



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112987662 B

(45) 授权公告日 2022. 03. 18

(21) 申请号 202110160017.3

(22) 申请日 2021.02.05

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 112987662 A

(43) 申请公布日 2021.06.18

(73) 专利权人 山东大学
地址 250061 山东省济南市历下区经十路
17923号

(72) 发明人 王黎明 孔琳 李方义 田广东
吕晓腾 郭婧 陈波

(74) 专利代理机构 济南圣达知识产权代理有限公司 37221

代理人 任欢

(51) Int. Cl.

G05B 19/418 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 102096599 A, 2011.06.15

CN 110632907 A, 2019.12.31

CN 106779143 A, 2017.05.31

CN 109711727 A, 2019.05.03

周艳平 等. 一种粒子群和改进自适应差分进化混合算法及在生产调度中的应用.《计算机测量与控制》.2019,第27卷(第8期),

审查员 尚伟昊

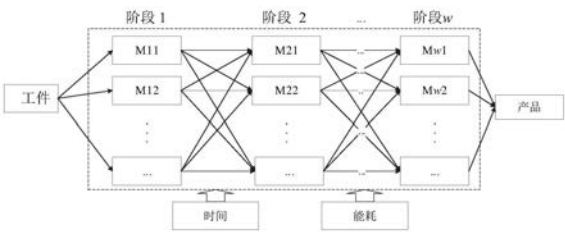
权利要求书2页 说明书12页 附图5页

(54) 发明名称

基于机床加工能力排序的混合流水车间可
持续调度方法

(57) 摘要

本发明公开了基于机床加工能力排序的混合流水车间可持续调度方法,解决了现有技术中没有充分考虑机床特性的问题,具有可进行机床主动选择,提高调度效率的有益效果,具体方案如下:基于机床加工能力排序的混合流水车间可持续调度方法,包括建立机床加工能力综合评价体系,对并行机床的加工能力进行排序;依据并行机床的排序结果为优化迭代的有效信息实现设备选取,提出主动解码规则;以完工时间和能耗为优化目标,结合主动解码规则进行机床的定向选择,基于机床加工能力的差分进化算法,实现混合流水车间的可持续调度。



1. 基于机床加工能力排序的混合流水车间可持续调度方法, 其特征在于, 包括如下内容:

建立机床加工能力综合评价体系, 对并行机床的加工能力进行排序, 利用TOPSIS方法对并行机床的加工能力进行排序, 解决多准则决策问题;

依据并行机床的排序结果为优化迭代的有效信息实现设备选取, 提出主动解码规则, 所述主动解码规则通过机床加工能力作为信息实现设备选取的方法定义;

以完工时间和能耗为优化目标, 结合主动解码规则进行机床的定向选择, 基于机床加工能力的差分进化算法, 将机床的选取规则融入算法的迭代过程中, 实现混合流水车间的可持续调度;

所述差分进化算法为启发式改进差分算法, 基于机床加工能力排序的差分进化算法, 包括如下内容:

设置迭代次数 $gen=1$, 初始化种群均匀分布在搜索空间; 变异算子和交叉算子分别设置为 F 和 cp ;

计算完工时间和能耗;

变异操作, 通过差分策略实现个体差异化;

对第 gen 代群体及其变异个体进行交叉操作;

采用贪婪算法进行选择, 对所有个体进行帕累托等级比较, 等级较高的个体被保留;

运用启发式解码规则: 将第 j 个操作对应的并行机床定义为 $Par_M(j)$, 计算 $Par_M(j)$ 的加工能力, 记为 $Md(j)$, 对 $Md(j)$ 排序, 最大的 $Md(j)$ 被选取加工;

执行上述步骤, 直至满足所有终止条件;

输出最优结果作为解决方案。

2. 根据权利要求1所述的基于机床加工能力排序的混合流水车间可持续调度方法, 其特征在于, 所述机床加工能力综合评价体系包括经济性指标、环境性指标和社会性指标。

3. 根据权利要求2所述的基于机床加工能力排序的混合流水车间可持续调度方法, 其特征在于, 所述经济性指标包括机床的使用成本和能耗成本;

使用成本由加工时间和单位时间的使用成本确定;

能耗成本是指加工工件的总能量消耗成本。

4. 根据权利要求2或3所述的基于机床加工能力排序的混合流水车间可持续调度方法, 其特征在于, 所述环境性指标通过比能耗计算, 机床的比能耗是指去除单位体积材料时机床所消耗的电能。

5. 根据权利要求2或3所述的基于机床加工能力排序的混合流水车间可持续调度方法, 其特征在于, 所述社会性指标包括工件加工质量和加工效率;

加工质量通过加工工序的不合格率表征;

加工效率由加工时间决定。

6. 根据权利要求1所述的基于机床加工能力排序的混合流水车间可持续调度方法, 其特征在于, 所述完工时间指的是所有工件的最大完工时间。

7. 根据权利要求1所述的基于机床加工能力排序的混合流水车间可持续调度方法, 其特征在于, 所述能耗包括加工阶段总能耗、等待阶段总能耗和运输阶段总能耗。

8. 根据权利要求1所述的基于机床加工能力排序的混合流水车间可持续调度方法, 其

特征在于,所述主动解码规则根据机床加工能力选择机床。

基于机床加工能力排序的混合流水车间可持续调度方法

技术领域

[0001] 本发明涉及车间调度领域,尤其是基于机床加工能力排序的混合流水车间可持续调度方法。

背景技术

[0002] 本部分的陈述仅仅是提供了与本发明相关的背景技术信息,不必然构成在先技术。

[0003] 近十年来,全球变暖、气候变化等环境问题引起了广泛关注。制造业消耗了全球近一半的能源。在中国,工业部门能源消耗占总量的71%,其中81%来自制造业。能源消耗是导致环境恶化的重要因素之一,制造商必须寻求减少能源消耗切实可行的方法。由于较少的资金投入,运营策略和调度得到了广泛的应用。混合流水车间调度具有多加工阶段的特点,通过合理的工件顺序和机床选取,可以有效降低制造对环境的影响。作为典型的NP-hard问题,混合流水车间调度优化问题的研究具有很重要的理论和工程应用价值。

[0004] 目前,大量的学者针对混合流水车间调度问题HFSP问题进行研究,并开发遗传算法、灰狼算法、回溯搜索算法、蚁群优化算法、粒子群优化算法、差分进化算法等进行调度优化,但目前的研究中,HFSP中设备是被动进行选择的,扩大了调度的求解空间。另一方面,发明人发现,机床特性被过分简化。机床通常被认为只是在处理速度上不同,或者在统一的并行机床环境中完全相同。然而,在实际生产过程中,常见的情况是先进的机床与旧机床同时支持生产,这些机床具有不同的功率消耗率、成本消耗等特性,没有考虑机床的加工能力,对机床分配的过分简化,无法实现可持续生产。

发明内容

[0005] 针对现有技术存在的不足,本发明的目的是提供基于机床加工能力排序的混合流水车间可持续调度方法,将机床的可持续特性集成到迭代优化过程中,提高调度效率。

[0006] 为了实现上述目的,本发明是通过如下的技术方案来实现:

[0007] 基于机床加工能力排序的混合流水车间可持续调度方法,包括:

[0008] 建立机床加工能力综合评价体系,对并行机床的加工能力进行排序;

[0009] 依据并行机床的排序结果为优化迭代的有效信息实现设备选取,提出主动解码规则;

