

可重构制造系统生产能力扩展性重构方法

段建国¹, 李爱平¹, 谢楠², 徐立云¹

(1. 同济大学机械与能源工程学院, 上海 201804; 2. 同济大学中德工程学院, 上海 201804)

摘要: 生产能力的缩放性设计是可重构制造系统(RMS)的主要研究内容之一。针对缺乏具有可操作性的生产能力重构方法的问题, 提出了具有动态特性的约束 RMS 生产能力扩展性重构方法。通过分析生产能力缩放性原理, 给出实现生产能力重构的 3 种基本方法。在给定 RMS 约束模型的基础上, 通过建立系统成本模型、生产线平滑指数模型生成 RMS 生产能力扩展性设计的综合模型, 并针对模型特点, 提出了约束 RMS 生产能力扩展性设计的具体实现方法。最后通过实例验证了该方法的实用性和有效性。

关键词: 可重构制造系统; 生产能力; 扩展性; 重构方法
中图分类号: TH 162 **文献标识码:** A

Reconfiguration Method on Production Capacity Expansion in RMS

DUAN Jianguo¹, LI Aiping¹, XIE Nan², XU Liyun¹
(1. College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Sino-German College of Applied Sciences, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Production capacity scalability design is one of the major issue in reconfigurable manufacturing systems (RMS). Aiming at the problem of lack of practical production capacity reconfiguration methods, a production capacity expansion reconfiguration method of constrained RMS with characteristic of dynamics was proposed. First, based on an analysis of production capacity scalability theory, three kinds of fundamental reconfiguration methods were given. The RMS constraints models were constructed, and then, on the basis of cost models, production line smoothness index model, an integrated production capacity expansion model of RMS was established. According to the characteristic of the proposed integrated model, the implementation method was described in details. At last, a case was illustrated to verify the practicability and effectiveness of the given method.

Key words: reconfigurable manufacturing systems; production capacity; expansion; reconfiguration method

进入 21 世纪以来, 随着全球化趋势的进一步加剧, 世界各国的制造业都面临着日益激烈的行业竞争。面对动态多变的市场环境, 制造企业为了保证竞争优势就必须设计并采用适合相应产品的新的制造系统模式, 以使企业不但能以较低的制造成本加工出较高质量的产品, 而且能够快速响应市场变化和消费需求。重构是一项能够经济、快速地响应市场和产品改变的全新的工程技术, RMS(reconfigurable manufacturing system, 可重构制造系统)正是实现这一制造模式的基石。RMS 可根据市场和生产环境对生产功能和生产能力的要求实现快速重构, 增加企业的敏捷性, 提高企业的竞争力^[1]。由此可见, 制造系统生产能力的缩放性重构是实现 RMS 重构的重要途径。

文献[2]基于图论, 以最小化资本成本为目标函数研究了 RMS 单零件流水线的构形优化问题。文献[3]在考虑机床可用度的基础上, 给出了 RMS 系统构形的优化选择模型, 并通过元启发优化算法进行了求解。文献[4]依据工艺路线的有向网络图以及排队论, 提出了一种工艺路线与布局设计方法。文献[5]利用图论等数学工具, 研究了零件品种与批量变化情况下的 RMS 全生命周期的重构策略。以上方法仅适用制造系统初始设计, 对于市场需求变化后, 系统如何在原系统构形的基础上实现快速、经济、有效的重构则没有涉及。文献[6]首先对这个问题进行了研究, 提出通过在每道工序并联性能相同的机床实现制造系统生产性能的缩放, 但没有考虑安装空间以及瓶颈工序物料搬运系统的限制。文献[7-8]分析

收稿日期: 2011-06-08

基金项目: 国家自然科学基金(50975209, 51005169); 国家科技部科技重大专项(2011ZX04015-022); 上海市科委国际合作项目(10110705200)

第一作者: 段建国(1980—), 男, 博士生, 主要研究方向为制造系统与自动化、数字化设计与制造等。E-mail: djg20042008@yahoo.com.cn

通讯作者: 李爱平(1951—), 女, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为网络化制造及制造业信息化等。

E-mail: limuzi@tongji.edu.cn

的是何时进行生产能力的缩放才能既满足市场需求又能最经济,但对于具体如何进行重构则缺乏研究.

综合上述文献可以看出,针对 RMS 生产能力的缩放性问题,尤其是如何进行动态缩放性重构的研究还比较少,还需要进一步地深入研究.基于此,本文研究生产能力驱动的 RMS 重构方法,解决确定性市场需求环境下生产能力变化时如何进行重构的问题,并给出实例,验证方法的实用性和有效性.

