

可重构机床模块划分研究*

黄华 李爱平 徐立云

(同济大学现代制造技术研究所, 上海 201804)

【摘要】 综合考虑重构需求、结构功能和生命周期的影响,使用柔性模块划分方法对可重构机床模块划分进行了研究。采用层次分析法对影响模块形成的因素进行了权重分配,得到了机床零件之间的交互值并形成了相关矩阵,使用模糊聚类法对相关矩阵进行操作;考虑到可重构机床的特殊性,对其控制系统也进行了模块划分,最后得到了可重构机床模块划分的总体方案。

关键词: 可重构机床 模块划分 模糊聚类

中图分类号: TG502.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)07-0198-07

Modular Division Oriented to Reconfigurable Machine Tools

Huang Hua Li Aiping Xu Liyun

(Institute of Advanced Manufacturing Technology, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract

A flexible modular division method was proposed to the reconfigurable machine tools (RMT) considered the influence of customer demand, the structure-function and life cycle effect. Analytic hierarchy process (AHP) was used to weight the different influence factors and the interaction among the machine tool parts and the related matrix were obtained. The fuzzy clustering method was used to operate the matrix. The control system was modular divided based on the specialty of RMT. The proposal for RMT modular division was obtained and could be used as the foundation of RMT developing.

Key words Reconfigurable machine tools, Modular division, Fuzzy clustering

引言

正确合理的模块划分粒度是模块化产品成功设计的关键^[1],机床产品具有典型的模块性,很多学者开展了机床模块划分的研究^[2-5]。可重构机床是目前的研究热点^[6],对其进行模块划分是其设计制造需要解决的首要问题,目前相关文献非常少。文献[7]根据影响加工精度的三要素进行可重构模块划分的理论研究,专门针对电火花线切割机床,缺乏一般性。总体而言,可重构机床的模块划分有其独有特点:其控制软件必须采用模块化,以便适应运动轴的重构;必须考虑重构需求,零部件生命周期的影响,零部件之间的功能、信息、装配等影响。本文对

可重构机床的模块划分进行研究,考虑多种因素对零部件相关性的影响,在获得相关矩阵后,通过模糊聚类对相关矩阵进行操作而实现划分。

1 可重构机床的模块划分原则

机床的模块划分是一个复杂的过程,一般认为模块划分要遵循如下几个原则:特性原则、独立原则、典型部件原则、可扩充性原则^[8]。面向可重构机床的模块划分,除了通用的模块划分准则之外,还要考虑以下几个原则:

(1)可重构的零部件要单独划分为一个模块,分为两种情况:某些零部件将来可被替换、删除或者增加附属部件而升级;某些零部件具有自身调整功

收稿日期:2009-08-10 修回日期:2009-10-30

* 国家自然科学基金资助项目(50975209)、国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2007AA042002)和上海市基础研究重点项目(09JC1414500)

作者简介:黄华,博士生,主要从事制造系统及其自动化研究,E-mail: hh318872@126.com

能,如卧卧转换头、转向块等,这种功能部件体现了“可重构”概念的精髓。

(2)可重构机床的软件模块划分:可重构机床的功能结构具有可重构性,表现在运动轴数的增减或运动轴的换向(如卧式变成立式等)。这就要求其控制软件具有可重构性。

2 面向重构的机床模块划分方法

面向可重构机床的模块划分,主要针对 3 种情况进行研究。第 1 种情况是对已有机床产品的变型设计,通过对某些功能模块进行系列化扩展而获得变型产品;第 2 种情况是对已有机床的模块化改造,对旧的机床进行拆分,分成单独的模块,然后按照新工艺的需求对这些模块进行组合形成新的机床,在

这过程中可能需要通过设计或购买添置一些新的机床模块。第 3 种情况是针对零件族的工艺需求,以模块化技术为基础设计可重构机床,这需要在初始阶段就对相关模块进行系列化设计。这 3 种情况都需要进行模块划分。