[0010] 以完工时间和能耗为优化目标,结合主动解码规则进行机床的定向选择,基于机床加工能力的差分进化算法,实现混合流水车间的可持续调度。

[0011] 上述的调度方法中,依据车间生产特性建立以完工时间和工件加工过程中的能耗作为优化目标,充分考虑机床的特点和可持续生产需求,建立机床加工能力综合评价体系,有利于后续机床选择,通过主动解码规则,可将机床的选取规则融入算法的迭代过程中,加快收敛,提高算法的性能,并提高调度效率。

[0012] 如上所述的基于机床加工能力排序的混合流水车间可持续调度方法,利用TOPSIS

方法对并行机床的加工能力进行排序,实现了HFSP的高效选择和调度优化。

[0013] 如上所述的基于机床加工能力排序的混合流水车间可持续调度方法,所述机床加工能力综合评价体系包括经济性指标、环境性指标和社会性指标。

[0014] 为了进一步分析各方面的特点,细化指标信息,构建机床加工能力综合评价体系,如上所述的基于机床加工能力排序的混合流水车间可持续调度方法,所述经济性指标包括机床的使用成本和能耗成本;

[0015] 使用成本由加工时间和单位时间的使用成本确定;

[0016] 能耗成本是指加工工件的总能量消耗成本。

[0017] 如上所述的基于机床加工能力排序的混合流水车间可持续调度方法,所述环境性指标通过比能耗计算,机床的比能耗是指去除单位体积材料时机床所消耗的电能。

[0018] 如上所述的基于机床加工能力排序的混合流水车间可持续调度方法,所述社会性指标包括工件加工质量和加工效率;

[0019] 加工质量通过加工工序的不合格率表征;

[0020] 加工效率由加工时间决定。

[0021] 如上所述的基于机床加工能力排序的混合流水车间可持续调度方法,所述完工时间指的是所有工件的最大完工时间。

[0022] 如上所述的基于机床加工能力排序的混合流水车间可持续调度方法,所述能耗包括加工阶段总能耗、等待阶段总能耗和运输阶段总能耗;加工能耗由加工时间和机床单位时间的加工能耗决定;机床的等待能耗是指机床在待机时所消耗的能量;运输能耗总量由工件在不同阶段间的运输过程决定。

[0023] 如上所述的基于机床加工能力排序的混合流水车间可持续调度方法,所述主动解码规则根据加工能力选择机床。

[0024] 如上所述的基于机床加工能力排序的混合流水车间可持续调度方法,所述差分进化算法为启发式改进差分算法,基于机床加工能力排序的差分进化算法,包括如下内容:

[0025] 设置迭代次数 $gen=1$,初始化种群均匀分布在搜索空间;变异算子和交叉算子分别设置为 F 和 cp ;

[0026] 计算完工时间和能耗;

[0027] 变异操作,通过差分策略实现个体差异化;

[0028] 对第 gen 代群体及其变异个体进行交叉操作;

[0029] 采用贪婪算法进行选择,对所有个体进行帕累托等级比较,等级较高的个体被保留;

[0030] 运用启发式解码规则:将第 j 个操作对应的并行机床定义为 $Par_M(j)$,计算 $Par_M(j)$ 的加工能力,记为 $Md(j)$,对 $Md(j)$ 排序,最大的 $Md(j)$ 被选取加工;

[0031] 执行上述步骤,直至满足所有终止条件;

[0032] 输出最优结果作为解决方案。

[0033] 上述本发明的有益效果如下:

[0034] 1) 本发明充分考虑机床的特点和可持续生产需求,建立机床加工能力综合评价体系,有利于后续机床的最优选择。

[0035] 2) 本发明依据并行机床的排序结果为优化迭代的有效信息实现设备选取,提出主动解码规则;结合主动解码规则,建立基于机床加工能力的差分进化算法,通过主动解码规则,

可将机床的选取规则融入算法的迭代过程中,加快收敛,提高算法的性能,并提高调度效率。

[0036] 3) 本发明利用TOPSIS方法对并行机床的加工能力进行排序,可解决多准则决策问题,实现了HFSP的高效选择和调度优化。

[0037] 4) 本发明针对混合流水车间特点,建立了考虑完工时间和能耗的数学模型,满足了生产需求;综合考虑经济,环境和社会指标,构建了机床加工能力综合评价指标体系,并根据TOPSIS法对机床加工能力进行排序;基于机床加工能力的启发式改进差分算法来生成可行的调度序列,实现了机床主动选择,缩小了搜索范围,加快了收敛速度;通过比较,验证了所提方法的有效性。

附图说明

[0038] 构成本发明的一部分的说明书附图用来提供对本发明的进一步理解,本发明的示意性实施例及其说明用于解释本发明,并不构成对本发明的不当限定。

[0039] 图1是本发明混合流水车间调度问题(HFSP)的流程图。

[0040] 图2是本发明构建的机床加工能力综合评估体系。

[0041] 图3是本发明运用TOPSIS方法的流程图。

[0042] 图4是本发明启发式解码规则示意图。

[0043] 图5是本发明第3个HDME帕累托解图。

[0044] 图6是本发明第9个HDME帕累托解图。

[0045] 图7是本发明图5中选取极值解点A,A'生成任务甘特图。

[0046] 图8是本发明图5中选取极值解点B,B'生成任务甘特图。

[0047] 图9是本发明图6中选取极值解点A,A'生成任务甘特图。

[0048] 图10是本发明图6中选取极值解点B,B'生成任务甘特图。

[0049] 图11是本发明并行机床加工能力雷达图。

[0050] 图中:为显示各部位位置而夸大了互相间间距或尺寸,示意图仅作示意。

具体实施方式

[0051] 应该指出,以下详细说明都是例示性的,旨在对本发明提供进一步的说明。除非另有指明,本发明使用的所有技术和科学术语具有与本发明所属技术领域的普通技术人员通常理解的含义。

[0052] 需要注意的是,这里所使用的术语仅是为了描述具体实施方式,而非意图限制根据本发明的示例性实施方式。如在这里所使用的,除非本发明另外明确指出,否则单数形式也意图包括复数形式,此外,还应当理解的是,当在本说明书中使用术语“包含”和/或“包括”时,其指明存在特征、步骤、操作、器件、组件和/或它们的组合;

[0053] 为了方便叙述,本发明中如果出现“上”、“下”、“左”、“右”字样,仅表示与附图本身的上、下、左、右方向一致,并不对结构起限定作用,仅仅是为了便于描述本发明和简化描述,而不是指示或暗示所指的设备或元件必须具有特定的方位,以特定的方位构造和操作,因此不能理解为对本发明的限制。

[0054] 术语解释部分:本发明中的术语“安装”、“相连”、“连接”、“固定”等术语应做广义理解,例如,可以是固定连接,也可以是可拆卸连接,或为一体;可以是机械连接,也可以是

电连接,可以是直接连接,也可以是通过中间媒介间接相连,可以是两个元件内部连接,或者两个元件的相互作用关系,对于本领域的普通技术人员而言,可以根据具体情况理解上述术语在本发明的具体含义。

[0055] 正如背景技术所介绍的,现有技术中存在没有充分考虑机床加工能力进行调度优化的问题,为了解决如上的技术问题,本发明提出了基于机床加工能力排序的混合流水车间可持续调度方法。

[0056] 本发明的一种典型的实施方式中,基于机床加工能力排序的混合流水车间可持续调度方法,包括如下内容:

[0057] 建立机床加工能力综合评价体系,对并行机床的加工能力进行排序;

[0058] 依据并行机床的排序结果为优化迭代的有效信息实现设备选取,提出主动解码规则;

