

多准则数控机床模块谱系聚类的划分方法研究

高羨明¹, 洪军¹, 刘瑞萍¹, 李虎¹, 李来¹, 孙波²

(1. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安;
2. 沈机集团昆明机床股份有限公司, 650203, 昆明)

摘要: 为了提高数控机床模块设计中的制造周期及性价比,通过求解数控机床功能模块、构建功能模块与结构模块的映射关系来划分数控机床模块. 基于自顶向下的模块划分原则,采用层次分析法构建相关度权重判断矩阵,综合考虑了功能元之间的功能、装配、空间、动力、设计、信息和工艺等多个相关准则,采用谱系聚类法对子功能进行了聚合. 应用公理化设计理论,采用功能-原理-结构相互对应的原则完成了功能模块与结构模块的映射,得到了模块的划分方案. 最后,以精密卧式机床为例,验证了该方法的有效性与可行性.

关键词: 数控机床;模块划分;谱系聚类

中图分类号: TG502.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)05-0131-06

Numerical Control Machine Tool Module Partition with Multi-Criteria Pedigree Clustering Method

GAO Xianming¹, HONG Jun¹, LIU Ruiping¹, LI Xiaohu¹, LI Lai¹, SUN Bo²

(1. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. Shenji Group Kunming Machine Tool Company Limited, Kunming 650203, China)

Abstract: For improving the manufacturing cycle and ratio of performance to price in the modular designing of numerical control(NC) machine, the modules of NC machine are divided by function module solving and setting up the relationship between the function module and the structural one. Based on the principle of on top-down module division the analytic hierarchy is adopted to construct the correlation degree weight judgment matrix, and the multiple correlation criterion of the function, assembly, space, dynamic, design information and technology in the function unit, are considered. The hierarchical clustering is chosen to poly the accessorial function. Following the mentality for function-principle-structure each corresponded, the mapping between the function module and the structure module is completed, then the module division proposal is obtained. The example of the precision horizontal machining center verifies the effectiveness and feasibility.

Keywords: numerical control machine tool; module division; hierarchical clustering

为了实现面向多样化需求产品的模块化设计,需要对产品通用配置模块的创建与划分进行研究^[1]. 作为模块化设计中重要的一环,近年来,国内外学者在模块划分方面做了许多研究工作. Erixon 等人^[2]提出了功能模块独立的 11 个条件,并以此作

为产品模块划分的通用原则. Lee 等人^[3]提出采用模糊层次分析法,在产品开发阶段为产品的模块选择提供决策支持方面的信息,并将此方法应用于实际设计中. Gu 等人^[4]提出面向产品全生命周期的产品模块划分方法,但是该方法需要构造大量的相关

矩阵,计算过程相当复杂,而且最终的划分结果过分依赖于产品设计师的工作感觉和经验.刘小鹏等人^[5]提出了机床模块划分的基本原则、影响因素与通用模型,归纳了模块创建过程.冯超^[6]提出了具有可重构性的并联机床模块划分原则,并根据划分原则将虚拟轴机床划分为驱动、控制、动平台、静平台和机架5个模块.齐尔麦等人^[7]采用面向对象的方法建立了功能、结构映射的机床产品求解模型.

然而,以上研究都没有全面考虑机床模块划分的影响因素.本文在多准则、多因素的条件下,对数控机床的模块划分进行了系统深入的研究,归纳出数控机床模块划分的一般流程,并以典型数控机床为例,对模块划分的实例应用进行了验证.