受文献[8]的启发,本文提出了专门面向可重构机床的柔性模块划分方法,分 4 个阶段进行:首先对以上 3 种情况进行选择;接着对机床进行功能分析,分解为一系列的子功能,并与其载体结构一一对应;然后进行相关性分析,不同情况会有不同的相关性影响因素,构造相关性矩阵;最后对相关性矩阵进行操作,使用模糊聚类或智能算法,得到模块划分结果;如果存在多种划分方法,还需对划分结果进行评价,获得最优划分结果。具体流程如图 1 所示。

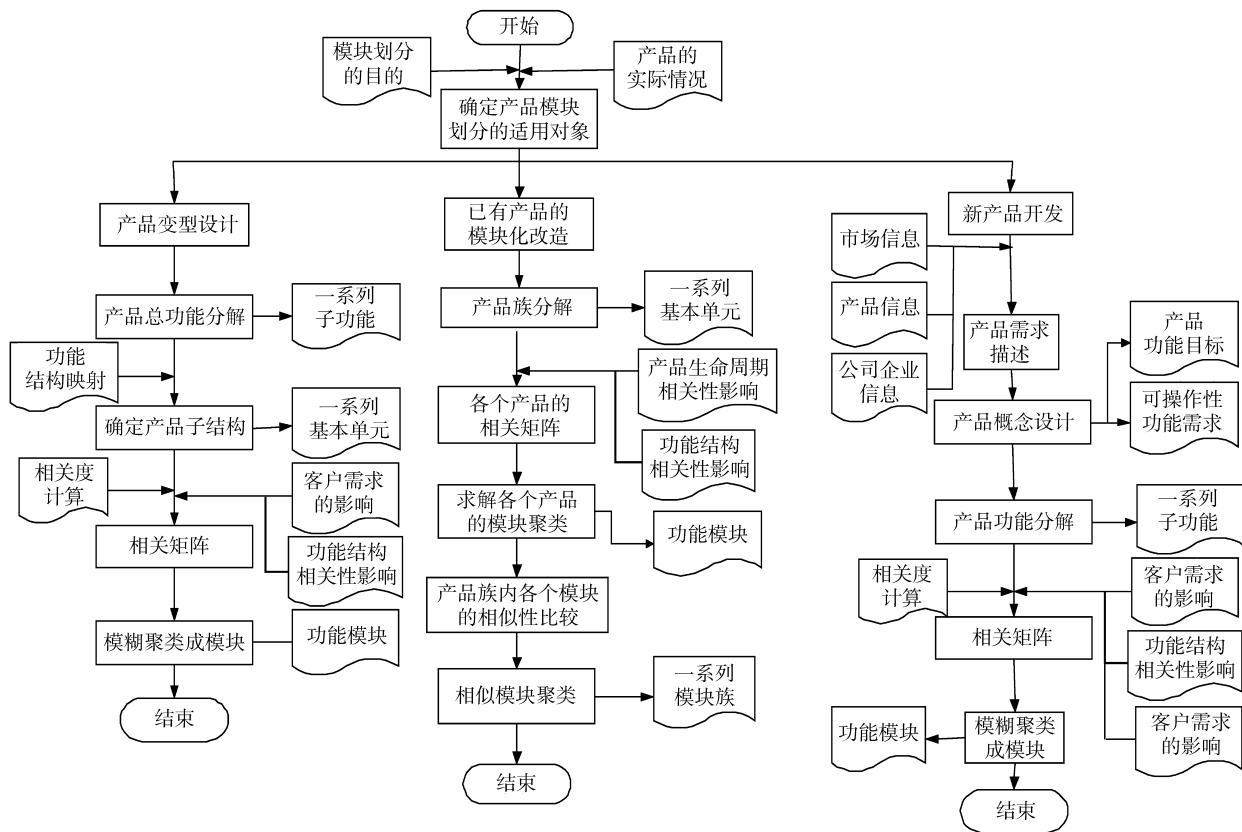


图 1 模块划分流程

Fig. 1 Process of modular division

3 相关性分析

重构目的就是为了快速满足客户的不同需求,因此模块划分时首先必须考虑客户需求;另一方面,产品各功能模块之间相对独立、较少耦合有助于设计、制造、装配过程的并行进行,因此模块之间的相对独立也是产品模块划分的关键因素。