[0059] 以完工时间和能耗为优化目标,结合主动解码规则进行机床的定向选择,建立基于机床加工能力的差分进化算法,实现混合流水车间的可持续调度。

[0060] 参考图1所示,混合流水车间调度问题(HFSP)通常描述如下:有 n ($i=1,2,\dots,n$) 个工件必须在 w ($j=1,2,\dots,w$) 个阶段进行加工。每个工件 i 由预先确定的操作顺序组成。每个操作都需要从一组可用的并行机床 $M_k = \{M_1, M_2, \dots, M_m\}$ 中选择一台进行加工。

[0061] 为了减少资源和能源的消耗,实现可持续生产,以工件顺序和机床选取为变量,以完工时间和能源消耗最小为目标生产合理加工方案。

[0062] 调度过程的假设总结如下:

[0063] (1) 各加工工件是相互独立的,具有相同的优先级。

[0064] (2) 在一台机床上处理完一个操作后,立即传送到下一台机床。

[0065] (3) 在加工过程中不允许关闭闲置机床,也不考虑机床故障。

[0066] (4) 每个作业的操作顺序是预先定义的,不能修改。

[0067] (5) 不允许抢占,即在当前操作完成之前,不能中断加工任务。

[0068] 将生产过程划分为三个阶段:(1) 加工阶段,(2) 等待阶段,(3) 运输阶段。

[0069] 每个阶段对应时间和能量消耗。 i, j, k 分别代表加工工件,加工工序和加工机床的序号。加工时间 Pt_{ijk} 、单位时间加工能耗 PE_{ijk} 、单位时间等待能耗 WE_{ijk} 、不同阶段机床的运输距离 d_{jk} 和单位时间运输能耗 TE_{ijk} 是确定的。

[0070] 公式(1)中所示的等待时间 Wt_{ijk} 由同一台机床上工件的完成时间 Ft_{ijk} 和下一个工件的开始时间 $St_{ij(k+1)}$ 决定。运输时间 Tt_{ijk} 的由两台机床之间的距离决定,如式(2)。为了便于计算,假设运输速度 V 是固定的。

[0071] T_{make} 是指所有工件的最大完工时间。

[0072] $Wt_{ijk} = St_{ij(k+1)} - Ft_{ijk}$ (1)

[0073] $Tt_{ijk} = \frac{d_{jk}}{V}$ (2)

[0074] $T_{make} = \max \{Ft_{ijk}\}$ (3)

[0075] 能耗由加工阶段总能耗、等待阶段总能耗和运输阶段总能耗组成。加工能耗由加工时间和机床单位时间的加工能耗决定。机床的等待能耗是指机床在待机时所消耗的能量。运输能耗总量由工件在不同阶段间的运输决定,可按式(5)计算。

[0076] $E_{cons} = TE_{total} + PE_{total} + WE_{total}$ (4)

$$[0077] \quad T E_{total} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^w \sum_{k=1}^m T t_{ijk} \cdot T E_{ijk} \cdot X_{ijk} \quad (5)$$

$$[0078] \quad P E_{total} = \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^w P t_{ijk} \cdot P E_{ijk} \cdot X_{ijk} \quad (6)$$

$$[0079] \quad W E_{total} = \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^w (S t_{ij(k+1)} - F t_{ijk}) \cdot W t_{ijk} \cdot X_{ijk} \quad (7)$$

[0080] 综上,混合流水车间调度问题的调度规划模型如下所示:

$$[0081] \quad \min o b j_1 = T_{make} \quad (8)$$

$$[0082] \quad \min o b j_2 = E_{cons} \quad (9)$$

[0083] Subject to:

$$[0084] \quad \sum_{k \in m} X_{ijk} = 1, i \in \{1, 2, \dots, n\}; j \in \{1, 2, \dots, w\}; k \in \{1, 2, \dots, m\} \quad (10)$$

$$[0085] \quad S t_{ij} + \sum_{k \in m} P t_{ijk} \cdot X_{ijk} \leq S t_{i(j+1)}, i \in \{1, 2, \dots, n\}; j \in \{1, 2, \dots, w\} \quad (11)$$

$$[0086] \quad F t_{i(j+1)k^*} - F t_{ijk} \geq P t_{i(j+1)k^*} \quad \forall i \in n, j \in w, k \in m \quad (12)$$

$$[0087] \quad S t_{i(j+1)k^*} - F t_{ijk} \geq 0 \quad \forall i \in n, j \in w, k \in m \quad (13)$$

$$[0088] \quad F t_{ijk} - F t_{(i-1)jk} \geq P t_{ijk} \quad \forall i \in n, j \in w, k \in m \quad (14)$$

$$[0089] \quad X_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{if machine } k \text{ is selected for operation} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad \forall i \in n, j \in w, k \in m \quad (15)$$

$$[0090] \quad S_{ij(k+1)} - F_{ijk} \geq 0 \quad \forall i \in n, j \in w, k \in m \quad (16)$$

$$[0091] \quad T_{make} \geq F t_{ijk} \quad \forall i \in n, j \in w, k \in m \quad (17)$$

$$[0092] \quad E_{cons} \leq E_{max}, T_{make} \leq T_{max} \quad (18)$$

[0093] 式(8)和式(9)为目标函数。

[0094] 式(10)确保每个操作只选择一台机床。

[0095] 式(11)表示机床的待机时间大于等于0。

[0096] 式(12)和式(13)确保工件按照约束顺序进行加工。

[0097] 式(14)规定了一台机床在同一时间只能执行一个操作,并且只有在前一个操作完成后,才可以进行其他操作。

[0098] 式(15)确定了机床的选取。

[0099] 式(16)表示工件的各操作之间的先后关系。

[0100] 式(17)表示完工时间等于或大于所有工件的完成时间。

[0101] 式(18)保证工件完工时间与能耗需满足最大消耗的约束。

[0102] 机床加工能力综合评价体系包括如下内容:

[0103] 参考图2所示,机床过载会影响机床的使用寿命和工作质量,选取机床性能过高则会造成机床资源的浪费和成本的增加;机床不同的特性,反映了不同属性的加工能力;将机床的加工能力划分为三个方面:(1)经济性指标,(2)环境性指标,(3)社会性指标。进一步分析各方面特点,细化指标信息,构建机床加工能力综合评价体系。

[0104] 具体指标描述如下:

[0105] (1) 经济性指标:使用成本 Uc 和能耗成本 Ec 主要用于评价机床是否满足加工的经济性要求,如式(19)所示。

[0106] 使用成本表示工件加工过程消耗的成本,由加工时间和单位时间的加工成本确定,主要包括人力成本,资源、能源成本等。

[0107] 能耗成本主要是指加工工件的总能量消耗成本,与耗电量有关。

$$[0108] \quad C_{total} = Uc + Ec = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^w \sum_{k=1}^m X_{ijk} \cdot (uc_{ijk} \cdot ucc + ec_{ijk} \cdot uec) \quad (19)$$

[0109] 式中, C_{total} 表示机床加工工件总成本。 ec_{ijk} 表示第*i*个工件第*j*次操作在机床*k*上的能耗。 uec 是单位能耗的成本。 uc_{ijk} 表示第*i*个工件第*j*次操作在机床*k*的使用时间。 ucc 是单位时间的使用成本。

[0110] (2) 环境性指标:能耗作为环境影响的重要来源,主要通过比能耗(specific energy consumption, SEC)衡量。

[0111] 机床的比能耗是指去除单位体积材料时机床所消耗的电能。为了直观地评价机床的能耗特性,采用了“比能耗-材料去除率”的计算公式。

$$[0112] \quad SEC = \frac{P_{cut}}{MRR^*} = c_1 + \frac{c_2}{MRR^*} \quad (20)$$