1 机床功能模块分解原则

对数控机床进行模块划分时,可根据用户需求进行,也可根据机床结构进行,但按功能进行分解是数控机床模块划分的条件与基础.这个过程主要是分析数控机床的总体功能,采用自顶向下逐层分解的方法进行功能分解,得到若干个彼此独立的功能元,直至将客户需求功能都划分到子功能模块为止.通过在昆明机床厂、秦川机床厂等5家单位的现场调研,给出机床功能模块的划分原则为:①数控机床各个模块应该彼此独立且结构完整;②机床模块的接口应方便安装和拆卸;③机床单元模块之间的相关性较弱,而独立模块内各功能元之间的相关性则较强;④模块分解的程度应适中,不能划分得过粗或过细;⑤模块划分要遵循机床单元模块的典型性和不同产品的通用性原则.但是,实际设计、生产中的模块化设计不能仅仅从单一的角度进行考虑,必须综合从多个角度进行考虑^[8-9].除此之外,对于数控机床模块划分的子功能单元,也有相应的独立条件:①模块子功能的通用性——某一系列数控机床都具有的子功能;②生产独立性——该子功能对应的机床模块是独立生产制造的;③装配便利性——该子功能对应的机床模块在装配的时候是整体进行的;④使用独立性——例如机床工作台,该模块可作为独立产品销售;⑤方便维修——该模块可方便地从整机中拆下来进行维修;⑥可回收性——生产该模块的材料是可以回收重新利用的;⑦强结构关系——该子功能对应的机床模块之间存在着非破坏不可彼此拆离开的关系.

如果对机床进行分解得到的机床子功能均满足上述7个条件中的任何一个,该机床的子功能便可

作为一个独立的机床模块.

2 机床功能模块求解

2.1 功能元相关度

机床功能模块的求解是以功能的分解为基础,综合考虑各个功能元彼此之间的功能、装配、空间、动力、设计、信息和工艺相关性等多个相关准则,采用谱系聚类法进行功能模块求解.为了对数控机床的功能元进行合并计算,引入相关度的概念.功能元 f_i 与另一个功能元 f_j 之间的相关度(即相关程度),用 r_{ij} 表示, $r_{ij} \in \{0, 1\}$, $r_{ij} \neq 0$.显然,当 $r_{ij} = 1$ 时, $r_{ij} = r_{ji}$.为了能够合理地将数控机床进行模块化分解,这里给出几个数控机床功能元相关性的定义.

如果 f_i 和 f_j 在功能、装配、空间、动力、设计、信息、工艺等方面存在关系,则称这2个功能元在功能、装配、空间、动力、设计、信息、工艺上是相关的.

在定义了功能、装配等7种相关性之后,需计算由数控机床功能分解得到的各个功能元彼此之间的相关度.设各个功能元彼此之间的相关性有 n 种,第 k 种相关性在计算相关度时的权重为 w_k ,则 f_i 与 f_j 之间的相关度为

$$r_{ij} = \sum_{k=1}^n w_k r_{ij}^k \quad (1)$$

$$r_{ij}^k = \begin{cases} 1, & f_i \text{ 与 } f_j \text{ 满足第 } k \text{ 种相关条件} \\ 0, & f_i \text{ 与 } f_j \text{ 不满足第 } k \text{ 种相关条件} \end{cases}$$

且

$$\sum_{k=1}^n w_k = 1 \quad (2)$$

根据对数控机床功能元相关性的定义,确定机床功能元之间有7种类型的相关性,即在式(2)中, $n=7$, $k \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$,此时的相关性分别为功能相关性、装配相关性、空间相关性、动力相关性、设计相关性、信息相关性、工艺相关性.在确定这7种相关性的影响系数之前,可采用层次分析法^[10](AHP)中的权重计算方法来得到权重.

2.2 相关度权重计算

为了计算数控机床各功能元相关性之间的相关度权重,将它们按特定的关系进行分组,形成一个有序的层次状结构的矩阵,通过对各个相关性两两进行比较,来确定每一层次中各个因素的重要性.具体的计算步骤如下.

(1)对指标体系中的某一层中的 m 项指标之间相对的重要性进行两两比较和判断,形成判断矩阵

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mm} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $a_{ij}(i,j=1,2,\cdots,m)$ 是 2 个指标进行比较的相对重要度.对重要度按 1~9 赋值(称为重要性标度值,如表 1 所示).