1 确定性市场需求环境下 RMS 缩放性分析

RMS 的缩放性是指可通过系统中设备的增减或采用高效的机床及机床模块,快速实现系统生产能力的增减. RMS 缩放后的新构形是在原构形的基础上依据生产能力的要求通过重构而产生的, RMS 的特点决定了重构后的工艺路线必须要充分利用原系统中的设备,使得新构形与原有构形之间的差异性尽可能小,这样不但可以减少投资、降低劳动强度、提高产品质量,还可以缩短斜升时间、加快重构过程,为企业赢得宝贵的竞争机遇.因此,提高 RMS 生产能力的基本方法有两种:一是在系统的瓶颈工序的工作站中并联设备,以增加该工序工作站的生产能力,从而提高整个系统的生产能力;二是进行工序重组,将某些瓶颈工序细分,划分为多个工序生产,提高瓶颈工序的生产能力以提高整个系统的生产能力.在重构过程中,受车间长度、宽度等基本尺寸的限制,制造系统每个工作站中能够并联设备的数目(系统宽度约束 H)以及允许设置的工作站的数量(系统长度约束 L)都应在一定的范围内,如图 1 所示.图中, M_i 表示添加的机床, S_i 表示工况站.因此,还可以结合以上两种方法实现 RMS 的生产能力扩展性重构,即对组成工艺过程的工序进行拆分的同时,在相应的瓶颈工序工作站中增加设备,这样既充分利用了厂房空间,也能达到生产能力的要求.

需要注意的是,并非所有的情况均需进行重构.只有当市场需求超过系统的最大生产能力或系统的生产能力具有较大冗余时,才对原系统进行缩放性重构,以提高或降低系统的生产率,满足生产能力的要求.否则,只需调节现有系统中各资源的生产效率即可达到市场需求.本文以 RMS 生产能力扩展性设计为例探讨第一种基本实现方法的具体重构过程,并假定市场需求的生产能力已超过现有制造系统的最大生产能力.

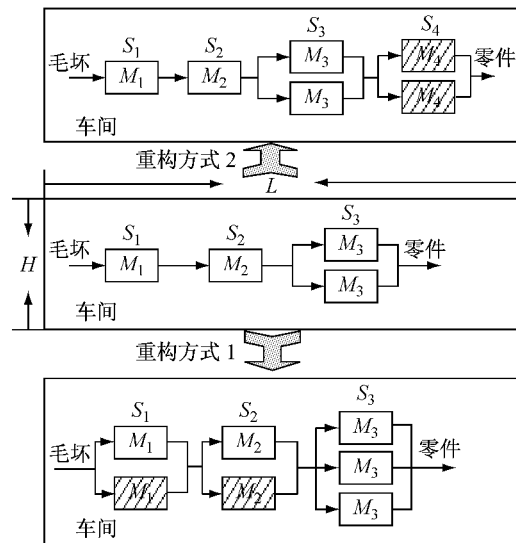


图 1 生产能力缩放性重构方法

Fig.1 Production capacity scalability reconfiguration method

2 RMS 生产能力扩展性设计综合模型

在建立 RMS 生产能力扩展性模型之前,先假定系统的各工作站之间具有串行结构.为了满足每个工作站相应的加工能力,工作站内的设备之间采用并联结构,每个工作站中并联的设备性能完全相同,这样不但可以方便实际生产中的维护和操作,同时也容易保证产品质量.在 RMS 扩展性设计中,假设加工的零件为单一品种,且在重构前后保持不变.

2.1 RMS 扩展性设计约束信息

在 RMS 的生产能力扩展设计中,必须满足一定的约束.

(1) 车间空间约束.由于本文的研究仅局限在通过在工作站中并联性能完全相同的设备(机床、清洗机、试漏机、油压机等)来完成系统的扩展性设计,因此,每个工作站的宽度需满足约束

$$h_i n'_i \leq H, \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, m\} \quad (1)$$

式中: h_i 为工作站 i 中设备占地宽度; n'_i 为重构后工作站 i 中的设备数目; m 为系统中工作站的数目.