[0113] 式中, P_{cut} 表示机床的总切削功率, c_1 、 c_2 是通过拟合得到的机床的加工属性系数, c_1 与工件的材料和刀具有关, c_2 取决于机床的空载功率。

[0114] (3) 社会性指标:主要包括工件加工质量和加工效率。加工质量 Q 通过加工工序的不合格率表征。不合格率越高,加工质量越不稳定。加工效率由加工时间决定,即机床从开始加工工件到完成加工任务的总时间。

$$[0115] \quad C_{ij} = \sum_{j=1}^h X_{ijk} \cdot (uc_{ijk} \cdot ucc + ec_{ijk} \cdot uec) \quad (21)$$

$$[0116] \quad V_{ijk} = C_{ij} \cdot r_{ijk} \quad (22)$$

$$[0117] \quad Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^w V_{ijk} \quad (23)$$

[0118] 式中, r_{ijk} 表示第*i*个工件第*j*道工序的不合格率。 C_{ih} 代表第*i*个工件的前*j*个工序的总加工成本。

[0119] 机床加工能力排序:

[0120] 利用基于理想解相似性的排序技术(TOPSIS)方法对并行机床的加工能力进行排序,解决多准则决策问题。

[0121] 该方法的基本思想即,所选方案与正理想方案的距离最短,与负理想方案的距离最远,利用此方法实现机床加工能力进行的评价与排序。解决调度过程中存在k台并行机床 $m_k = \{m_1, m_2, \dots, m_m\}$,机床包含多个评价指标的多准则决策问题。首先构建机床的决策矩阵 X_{kf} 。

$$[0122] \quad X_{kf} = \begin{matrix} m_1 & \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{15} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{25} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{k1} & x_{k2} & \dots & x_{k5} \end{bmatrix} \\ m_2 & \\ \dots & \\ m_m & \end{matrix}$$

[0123] machines $e_1 \ e_2 \ \dots \ e_5$ indicators

[0124] 其中, x_{kf} 表示第k个机床第f个指标的耗值, $k=1,2,\dots,m$; $f=1,2,\dots,5$ 。参考图3所示,按照如下内容进行机床的加工能力评估与排序。

[0125] 1) 数据准备:

[0126] 各向同性决策矩阵 x'

[0127] 建立的决策矩阵中所有指标都是成本型指标,一般将成本型指标转化为效益型指标(即价值越大,评价越高):

$$[0128] \quad x' = \frac{1}{x_{kf}} (x_{kf} > 0)$$

[0129] 归一化决策矩阵 R_{kf}

[0130] 通过将每个列元素除以当前列向量的范数实现标准化:

$$[0131] \quad R_{kf} = \frac{x_{kf}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m x_{kf}^2}}$$

[0132] 其中,k为机床的总数($k=1,2,\dots,m$), x_{kf} 决策矩阵 R_{kf} 中的元素;

[0133] 2) 数据处理:

[0134] 识别理想和负理想方案

[0135] 理想方案 R^+ 由 R 中每个元素的最大值组成:

$$[0136] \quad R^+ = (\max \{R_{11}, R_{21}, \dots, R_{m1}\}, \max \{R_{12}, R_{22}, \dots, R_{m2}\}, \dots, \max \{R_{1v}, R_{2v}, \dots, R_{mv}\}) = \{R_{1+}, R_{2+}, \dots, R_{v+}\}$$

[0137] 负理想方案 R^- 由 R 中每个元素的最小值组成:

$$[0138] \quad R^- = (\min \{R_{11}, R_{21}, \dots, R_{m1}\}, \min \{R_{12}, R_{22}, \dots, R_{m2}\}, \dots, \min \{R_{1v}, R_{2v}, \dots, R_{mv}\}) = \{R_{1-}, R_{2-}, \dots, R_{v-}\}$$

[0139] 采用熵权法获取权重 w_f ,计算每个评价对象与理想方案和负理想方案的接近度

$$[0140] \quad D_k^+ = \sqrt{\sum_{f=1}^v w_f \cdot (R^+ - R_{kf})^2}$$

$$[0141] \quad D_k^- = \sqrt{\sum_{f=1}^v w_f \cdot (R^- - R_{kf})^2}$$

[0142] 3) 机床排序:

[0143] 计算与理想解的接近度

$$[0144] \quad D_k = \frac{D}{D_k^+ + D_k^-}$$

[0145] $0 \leq D_k \leq 1, D_k \rightarrow 1$, 表明机床更适合加工。

[0146] 进行机床加工能力排序:

[0147] $M2 > m4 > m3 > \dots > m1$

[0148] 进一步地, 通过机床加工能力作为信息实现设备选取的方法定义为一种解码规则, 采用启发式改进差分进化算法 (Heuristic modified Differential evolution algorithm, HMDE) 求解混合流水车间调度问题。方法在遗传操作后进行主动解码, 并将机床的选取规则融入算法的迭代过程中, 加快收敛, 提高算法的性能。

[0149] 解码方法是将迭代产生的染色体序列解码生成合理的生产调度方案的关键因素, 对解的质量有很大的影响。启发式规则主要是根据加工能力来选择机床。在通过算法的变异、交叉、选择操作后生成一组染色体, 每条染色体代表一个生产方案, 通过从左到右识别染色体基因进行解码操作, 实现机床的选取。一般来说, 加工能力排序越高表明机床越适合操作。如图4所示, 工件2第1道工序对应的并行机床加工能力排序为: $M1 > M3 > M2$, 因此解码后选取M1进行加工。Algorithm1描述了如何根据启发式解码规则获得合适机床。

Algorithm1 解码过程伪代码

Input $i, j //$

Output $g(i, j), Set(i, j)$

[0150] (1) **For** $i=1$ To n
 (2) $j=1$;
 (3) **While** ($j \leq w$) **Do**
 (4) Parallel machines $p_M(i, j)$;
 (5) Calculate the matching degree for the i th job of j stage $Md(i, j)$ via Eq.(28);
 (6) Ranking the machining capacity of the parallel machines, set the machine order as
 (7) $g(i, r) = \max \{ Md(i, j) \}$;
 (8) $j++$;
 (9) **End While**
 (10) $i++$;
 (11) **End For**

[0151] 结合启发式解码规则, 提出了一种适用于HFSP可持续调度的启发式改进差分算法, 实现设备的定向选择。具体步骤如下:

[0152] 步骤1: 设置迭代次数 $gen=1$, 初始化种群 $x1 = \{x_1(1), x_2(1), \dots, x_p(1)\}$, ($r=1, 2, \dots, p$) 均匀分布在搜索空间, $x_r(1) = \{x_{r1}, x_{r2}, \dots, x_{rG}\}$, ($g=1, 2, \dots, G$)。变异算子和交叉算子分别设置为F和cp。

[0153] 步骤2: 通过式 (8), (9) 计算时间和能耗。

[0154] 步骤3: 变异操作: 通过差分策略实现个体差异化。

[0155] $M_r(gen+1) = x_{r1}(gen) + F * (x_{r2}(gen) - x_{r3}(gen))$

[0156] 式中, $r \neq r1 \neq r2 \neq r3$, $x_{r2}(gen)$ 表示第gen代种群的第 r_2 个染色体。

[0157] 步骤4: 对第gen代群体及其变异个体 $M_r(gen+1)$ 进行交叉操作。

$$[0158] \quad C_r(\text{gen} + 1) = \begin{cases} M_r(\text{gen} + 1), & \text{if } \text{rand}(0,1) \leq cp \\ x_{gr}(\text{gen}), & \text{otherwise} \end{cases}$$

