

基于商空间理论的可重构机床粒计算方法研究

曾法力¹, 李爱平¹, 谢楠²

(1. 同济大学 现代制造技术研究所, 上海 200092; 2. 同济大学 中德工程学院, 上海 200092)

摘要: 为提高制造系统的快速结构配置规划响应速度, 提出了基于商空间理论的可重构机床粒计算方法, 实现了体系结构组元模型在系统配置规划中的快速粒度分解、组合, 建立了功能分解与结构匹配的商空间模型, 全面表达了可重构机床在配置规划中粒度分解的相关特征和目标任务的相关变化, 实现了可重构机床的模块快速优化分解。

关键词: 可重构机床; 商空间理论; 粒计算; 模块; 配置规划

中图分类号: TH122

文献标识码: A

Quotient Space Theory-based Granularity Computation Method of Reconfigurable Machine Tools

ZENG Fali¹, LI Aiping¹, XIE Nan²

(1. Institute of Advanced Manufacturing Technology, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Sino-German College of Applied Sciences, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The paper presents a new method about the granularity computation of reconfigurable machine tools based on quotient space theory for improving the response of quick structure configuration layout of manufacture system. Decomposition behavior of dynamic systematic structure is depicted by quotient space theory of the granularity intuitively and formally, which can meet different requirements through the transform of coarse granularity to fine granularity. The quotient space theory of the granularity is adopted to achieve quick granularity decomposition and combination physics implement of systematic structure model in system configuration layout, the creativity function decomposition and structure matching model is set up with the aid of the quotient space theory. It expresses granular correlative features of the configuration layout of reconfigurable machine tools roundly and corresponding correlative variety of aim assignment, and quick optimized decomposition technology of module of reconfigurable machine tools is realized. Finally,

the method is verified by a case study.

Key words: reconfigurable machine tools; quotient space theory; granular computing; module; configuration layout

为使制造企业能适应迅速变化的市场环境, 出现了可重组制造的制造模式^[1]. 当市场环境发生变化时, 可重组制造系统能够基于现有自身系统在系统规划与设计规定的范围内, 通过改变可重构机床的模块化构件, 或通过移动、更换和添加可移动性设备, 或以逻辑重构方式生成虚拟制造单元, 达到根据变化动态快速地调整生产过程、功能和能力, 实现短的系统研制周期、低的生产和重构成本、高的经济效益和更小的冗余生产能力。

可重构机床 (reconfigurable machine tools, RMTs) 是可重构制造系统的重要组成部分^[2], 它与普通机床的最大区别在于用户能够根据不同的加工任务及时调整机床的模块组成、配置, 以满足不同零件的加工需求. 制造生产线上的加工设备类型和数量可根据新工艺需求进行重构, 其重构过程由客户需求驱动, 因此, 模块划分和配置规划是可重构机床的重要重构基础. 刘征^[3] 提出了产品总体概念设计的知识获取, 从过程设计、产品信息表达、模块粒度特征与生成等方面进行了深入的归纳和研究总结. Y Koren 和 R Landers^[4] 开发了一个可重构机床概念设计原型, 该原型可以通过预留的接口, 添加或拆除主轴模块使机床的资源得到优化. L Liao 和 Lee^[5] 合作研究开发了一种用可重构机床的粒度库和专家系统, 其目标是通过转换机床的配置来加工不同的零件. R Katz^[6] 提出了可重构机床的设计原则及不同的配置方式. 刘晨^[7] 提出了用工艺知识论域、属性函数和工艺知识论域结构的三元组描述工艺设计过

收稿日期: 2011-04-04

基金项目: 国家自然科学基金(50975209); 国家科技重大专项(2011ZX04015-022); 中央高校基本科研业务费专项资金

第一作者: 曾法力(1979—), 男, 博士生, 主要研究方向为制造系统与自动化, 可重构机床等. E-mail: falizeng@yahoo.com.cn

通讯作者: 李爱平(1951—), 女, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为制造系统集成及自动化, 制造业信息化等.