(2) 追加投资约束.重构的目的就是用最少的花费获得最大的经济效益,因此,在生产线的改造中由于资金等的限制均会对设备的追加投资有一定的约束,即

$$\sum_{i=1}^m (n'_i - n_i) C_i \leq I_A \quad (2)$$

式中: I_A 为用于购买机床设备的追加投资; n_i 为重构前工作站 i 中的设备数目; C_i 为工作站 i 中单台设备成本。

(3) 生产能力约束. 重构后的系统中每个工作站的设计生产能力不小于系统的实际需求生产能力, 即

$$P'_i n'_i \eta_i \geq P'_{de} \quad (3)$$

式中: P'_i 为重构后工作站 i 中设备的生产能力; η_i 为工作站 i 的生产效率; P'_{de} 为重构后的市场需求生产能力。

2.2 RMS 成本建模

当市场需求超过原生产系统的设计生产能力时, 必须要进行生产能力的扩展性设计, 通过增加设备提高系统的加工能力. 在此仅考虑主要设备成本, 不考虑厂房、物流、控制以及人工成本. RMS 的成本包括折旧成本、工序成本、追加投资、设备安装成本和生产能力损失成本。

(1) 折旧成本. 设备的折旧成本用 C_{dep} 表示, 为所有设备在特定生产周期内的折旧费用之和, 即

$$C_{dep} = \sum_{i=1}^m k_{dep}(i) C_i t \quad (4)$$

式中: $k_{dep}(i)$ 为工作站 i 中设备的折旧率; t 为生产周期长度。

(2) 工序成本. 工序成本 C_{pro} 定义为 RMS 在生产周期内为完成所需批量的生产而消耗的人工、刀具和动力资源等费用的总和^[5]. 假设系统中的每个工作站的单件零件工序成本为常数, 则工序总成本为

$$C_{pro} = \sum_{i=1}^m k_{pro}(i) B' \quad (5)$$

式中: $k_{pro}(i)$ 为工作站 i 的单件零件工序成本; B' 为重构后在生产周期内的市场需求总量。

(3) 追加投资. 由于仅考虑主要设备费用, 因此在扩大产能时的追加投资为各工作站为提高生产能力而添加的设备费用之和, 即

$$C_{ad} = \sum_{i=1}^m (n'_i - n_i) C_i \quad (6)$$

(4) 机床安装成本. 由于制造系统自身的复杂性, 对制造系统的建模一般都采用间接建模. 因此, 假定系统的安装成本与设备自身的成本成比例关系, 即设备的成本越高, 其安装成本也越高. 系统的安装成本可表示为

$$C_{am} = \sum_{i=1}^m k_{am}(i) C_i \quad (7)$$

式中: $k_{am}(i)$ 为工作站 i 中设备安装成本比例系数。

(5) 生产能力损失成本. 当 RMS 由一种构形重构到另一构形的过程中需要添加机床、清洗机、油压机、物流以及控制等设备, 会造成生产能力的降低甚至停产. 在此过程中, 由于系统不能正常生产, 会为企业带来一定的经济损失. 重构阶段造成的损失可表示为

$$C_{rc} = (P_{de} - P_{rc}) t_{rc} C_{par} \quad (8)$$

式中: P_{de} 为重构前系统的需求生产能力; P_{rc} 为重构阶段系统的生产能力; t_{rc} 为重构时间; C_{par} 为单件零件生产能力损失成本。

另外, 系统按照市场需求重构完成后必须经过一段时间才能达到稳定生产, 从重构完成到稳定生产的这段时间称为斜升时间. 由于在斜升时间内并没有达到要求的生产能力, 也会给企业造成一定的经济损失, 如图 2 所示. 斜升时间越短, 损失越少. 斜升阶段造成的生产能力损失成本可表示为

$$C_{ru} = \frac{(P_{de} - P_{rc})^2 t'_{ru} C_{par}}{2(P'_{de} - P_{rc})} \quad (9)$$

式中: P'_{de} 为系统重构后的需求生产能力; t'_{ru} 为达到需求生产能力时的斜升时间, 且有 $t'_{ru} < t_{ru}$ (斜升时间). 在此假设 t'_{ru} 与 t_{rc} 成比例关系, 即 $t'_{ru} = k_c t_{rc}$, k_c 为比例系数。