[0159] 其中, $\text{rand}(0,1)$ 是在0和1之间均匀分布的随机数。

[0160] 步骤5: 采用贪婪算法进行选择。对所有个体进行帕累托等级比较, 等级较高的个体被保留。

$$[0161] \quad x_r(\text{gen} + 1) = \begin{cases} C_r(\text{gen} + 1), & \text{if } \text{rank}(C_r(\text{gen} + 1)) \geq \text{rank}(x_r(\text{gen})) \\ x_r(\text{gen}), & \text{otherwise} \end{cases}$$

[0162] 步骤6: 运用启发式解码规则。将第j个操作对应的并行机床定义为 $\text{Par_M}(j)$ 。计算 $\text{Par_M}(j)$ 的加工能力, 记为 $\text{Md}(j)$ 。对 $\text{Md}(j)$ 排序, 最大的 $\text{Md}(j)$ 被选取加工。

[0163] 步骤7: 执行步骤2到步骤6, 直到满足所有终止条件。

[0164] 步骤8: 输出最优结果作为解决方案。

[0165] 案例研究

[0166] 案例设置如下: 4个加工工件, 每个工件包含5道加工工序, 每道工序有5台并行机床可供选择。表1提供了生产数据, 包括工件编号、加工时间、加工功率和待机功率。数据由日本横河CW240测算获取。

[0167] 表1 HFSP的参数

		工件 1	工件 2	工件 3	工件 4	加工功率	待机功率	
		加工时间 (min)				(kW)	(kW)	
[0168]	工序 1	M1	6	4.2	6.1	5.8	20	15
		M2	2.3	2.6	4.1	3.4	30	25
		M3	4.2	3.2	5.6	4.3	25	20
		M4	8.1	4.2	7.4	6.9	10	5
		M5	1.5	2.6	3.6	2.8	35	30
	工序 2	M6	2.3	2.4	2.2	2.9	30	25
		M7	3.5	3.6	3.2	2.6	23	18
		M8	4.3	4.3	4.8	3.6	18	13
		M9	5.2	4.5	4.8	4.8	12	7
		M10	6.1	5.2	5.6	5.1	8	5
[0169]	工序 3	M11	8.1	4.8	4.5	4.8	10	5
		M12	7.2	3.3	3.4	3.3	18	13
		M13	3.1	2.5	1.5	1.9	35	30
		M14	5.3	3.4	2.1	2.1	23	18
		M15	9	5.3	5.3	5.6	8	5
	工序 4	M16	2.6	1.5	2.2	2.8	25	20
		M17	3.6	2.5	4.3	3.5	20	15
		M18	3.8	1.9	3.4	3.5	23	18
		M19	5.1	2.6	5.6	4.6	15	10
		M20	6.2	3.9	6.3	5.3	10	5
工序 5	M21	4.5	4.8	7.5	7.3	10	5	
	M22	3.6	3.4	6.6	6.8	13	8	
	M23	2.7	3.5	5.8	5.6	15	10	
	M24	1.3	2.6	3.7	3.3	20	15	
	M25	1.5	2.6	4.8	4.6	18	13	

[0170] 表2测量了各机床的加工能力参数。合格率 Q_r 来确定质量, MRR 来确定能耗, 用 u_{up}

来确定成本,用加工时间和等待时间来确定时间。

[0171] 表2加工能力指标

工序	机床	工件 1	工件 2	工件 3	工件 4
		Q_r / MRR/ uup	Q_r / MRR/ uup	Q_r / MRR/ uup	Q_r / MRR/ uup
工序 1	M1	0.90/22/1.67	0.87/25/1.67	0.89/50/1.67	0.96/27/1.67
	M2	0.75/30/3.00	0.79/32/3.00	0.92/58/3.00	0.92/34/3.00
	M3	0.80/25/2.50	0.86/29/2.50	0.87/54/2.50	0.87/30/2.50
	M4	0.91/20/1.00	0.91/21/1.00	0.95/38/1.00	0.82/21/1.00
	M5	0.83/40/3.33	0.95/35/3.33	0.94/62/3.33	0.92/36/3.33
工序 2	M6	0.80/35/3.67	0.93/54/3.67	0.91/35/3.67	0.89/36/3.67
	M7	0.85/32/3.00	0.89/52/3.00	0.86/32/3.00	0.91/31/3.00
	M8	0.90/29/2.50	0.85/48/2.50	0.89/28/2.50	0.87/26/2.50
	M9	0.79/25/2.17	0.78/45/2.17	0.84/26/2.17	0.95/21/2.17
	M10	0.84/20/1.33	0.75/40/1.33	0.95/20/1.33	0.97/17/1.33
工序 3	M11	0.85/38/1.67	0.92/25/1.67	0.84/15/1.67	0.88/32/1.67
	M12	0.79/45/2.00	0.97/27/2.00	0.86/18/2.00	0.95/37/2.00
	M13	0.82/52/3.00	0.92/35/3.00	0.91/24/3.00	0.94/47/3.00
	M14	0.94/48/2.50	0.89/32/2.50	0.82/22/2.50	0.86/45/2.50
	M15	0.89/35/1.33	0.86/22/1.33	0.78/13/1.33	0.87/26/1.33
工序 4	M16	0.78/38/3.33	0.76/37/3.33	0.82/34/3.33	0.98/42/3.33
	M17	0.91/25/2.50	0.82/34/2.50	0.84/29/2.50	0.95/34/2.50
	M18	0.82/32/3.00	0.84/30/3.00	0.91/32/3.00	0.85/39/3.00
	M19	0.95/20/2.17	0.79/27/2.17	0.72/26/2.17	0.91/31/2.17
	M20	0.92/17/1.83	0.83/25/1.83	0.85/24/1.83	0.87/24/1.83
工序 5	M21	0.84/22/1.67	0.95/21/1.67	0.92/21/1.67	0.98/18/1.67
	M22	0.87/25/2.67	0.97/26/2.67	0.98/32/2.67	0.94/22/2.67
	M23	0.91/28/3.00	0.89/30/3.00	0.91/37/3.00	0.87/24/3.00
[0173]	M24	0.88/35/3.83	0.92/34/3.83	0.89/47/3.83	0.86/36/3.83
	M25	0.85/32/3.50	0.93/32/3.50	0.95/43/3.50	0.93/31/3.50

[0174] 运用提出的算法,进行不同规模的实例评估。对于不同规模的实例数据,我们根据表1中对应的工件/工艺/机床的数据按比例扩大。一个包含n个工件、s个工序和m台机床的实例被表示为 $n \times s \times m$ 。对于每个实例,分别运行HMDE算法50次,取解的平均值。结果如表3,表示了不同规模实例的Pareto front解集的运行时间和最大完工时间、能耗结果。

[0175] 表3 HMDE优化结果

序号	实例	完工时间(min)	能耗(kW.h)	完工时间(min)	能耗(kW.h)	运行时间
		extreme points				(s)
1	4*5*25	21	2404	22.9	1949	34.252
2	8*5*25	26.5	4067	33.8	3089	61.710
3	12*5*25	30.8	4900	38.2	4253	90.262
4	16*5*25	36.6	6051	40.3	5587	117.240
5	20*5*25	41.8	7113	50.2	6791	143.815
6	25*5*25	47.6	9315	56.7	8374	178.785
7	4*10*50	38.4	8249	39.9	6821	61.978
8	8*10*50	46.9	1.15e+04	53.1	1.059e+04	114.406
9	12*10*50	51.2	1.630e+04	59.0	1.3042e+04	168.970
10	16*10*50	58.9	1.733e+04	63	1.64e+04	220.235
11	20*10*50	64.7	1.914e+04	67	1.873e+04	271.624
12	25*10*50	71.7	2.223e+04	74.9	2.185e+04	339.596