E-mail: limuzi@tongji.edu.cn

程中知识以及工艺知识元素之间关系的方法,并讨论了运用语义匹配、分类操作、关联规则和聚类分析等多种数据挖掘方式进行基于知识粒度的知识获取发现方法;王玉新^[8]建立了创新增强型功能-行为-结构(function-behavior-structure, FBS)功能分解与结构匹配的商空间模型,但没有形成完整的配置重构体系。

本文根据客户需求任务,提出了一种基于商空间粒度计算理论的可重构机床配置规划模型的概念及其表达方法,以适应加工不同类型的产品。基于商空间理论的可重构机床粒计算方法是可重构机床配置规划多任务集成,利用商空间粒度模型对可重构机床进行相关粒度划分操作和快速配置规划,极大提升了可重构技术的动态特性和高效能力。

1 商空间理论与粒度计算

商空间理论利用结构化的思维方式、问题求解方法以及结构化的信息处理模式,形成了一套研究复杂对象的方法,通过该方法可以对详细信息进行由粗到细、由表到里的研究。商空间理论根据粒度调整时定义的合并法和分解法,使研究对象按需要方便地进行粒度粗细变化,在合适的粒度空间基础上,对复杂系统进行经济无冗余的配置规划。

商空间理论是一个三元组 (X, f, T) ,其中 X 为研究的论域, X 上的每个元素为 x ,对应的属性函数值为 $f(x)$,即在 X 上有属性函数 $f: X \rightarrow Y$,其中 Y 可以是多维的,各维可以是实数域,也可以是其他的集合,最后用 X 上的拓扑 T 来描述 X 中各元素之间的关系。对 X 取一个等价关系 R ,根据 R 构造对应的商集及属性函数和结构。由拓扑学中的商拓扑得到商集上的结构——商拓扑。按定义商拓扑 $[T]$ 为

$$[T] = \{u \mid p^{-1}(u) \in T, u \subset [X]\}$$

式中: $p: X \rightarrow [X]$ 为自然投影; p^{-1} 为 p 的逆变换。

所谓粒(粒度)就是将性质相似的元素归结成一个新的元素。将一个子集看成一个元素,就是将子集中的元素都看成是等同的。由这些新元素构成的集合,称为商集。对产品进行粒度分析和粒计算,即对产品取不同的粗、细粒度进行分析研究各商空间之间的关系,各商空间的合成、综合、分解和商空间中的推理。

给定论域 X 和其上一个等价关系 R (等价关系是一种最为简单地将论域进行划分的方式),关系 R 关于论域的划分 X/R 为一组等价类集合,称每个等

价类为一个颗粒,那么 X/R 为一个颗粒集合。 X/R 是对论域 X 的一个颗粒化。关系 R 对于论域 X 的划分可以用下面的二元组来表示,即

$$S = (X, R)$$

式中: X 为论域,是一个非空集合; $R \subset X \times X$ 为一等价关系。

关系 R 将论域 X 划分为多个等价类,每一个等价类在该粒度下作为一个基本运算单位,也就是在目前给定的知识库中,该等价类中的元素是无法区分的。针对不同的层次空间模型、对象相应的属性、结构和粒度模型,商空间和粒度关系如图1所示。

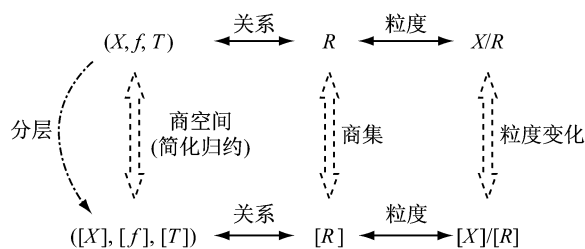


图1 商空间与粒度的原理

Fig.1 Principle of quotient space and granularity

分析或求解问题 (X, f, T) 即对论域 X 的大小粒度进行简化归约,使其产生一个新的较大粒度的论域 $[X]$,那么把原问题 (X, f, T) 变成新的层次上的问题 $([X], [f], [T])$,即从比较粗粒度 $[X]$ 去分析讨论问题。