3.1 客户需求影响下的相关性分析

首先要获取产品的客户需求,并列出那些可能

会导致某些功能载体存在横系列或纵系列方面变型的需求因素进行重点考察,比如某加工中心的主轴功率需求变化范围很大,则主轴箱体和主轴系统等必须有系列化变型才能覆盖这些功能谱,它们应该设计成独立的模块。筛选出对模块化设计有重要影响的客户需求之后,构造需求与零部件的关联关系。

假设 CR_1, CR_2, \dots, CR_m 为 m 个客户需求, FR_1, FR_2, \dots, FR_n 为所分解的 n 个功能, r_{ij} 为 CR_i 对 FR_j 的影响程度。当 CR_i 对 FR_j 无影响时, $r_{ij} = 0$; 当 CR_i

对 FR_j 有细微影响时, $r_{ij} = 1$; 当 CR_i 对 FR_j 有影响但较小时, $r_{ij} = 2$; 当 CR_i 对 FR_j 影响一般时, $r_{ij} = 3$; 当 CR_i 对 FR_j 有较大影响时, $r_{ij} = 4$; 当 CR_i 对 FR_j 有很大影响时, $r_{ij} = 5$, 则相应的关系矩阵就可以表示为 $R = [r_{ij}]_{m \times n}$ 。

需求	受影响的零部件
CR_1	P_1, P_2
CR_2	P_1, P_3
\vdots	\vdots
CR_m	P_5, P_n

利用上述关系可自动生成在 CR_k 影响下的产品零部件的相关矩阵 $A_{n \times n, k}$, 其中 $k = 1, 2, \dots, m, m$ 表示客户需求数, P_i 表示零部件, n 表示零部件个数。

