DOI: 10.3901/JME.2021.03.077

变双曲圆弧齿线圆柱齿轮专用机床 的模块化设计*

张海燕 侯力 罗岚 梁爽 冷松
(四川大学机械工程学院 成都 610065)

摘要: 变双曲圆弧齿线圆柱齿轮具有小型、重载、高可靠性等特点, 应用前景广阔。为推广这种新型传动的应用, 开展针对变双曲圆弧齿线圆柱齿轮专用机床的模块化设计方法的研究。根据此专用机床的功能需求, 以设计概念为主线, 以功能-原理-行为-结构设计过程模型为映射及相关性分析原则获得系统零部件的综合相关关系矩阵, 在此基础上应用间隙统计和自组织神经网络映射相结合的方法对系统进行聚类, 得到多种模块划分方案。最后, 基于逼近理想解排序法对模块划分方案进行了优选, 得到了最理想的划分方案。对变双曲圆弧齿线圆柱齿轮专用机床的模块化方法的研究能够实现此机床的快速设计, 为机床的可重构奠定了基础。

关键词: 齿轮机床; 新型传动; 模块化设计; 可重构机床

中图分类号: TP391

Modular Design for Machine Tools of Variable Hyperbolic Circular-arc-tooth-trace Cylindrical Gear

ZHANG Haiyan HOU Li LUO Lan LIANG Shuang LENG Song
(School of Mechanical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065)

Abstract: Variable hyperbolic circular-arc-tooth-trace cylindrical gear with the features of small size, heavy load and high reliability and broad application prospects. The application of new type of transmission is to be extended. A modular design method for the mechanical system of the variable hyperbolic circular cylindrical gear special machine tools is developed. According to the functional requirements of this special machine tools, the comprehensive correlation matrix of system parts is obtained by taking the design concept as the main line and the function-principle-behavior-structure design process model as the principle of mapping and correlation analysis. On the basis of this, the system is divided into modules by the method of gap static and self-organizing map(SOM), and a variety of modules are divided. Finally, based on the technique for order preference by similarity to an ideal solution(TOPSIS) method, the modular partition solution is evaluated and the most suitable partition scheme is obtained. The rapid design and reconfiguration of the machine tools are realized by the research of modular partition method of the special machine tools for variable hyperbolic circular-arc-tooth-trace cylindrical gear.

Key words: gear machine tools; new transmission; modular design; reconfigurable machine tools

0 前言

变双曲圆弧齿线圆柱齿轮传动具有啮合性能好、重合系数大、承载力大、传动效率高、无附加轴向力、使用寿命长、平稳性高和噪声低等优点。但是

这种新型传动在工业化应用方面明显存在不足, 其最重要的原因是变双曲圆弧齿线圆柱齿轮的制造没有相关的专用机床, 在高档通用机床上加工成本很高, 在普通机床上加工, 误差较大, 并且机床调整等工艺复杂不易推广。目前尚未有变双曲圆弧齿线圆柱齿轮专用机床, 因此专用机床的研制成为这种新型传动工业化应用的瓶颈。

模块化设计方法(Modular design method, MDM)

* 国家自然科学基金资助项目(51875370)。20200329 收到初稿, 20201201 收到修改稿

是实现产品快速设计的有效手段,合理的模块划分可以提高设计效率,有效解决产品质量与制造周期及成本之间的矛盾^[1]。通过选择和组合功能模块,重构系统功能响应快速设计来应对变化的市场需求^[2],将变双曲圆弧齿线圆柱齿轮的创新真正转化成相应的生产力。

近二十年来,研究者在各类机床的模块化设计方向进行了大量研究。在国外,模块化设计表现突出的是德国的 Bremer Vulran 集团 Dorries Scharmann 中型卧式加工中心。它可以在特定的条件下与其它公司共享机床模块^[3]。美国康涅狄格州 Shelton 的 Index 公司开发了一种模块化车削中心,可以由用户来决定需要哪些功能,除去一些冗余功能^[4]。在国内,黄华等^[5]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。王鹏家等^[6]基于谱系聚类法进行模块划分,采用 VB 及 MATLAB 开发了计算机辅助数控机床模块划分系统。高美明等^[7]通过构建功能模块与结构模块的映射关系,应用谱系聚类法对数控机床进行了模块划分。

当前对变双曲圆弧齿线圆柱齿轮专用机床的研究缺乏完整的机床模块划分及评价系统,本文在四川大学赵斐等^[8]提出的利用旋转刀盘双刃铣削变双曲圆弧齿线圆柱齿轮的方法的基础上,以设计概念为主线,以功能-原理-行为-结构的设计过程模型为映射及相关性分析原则,获得系统内部零部件的综合相关关系矩阵,在此基础上采用间隙统计和自组织特征神经网络映射相结合的算法对这类专用机床进行了模块划分,并应用最优理想解法对划分方案进行了优选,为实现机床的快速响应设计和可重构奠定了基础。