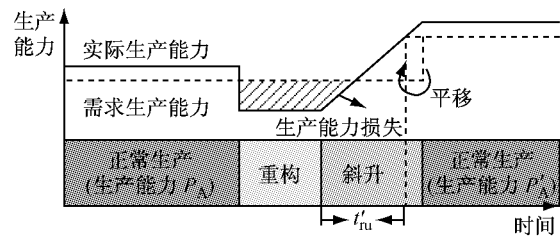


图2 生产能力扩展时制造系统不同的运行阶段

Fig.2 Manufacturing system at different operating stages

图中, P_A, P'_A 为重构前后系统的实际生产能力。

生产能力扩展重构后, 制造系统的总成本为以上各种成本之和, 即

$$C_{sys} = C_{dep} + C_{pro} + C_{ad} + C_{am} + C_{ps} + C_{ru} \quad (10)$$

2.3 目标函数

本文所建立的模型既要满足从原构形重构到新构形的过程中成本最低, 还要保证重构后能尽量保证生产线平衡, 显然为多目标优化. 在此以总成本和生产线平滑指数的线性组合作为目标函数. 由于总成本与平滑指数数量纲不一致, 且数量级相差很大, 单纯线性组合无法正确体现两种指标的相对大小, 因此将生产线平滑指数定义为

$$I_s = \frac{C_{par} B'}{T_c} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (T_c - T_i)^2}{m}} \quad (11)$$

式中, T_c 为生产节拍.

总目标函数为

$$\min g = \alpha C_{sys} + \beta I_s \quad (12)$$

式中: α 为总成本权重系数; β 为平滑指数权重系数; $\alpha + \beta = 1$.

3 约束 RMS 生产能力扩展性设计方法

当市场需求增加时,需要对原制造系统的生产能力进行扩展,以满足加工能力的要求.在重构过程中需要考虑的因素纷繁复杂,因此在研究中一般先做诸多假设,确立一定的优化目标,以简化问题的复杂性,降低模型的求解难度.但是,这样做也必然造成建立的模型只能反映制造系统的局部性能指标,而不能反映系统的整体运行状况.为了不丢失综合性能更优的构形,制造系统的构形选择问题应分为两步求解:① 根据具体情况确定目标函数,在一定的约束条件下寻求 k -优构形;② 综合考虑除目标函数之外的性能准则,从 k -优构形中选取综合性能最优的构形作为重构后的构形.本文只针对第①步进行研究.

3.1 生成 RMS 有向无环图

RMS 运行过程中,加工任务之间具有紧密的依赖关系,前一工作站的输出为后一工作站的输入,因此可以使用图论中的有向无环图(directed acyclic graph, DAG)表示 RMS 模型.系统的有向无环图 D 可以用一个有序四元组表示为 $G_D = (V, E, \psi, W)$. 其中, V 为 D 的顶点集,是一个非空有限集合; E 是与 V 不相交的有限集合,即 D 的有向边集; ψ 是关联函数,它使 E 中的每条有向边对应于 V 中的有序顶点对; W 为有向边的权.图 3 为一 RMS 的有向无环图,图中省略了各边的权. V_s 为 DAG 的源点, V_e 为宿点; $S_1 \sim S_4$ 表示 RMS 的 4 个工作站; M_1 和数字 1 表示工作站 S_1 所用设备类型为 M_1 , 数量为 1; 当需要扩大产能时,根据车间宽度约束,在各工位添加相应的设备,生成系统的有向无环拓展图,如图 4 所示.图中从源点 V_s 出发到达宿点 V_e 的每一条通路均可以作为一条加工路线.所有的通路组成一个加工路线集合 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_r\}$. 本文的目的就是要

在集合 P 中找出 k 条最优路径.