针对不同的粒度世界,对问题 (X, f, T) 从不同的粒度(角度、层次、结构)进行研究是指由等价关系 R 产生商集 $[R]$,然后研究相应问题 $([X], [f], [T])$ 。其中 $[f], [T]$ 分别代表商集 $[X]$ 上对应的商属性函数和商结构,称 $([X], [f], [T])$ 为 (X, f, T) 的商空间。

2 基于商空间的粒度划分

2.1 粒度的划分和选择

粒度的划分和选择是实现模块化制造的基础,所划分的模块应具有独立的功能,并具有一定的通用性,有连接关系的模块应具有对应的接口特征,可互换的模块应具有相同的功能和接口特征,还应满足模块之间位置关系和运动关系的要求。

粒度划分的核心问题是确定功能分解的层次与规模,方法包括设计问题的分解、子功能成为独立模块的条件分析、子功能之间相关度的计算、模块的形成、模块划分结果的评价等步骤,具体如下:

(1)构建子功能的运动学模型.

(2)分析产品族工艺特点,并构建了产品工艺约束,将总功能信息分解成一系列的子功能,构建子功能之间的拓扑关系.

(3)定义子功能之间相关度,综合考虑相关度之间的权重,得到子功能之间的相关矩阵以后,采用截矩阵法进行模块划分.将所需的每个功能映射为模块库中的一系列模块或模块的组合.

(4)判断每个子功能是否满足独立模块条件以及是否有两个以上的子功能满足相同的独立模块条件,计算出最优的粒度和模块组合.

功能模块分解的粒度以及在相应层面中子功能模块的个数,取决于客户的需要和任务.但寻求最优粒度和最佳配置规划是最为重要的步骤之一.对给定的系统,可以从3个方面构建商空间^[9].

(1)论域划分法.给定一个等价关系 R ,由 R 得到相应的商集 $[X]$,然后由 $[X]$ 构造对应的商空间 $([X], [f], [T])$.

(2)属性划分法.设属性函数 $f=(f_1, \dots, f_n)$, $f_i = X \rightarrow Y_i, i=1, \dots, n$. 对 Y_i 取粒度得值域的商集 $[Y_i]$,设其对应的等价关系为 $[R_i]$,定义 X 上的等价关系 $G_i: x \sim y \Leftrightarrow f_i(x) R_i f_i(y)$,这样就得到 X 上的一个等价关系 G_i ,由此可以得到对应的商空间 $([X], [f], [T])$.

(3)结构划分法.设问题为 (X, f, T) ,取 T 的粗拓扑 T_1 ,构造问题 (X, f, T_1) ,即为原问题的粗粒度分析.

(4)约束划分法.设问题 (X, f, T) 有 n 个约束条件 C_1, C_2, \dots, C_n ,可以根据 C_i 进行划分.

2.2 粒度优化策略

机床模块粒度的划分直接影响配置的光滑度和经济性.模块物理重组或组合是指对设备的添加、减少或者替换;机床模块的逻辑重组是指动态地完成软件、控制器的重组.通过改变物理重组和逻辑重组可以改变机床的生产能力和功能,灵活快速地完成新的生产任务.

机械系统的粒度划分在不同的系统中,粒结构有不同层次的描述.通过分层递阶地构建归一化等腰距离函数,实现了从分层递阶结构到模糊等价关系的递归构建,并利用等价关系的交运算与并运算实现了不同层次商空间的分解与合成,粒度层次划分如图2所示.

图2中 λ 为阈值,对应相应的商空间为 $X(\lambda)$. 设 X 上的分层递阶结构 $\{X(\lambda) | 0 \leq \lambda \leq 1\}$,如果所有

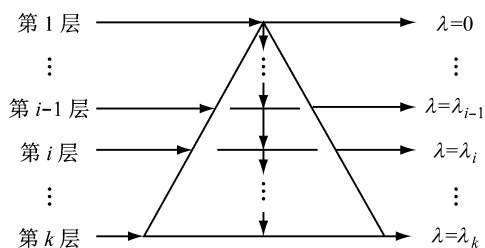


图2 分层递阶结构

Fig.2 Hierarchical structure

λ 按照从小到大排列形成一个序列 $0 \leq \lambda_1 < \lambda_2 < \dots < \lambda_k \leq 1$, 则对应的商空间序列为 $\{X(\lambda_1), X(\lambda_2), \dots, X(\lambda_k)\}$. 根据机床分解粒度,描述所有机床部件的重构配置过程并建立相应的描述模型,确定部件的一系列重构操作及其影响因素(包括各部件自身重构的并发操作、串行操作以及异步操作,以及整个生产过程中其他资源对某一部件重构的时序约束关系),根据成本函数,机床的动态重构算法如下:

(1)确定机床的可重构操作,并建立相应的重构描述模型.