表 1 重要性标度值定义表

标度	含义
1	2 个元素相比,同样重要
3	2 个元素相比,前者稍微重要
5	2 个元素相比,前者明显重要于后者
7	2 个元素相比,前者强烈重要于后者
9	2 个元素相比,前者极端重要于后者
2,4,6,8	相邻两判断的中间值
倒数	若 i,j 的重要性之比为 a_{ij} ,则 j 与 i 的重要性之比为 $1/a_{ij}$

(2)计算出 $\mathbf{A}$ 的特征向量 $\mathbf{d}_i$,并根据 $\mathbf{d}_i$ 计算得到各个指标的权重值

$$\mathbf{d}_i = \left(\prod_{j=1}^m a_{ij}\right)^{1/m}, i = 1,2,3,\cdots,m \quad (4)$$

$$w_i = \mathbf{d}_i / \sum_{i=1}^m \mathbf{d}_i \quad (5)$$

(3)进行一致性检验,首先计算 $\mathbf{A}$ 的最大特征根

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m a_{ij} w_j / w_i \quad (6)$$

其次,计算一致性指标

$$I_C = (\lambda_{\max} - m) / (m - 1) \quad (7)$$

I_C 越大,矩阵的一致性越差.最后,需要对一致性比率 R_C 进行计算并验证其合理性. $R_C = I_C / I_R$,其中 I_R 为平均随机一致性指标,取值如表 2 所示.

在 AHP 算法中, $R_C=0.1$ 为公认的一致性标准,即当 $R_C<0.1$ 时,可以认为判断矩阵的一致性结果是可以接受的;当 $R_C\geq 0.1$ 时,则需要通过调整加权系数对判断矩阵作适当的修正.

2.3 谱系聚类计算

结合式(1)计算出数控机床各功能元之间的相

关度,得到相关矩阵

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & 1 & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

对 $\mathbf{R}$ 采用谱系聚类的方法进行子功能聚合,为了计算方便,以 i,j 分别表示 f_i,f_j ,以 l_{ij} 表示 i 与 j 之间的距离 $l_{ij}(f_i,f_j)$. G_p 和 G_q 分别表示 2 个功能元的聚合,它们分别含有 m_p,m_q 个子功能元.将 G_p 与 G_q 之间的距离记为 $L_{pq},L_{pq}=\min\{l_{ij}\},i\in G_p,j\in G_q$,用功能元之间的最短距离作为 G_p,G_q 的距离.

将 $\mathbf{R}$ 的元素进行变换得

$$l_{ij} = 1 - r_{ij}, i, j \in \{1,2,\cdots,n\} \quad (9)$$

可得距离矩阵

$$\mathbf{L}_0 = \begin{bmatrix} 0 & l_{12} & \cdots & l_{1m} \\ l_{21} & 0 & \cdots & l_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ l_{m1} & l_{m2} & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

选择 $\mathbf{L}_0$ 中非对角线上的最小元素,设这个元素为 l_{pq} ,这时 $l_p=\{f_p\},l_q=\{f_q\}$.令 $G_r=G_p\cup G_q$,在 $\mathbf{L}_0$ 中消去 G_p,G_q 所对应的行和列,同时加入由新类 G_r 和剩下的未被聚合的类之间的最小距离组成的新的行和列,形成一个新 $m-1$ 阶矩阵 $\mathbf{L}_1$.如此反复,直到 m 个功能元聚合成一个功能元.

机床单元模块聚合的过程及结果如图 1 所示,图中相互交叉的线条代表它们之间的聚类关系.在作具体的聚类图时,应该在聚类关系附近标明聚类的数值,以方便查看各个功能元之间的疏近关系.

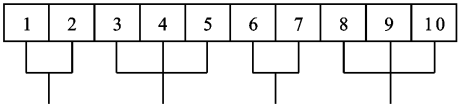


图 1 功能元的聚类过程

3 机床功能模块到结构模块的映射

功能与结构的相互映射贯穿了数控机床模块划分的整个过程,功能模块划分的最终结果是一个个彼此独立又相互存在细微关联的概念模块.将功能

表 2 15 阶正交反矩阵计算 1 000 次得到的平均随机一致性指标

矩阵阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
I_R	0.00	0.00	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46	1.49	1.52	1.54	1.56	1.58	1.59

模块进一步转化为实体的结构模块是功能模块到结构模块映射的过程. 只有将功能模块转变成可视化的结构模块,对数控机床进行的模块划分才有意义;只有将功能模块转化成结构模块后才能对其结构进行分析,判断设计的合理性,并对模块进行变型设计. 单纯的功能模块是无法组成一台数控机床的,只有将功能模块转化成结构模块后,特定的一些结构模块通过彼此之间的接口连接在一起,才能形成一台功能完整的数控机床.