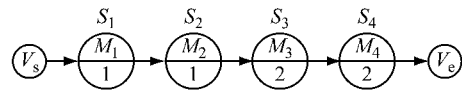


图 3 RMS 有向无环图

Fig. 3 Directed acyclic graph of RMS

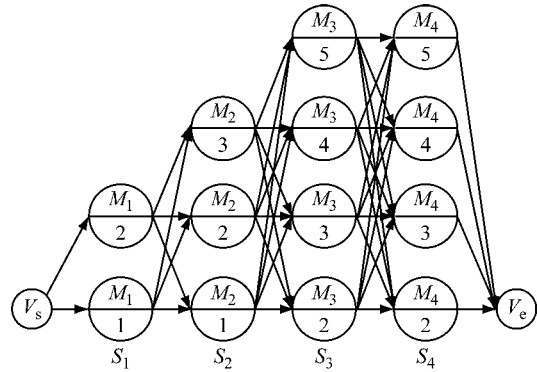


图 4 RMS 有向无环拓展图

Fig. 4 Augmented directed acyclic graph of RMS

3.2 RMS 约束 k -优构形搜索算法

在 RMS 有向无环拓展图中寻找约束 k -优构形最简单的方法是首先搜索出数量足够大的 m 条最优路径,即 $m \gg k$, 然后通过删除不符合约束条件的路径得到 k 条最优路径.然而这种方法具有极大的局限性,在得到 k 条最优路径之前无法确定不符合约束条件的路径到底有多少,也可能为 1.但是为了保证得到足够多的最优路径,不得不进行大量冗余计算,不但增加了求解的难度,降低求解效率,甚至会造成可以求解的 DAG 而无法求解.因此,在文献[9]的基础上提出约束 RMS 构形搜索算法,用来获取本文模型在车间空间、追加投资和生产能力等约束下的 k 条最优构形.算法的相关定义及步骤如下:

定义 1 递归路径约束. 设 $\{a_1, a_2, \dots, a_p\}$ 为 RMS 有向无环图中有向边的有序集, F 为一函数,用来评估路径中每一条有向边的可行性. 当有向边集 $\{a_1, \dots, a_{i-1}\}$ 可行时,有向边 i 可行,则 $F(a_i | a_1, \dots, a_{i-1}) = 1$; 否则 $F(a_i | a_1, \dots, a_{i-1}) = 0$. 当所有的有向边均可行时,该条路径才是可行的. 因此,路径的可行性的评价函数为

$$F(a_1, a_2, \dots, a_p) = \prod_{i=1}^p F(a_i | a_1, a_2, \dots, a_{i-1}) \quad (13)$$

注意:递归约束是路径可分约束的一种泛化,是为了保证 $F(a_i | a_1, \dots, a_{i-1}) = F(a_i)$. 另外,如果在特定递归约束下的某路径是不可行的,那么在该路径上形成的扩展路径也是不可行的,即

$$F(a_1, a_2, \dots, a_p) = \prod_{i=1}^p F(a_i \mid a_1, a_2, \dots, a_{i-1}) = 0$$

$$\Rightarrow F(a_1, a_2, \dots, a_p, b_1, b_2, \dots, b_r) = 0, \forall b_1, \dots, b_r \quad (14)$$

定义 2 路径集划分规则. 设 S 为 RMS 有向无环拓展图中所有从源点 V_s 出发到宿点 V_e 结束的路径组成的路径集, 集合 S 中的每一条路径均以有向边序列 $L_{in} = \{b_1, b_2, \dots, b_G\}$ 开始, 且不包含集合 $L_{ex} = \{c_1, c_2, \dots, c_H\}$ 中的有向边. 设 $P(S)$ 为集合 S 中的最短路径(无论是否为最短可行路径), 由有向边集 $\{L_{in}, a_1, a_2, \dots, a_q\}$ 组成. 如果该路径中存在不符合约束条件 $f = \notin \emptyset \cup f \in \{1, 2, \dots, q\}$ 的有向边, 则设 f 为第 1 条. 然后将集合 S 中除去最短路径后的集合 $S - P(S)$ 划分为集合 S_1, S_2, \dots, S_f 和集合 R . 其中, S_i 为连接源点 V_s 和宿点 V_e , 起始于有向边有序序列 $L_{in,i} = \{L_{in}, a_1, a_2, \dots, a_{i-1}\}$ 且不包含有向边集 $L_{ex,i} = \{L_{ex}, a_i\}$ 的无环路径集合; R 为由其余路径组成的补集.

算法步骤:

(1) 设 $S_{0,1}$ 为 RMS 有向无环拓展图中从源点 V_s 到宿点 V_e 的所有路径组成的路径集, 利用 Dijkstra 算法在集合 $S_{0,1}$ 中搜索出最短路径, 记为 $P(S_{0,1})$.

(2) 根据路径集划分规则, 利用可行初始有向边将集合 $S_{0,1} - P(S_{0,1})$ 划分为互不相容的 $q(1)$ 个子集 $S_{1,1}, S_{1,2}, \dots, S_{1,q(1)}$, 剩余的路径生成集合 R_1 . 令 $m=1$.

(3) 计算子集 $S_{m,1}, S_{m,2}, \dots, S_{m,q(m)}$ 中所有最短路径, 记为 $P(S_{m,1}), P(S_{m,2}), \dots, P(S_{m,q(m)})$. 到此为止, 在 $\{P(S_{1,1}), \dots, P(S_{1,q(1)}), \dots, P(S_{m,1}), \dots, P(S_{m,q(m)})\}$ 中已经找到了第 $m+1$ 个最短路径.

