaran B, Josephson J R, Benjamins V R. What are ontologies, and why do we need them?[J]. IEEE Intelligent Systems, 1999, 14(1): 20-26.
- [11] Chi Y, Hsu T Y, Yang W P. Building ontological knowledge bases for sharing knowledge in digital archive[C]//Proceedings of the International Conference on Machine Learning and Cybernetics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005: 2261-2266.
- [12] Kavouras M, Kokla M, Tomaie E. Comparing categories among geographic ontologies[J]. Computers & Geosciences, 2005, 31(2): 145-154.
- [13] Yen I, Karp P D, Noy N F, et al. Knowledge acquisition, consistency checking and concurrency control for Gene Ontology (GO)[J]. Bioinformatics, 2003, 19(2): 241-248.
- [14] Guarino N. Formal ontology and information systems[M]. Amsterdam, Netherlands: IOS Press, 1998: 3-15.
- [15] Fox J, Alabassi A, Patkar V, et al. An ontological approach to modeling tasks and goals[J]. Computers in Biology and Medicine, 2006, 36(7/8): 837-856.
- [16] Panwalkar S S, Iskander W. A survey of scheduling rules[J]. Operations Research, 1977, 25(1): 45-61.
- [17] Kiran A S, Smith M L. Simulation studies in job shop scheduling - II performance of priority rules[J]. Computers & Industrial Engineering, 1984, 8(2): 95-105.
- [18] Yancey D P, Peterson S. Implementation of rule-based technology in a shop scheduling system[C]//Proceedings of the Winter Simulation Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1989: 865-873.
- [19] Benjaafar S. Intelligent simulation for flexible manufacturing systems: An integrated approach[J]. Computers & Industrial Engineering, 1992, 22(3): 297-311.
- [20] 汪培庄, 张洪敏, 白明, 等. Fuzzy 推理机与真值流推理[J]. 模糊系统与数学, 1992, 6(2): 1-9.
Wang Peizhuang, Zhang Hongmin, Bai Ming, et al. Fuzzy inference machine and the theory of truth-valued-flow inferences[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 1992, 6(2): 1-9.
- [21] 李洪兴. 因素空间理论与知识表示的数学框架(VIII)——变权综合原理[J]. 模糊系统与数学, 1995, 9(3): 1-9.
Li Hongxing. Factor spaces and mathematical frame of knowledge representation(VIII) - Variable weights analysis[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 1995, 9(3): 1-9.
- [22] 汪培庄. 因素空间与概念描述[J]. 软件学报, 1992, 3(1): 30-40.
Wang Peizhuang. Factor space and description of concepts[J]. Journal of Software, 1992, 3(1): 30-40.
- [23] 李洪兴. 因素空间理论与知识表示的数学框架(I)——因素空间的公理化定义与描述架[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 1996, 32(4): 470-475.
Li Hongxing. Factor spaces and mathematical frame of knowledge representation(I) - Axiomatic definition of factor spaces and description frames[J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 1996, 32(4): 470-475.

作者简介:

岳 磊(1984-), 男, 硕士生. 研究领域为基于规则的动态调度技术, 生产过程建模与仿真.