(2)在研究单个阶段的配置易重构性基础上,寻找一条系统全局意义下精度最高且经济可行的最优配置路径,使得所有阶段的整体配置性能达到最佳.

3 基于商空间理论的可重构机床粒计算

3.1 粒计算

基于模块化设计思想,利用已有的设计方案和相关知识,快速分解重构新配置机床产品.首先对待加工零件进行工艺分析、聚类,从而提出对机床产品的结构和功能要求.根据系统粒度确定商空间集合,不同的模块对应不同的粒度元素,其连接属性对应模块连接方式.对可重构机床建立商空间模型,依据功能关系建立约束条件,基于模块空间关系对初始图粗粒度进行粒度变换,建立一一映射关系,使功能结构模块在不同的粒度层面可以快速转换.建立粒度分解和商空间关系,组成可重构机床内在联系.检索可重构机床数据库,如果没有合适粒度的机床配置单元,则使用模块化技术进行快速设计.查询机床配置单元系统模块,如果无合适粒度配置单元,则以已存在的相似模块为基础,进行扩展重构设计.对各个模块进行生成组合,构建最合适的机床配置方案.对机床进行分解粒度划分、组合分析、粒度配置分析和综合评价,确认划分和配置规划合理性,流程如图3所示.

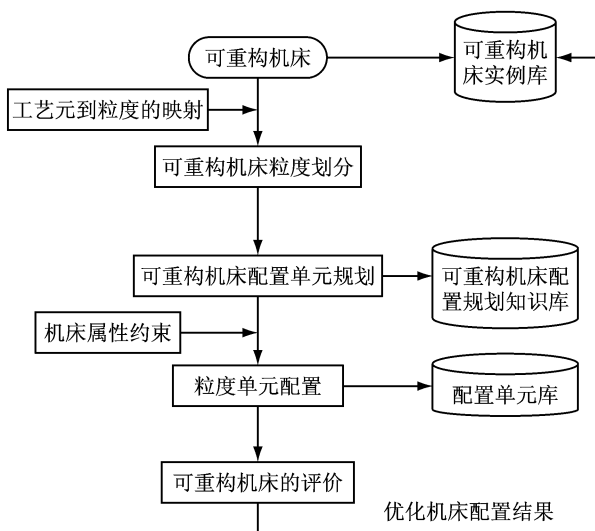


图 3 基于商空间粒度计算的可重构机床配置规划模型

Fig. 3 Configuration layout model based on quotient space theory of the granularity computing of reconfigurable machine tools

3.2 商空间粒度理论分析

当用一般可重构理论与方法对可重构机床进行划分重构时,如果客户需求发生变化,需要耗费大量资源对已有机床结构进行分析、配置和重构,不能建立动态配置规划方法实时响应市场需求。

利用商空间粒度计算理论与方法可以动态地对相关可重构机床进行合理粒度计算,当产品需求发生变化时,对相关特征粒度配置单元进行重构,建立动态合理的粒度配置单元与目标可重构机床之间的实时动态映射关系,构建多需求多体重构配置机床,可以极大减少重构斜升时间和配置资源的浪费,优

