

基于隐性势场法的制造单元构建技术

顾文斌^{1,2} 唐敦兵¹ 郑堃¹ 裴文祥¹

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京, 210016; 2. 河海大学机电学院, 常州, 213022)

摘要: 为了使制造企业能够根据市场需求快速调整组织制造资源, 简化生产调度过程, 提高生产调度质量, 提出了一种基于隐性势场的制造单元构建算法。在满足约束的前提下, 建立了以最小加工成本和最优单元负载均衡为目标的基于隐性势场的制造单元构建模型, 给出了制造单元的构建方法, 并构造了基于隐性势场的设备关联矩阵模型和任务关联矩阵模型。该算法具有模型简单、设计变量少等优点。通过具体实例, 验证了该方法的有效性和可行性。

关键词: 隐性势场算法; 关联矩阵; 制造单元; 单元构建

中图分类号: TH165 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-2615(2012)06-0862-07

Formation Technology for Manufacturing Cells Using Potential Field

Gu Wenbin^{1,2}, Tang Dunbing¹, Zheng Kun¹, Pei Wenxiang¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China; 2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hohai University, Changzhou, 213022, China)

Abstract: To adjust manufacturing resources rapidly according to the market demand, simplify production scheduling process and improve scheduling quality, a manufacturing resource organization model based on potential field concept is proposed. Under the condition of constraints satisfaction, the mathematical model with the minimum producing cost and optimal load balance as the goals is established based on potential field concept. Then, the conjunction matrix model of machines and the conjunction matrix model of machining routes based on potential field concept are established. The concrete steps of this proposed algorithm are given. The algorithm has the advantages of simple model and less design variables. Finally, an example is given to demonstrate the validity and feasibility of the proposed algorithm.

Key words: potential field algorithm; conjunction matrix; manufacturing cell; cell formation

市场竞争日益激烈, 消费者对于产品的个性化和多样化要求日益增加, 导致产品更新速度不断加快, 生产周期不断缩短。这些新特征迫使企业急需能够快速、敏捷、柔性地响应新产品的开发及满足市场需求的新型制造系统模式, 使其具有快速重组和响应的能力以便适应不断变化的市场需求, 敏捷

制造系统(Agile manufacturing system, AMS)为解决上述问题提供了有效的解决途径^[1]。而制造单元则是敏捷制造实施的基础, 一个敏捷制造单元(Agile manufacturing cell, AMC)就是一组根据具体生产任务的需要快速组合的资源配置, 从而把单件、小批量生产转换为批量生产, 在保持生产柔

基金项目: 国家自然科学基金(51175262)资助项目; 高等学校博士学科点专项科研基金(20093218110020)资助项目; 南京航空航天大学博士学位论文创新与创优基金(BCXJ10-09)资助项目。

收稿日期: 2011-11-15; **修订日期:** 2011-12-14

通讯作者: 唐敦兵, 男, 教授, 博士生导师, 1972年出生, E-mail: d.tang@nuaa.edu.cn。

性的同时,有效地利用资源、提高生产效率、获取批量生产的效益。并且,当生产任务发生变化时,它能根据任务变化的特点,在原有基础上自行组织新的资源配置。因此,如何快速、高效地构建敏捷制造单元一直是学术界的研究热点。

到目前为止,已有众多研究人员对制造单元的构建技术进行了深入的研究,提出了多种有效的制造单元构建方法^[2-6],并取得了丰硕的成果。王国新等人^[2]提出了一种基于整数规划和排序聚类算法的敏捷制造单元动态重构算法;白俊杰等人^[3]利用启发式方法与基于网格计算的分布式平行协同多目标粒子群算法相结合的方法,提出了一种新型的面向订单的制造单元构建方法;Nitesh K 等人^[4]研究了基于相似性理论,以最快速度交货为最优优化函数,针对虚拟制造系统中资源选择问题快速虚拟制造单元生成方法;而文献^[5]中利用改进型粒子群优化算法对影响制造单元的各个因素进行优化组合计算,并最终根据优化目标函数聚类出合适的制造单元,有效地完成了对制造资源和工艺路线的优化组合。文献^[6]则通过将分支界定法与遗传算法相结合的方法对制造系统单元构建进行了研究。但由于制造单元构建问题的复杂性,仍有许多问题没有得到很好的解决,主要包括以下几方面^[2,7-8]:

(1)制造资源组织重构问题一般是从自上而下的角度来解决,但因缺乏及时的实际运行信息,而无法对各种意外情况做出及时的合理调整。同时,使用自上而下的重构方法所搭建的优化模型往往过于复杂,难于求解。但是,如果采用自下而上重构方法却普遍存在着分布决策中协商困难和冲突难于消解的问题。此外,还存在系统通讯频繁、开销过大等不足。

(2)单元重构过程和工艺过程在已有的研究中都视为两个紧密联系的过程,但是制造单元的实际构建中,很多方法都是将工艺和重构的两个步骤分离开操作的,本质上并没有实现真正的融合。具有可实施性的制造单元应该是多种关联因素共同作用的结果,这些因素包括工件投产数量、加工时间、设备能力、同种类型设备的数量(可选设备)等,目前大多数算法主要以工件加工工序与制造资源之间的简单关联关系作为制造单元构建的基础,或是针对上述部分因素的组合展开研究,导致制造单元构建结果与生产实际情况偏差较大。

总的来说,对制造系统单元构建算法的开发还

处于研究阶段,未形成完整理论,有待于进一步探讨。人工势场法是利用与位置相关的隐性势场函数来控制机器人自动选径避障的一种智能算法。目前,该算法主要用于机器人路径规划中,但其引力场的实时变化函数却可以借鉴到制造单元根据不同任务进行重构时的情况中,受此启发,本文提出了基于隐性势场的单元构建算法,并利用基于隐性势场的设备关联矩阵与任务关联矩阵对制造单元进行构建,从而有效地完成了对制造资源与工艺路线优化组合。最后,通过对一个实例的仿真计算,证明了本文提出算法的可行性。

1 基于隐性势场的优化思想

基于隐性势场的优化思想主要来源于人工势场法在智能移动机器人中的应用。人工势场法是Khatib 等人^[9]在1985年提出的一种虚拟方法,刚开始只是为了解决机械手臂在移动抓取物体的时候,能够不碰到工作台,后来逐渐发展到机器人运动中的路径避障控制中去。该方法采用与位置相关的势函数来进行机器人避障控制,使机器人具有较好的适应实时变化的能力^[10-11]。其基本思想是将机器人的运行空间定义为一个抽象的势场,该势场为目标位置的引力场和环境中的障碍物的斥力场的叠加势场,机器人通过该势场力的作用来控制其自身运动,搜索无碰撞最优路径,以便实时避开障碍,抵达最终目标。

设机器人位置信息为 $q_r(x_r, y_r)$,目标位置信息为 $q_g(x_g, y_g)$,第 i 个障碍物的位置信息 $q_{oi}(x_{oi}, y_{oi})$ 。则引力势场函数可以描述为

$$U_{att}(q) = \frac{1}{2}k_a(q_r - q_g)^2 \quad (1)$$

斥力势场函数的计算公式为

$$U_{rep}(q) = \begin{cases} \frac{1}{2}k_r\left(\frac{1}{p(q)} - \frac{1}{p_0}\right)^2 & p(q) \leq p_0 \\ 0 & p(q) \geq p_0 \end{cases} \quad (2)$$

引力函数的计算公式

$$F_{att}(q) = k_a(q_r - q_g) \quad (3)$$

斥力函数的计算公式为

$$F_{rep}(q) = \begin{cases} -k_r\left(\frac{1}{p(q)} - \frac{1}{p_0}\right)\frac{1}{p(q)^2} & p(q) \leq p_0 \\ 0 & p(q) \geq p_0 \end{cases} \quad (4)$$