(4) 设 $S_{a,j}$ 为包含第 $m+1$ 个最短路径(无论是可行)的集合. 再次根据路径集划分规则, 利用可行初始有向边将集合 $S_{a,j} - P(S_{a,j})$ 划分为互不相容的 $q(m+1)$ 个子集 $S_{m+1,1}, S_{m+1,2}, \dots, S_{m+1,q(m+1)}$, 剩余的路径组成集合 R_m .

(5) 令 $m=m+1$. 重复步骤(3)和(4)直到 $m=k$.

3.3 施加约束

在 RMS 有向无环赋权图的生成过程中已经考虑了车间宽度约束, 但是忽略了追加投资约束和生产能力约束. 根据上文给出的递归路径约束定义, 可以看出追加投资约束和生产能力约束可以通过映射转化为该类约束.

设 $A_k = \{a_{1k}, a_{2k}, \dots, a_{mk}\}$ 为第 k 条最短路径的有向边的有序集, $A_n = \{a_{1k}, a_{2k}, \dots, a_{mk}\}$ 为集合 A_k 的子集 ($n \leq m$), $I_A(A_n)$ 为追加投资映射函数, 将 A_n 映射为所有工作站追加投资之和. $N_e(a)$ 为有向边 a 的终点, 函数 $I_A(a)$ 将有向边 a 映射为顶点 $N_e(a)$ 所表示工作站的追加投资. 根据式(2), 如果存在 A_n , 且满足

$$I_A(A_n) = \sum_{h=1}^n I_A(a_{hk}) > I_A \quad (15)$$

则路径 k 为不可行路径. 也就是说只有在 A_k 中不存在子集 A_n 满足式(15)时, 路径 k 才是可行路径.

相似地, 设 $P_C(A_n)$ 为生产能力映射函数, 功能为将集合 $A_n = \{a_{1k}, a_{2k}, \dots, a_{mk}\}$ 映射为该路径所表示的 RMS 的生产能力. $P_S(a)$ 表示有向边 a 和顶点 $N_e(a)$ 所在工作站的实际生产能力之间的映射函数. 根据式(3), 如果存在 A_n , 且满足

$$P_C(A_n) = \max_{a \in A_n} P_S(a) < P'_{de} \quad (16)$$

则路径 k 为不可行路径. 也就是说只有在 A_k 中不存在子集 A_n 满足式(16)时, 路径 k 才是可行路径.

4 实例验证

假设某发动机生产企业原有一条生产线, 包括 6 台数控机床 $M_1 - M_6$ (包含相应的气动吊具)、2 台清洗机、1 台铜套压装机、1 台缸盖水油试漏机、2 台油压机等, 用来加工某型缸盖零件, 年生产能力为 1.5 万件. 现由于市场需求发生变化, 需要原生产线停产, 然后在各工作站上并联相同的设备以实现生产能力的扩展, 重构后生产线的生产批量为 4.5 万件, 生产周期为 1 年, 公司用于购买新设备的追加投资不允许超过 400 万元人民币. 根据车间空间约束得到系统各工作站的设备信息如表 1 所示. 设车间工人实行三班倒工作制, 每班每天的有效工作时间为 7 h, 生产线的效率为 85%, 每年有效工作时间为 250 d, 系统中各设备的年折旧率均为 10%, 设备的安装成本系数为 0.1, 权重系数 $\alpha = \beta = 0.5$, 而由生产能力损失造成的单个缸盖零件成本 $C_{par} = 1000$ 元 · 个⁻¹. 假设设备安装顺序作业, 重构工作越复杂, 重构时间越长, 相应的斜升时间也越长, 设 $k_c = 0.9$. 需要注明的是由于在重构后辅助工序设备(清洗机、铜套压装机、试漏机和油压机)的生产能力完全可以满足生产需求, 为了简化分析过程, 在本节中忽略了辅助工序的相关设备信息.

表 1 各工作站单台设备的生产任务、成本以及时间信息

Tab.1 Assigned tasks, costs and time of machine tools

设备类型	加工任务	设备成本/ (万元·台 ⁻¹)	安装成本/ (万元·台 ⁻¹)	工序成本/ (元·台 ⁻¹)	生产时间/ min	平均重构 时间/h
M_1	O_{p_1}	50.0	5.0	18.0	12.8	55.0
M_2	O_{p_2}	45.0	4.5	15.5	11.3	50.0
M_3	O_{p_3}	30.0	3.0	14.0	8.6	40.0
M_4	O_{p_4}	54.0	5.4	20.0	16.1	60.0
M_5	O_{p_5}	28.0	2.8	13.0	8.5	30.0
M_6	O_{p_6}	18.0	1.8	8.0	2.1	20.0

表中, O_{p_i} ($i=1, \dots, 6$) 为每道工序的加工任务集合.