化的粒度分析可以有效缩短模块配置装配时间和减少对企业资源的利用。图 4 为一般重构分析方法与商空间粒度理论分析方法的对比。

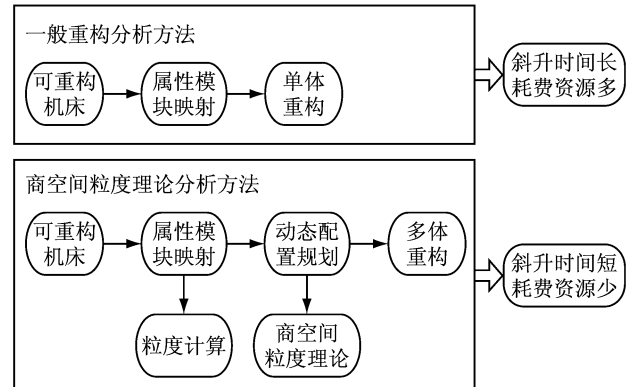


图 4 商空间粒度理论的对比分析

Fig. 4 Contrastive analysis of quotient space theory of the granularity

3.3 实例分析

以某大型企业箱体类产品族为例,由于材质和 Z 轴加工距离的变化,机床未重构配置规划前,有 40 多个子模块,需要单独分析研究,所得模块组合配置方案有成千上万种,没有适当的粒度计算分析,系统的配置规划很复杂。

因此需要配置能快速响应生产产品的可快速重构机床,其主要功能模块包括床身部、横梁部(过渡件)、立柱部、主轴箱部、滑座工作台面和刀库部 6 大部分。图 5 按照产品层、系统层、模块层、分模块层将加工中心进行模块分层分解。

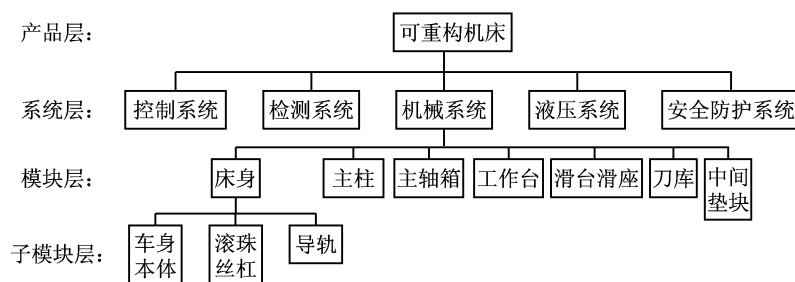


图 5 可重构机床粒度分层

Fig. 5 Granular delamination of reconfigurable machine tool

对产品缸体缸盖加工工序进行聚类分析,结果如图 6 所示。从该工艺聚类结果可知,缸体缸盖的加工特征可分 4 类:矩形面、矩形阵列盲孔、通孔、矩形阵列螺纹盲孔,其中二阶通孔和通孔同属一类加工特征。该聚类结果比一般聚类结果更加快捷简单,能有效划分模块加工特征,为商空间模块单元映射关

系建立基础。

可重构机床在机械系统层面可以分为床身、立柱、主轴、工作台、滑台滑座和刀库等 6 大部分,其中床身又可分为床身本体、滚珠丝杠、导轨,不同的父模块又由几十个子模块组合而成,其粒度变化生成如图 7 所示。