相应的作用于机器人的合力为

$$F_{total} = F_{att}(q) + \sum_{i=1}^n F_{rep} \quad (5)$$

式中: k_a 表示引力比例因子; $(q_r - q_g)$ 表示机器人

位置 q_i 到目标点的距离; k_r 表示斥力正比例因子; $\rho(q)$ 表示机器人与障碍物之间的最短距离; ρ_0 表示安全距离。

由式(1~5)可以看出,吸引场是对机器人运行空间的一种人为的抽象描述,目标点及障碍物按照某种势函数产生势场,而机器人在势场中具有势场函数则是根据需要人为设定的,因此势函数的形式不是唯一的,而且从避障效果考虑,引力场作用范围较大,而斥力场仅作用于局部范围内,当机器人远离障碍物时,不考虑斥力场对其的影响,机器人最终的运动轨迹是由合力 F_{total} 来决定的。因此,依靠人工势场中引力和斥力这种非符号的通信机制只需要进行简单的计算,其通信量小、实时性强,在路径寻找和避障控制上表现出了强大的寻优能力。

2 基于隐性势场的制造单元构建模型

制造单元构建方法的模型是制造系统根据其生产任务组织现有制造资源的方式方法,描述如何用制造资源构造生产系统。不同的制造单元构建形式对生产系统的特性有很大影响,如系统的运行效率、适应性、经济性、可靠性以及可持续发展性和技术先进性等。机器人的寻径避障的过程可以看作是一个“任务-资源”匹配问题的求解过程,即机器人为其任务(向着目标行进)寻找最佳资源(路径)的过程。与其他“任务-资源”匹配问题一样,问题的求解环境中的多个资源(即多条支路)之间存在着替代关系。因此,模拟人工势场法基本原理的隐性势场算法可以解决制造系统中任务与资源之间优化配置的问题。

2.1 制造系统中的工艺路线选择

在离散制造系统中,同一个生产任务通常可以由多条工艺路线完成,如何协调生产任务与工艺路线之间的关系,以便达到某种优化目标,这就构成了制造系统的“任务-工艺路线”匹配问题。而构建制造单元的基础信息主要包括生产任务、工艺信息和制造资源,这些信息中包含了诸如工件加工数量、工序加工时间、机器加工能力等决定制造单元构建结果的重要因素,只有综合考虑这些因素,构建的制造单元才能符合生产实际情况。并且,这些关键因素与制造系统加工任务所选择的工艺路线又是息息相关的。因此,在制造单元构建之前,需要合理地解决“任务-工艺路线”的匹配问题,提取这些关键因素,并将其有效地结合起来,作为构建制造单元的约束条件。

单元构建需要满足紧凑性与独立性两个要求。紧凑的单元(单元包括的设备少)可以减少单元内物流的平均距离,独立的单元可以减少工件在单元间的流动次数,这是一个既对立又统一的问题。协调好单元内的物流距离与单元间的物流次数之间的关系,对于降低单元加工成本和提高单元生产效率具有重要作用。如果将这一问题和机器人自动避障时的路径选择过程相比的话,可以发现二者存在着诸多相似之处。待加工的任务可以看作正在寻路的机器人,而一条工艺路线就相当于任务在加工过程中通过的一段路径,制造系统中能完成某一个任务的多条工艺路线如同机器人所遇到的多条支路,各条工艺路线对任务加工时间和成本的差异就类似机器人通过不同支路的时间差异。基于机器人寻路避障过程与“任务-工艺路线”匹配问题的相似之处,本文设计了一种基于隐性势场的“任务-工艺路线”匹配问题求解方法。

2.2 基于隐性势场的“任务-工艺路线”匹配模型

为了模仿机器人自动探路过程实现任务到工艺路线的选择,首先就必须建立制造系统的“隐性势场”。隐性势场被建模为一个数值,它代表的是某一工艺路线加工某一类任务对加工成本的全局性能的改善程度,就像机器人自动探路问题中势场合力强度代表各通路长短一样。高的隐性势场数值意味着由某条工艺路线加工该类任务更可能使制造系统全局性能得到改善。

“任务-工艺路线”匹配问题可描述为:有 M 类资源设备,各类资源设备为 N_m 台,企业的零件级任务有 P 种,每种任务包含多道工序,每道工序的加工设备类型固定,在满足加工工艺要求的情况下,为每道工序选择合适的加工设备,形成加工路线。由于可利用资源的多样性,工件的加工路线会有多种方案,如何选择合适的加工路线,构建合理的加工制造单元,将直接影响企业生产的效率和质量。因此,本文以总的生产成本 $C_{\text{total}}(P)$ 最小和制造单元负载均衡 $B_L(N_C)$ 为优先考虑目标。