3.2 功能结构相关性分析

功能相关: 零部件之间的功能相关性是指在模块划分时, 将那些为实现同一功能的零部件聚在一起构成模块, 这有助于提高模块的功能独立性。其定义如表 1 所示。

几何相关: 零部件之间的几何相关性, 是指零部件之间的空间、几何关系上的物理联接、尺寸、垂直度、平行度和同轴度等几何关系^[9]。其定义如表 2 所示。

物理相关性: 零部件之间的物理相关性是指零部件之间存在着能量流、信息流或物料传递等物理关系。其定义如表 3 所示。

表 1 功能相关性定义

Tab. 1 Definition of Function Relation

功能相关描述	相关数值
共同完成某功能, 缺一不可	5
辅助功能关系强	3
辅助功能关系弱	1
无功能关系	0

表 2 几何相关性定义

Tab. 2 Definition of geometry relation

联接相关描述	相关数值
联接紧密, 难以拆分	5
键槽等较难拆分联接	3
螺纹等易拆分联接	1
无功能关系	0

表 3 物理相关性定义

Tab. 3 Definition of physical relation

物理相关描述	相关数值
存在着能量流的物理关系	5
存在着信息流的物理关系	3
存在着物料流的物理关系	1
无物理关系	0

3.3 全生命周期下影响因素分析

可重构机床的设计要考虑模块在生命周期中设计、制造、使用和回收过程^[10], 对各个因素的评价准则如表 4 所示。

表 4 产品生命周期中各个影响因素的评价准则

Tab. 4 Evaluating criteria of different factors in life cycle

影响因素	评价		
	高	中	低
维修频率/年	< 5	5 ~ 10	> 10
维修停机时间/min	> 30	10 ~ 30	< 10
技术水平要求	技术熟练, 特殊工具	技术一般, 特殊工具	技术一般, 普通工具
使用寿命/年	> 10	5 ~ 10	< 5
零件成本/元	> 1 000	100 ~ 1 000	< 100
可重用性	易重用易重装配	重用之前需稍作修整	重用之前需要再较多加工
可回收性	易回收并且有回收价值	不易回收但有回收价值	不易回收并且没有回收价值
材料同质性	同一材料	一种材料为主加少量另一种材料	多种材料
数值	5	3	1

假设 LC_i 是产品生命周期中第 i 个影响因素, 利用上述关系可自动生成在 LC_i 影响下的产品零部件的相关矩阵 $B_{n \times n, k}$, 其中 $k = 1, 2, \dots, j, j$ 表示影响因素个数。如果存在多个影响因素, 则可以利用层次分析法, 根据具体情况对不同的影响因素赋予权

重, 然后将各个矩阵相加, 最后得到生命周期下的综合影响因素。

3.4 相关矩阵构造

根据以上分析, 可以分别构造客户需求下的子相关矩阵、全生命周期下的子相关矩阵、以及功能、

几何、物理相关子矩阵。构造零部件的子相关矩阵 $A_k (k = 1, 2, \dots, m, m + 1, \dots, n, n + 1, n + 2, n + 3)$, 其中前 m 个是针对每个客户需求建立的子相关矩阵, 表示功能相关矩阵、前 $n - m$ 个矩阵是生命周期影响下针对每个因素建立的子相关矩阵, $n + 1$ 表示功能相关矩阵, $n + 2$ 表示几何相关矩阵、 $n + 3$ 表示物理相关矩阵, 每一节的相关矩阵由设计师评定。

参考文献[11]根据各子相关矩阵 $A_k (k = 1, \dots, m, m + 1, \dots, m + 4)$ 生成零部件相关矩阵 $R_{n \times n}$, 其构造算法为

$$R_{ij} = \begin{cases} \beta \left(\omega_1 \sum_{k=1}^m \mu_k A_{ij,k} + \omega_2 \sum_{t=m+1}^n \mu_t A_{ij,t} + \omega_3 A_{ij,n+1} + \omega_4 A_{ij,n+2} + \omega_5 A_{ij,n+3} \right) & (i \neq j) \\ 1 & (i = j) \end{cases} \quad (1)$$

式中 β ——正则化系数, 主要是为保证 $R_{ij} \in [0, 1]$, 取 $\beta = 0.1$

ω_1 ——客户需求相关准则的权重系数

ω_2 ——生命周期相关准则的权重系数

ω_3 ——功能相关准则的权重系数

ω_4 ——几何相关准则的权重系数

ω_5 ——物理相关准则的权重系数

u_k ——第 $k (k = 1, 2, \dots, m)$ 个客户需求的权重系数, 可采用 AHP 法或者根据市场调查确定

应用 AHP 法确定各准则的权重系数, 得 $\omega_1 =$

$0.248, \omega_2 = 0.200, \omega_3 = 0.371, \omega_4 = 0.139, \omega_5 = 0.371$ 。

通过零件间相互计算得到模糊关系矩阵, 将矩阵按式(1)进行规格化处理。

形成规格化后的模糊关系矩阵 R , 相同零件的相关度取值为 1。下对角阵按上对角阵取值, 该矩阵为对称矩阵。

$$R = \begin{bmatrix} T(1,1) & T(1,2) & \dots & T(1,n) \\ T(2,1) & T(2,2) & \dots & T(2,n) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ T(n,1) & T(n,2) & \dots & T(n,n) \end{bmatrix}$$

其中 $0 \leq T(i,j) \leq 1 \quad T(i,j) = T(j,i) \quad (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad T(i,i) = 1$