[0177] 为了直观的表达算法的优化结果,我们在12个规模中选取了第3个和第9个实例的帕累托前沿解进行可视化分析,各优化结果分布均匀,具体如图5和图6所示。

[0178] 为了进一步评估所提模型和算法的有效性,从图5和图6中得到的帕累托前沿解中选取极值解点A,A',B,B',生成任务甘特图分别如图7-图10所示。

[0179] 从图7和图8可以看出,并行机床中M1,M8,M9,M10,M13,M11,M18,M21和M23的利用率较低。根据TOPSIS方法获得不同工件各工序并行机床的加工能力排序,如表4所示。结果表明生产方案机床的选取情况与加工能力排序一致。

[0180] 表4机床加工能力排序

工序	机床	(值/等级排序)			
		工件 1	工件 2	工件 3	工件 4
工序 1	M1	0.59/5	0.40/5	0.55/4	0.55/5
	M2	0.30/2	0.31/1	0.48/3	0.41/2
	M3	0.50/3	0.36/4	0.60/5	0.48/4
	M4	0.58/4	0.31/2	0.48/2	0.48/3
	M5	0.19/1	0.32/3	0.44/1	0.35/1
工序 2	M6	0.27/1	0.28/1	0.28/1	0.38/3
	M7	0.41/2	0.40/3	0.38/2	0.28/1
	M8	0.46/3	0.43/5	0.48/5	0.36/2
	M9	0.49/5	0.41/4	0.43/4	0.43/5
	M10	0.47/4	0.38/2	0.41/3	0.38/4
工序 3	M11	0.70/2	0.35/4	0.35/4	0.40/4
	M12	0.75/4	0.27/1	0.31/3	0.33/3
	M13	0.79/5	0.29/2	0.15/1	0.23/1
	M14	0.61/1	0.31/3	0.20/2	0.23/2
	M15	0.71/3	0.36/5	0.39/5	0.44/5
工序 4	M16	0.25/1	0.13/1	0.22/1	0.33/1
	M17	0.30/2	0.23/3	0.42/3	0.39/2
	M18	0.39/3	0.17/2	0.34/2	0.41/3
	M19	0.46/4	0.23/4	0.50/5	0.47/4
	M20	0.51/5	0.32/5	0.50/4	0.48/5
工序 5	M21	0.33/5	0.38/5	0.60/4	0.56/3
	M22	0.31/4	0.32/3	0.65/5	0.65/5
	M23	0.22/3	0.34/4	0.60/3	0.58/4
	M24	0.09/2	0.25/2	0.44/1	0.36/1
	M25	0.08/1	0.25/1	0.54/2	0.51/2

[0182] 为了进一步说明模型和方法的有效性,选取了工件1的5个加工工序,生成各工序下机床加工能力的雷达图,如图11所示(为便于说明,各工序并行机床均标表示为M1、M2、

M3、M4、M5)。在并行机床中,工序1中的M1、M3、M4,工序2中的M3、M4、M5,工序3中的M1、M2、M5,工序4中的M4、M5、M6,工序5中的M1、M2、M3的排序等级较低。工件1的加工情况如图7和图8所示,甘特图结果表明选取的机床为M2、M6、M14、M17、M25,所有的操作避免选取最小排序等级的机床,表明了启发式规则解决HFSP调度问题的有效性。

[0183] 为了测试提出的规则和改进算法的性能,我们将启发式规则引入到NSGA-II和PSO中,命名为HMNSGA-II和HMPSO。对每个实例进行20次独立运行,将HMDE与HMNSGA-II和HMPSO进行比较。

[0184] 表5算法非支配解

序号	实例	HMDE			HMPSO			HMNSGA-II		
		max	min	Avg	max	min	avg	max	min	avg
1	4*5*25	6	4	5.2	4	3	3.1	5	3	4.6
2	8*5*25	18	10	14.5	15	9	11.3	17	10	13.2
3	12*5*25	21	12	14.2	16	11	12.5	17	12	13.4
4	16*5*25	28	10	21.7	13	8	10.3	23	10	18.5
5	20*5*25	22	15	19.4	18	12	15.6	20	13	18.9
6	25*5*25	28	13	20.1	18	12	17.4	24	12	18.3
7	4*10*50	5	3	4.5	3	2	2.6	4	3	3.2
8	8*10*50	12	9	11.3	11	5	7.9	13	7	9.8
9	12*10*50	24	13	22.4	18	11	16.3	21	14	18.1
10	16*10*50	23	15	19.5	17	10	12.6	20	12	16.4
11	20*10*50	17	10	12.3	14	8	10.5	15	9	11.2
12	25*10*50	15	7	9.6	12	6	8.3	13	6	8.9

[0186] 从表6中可以清楚地发现,在相同的计算时间内,HMDE算法得到的总体avg,max和minA要比HMNSGA-II算法和HMPSO算法的更好。HMDE优于其他算法的原因在于,该算法可以充分利用非支配解生成后代,并且可以利用迭代算子的启发式规则来产生优秀的个体。

[0187] 以上所述仅为本发明的优选实施例而已,并不用于限制本发明,对于本领域的技术人员来说,本发明可以有各种更改和变化。凡在本发明的精神和原则之内,所作的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