2.2.1 总的生产成本 $C_{\text{total}}(P)$

制造企业在单元式生产模式下,其生产成本主要由两部分费用组成:工件加工费用 $C_w(P)$ 和物流运输费用 $C_T(P)$ 。但是由于缺乏单元系统布局信息,单元构建阶段的物流距离无法获知,文献[12]认为当单元尺寸在一定范围内变化时,其单元间物流费用近似为一常量 C_{T0} 。因此,总生产成本 $C_{\text{total}}(P)$ 的表达式为

$$C_{\text{total}}(P) = \sum_{r_p} (N_{r_p} \times C_{r_p}) + N_C \times C_{T_0} \quad (6)$$

式中: N_{r_p} 表示工件 p 在加工路径 r_p 上的生产数量; C_{r_p} 表示单个工件 p 在加工路径 r_p 上的生产成本; N_C 表示制造单元的数量。

2.2.2 制造单元负载平衡 $B_L(N_C)$

生产设备的负载平衡既可以提高设备的利用率,同时可以保证产品各模块的加工进度相近,有利于生产管理,可提高产品的齐套率,降低在制品库存。本文以单元的负载比统计标准差来度量制造单元之间的平衡率。

定义1 在任务加工过程中,制造单元中设备实际加工时间 NP_C 与设备可用加工时间 EP_C 的比值称为制造单元的单元负载比 LR_C 。

$$LR_C = \frac{NP_C}{EP_C} \quad (7)$$

制造单元之间的负载平衡率为

$$B_L(N_C) = \frac{1}{N_C - 1} \sqrt{\sum_{n_c=1}^{N_C} \left(LR_C - \frac{\sum_{n_c=1}^{N_C} LR_C}{N_C} \right)^2} \quad (8)$$

单元负载比 LR_C 描述了制造单元的忙碌程度,而单元负载比标准差 $B_L(N_C)$ 则描述了单元的忙闲均匀程度,其值越小则负载越均匀,反之则表示负载均匀程度偏差。

2.2.3 “任务-工艺路线”匹配的隐性势场模型

由于加工某一任务可以有多条工艺路线,而每一条工艺路线根据设备的性能所需要的总加工成本也不一样,因此,这些工艺路线就拥有不同隐性势场的值,分别对应着该工艺路线对不同制造任务的吸引程度。若某条工艺路线不能完成某类制造任务,则将对应的势场设为0,以避免吸引此类任务。为了既保证加工任务初始探索的正常进行又避免工件的无效选择,在本算法中,给所有“有效路径(即可加工该任务的路线)”的隐性势场设定一个初始值。即

$$AT_0[r][p] = \begin{cases} C_0 & \text{如果路线 } r \text{ 能够完成任务 } p \\ 0 & \text{如果路线 } r \text{ 不能够完成任务 } p \end{cases} \quad (9)$$

当某一个任务需要选择路线加工时,它首先感知各条工艺路线对该任务下一个加工工件的引力,按各条工艺路线上的总加工成本大小所对应的引力大小来选择工艺路线。设定路径选择非线性因子 h 为1,则对任一个工件,为加工任务 p 选择工艺路线 r 的概率 $p(r)$ 为

$$p(r) = \frac{AT[r][p]}{\sum_{p=1}^J AT[r][p]} \quad (10)$$

当某一任务的一个工件选择了某条工艺路线后,该路线就得到了一定的奖励,即增加该路线对对应任务的隐性势场,即

$$AT[r][p] = AT[r][p] + A(c) \quad (11)$$

式中: c 为某一条工艺路线加工该工件所需要的总加工成本; $A(c)$ 为增加的势场强度,是 c 的减函数。这样可以保证优秀的工艺路线的隐性势场得到加强的机会多,故被选择的几率也大。