数控机床功能模块到结构模块的映射过程可按照公理化设计的理论,采用功能—原理—结构相互对应的思路来完成. 通常一个功能对应着多个可实现的机构,各个机构由于其实现功能原理的不同,所以结构也不尽相同. 例如,在数控机床模块划分结束后,有一个功能模块要实现进给功能,原理就是将回转运动转变成往复直线运动,而能够完成这一功能的有丝杠螺母副、齿轮齿条、曲柄滑块、凸轮等几种结构,但在数控机床的实际设计中,通常只采用丝杠螺母副和齿轮齿条副形式的进给结构. 对于行程在 3.5 m 以内的,采用丝杠螺母副结构,对于行程大于 3.5 m 的,则采用齿轮齿条副结构. 如果对模块划分结果中的某些功能模块不能找到与之对应的结构模块,就需要根据其实现原理重新设计出新的结构模块来满足需求. 在进行功能分解时,原则上也应该和实现该功能的机构密切联系,交错进行,而不是一次性完成映射的,因为功能的分解是由实现其功能的结构所决定的.

4 实例应用

为了验证数控机床模块划分方法的可靠性和有效性,以沈阳机床集团的精密卧式加工中心(见图 2)为例,对其进行模块划分.

4.1 总体功能分解

将精密卧式加工中心的总体功能按照自顶向下逐层分解的方法,先分为运动功能、辅助功能、附属功能 3 个一级功能,然后继续向下分解为自动换刀,数控系统, X、Y、Z、B、W 向主运动,以及冷却、润滑和排屑等二级功能模块,并可继续将各个方向的主运动分解为支撑、驱动、传动、进给、检测和防护等三级子功能模块. 整个功能分解过程如图 3 所示.

4.2 功能元编号

在完成总体功能分解后,采用谱系聚类法对功能元进行聚合. 为了方便进行功能元的聚合,将对各个功能元依次进行编号,如表 3 所示.