4 基于模糊聚类方法的模块划分

在得到相关矩阵 R 的基础上, 用模糊聚类方法—— λ 截矩阵对产品的模糊相似矩阵进行截割, 从而将单元聚类为不同的模块。不同的 λ 可以得到不同的聚类结果。

5 模块划分实例

某厂有一台面向发动机缸盖生产的加工中心, 为了适应一定范围内产品种类、批量和工艺的变化, 需要更换某些机床部件实现重构。为了提供具备足够工艺能力的机床模块, 需要针对重构需求对机床进行模块划分和扩展设计。机床的功能结构如图 2 所示。

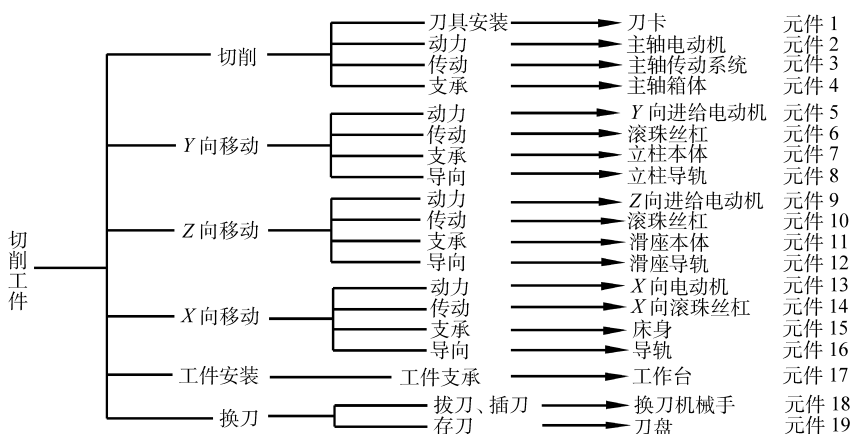


Fig. 2 Structure of machine center

根据产品零件族的工艺变化, 机床有如下几种重构需求如表 5 所示。

建立针对客户需求 1 的相关矩阵如图 3 所示。同理可得客户需求 2、3 的相关矩阵。同时, 考虑功

能结构相关性影响因素的分析, 最后可得相关矩阵如图 4 所示。

使用 λ 截矩阵法, 用不同的 λ 值, 得到了如图 5 所示的动态聚类树。

表5 重构需求及受影响的相关部件

Tab.5 Reconfigure demands and its related parts

序号	客户需求	受影响的 功能部件
1	主轴最大转速有 5 000, 8 000, 12 000 r/min 三种匹配	元件 2、3、4
2	Z 轴最大行程有 0.5 m 和 1 m 两种最大匹配	元件 7、8
3	工作台最大承重有 50 kg 和 100 kg 两种匹配	元件 17