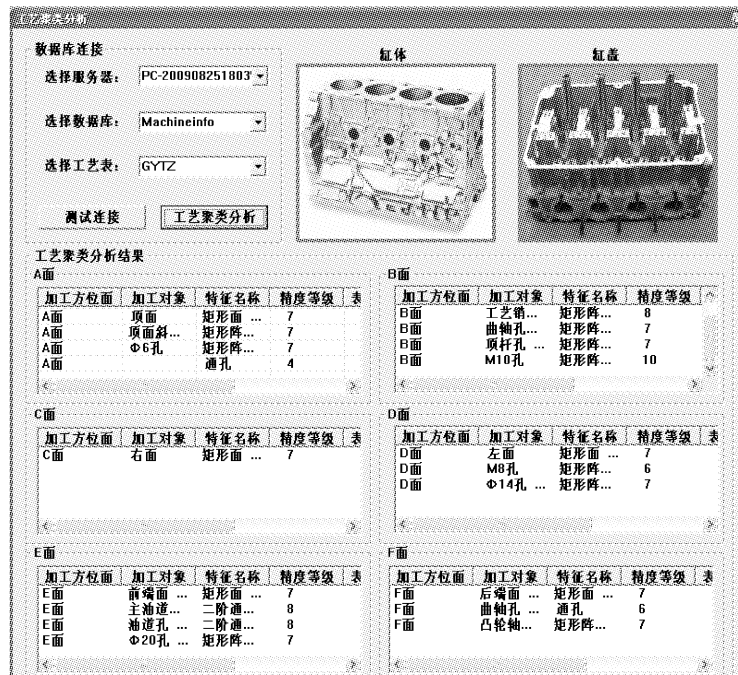


图 6 工艺聚类分析界面

Fig.6 Process clustering analysis interface

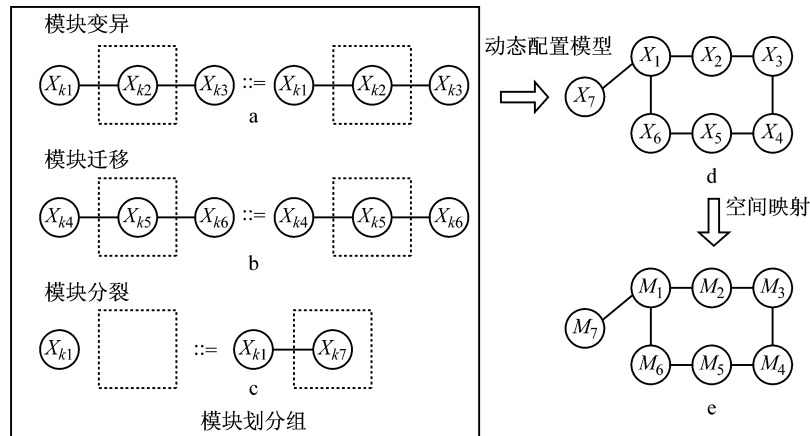


图 7 基于商空间的 RMTs 动态粒度变化模型

Fig.7 RMTs dynamic granular change model based on quotient space

定义可重构机床商集 $[X]$ 对应机械系统商空间为 $([X], [f], [T])$.

(1) 论域 $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$, 为可重构机床子模块.

(2) R_1, R_2, \dots, R_n , 为论域 X 上对应等价关系集合.

(3) $[X] = \{[X_1], [X_2], [X_3], [X_4], [X_5], [X_6], [X_7]\}$.

(4) $M_1, M_2, M_3, M_4, M_5, M_6, M_7$ 为各商集对应的子模块.

图 7 对商集论域 X_{ki} 进行不同层粒度操作变换, 由图 7a 可知, 论域 X_{k2} 在该粒度要进行变异, 对 X_{k2} 进行比例缩放操作模块替换, 可对应提升主轴的加

工 Z 轴方向的行程, 原机床可加工缸体零件相关特征, 通过实体可重构机床变换, 该可重构机床可加工缸盖零部件相关特征; 图 7b 对论域 X_{k5} 进行迁移替换, 原来的工作台只有一个托盘, 通过替换 X_{k5} , 更换旋转托盘可以进行对换加工; 图 7c 对可重构机床的论域 X_{k7} 进行了裂变粘贴操作, 对位于可重构本体的箱体边的刀库进行嵌入操作, 可有效提升机床的加工能力, 减少换刀时间和斜升时间; 图 7d 为论域集合模型的动态配置方案, 对图 7e 的商空间论域进行物理映射得到图 7d 的空间子模块集合.

对可重构机床进行商空间粒度计算分析和对物理模型进行表达, 可有效提升机床重构效率. $([X], [f], [T])$ 可在论域空间 $[X_1], [X_2], [X_3], [X_4]$,

$[X_5]$, $[X_6]$, $[X_7]$ 中粒度划分为 $M_1([X_1])$, $M_2([X_2])$, $M_3([X_3])$, $M_4([X_4])$, $M_5([X_5])$, $M_6([X_6])$, $M_7([X_7])$. 图8是对应的可重构机床模块粒度划分模型.