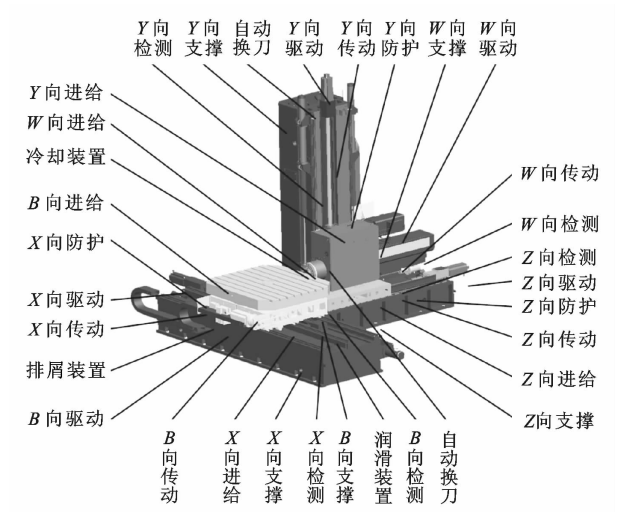


图 2 精密卧式加工中心示意图

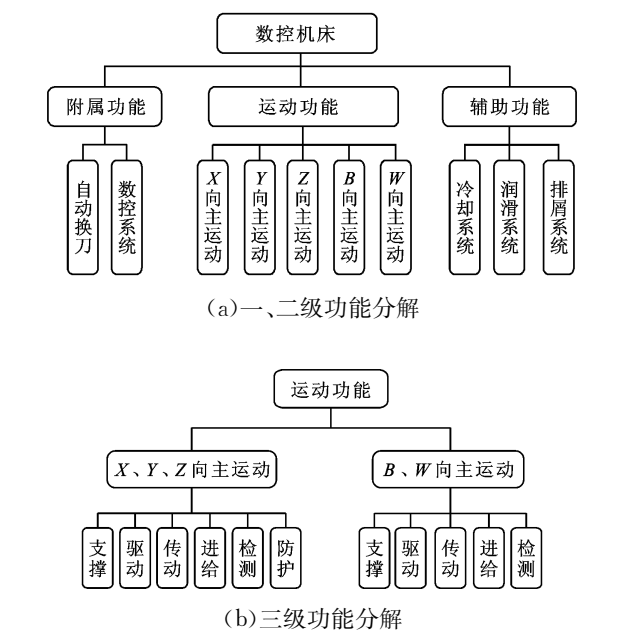


图 3 精密卧式加工中心功能分解图

表 3 功能元编号表

编号	功能名称	编号	功能名称	编号	功能名称
1	X 向支撑	12	Y 向防护	23	B 向检测
2	X 向驱动	13	Z 向支撑	24	W 向支撑
3	X 向传动	14	Z 向驱动	25	W 向驱动
4	X 向进给	15	Z 向传动	26	W 向传动
5	X 向检测	16	Z 向进给	27	W 向进给
6	X 向防护	17	Z 向检测	28	W 向检测
7	Y 向支撑	18	Z 向防护	29	冷却装置
8	Y 向驱动	19	B 向支撑	30	润滑装置
9	Y 向传动	20	B 向驱动	31	排屑装置
10	Y 向进给	21	B 向传动	32	自动换刀
11	Y 向检测	22	B 向进给	33	数控系统

4.3 权重计算

按照表 1,对照表中的标度数据,采用层次分析法中权重的计算方法,计算出功能相关度的各个权重. 对各项指标之间的相对重要性的大小进行两两比较与判断,形成判断矩阵

$$A =$$

1	2	3	5	7	8	9
0.5	1	2	3	5	8	9
0.333 3	0.5	1	2	4	7	8
0.2	0.333 3	0.5	1	2	3	4
0.142 9	0.2	0.25	0.5	1	2	3
0.125	0.125	0.142 9	0.333 3	0.5	1	2
0.111 1	0.111 1	0.125	0.25	0.333 3	0.5	1

$$L_0 =$$

0	1	0.745 9	0.745 9	0.745 9	...	1	1	1	1	1
1	0	0.284 7	0.538 8	1	...	1	1	1	1	1
0.745 9	0.284 7	0	0.284 7	1	...	1	1	1	1	1
0.745 9	0.538 8	0.284 7	0	0.826 5	...	1	1	1	1	1
0.745 9	1	1	0.826 5	0	...	1	1	1	1	1
						:	:	:	:	:
							0	1	1	1
:	:	:	:	:	:		1	0	1	1
							1	1	0	1
							1	1	1	0
1	1	1	1	1	...	1	1	1	1	0

由 L_0 可知, $l_{23}=0.284 7$ 为最小值,故将 $G_2、G_3$ 在 $0.284 7$ 水平上合并成一个新类 $G_{11}=\{2,3\}$,并计算 G_{11} 与 $G_1,G_4,G_5,\cdots,G_{33}$ 之间的最短距离,得到 L_1 . 如此反复,直到所有的功能元聚合为一个功能,并且结构划分合理.

4.5 模块聚类图

根据谱系聚类的计算过程,将所有功能元的聚合用聚类图的形式表现出来,如图 4 所示. 由图 4 可知,经谱系聚类后,数控机床模块的划分结果为:模块 2、3、4 组合,作为 X 向进给模块;模块 8、9、10 组合,作为 Y 向进给模块;模块 14、15、16 组合,作为 Z 向进给模块;模块 20、21、22 组合,作为 B 向进给模块;模块 25、26、27 组合,作为 W 向进给模块. 模块

进一步可得到判断矩阵的最大特征根

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m a_{ij} w_j / w_i = 7.179 2$$

计算得 $I_C=0.029 9$,结合表 2 中的数据计算出 $R_C=I_C/I_R=0.022 0<0.1$,由计算结果可以判断出矩阵的一致性是可以接受的.

4.4 功能元聚合

对于功能元聚合的计算过程,选择采用谱系聚类法进行功能元聚合. 首先,需要根据所计算出的各个 w_k 依次计算出 33 个功能元彼此的相关度 r_{ij} . 然后,根据式(9)、式(10)计算出

1、5、6、7、11、12、13、17、18、19、23、24、28、29、30、31、32、33 分别作为独立模块.

4.6 功能模块到结构模块的映射

功能模块划分结束后,根据结构模块的特点将功能模块划分结果进行适当的调整,得到更合理的模块划分方案,如表 4 所示.