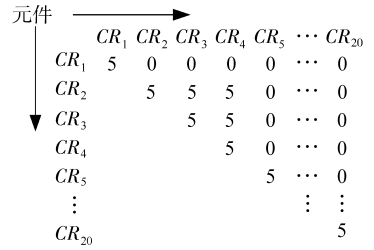


图3 客户需求 1 的相关矩阵

Fig.3 Related matrix for 1st customer demand

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	1.00	0.70	0.75	0.82	0.45	0.45	0.45	0.45	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.25	0.25	0.25	0.25	0.20	0.20
2		1.00	0.80	0.70	0.45	0.45	0.45	0.45	0.30	0.30	0.30	0.35	0.35	0.25	0.25	0.25	0.25	0.20	0.20
3			1.00	0.78	0.45	0.45	0.48	0.48	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.25	0.25	0.25	0.25	0.20	0.20
4				1.00	0.45	0.45	0.45	0.45	0.35	0.30	0.30	0.30	0.30	0.25	0.25	0.25	0.25	0.20	0.20
5					1.00	0.86	0.55	0.55	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.25	0.25	0.25	0.25	0.20	0.20
6						1.00	0.55	0.50	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.25	0.25	0.25	0.25	0.20	0.20
7							1.00	0.80	0.41	0.30	0.30	0.30	0.30	0.25	0.25	0.25	0.25	0.20	0.20
8								1.00	0.40	0.40	0.40	0.43	0.66	0.25	0.25	0.25	0.25	0.20	0.20
9									1.00	0.80	0.75	0.70	0.60	0.60	0.60	0.60	0.25	0.20	0.20
10										1.00	0.70	0.70	0.65	0.65	0.65	0.65	0.25	0.20	0.20
11											1.00	0.80	0.60	0.60	0.60	0.60	0.25	0.20	0.20
12												1.00	0.60	0.60	0.75	0.75	0.25	0.20	0.20
13													1.00	0.85	0.70	0.70	0.25	0.20	0.20
14														1.00	0.70	0.70	0.25	0.20	0.20
15															1.00	0.85	0.25	0.20	0.20
16																1.00	0.50	0.20	0.20
17																	1.00	0.20	0.20
18																		1.00	0.81
19																			0.00

图4 机床零部件的相关矩阵

Fig.4 Related matrix of machine tool parts

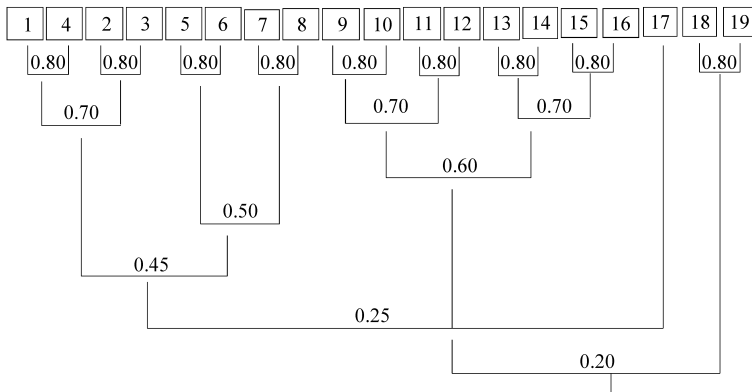


图5 机床模块动态聚类树

Fig.5 Dynamic clustering for machine tool modules

不同的 λ 值对应不同的模块划分方案。综合考虑各种因素,取 $\lambda = 0.60$,得到如下划分方案。模块 1(主轴箱模块):刀卡 1、主轴电动机 2、主轴传动系统 3、主轴箱体 4;模块 2(立柱驱动模块):Y 向进给电动机 5、Y 向滚珠丝杠 6;模块 3(立柱本体模块):立柱本体 7、立柱导轨 8;模块 4(床身模块):X 向电动机 13、X 向滚珠丝杠 14、床身本体 15、床身导轨 16、Z 向进给电动机 9、Z 向滚珠丝杠 10、滑台滑座本体 11、滑座导轨 12;模块 5(工作台模块):工作台 17;模块 6(刀库模块):换刀机械手 18,刀盘 19;由模块划分的结果可以看到,其结果突出了重构需求,需要重构的部件都单独划分为模块。

6 可重构数控系统的模块划分

可重构机床的控制系统一般需要自行开发或者

基于开放式数控系统进行二次开发。一般可将数控系统分为硬件和软件模块,硬件包括运动控制卡、工业计算机和一些辅助模块;软件包括人机交互界面模块、程序译码模块、刀补预处理模块、轨迹插补模块、轴伺服控制模块、I/O 模块等。根据重构要求,又可以分为公共模块和可选模块。