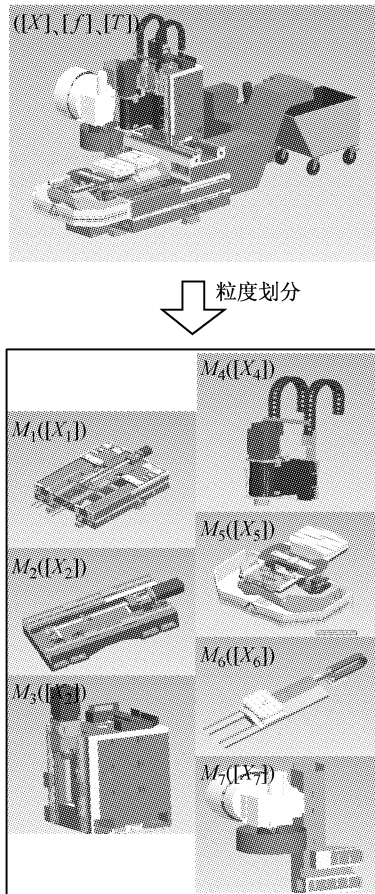


图8 基于商空间的可重构机床粒计算结果
Fig.8 RMTs granular computing result based on quotient space

通过商空间理论粒度计算方法,结合计算机数据库等高效的映射关系,可以实时展示可重构机床的粒度划分和动态配置过程,建立一种新的工艺聚类与重构模块之间的映射关系,可以方便的对机床动力配置进行重构,从而为机床的可重构配置规划奠定基础.

4 结论

本文对建立可重构机床商空间粒计算方法的关键问题进行了研究,运用商空间理论中的论域和粒度阈值对应关系提出了基于商空间的可重构机床粒度计算方法,通过不同层面粗细粒度的转换,能够满

足不同层次不同任务的需求.实现了体系结构组元模型在系统配置规划中的快速粒度分解、组合等物理操作,建立了功能分解与结构匹配的商空间模型,全面表达了可重构机床在配置规划中粒度分解的相关特征和目标任务的相关变化,实现了可重构机床的模块快速优化分解.基于商空间理论的可重构机床粒计算方法可以充分利用商空间模型和粒计算动态特性对重构设备进行重构规划,建立一种新的工艺聚类与重构模块之间的映射关系,方便对机床配置进行重构,从而为机床的可重构配置规划奠定基础.

参考文献:

- [1] Koren Y, Shpitalni M. Design of reconfigurable manufacturing systems[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2010, 29(4): 130.
- [2] Mori M, Fujishima M. Reconfigurable machine tools for a flexible manufacturing system [J]. Advanced Manufacturing, 2009;101.
- [3] 刘征,鲁娜,孙凌云. 面向概念设计过程的隐性知识获取方法[J]. 机械工程学报, 2011, 14(8): 112.
LIU Zheng, LU Na, SUN Lingyun. Tacit knowledge acquisition method for the process of concept design [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 14(8): 112.
- [4] Landers R G, Min B K, Koren Y. Reconfigurable machine tools [J]. Annals of the CIRP, 2001, 50(1): 269.
- [5] LIAO L, LEE J. Design of a reconfigurable prognostics platform for machine tools[J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(1): 240.
- [6] Reuven Katz. Design principles of reconfigurable machines[J]. Advanced Manufacturing Technology, 2007, 34(5): 430.
- [7] 刘晨,殷国富,龙红能. 制造工艺知识粒度描述方法与获取算法研究[J]. 计算机集成制造系统, 2008, 10(12): 10.
LIU Chen, YIN Guofu, LONG Hongneng. Research status and development direction of product conceptual design [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2008, 10(12): 10.
- [8] 王玉新,张旭光,毛晓辉. FBS模型中行为与结构创新的商空间表现与实现[J]. 机械工程学报, 2010, 46(15): 107.
WANG Yuxin, ZHANG Xuguang, MAO Xiaohui. Implementation and quotient representation of creativity in functional layer and form layer of the function-behavior-structure model [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(15): 107.
- [9] 张玲,张钊. 问题求解理论及应用——商空间粒度计算理论及应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2007.
ZHANG Ling, ZHANG Bo. Problem solving theory and application—quotient space granular computing theory and application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007.