5 结 论

本文对数控机床模块划分的方法进行了研究,利用层次分析法和谱系聚类法对数控机床进行了功能分解和功能模块求解. 采用公理化设计的思想对数控机床的功能模块到结构模块进行了映射,并按照此方法对精密卧式机床进行了模块划分,实验

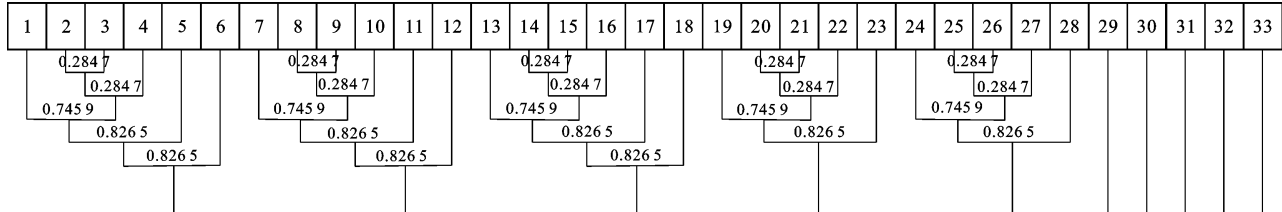


图 4 精密卧式加工中心聚类图

表 4 功能模块与结构模块映射表

功能模块	结构模块
X 向支撑	X 床身
X 向防护	X 床身护板
Y 向支撑	立柱加滑座
Y 向防护	立柱护板
Z 向支撑	Y 向床身
Z 向防护	Z 床身护板
B 向支撑 B 向进给功能	工作台
W 向支撑 W 向进给功能	主轴单元
X 向进给	丝杠螺母
Y 向进给	丝杠螺母
Z 向进给	齿轮齿条
X 向位置检测	
Y 向位置检测	
Z 向位置检测	光栅尺
B 向位置检测	
W 向位置检测	
冷却	冷却系统
润滑	润滑系统
排屑	排屑系统
自动换刀	刀库、自动换刀装置
数控	数控操作系统

结果表明本文所提出的方法是有效可行的。

参考文献：

[1] 童时中. 模块化原理设计方法及应用 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2000: 10-11.

[2] ENIXON G, VON YXKULL A, AMSTROM A. Modularity: the basis for product and factory reengineering

[J]. Annals of the CIRP, 1996, 45(1): 1-6.

[3] LEE W B, LAY H, LIU Z Z, et al. A fuzzy analytic hierarchy process approach in modular product design [J]. Expert Systems, 2001, 18(1): 32-41.

[4] GU P, SOSALE S. Product modularization for life cycle engineering [J]. Robotics and Practice, 1999(15): 387-401.

[5] 刘小鹏, 张卫国, 钟毅芳. 机床模块化设计中的模块创建及应用 [J]. 华中理工大学学报, 2000, 28(5): 16-17.

LIU Xiaopeng, ZHANG Weiguo, ZHONG Yifang. The creation of machine tool module in modularization [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2000, 28(5): 16-17.

[6] 冯超. 基于虚拟样机的虚拟轴机床设计研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2002.

[7] 齐尔麦, 徐燕申, 谢艳. 模块化数控机床概念设计的研究 [J]. 组合机床与数控化加工技术, 2003(1): 15-18.

QI Ermai, XU Yanshen, XIE Yan. Research on the conceptual design of modular NC machine tool [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2003(1): 15-18.

[8] 宗鸣摘, 刘旭东, 李湘媛. 产品模块化设计中模块划分的多角度、分级特性讨论 [J]. CAD/CMA 与制造业信息化, 2003(1): 50-52.

ZONG Mingdi, LIU Xudong, LI Xiangyuan. A multi-perspective hierarchical division approach for a product in its modular design [J]. Digital Manufacturing Industry, 2003(1): 50-52.

[9] 姜慧, 徐燕中, 谢艳. 机械产品模块划分方法的研究 [J]. 制造技术与机床, 1999(3): 7-9.

JIANG Hui, XU Yanzhong, XIE Yan. Research on modular dividing method of machinery products [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 1999(3): 7-9.

[10] 王莲芬. 层次分析法 [M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1982: 18-24.

(编辑 管咏梅)