按以上原则,本文将可重构机床的数控系统进行划分,结果如图 6 虚线方框内所示。

7 机床模块的综合划分方案

综上所述,可以将 RMT 的软件和硬件系统划分为如图 6 所示的模块。其中系列化的模块是考虑将来的重构需求,将该模块进行系列化扩展,便于将来进行模块替换或升级。

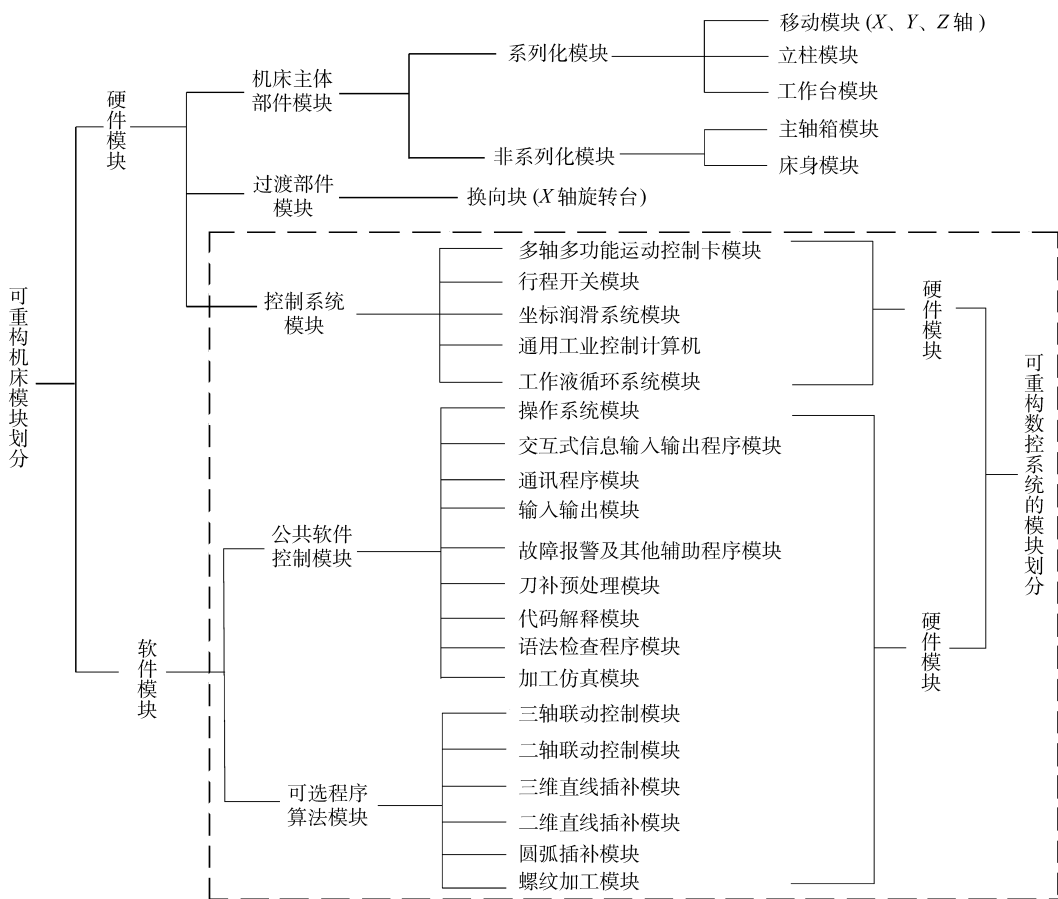


图 6 可重构机床模块综合划分方案

Fig. 6 Results of modular division for RMT

8 结束语

研究了针对可重构机床的柔性模块划分方法,充分考虑了可重构机床模块划分的特殊性,综合考虑了重构需求、功能结构、生命周期对相关性的影

响,进而形成了相关矩阵,通过对相关矩阵使用模糊聚类方法形成模块划分的最终方案,并以实例进行说明。同时,对可重构机床控制系统也进行了模块划分研究,最终得到了可重构机床的综合模块划分方案。