但是,和机器人寻路避障过程一样,制造系统中的隐性势场也有“衰减性”,以淘汰过时的信息。也就是说,每一次任务选择后,被选路径上的设备负荷会变大,其加工能力就会衰减,因此,被选路线上所具有的隐性势场强度会根据负载强度进行相应的降低

$$AT[r][p] = AT[r][p] - W(l) \quad (12)$$

式中: $W(l)$ 为路径 r 上的设备负载函数,是其设备负载 l 的增函数。

在以上公式中, C_0 , $A(c)$, $W(l)$ 为基于隐性势场的“任务-工艺路线”选择算法的参数,可以根据式(6~8),依据不同制造系统的具体情况来确定,以获得更好的全局优化性能。

3 隐性势场算法实现

基于隐性势场的制造单元构建算法的假设条件如下:(1)不同零件任务的加工顺序不受约束。(2)每台机器加工方式为非抢占式,即任何一项任务一旦进入生产则不能中断,任何设备在完成对应生产任务后才能开始另一项任务。(3)工件任何一道工序只能并且必须在一台设备上完成加工。(4)原则上认为所有设备随时可以开动。(5)允许设备闲置状况存在。

3.1 制造系统中隐性势场构建

(1)给所有路径根据式(9)预先设定一个初始的隐性势场强度常数 $AT_0[r][p]$,以区分各路径之间的异同,并确保每条有效的工艺路线都能够有机会被选择。

(2)每批加工任务中的单个个体都根据隐性势场强度来选择自己的最佳工艺路线,如果某条工艺路线被某个任务选择一次,则根据式(11)对该工艺路线的隐性势场进行加强。

(3)随着加工任务对工艺路线的选择,被选工艺路线中涉及机床的的负载会不断增加,其可用加工时间也会逐步减少,故用设备负载函数 $W(l)$ 减少该工艺路线的隐性势场强度,以减少其被再次选中的概率。设备负载函数 $W(l)$ 是工艺路线中设备

负载 l 的增函数, $W(l)$ 的值在 $0\sim A(c)$ 之间,具体问题可设计具体 $W(l)$ 的表达式。当某条工艺路线中的某机床的可用时间小于某个工件的某道工序所需时间时,则该工艺路线隐性势场自动变为0。特殊的,当某个机床的可用时间为0时, $W(l)$ 应置所有涉及该机床的工艺路线的隐性势场为0。

(4)最终每一条路线上的隐性势场的强度与相应工艺路线所需要的每个设备上的隐性势场强度对应相等。

3.2 基于隐性势场的设备关联矩阵构造

根据3.1中所获得的吸引力,得到所有制造资源上的隐性势场矩阵 $RE(R,M)$,其中, R 为工艺路线总数, M 为设备总数。 $RE(R,M)$ 矩阵表示为式(13),其中 a_{rm} 表示工艺路线 r 上设备 m 的隐性势场值。

$$RE(R,M) = (a_{rm})_{R \times M} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1M} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2M} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{R1} & a_{R2} & \cdots & a_{RM} \end{pmatrix} \quad (13)$$

为了找出整个制造系统中资源设备之间的相互关联程度,并确定其在整个制造系统中对加工任务的吸引程度,构建以下参数

$$u'_{j_1 j_2} = \sum_{i=1}^R a_{ij_1} \quad a_{ij_1} * a_{ij_2} \neq 0 \quad (14)$$

$$u = \sum_{i=1}^R \max_{1 \leq j \leq M} \{a_{ij}\} \quad (15)$$

式中, $i, j, j_1, j_2 = 1, 2, \dots, M$ 。

由式(14,15)可得到构建设备关联度矩阵的基本元素

$$\alpha_{j_1 j_2} = \frac{u'_{j_1 j_2}}{u} \quad j_1, j_2 = 1, 2, \dots, M \quad (16)$$

因此,由式(16)可以得到基于隐性势场强度的设备关联度矩阵

$$R_M = \begin{pmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \cdots & \alpha_{1M} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \cdots & \alpha_{2M} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha_{M1} & \alpha_{M2} & \cdots & \alpha_{MM} \end{pmatrix} \quad (17)$$