依据成本、时间和约束信息,在原系统有向无环图的基础上,得到缸盖生产线的有向无环拓展图,如图 5 所示.图中 (a, b) 表示由该顶点出发的所有有向边赋权值,其中, a 为顶点表示的工作站的总成本, b 表示该顶点所表示的工作站进行相应操作任务时的生产时间.

利用本文给出的约束 k 最短路径求解算法,可

得到 k 条满足追加投资约束和生产能力约束的 1 条最短路径和 $k-1$ 条次短路径.为降低问题求解的难度,这里取 $k=6$,得到 6 条最优和次优可行构形,结果如表 2 所示.这些构形为初始构形,可以提供给缸盖可重构制造系统的详细设计者以及缸盖制造商,在考虑相应人员因素、布局以及生产物流的基础上进行详细设计.

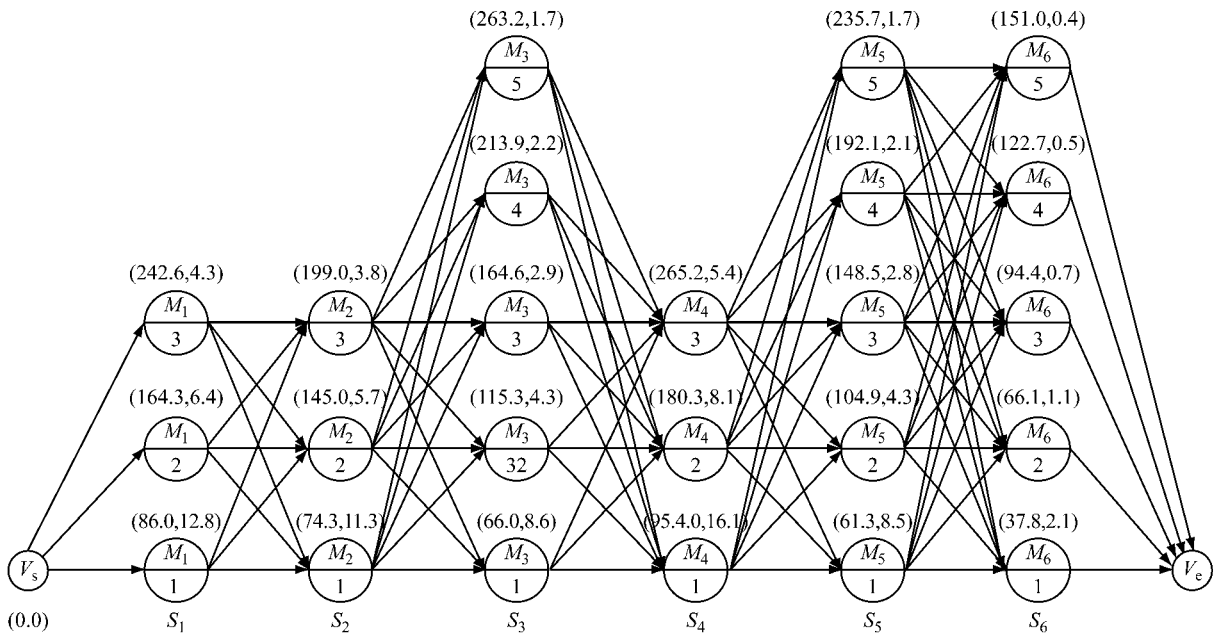


图 5 缸盖可重构制造系统有向拓展图

Fig.5 Augmented directed acyclic graph of cylinder head RMS

表 2 缸盖可重构制造系统最优构形和次优构形

Tab.2 Optimal and suboptimal configurations of cylinder head RMS

序号	构形	目标函数取值	总成本	平滑指数
1	$3 \times M_1 \rightarrow 2 \times M_2 \rightarrow 2 \times M_3 \rightarrow 3 \times M_4 \rightarrow 2 \times M_5 \rightarrow 1 \times M_6$	1 165.9	910.8	1 421.0
2	$3 \times M_1 \rightarrow 3 \times M_2 \rightarrow 2 \times M_3 \rightarrow 3 \times M_4 \rightarrow 2 \times M_5 \rightarrow 1 \times M_6$	1 173.0	964.8	1 381.1
3	$2 \times M_1 \rightarrow 2 \times M_2 \rightarrow 2 \times M_3 \rightarrow 3 \times M_4 \rightarrow 2 \times M_5 \rightarrow 1 \times M_6$	1 186.2	832.5	1 539.8
4	$3 \times M_1 \rightarrow 2 \times M_2 \rightarrow 2 \times M_3 \rightarrow 3 \times M_4 \rightarrow 2 \times M_5 \rightarrow 2 \times M_6$	1 298.5	939.1	1 657.9
5	$2 \times M_1 \rightarrow 2 \times M_2 \rightarrow 2 \times M_3 \rightarrow 3 \times M_4 \rightarrow 2 \times M_5 \rightarrow 2 \times M_6$	1 309.3	860.8	1 757.8
6	$2 \times M_1 \rightarrow 3 \times M_2 \rightarrow 2 \times M_3 \rightarrow 3 \times M_4 \rightarrow 2 \times M_5 \rightarrow 1 \times M_6$	1 392.5	886.5	1 898.4

5 结论

(1) 通过分析确定性市场需求环境的特点以及 RMS 生产能力重构性原理,给出实现生产能力缩放性设计的 3 种基本重构方法。

(2) 建立车间空间、追加投资和生产能力约束模型,通过构建系统成本模型、生产线平滑指数模型生成 RMS 生产能力扩展性设计的综合模型,提出了约束 RMS 生产能力扩展性设计的具体实现方法。根据 RMS 的拓扑结构和空间约束,构建系统的有向无环图和有向无环拓展图;通过将具有追加投资约束和生产能力约束的 k -优构形优选问题转化为在 RMS 有向无环拓展图上的约束 k -优路径问题,得到 k 个最优构形。

(3) 以某企业的缸盖 RMS 为例,通过建立各种约束模型、成本模型、生产线平滑指数模型以及综合模型,生成缸盖 RMS 有向无环拓展图,应用约束 k -优路径搜索方法得到 6 条符合要求的最优构形,为下一步进行详细设计奠定了基础。

参考文献:

- [1] Yoram Koren. The global manufacturing revolution: product-process-business integration and reconfigurable systems[M]. Hoboken: Wiley, 2010.
- [2] 窦建平,戴先中,孟正大,等. 基于图论的可重构制造系统单零件流水线构形优化[J]. 计算机集成制造系统,2010,16(1):81. DOU Jianping, DAI Xianzhong, MENG Zhengda, et al. Optimization for single-part flow-line configurations of reconfigurable manufacturing systems based on graph theory[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 16(1): 81.
- [3] Youssef A M A, Elmaraghy H A. Availability consideration in the optimal selection of multiple-aspect RMS configurations[J]. International Journal of Production Research, 2008, 46(21): 5849.
- [4] 金哲,宋执环,杨将新. 可重构制造系统工艺路线与系统布局设计研究[J]. 计算机集成制造系统,2007,13(1):7. JIN Zhe, SONG Zhihuan, YANG Jiangxin. Process route and layout design method for reconfigurable manufacturing systems[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2007, 13(1): 7.
- [5] 楼洪梁,杨将新,林亚福,等. 基于图论的可重构制造系统重构策略[J]. 机械工程学报,2006,42(3):22. LOU Hongliang, YANG Jiangxin, LIN Yafu, et al. Reconfiguring policy of reconfigurable manufacturing systems based on graph theory[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(3): 22.
- [6] Son Sungyong, Tava Lennon Olsen, Derek Yiphoi. An approach to scalability and line balancing for reconfigurable manufacturing systems[J]. Integrated Manufacturing systems, 2001, 12(7): 500.
- [7] Ahmed M Deif, Waguih EIMaraghy. Effect of reconfiguration costs on planning for capacity scalability in reconfigurable manufacturing systems[J]. International Journal of Flexible Manufacturing Systems, 2006, 18(3): 225.
- [8] Ahmed M Deif, Waguih EIMaraghy. Investigating optimal capacity scalability scheduling in a reconfigurable manufacturing system[J]. International Journal of Manufacturing Technology, 2007, 32(5): 557.
- [9] van der Zijpp N J, Catalano S Fiorenzo. Path enumeration by finding the constrained K-shortest paths[J]. Transportation Research Part B, 2005, 39(6): 545.