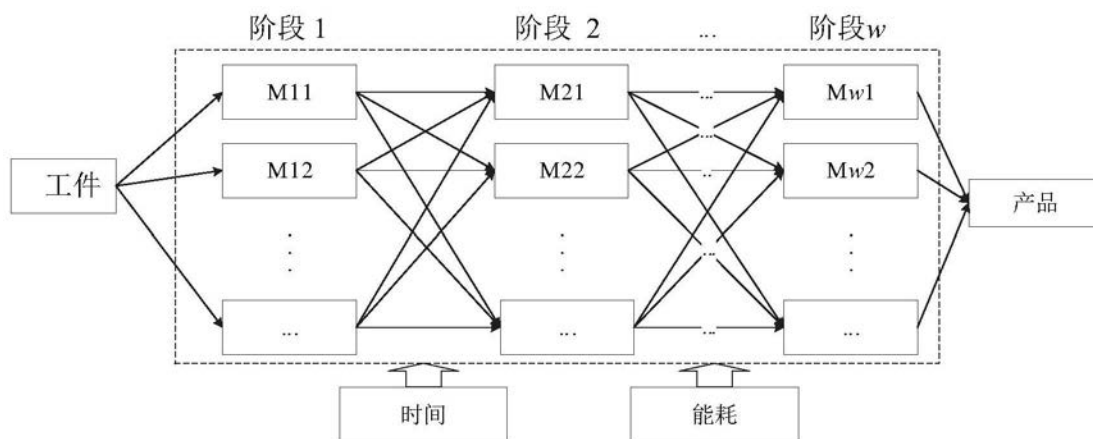


图1

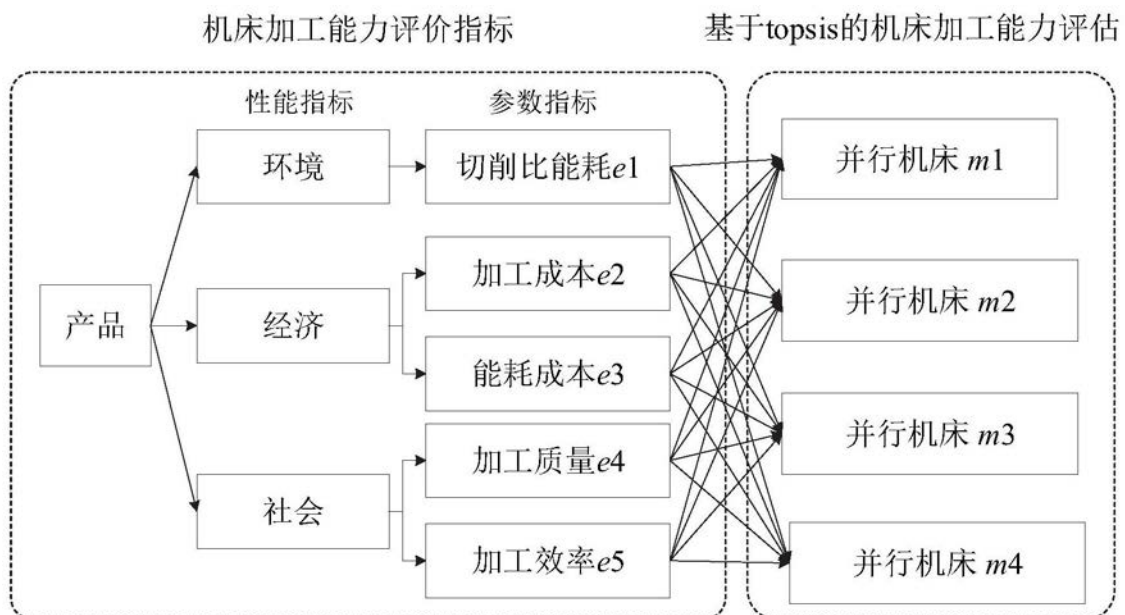
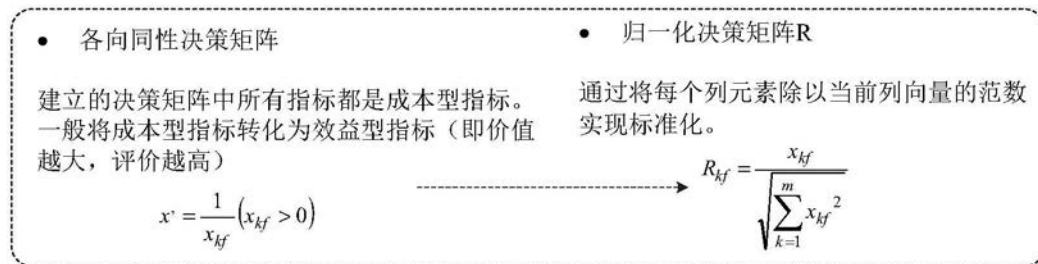
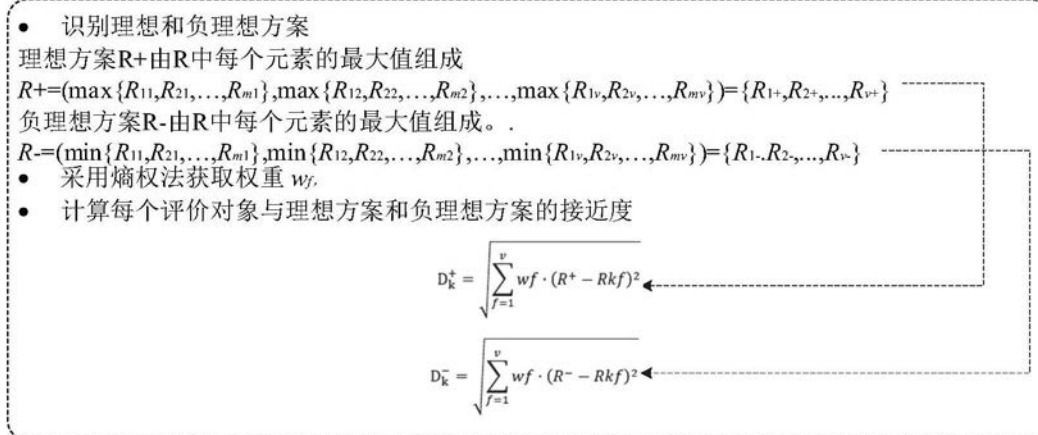