3.3 基于隐性势场的任务关联矩阵构造

根据所有制造资源上的隐性势场矩阵 $RE(R,M)$,隐含着多个任务之间的工艺路线协调和加工成本之间的潜在关系,为了能够较为清晰地找出这种相互之间影响,本文对多个任务之间的相互关联程度进行了研究,并构建了以下参数

$$\omega'_{i_1 i_2} = \sum_{j=1}^M (a_{i_1 j} + a_{i_2 j}) \quad a_{i_1 j} * a_{i_2 j} \neq 0 \quad (18)$$

$$\omega_{i_1 i_2} = \sum_{j=1}^M (a_{i_1 j} + a_{i_2 j}) \quad (19)$$

式中, $i_1, i_2 = 1, 2, \dots, R$ 。

由式(18,19)可得到构建任务关联度矩阵的基本元素

$$\beta_{i_1 i_2} = \frac{\omega'_{i_1 i_2}}{\omega_{i_1 i_2}} \quad i_1, i_2 = 1, 2, \dots, R \quad (20)$$

则根据式(20)得到基于隐性势场的任务关联度矩阵

$$R_R = \begin{pmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} & \cdots & \beta_{1R} \\ \beta_{21} & \beta_{22} & \cdots & \beta_{2R} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \beta_{R1} & \beta_{R2} & \cdots & \beta_{RR} \end{pmatrix} \quad (21)$$

3.4 制造单元构建

取一个实数 $\lambda_1, \lambda_2 \in [0, 1]$ 为判断准则,分别将设备和任务进行协调分类, $\alpha_{ij} \geq \lambda_1$ 或 $\beta_{ij} \geq \lambda_2$ 时为同一类,通过这样的方式协调构建不同的制造单元。

4 实例分析

在Windows7.0平台上用Visual C++开发以上述算法为基础的制造单元快速构建分析系统,并结合具体算例进行了应用检验。现以一个具体实例说明基于隐性势场制造单元构建的过程。

某车间接到一批生产任务,需要加工工件的种类、数量、工艺路径、加工时间和成本如表1所示,各个任务的交货期均为 $D=1\ 500$,单元间运输费用 $C_{T0}=100$ (元/次)。车间可用制造资源集合包括9台加工设备,分别为车床M1,M2,M3;铣床M4,M5;精密车床M6,M7;磨床M8,M9,其车间布局如图1所示。

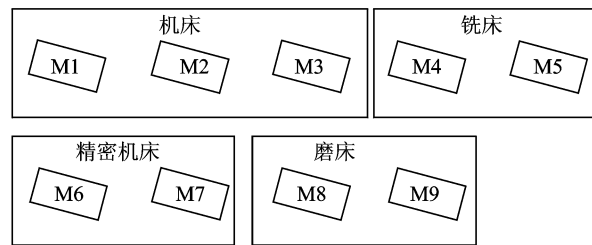


图1 车间可用制造资源分布

应用本文提出的算法对上述问题进行单元构建,其相关参数设置如下:有效路径的隐性势场初始值 $C_0=100$,势场增加值 $A(c)=1\ 000/c$,路径上的设备负载函数 $W(l)=LR_c * A(c)$ 。通过基于隐性势场算法的求解过程,得到的结果如下: $N_{11}=25, N_{12}=28, N_{13}=27, N_{21}=19, N_{22}=30, N_{23}=41,$

表1 任务的加工工艺流程

工件序号(数量)	加工路径序号	加工设备/加工时间/单位加工成本/元
P1 (80)	1-1	M1/12/4 → M3/18/3 → M4/15/2 → M6/15/8
	1-2	M2/12/5 → M5/10/5
	1-3	M8/15/6 → M2/12/5
P2 (90)	2-1	M2/10/5 → M5/5/5 → M8/10/6 → M1/6/4
	2-2	M4/8/2 → M3/15/3 → M9/10/2 → M7/15/12
	2-3	M1/8/4 → M4/8/2 → M6/5/8
P3 (70)	3-1	M8/6/6 → M9/10/2 → M7/25/12
	3-2	M6/12/8 → M1/10/4 → M3/5/3
	3-3	M5/10/5 → M2/8/5 → M8/15/6

注: $Mx/y/z$ 表示加工设备 Mx 在本道工序中需要加工时间 y , 其单位加工成本为 z 元; 表中“→”表示路线流程。

$N_{31} = 26, N_{32} = 22, N_{33} = 22$, 其中 N_{ij} 表示第 i 种工件在第 j 条工艺路线上的加工数量。根据上述优化结果, 得到所有制造资源上的隐性势场矩阵 $RE(R, M)$, 进而得到基于隐性势场的设备关联矩阵 R_M 和任务关联矩阵 R_R , 最终制造单元构建的结果如图2所示。