参 考 文 献

- 1 高飞,肖刚,潘双夏. 产品功能模块划分方法[J]. 机械工程学报,2007,43(5):29~35.
Gao Fei, Xiao Gang, Pan Shuangxia. Method of product function module partition[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(5):29~35. (in Chinese)
- 2 Ulrich K, Tung K. A heuristic method for identifying modules for product architectures[J]. Design Studies, 2000, 21(1): 5~31.
- 3 王海军,孙宝元,魏小鹏. 基于模糊聚类的产品模块化形成过程分析[J]. 计算机集成制造系统,2003,12(9):123~126.
Wang Haijun, Sun Baoyuan, Wei Xiaopeng. Process analysis of product modularization's generation based on fuzzy cluster [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2003, 12(9):123~126. (in Chinese)
- 4 Gu P, Hashemian M, Sosal E S. An integrated design methodology for life engineering[J]. Ann. CIRP, 1997, 46(1):71~74.
- 5 Victor B Kreng, Tseng-Pin Lee. Modular product design with grouping genetic algorithm—a case study[J]. Computers & Industrial Engineering, 2004,46(3):443~460.
- 6 游有鹏,张晓峰,王珉. 可重构机床的模块化设计[J]. 机械科学与技术,2001,20(6):815~818.
You Youpeng, Zhang Xiaofeng, Wang Min. Modularity design for reconfigurable machines[J]. Mechanical Science and Technology, 2001, 20(6): 815~818. (in Chinese)
- 7 赵庆志,刘正坝,谷安. 电火花线切割机床可重构模块划分的理论和应用研究[J]. 机械工程学报,2005,41(9):175~179.
Zhao Qingzhi, Liu Zhengxun, Gu An. Theoretical and applicable research of modulus division for reconfigurable wire electrical discharge machine tools[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005,41(9):175~179. (in Chinese)
- 8 祁卓娅,王建正,韩新民. 模块柔性划分方法[J]. 机械工程学报,2007, 43(1):87~94.
Qi Zhuoya, Wang Jianzheng, Han Xinmin. Flexible module division method[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(1):87~94. (in Chinese)
- 9 Gu P, Sosal E S. Product modularization for life engineering[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 1999, 15(5): 387~401.
- 10 黄海鸿,刘志峰,王淑旺. 面向回收的产品模块化设计方法[J]. 农业机械学报,2006,37(2):144~149.
Huang Haihong, Liu Zhifeng, Wang Shuwang. Research on methodology of modular design for recycling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(2):144~149. (in Chinese)
- 11 贡智兵,李东波,史翔. 面向产品配置的模块形成及划分方法[J]. 机械工程学报,2007,43(11):160~167.
Gong Zhibing, Li Dongbo, Shi Xiang. Module generation and module partition method for product configuration[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(11):160~167. (in Chinese)
- 12 明加,朱才朝,冉险生. 基于特征线的复杂曲面重构技术[J]. 农业机械学报,2008,39(6):179~183.
Ming Jia, Zhu Caichao, Ran Xiansheng. Complex surface reconstruction based on feature line [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(6):179~183. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 190 页)

- 15 Colandairaj J, Irwin G W, Scanlon W G. Wireless networked control systems with QoS-based sampling [J]. IET Control Theory and Applications, 2007, 1(1):430~438.
- 16 Feng X, Zhao W H, Sun Y X, et al. Fuzzy logic control based QoS management in wireless sensor/actuator networks [J]. Sensors, 2007, 7(12):3 179~3 191.
- 17 蒋静坪. 计算机实时控制系统[M]. 杭州:浙江大学出版社,1992.
- 18 Feng X, Longhua M, Chen P, et al. Cross-layer adaptive feedback scheduling of wireless control systems [J]. Sensors, 2008, 8(12):4 265~4 281.
- 19 郭小华. 基于无线传感器网络的无线网络控制系统研究[D]. 杭州:浙江大学,2007.  
Guo Xiaohua. Study on wireless networked control system based on wireless sensor networks [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.