图2

步骤1:数据准备



Step2:数据处理



Step3: 机床排序

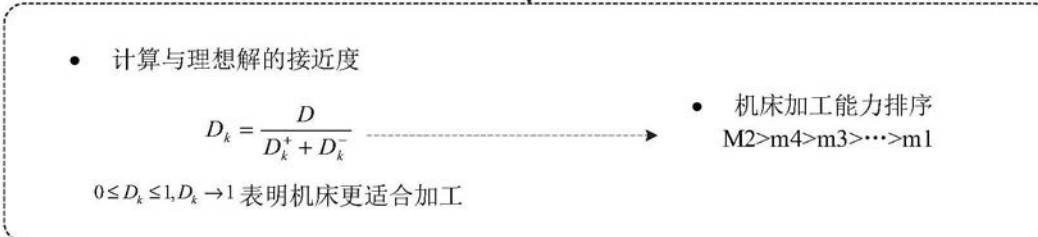


图3

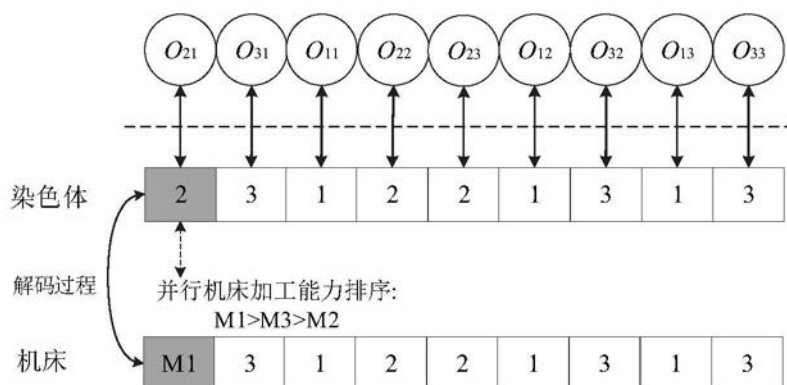


图4

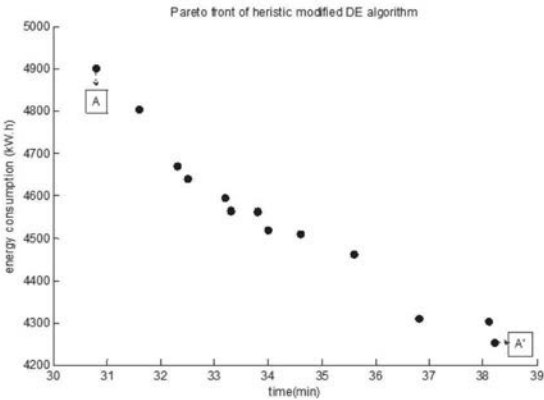


图5

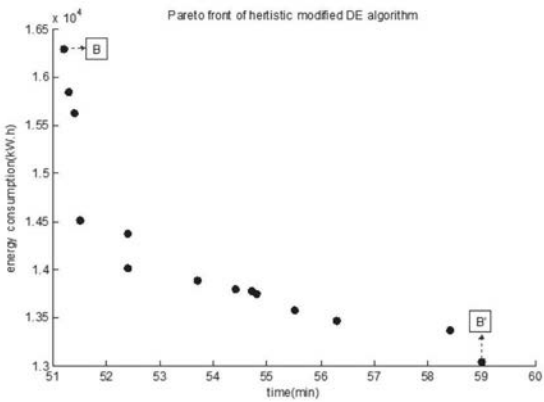


图6

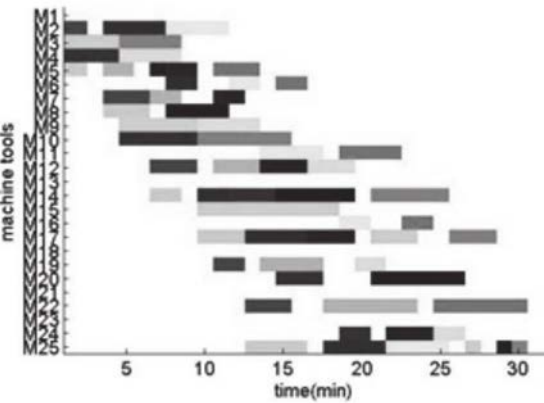


图7

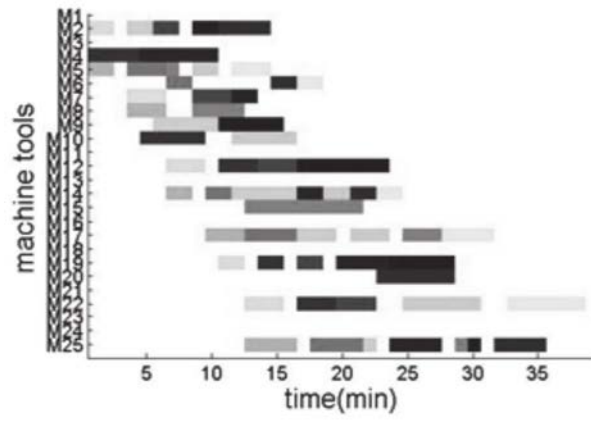


图8

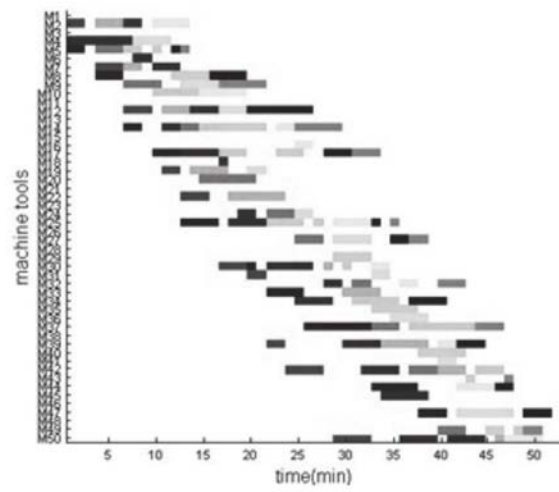


图9

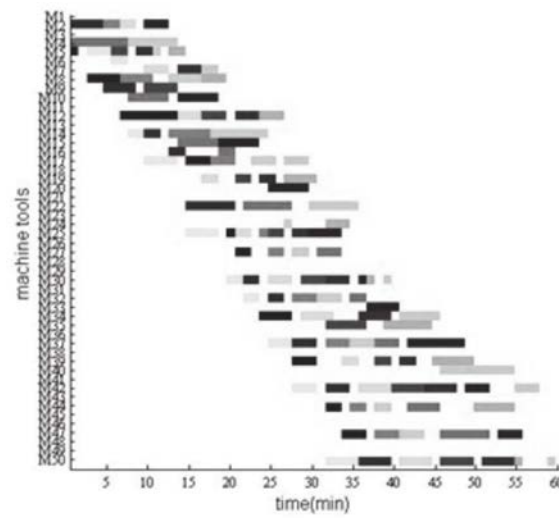


图10

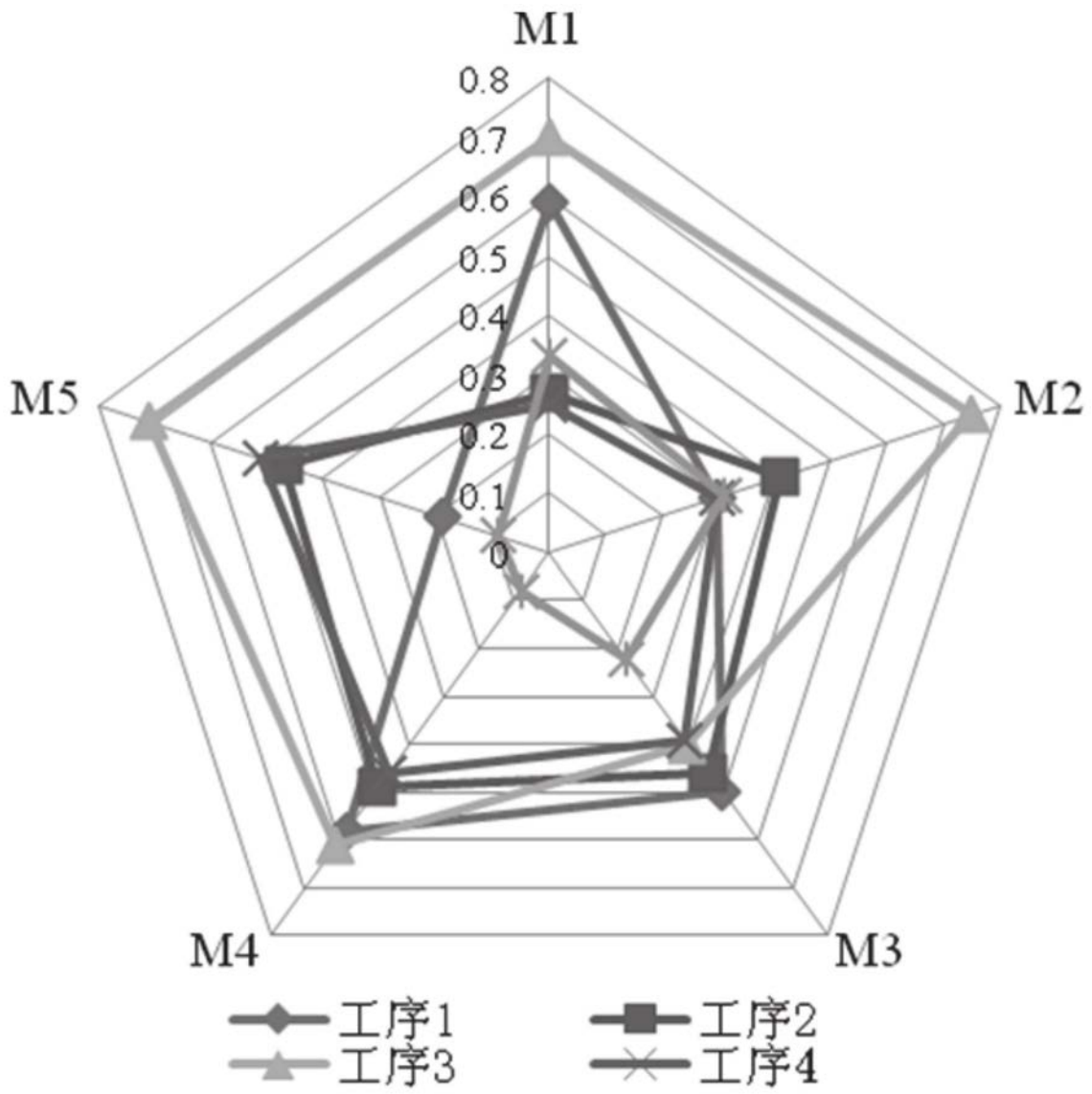


图11