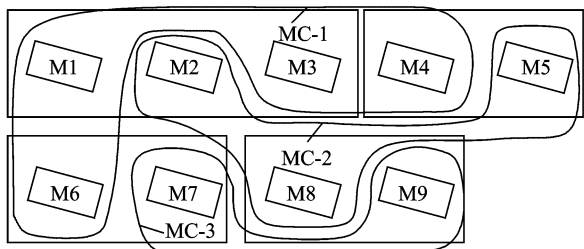


图2 制造单元构建的结果

最后形成3个制造单元{MC-1, MC-2, MC-3}: 单元MC-1的制造资源集合为{M1, M3, M4, M6}, 对应的加工任务为{1-1(25), 2-3(41), 3-2(22)}, 其中, “1-1(25)”表示工件1以第1种加工路径加工, 加工数量为25件, 其余意义相同; 单元MC-2的制造资源集合为{M2, M5, M8}, 加工任务集合为{1-2(28), 1-3(27), 2-1(19), 3-3(22)}; 单元MC-3的制造资源集合为{M7, M9}, 加工任务集合为{2-2(30), 3-1(26)}。总的跨单元的次數仅为3次。

为了更好地突出本算法的优势, 本文分别与先对工艺路径进行聚类分析, 划分制造单元, 再以加工总费用最小为目标, 计算每个单元加工零件数量, 不考虑单元间的负荷平衡的传统方法, 以及文献[13]中, 每种工件只选用一条工艺路径, 以加工

总费用最小为目标, 不考虑单元间的负荷平衡, 用遗传算法对单元构建求解的方法进行了对比, 其结果如表2所示。

从表2可以看出, 按照传统方法可以聚类得到4个制造单元, 并且其生产成本 $C_{total}(P)$ 为4 178元, 是3种方法中最高的。而文献[13]和本文算法均得到3个有效的制造单元, 其中文献[13]的生产成本 $C_{total}(P)$ 为3 210元, 是3种方法中最低的, 但其以牺牲单元负荷平衡率为代价, 其必然会导致产品的中间在制品存储成本的增加和总完工时间的延长。本文算法得到的生产成本 $C_{total}(P)$ 为3 578元, 虽略高于文献[13], 但比传统方法低很多, 并且单元间负载是最均匀的。因此, 在综合考虑生产成本和制造单元负载均衡的情况下, 本文算法得到的结果是最优的。

从上述仿真过程可以看出, 基于隐性势场的制造单元构建算法, 在保证交货期的前提下, 减少了生产任务的加工成本, 并且兼顾了各个制造单元间的负载平衡, 避免某些设备负载过重; 同时, 通过基于隐性势场算法的协调, 将本来看似“毫不相干”的各零件逐渐形成具有相似特征的零件族, 而在同样机制作用下, 本来“各自为政”的制造资源逐渐聚合成一个个针对加工零件具有很强工艺匹配能力的制造单元。而且, 实验过程中制造资源之间并没有复杂频繁的通信, 这充分说明基于隐性势场的制造单元构建算法具有简单、稳定可靠的协调机制, 可以有效降低制造系统的复杂程度, 提高制造系统控制的鲁棒性。因此, 基于隐性势场的制造单元构建过程可以有效地促使制造系统由初始的混沌无序逐渐走向协调有序。

表2 制造单元分组、加工总费用 $C_{total}(P)$ 及制造单元负载均衡 $B_L(N_C)$

求解方法	制造单元分组	$C_{total}(P)$ /元	$B_L(N_C)$
传统方法	MC-1{M1, M6}; MC-2{M2, M5, M8}; MC-3{M3, M4}; MC-4{M7, M9}	4 178	0.105 3
文献[13]	MC-1{M1, M3, M6}; MC-2{M4, M7, M9}; MC-3{M2, M5}	3 210	0.213 7
本文算法	MC-1{M1, M3, M4, M6}; MC-2{M2, M5, M8}; MC-3{M7, M9}	3 578	0.102 6

5 结束语

本文针对零件存在可选工艺路线、工序存在可选加工设备的制造单元构建问题,考虑加工设备的能力和任务交货期的约束,充分重视加工设备的优化选择、生产线负载平衡,提出了基于隐性势场算法的制造单元构建模型,为制造系统的制造单元构建提供了有效的技术方案。针对“多任务-多工艺路线”的企业生产状况进行合理的制造资源优化配置,使具有相似加工工艺路线的零件族和制造资源聚合为制造单元,形成“小流水”的生产效果,这对提高制造企业的生产效率和质量一致性水平具有重要意义。但是,由于制造系统存在着随机事件(如:设备故障、新任务加入等),如何考虑系统的意外扰动,提高对制造系统面临频繁的动态干扰的处理能力将是本文的下一步研究方向。

参考文献:

- [1] Dove R. Introducing principles of agile systems[J]. *Production*, 1995, 8(8): 14-18.
- [2] 王国新, 阎艳, 宁汝新, 等. 模糊神经网络与启发式算法相结合的制造单元构建方法[J]. *计算机集成制造系统*, 2008, 14(11): 2175-2183.
Wang Guoxin, Yan Yan, Ning Ruxin, et al. Manufacturing cell formation approach combing fuzzy neural network with heuristic algorithm[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2008, 14(11): 2175-2183.
- [3] 白俊杰, 龚毅光, 王宁生, 等. 面向订单制造的可重构制造系统中虚拟制造单元构建技术[J]. *计算机集成制造系统*, 2009, 15(2): 313-320.
Bai Junjie, Gong Yiguang, Wang Ningsheng, et al. Methodology of virtual manufacturing cell formation in reconfigurable manufacturing system for make-to-order manufacturing[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2009, 15(2): 313-320.
- [4] Nitesh K, Berna H U, Islier A A, et al. A methodology to design virtual cellular manufacturing systems[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2011, 22(4): 533-544.
- [5] Hassan R, Reza M, Mahdi Z. Solving a dynamic virtual cell formation problem by linear programming embedded particle swarm optimization algorithm[J]. *Applied Soft Computing*, 2011, 11(3): 3160-3169.
- [6] Menouar B, Karim A. A new branch-&-bound-enhanced genetic algorithm for the manufacturing cell formation problem[J]. *Computers & Operations Research*, 2006, 33(8): 2219-2245.
- [7] 李淑霞, 单鸿波. 基于敏捷制造单元的车间动态重构[J]. *计算机集成制造系统*, 2007, 13(3): 520-526.
Li Shuxia, Shan Hongbo. Dynamic workshop reconfiguration based on agile manufacturing cell [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2007, 13(3): 520-526.
- [8] 梁福军, 宁汝新. 可重构制造系统中基于相似性理论的虚拟制造单元生成方法[J]. *计算机集成制造系统*, 2004, 10(11): 1370-1376.
Liang Fujun, Ning Ruxin. Method of virtual manufacturing cell formation based on similarity science in reconfigurable manufacturing system[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2004, 10(11): 1370-1376.
- [9] Khatib O. Real time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots [J]. *International Journal for Robotics Research*, 1986, 5(1): 90-99, 198.
- [10] Zhu Qidan, Yan Yongjie, Xing Zhouyi. Robot path planning based on artificial potential field approach with simulated annealing [C]//*Proceedings of the Sixth International Conference on Intelligent System Design and Applications*. Jinan: ISDA, 2006: 622-627.
- [11] Mabrouk, Mohamed M, McInnes C R. Solving the potential field local minimum problem using internal agent states[J]. *Robots and Autonomous Systems*, 2008, 56(12): 1050-1060.
- [12] Nsakanda A L, Diaby M, Price W L. Hybrid genetic approach for solving large-scale capacitated cell formation problems with multiple routings [J]. *European Journal of Operational Research*, 2006, 171(3): 1051-1070.
- [13] Hu L, Yasuda K. Minimizing material handling cost in cell formation with alternative processing routes by grouping genetic algorithm [J]. *International Journal of Production Research*, 2006, 44(11): 2133-2167.