1 基于 F-P-B-S 的模块划分

产品的功能要求来自于市场需求。将功能要求转化成具体结构的过程就是产品设计过程。德国学者 PAHL 和 BEITZ^[9]于 20 世纪 70 年代提出将产品设计过程划分为四个阶段,即明确的任务阶段、概念设计阶段、具体化设计阶段和详细设计阶段。概念设计阶段就是根据功能要求寻求合适的结构的过程。功能是对产品需求用简洁、准确的语言具体化和科学化描述的过程;结构是功能实现的载体,具体来说是由构成复杂产品系统的组件或零部件。

在这个映射过程中加入原理和行为两个设计要素,增强了功能到结构映射的可行性。原理是实现产品功能的技术途径;行为是功能的具体体现,由原理产生。这样可以清晰地显示出实现产品功能的结构所依据的原理以及所采用的行为方式,多层次、全方面的映射迭代过程使模块划分更系统、更有效。

1.1 基于功能(Function)—原理(Principle)—行为(Behavior)—结构(Structure) (F-P-B-S)的产品设计过程

将产品设计要求中的总功能进行分解,继而映射到实现的原理上,根据原理分析行为的具体实现,最后得到载体结构。基于 F-P-B-S 的产品设计过程见图 1。

图 1 基于 F-P-B-S 的产品设计过程

由此,可以通过对产品的需求进行功能、原理、行为、结构的映射迭代分析来建立模块划分的层次模型,获得产品零部件结构。

1.2 建立基于 F-P-B-S 的零部件综合相关关系矩阵

模块划分力求达到模块内具有高内聚度、模块间具有低耦合度^[10]。模块划分的前提条件是产品零部件间存在一定的相关性^[11]。零部件相关性是指零部件之间存在一定的关系,当某个零部件的变化会引起另一个零部件的变化时,则称这两个零部件相关;否则,不相关。

根据相关关系强度不同,分为“强、中、弱、无”四个强度级别。关系强度是一个模糊量,必须进行量化。量化值如表 1 所示。

表 1 零部件相关关系强度

关系强度	量化值
强	1
中	0.5~0.9
弱	0.1~0.4
无	0

本文从产品设计的映射迭代过程中筛选出功能相关,原理相关,行为相关和结构相关四个相关要素分别进行分析作为模块划分的依据。四个要素的相关性定义如表 2 所示。

表 2 相关性定义

相关要素	关系强度	相关描述
功能相关	强	共同实现某功能,不可或缺
	中	功能协作关系较强
	弱	功能协作关系较弱
	无	功能不相关
原理相关	强	相同原理
	中	同类原理□□
	弱	原理具有一定的联系□
	无	原理不同
行为相关	强	共同实现同一行为,缺一不可□
	中	辅助实现某个行为,协作关系较强□□
	弱	辅助实现某个行为,协作关系较弱□□
	无	行为不相关
结构相关	强	永久连接,不可拆分/具有严格的形位关系
	中	较难拆卸,如铆钉连接/形位关系要求中等
	弱	较易拆卸,如螺纹连接/形位关系要求低
	无	无连接关系/无形位关系

对零部件间的四个相关要素的相关性根据上述量化方法进行评定和量化,构建零部件单个要素相关矩阵 $\mathbf{R}_k = (r_{ij}^k)_{n \times n}$, 其矩阵元素 r_{ij}^k ($i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n$) 为零部件 x_i 和 x_j 关于相关要素 k 的相关度, $k=1, 2, \dots, m, m=4$, 分别代表相关要素功能、原理、行为、结构, n 为零部件的数量。

将各子相关矩阵构建 n 个零部件的综合相关矩阵, 构建公式如下

$$\mathbf{R} = \sum_{k=1}^m \omega_k \mathbf{R}_k = (r_{ij})_{n \times n} \quad i, j \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (1)$$

式中, $\mathbf{R}$ 为综合相关矩阵, 其阶数为 n ; ω_k 为第 k

个相关要素的权重, 且满足 $\sum_{k=1}^m \omega_k = 1$, 通过标准 AHP 法来确定各相关要素的权重; r_{ij} 为第 i 个与第 j 个零部件之间的综合相关系数。

通过多个子相关矩阵构成综合相关矩阵的主要优势是从不同的角度考虑零部件之间的相关性, 从而使产品的模块划分更加实用有效^[12]。

2 基于间隙统计和自组织映射网络聚类算法的产品模块划分

间隙统计法(Gap statistic)由 TIBSHIRANI 等人提出, 用以解决聚类问题确定所判定类的数目。自组织映射(Self-organizing map, SOM)^[13]算法是基于无监督学习算法的一种神经网络, 通过对相似数据智能挖掘, 把相似数据划分为一个聚类, 广泛应用到故障诊断、数据挖掘等领域^[14-15]。

本文对 Gap statistic 和 SOM 算法进行了综合并将其应用于复杂产品系统的模块划分过程。

2.1 间隙统计法

假设一个聚类样本有 n 个观测点, 样本中的每个观测点可以用 $\mathbf{X}_i$ 来表示, 其中, $i=1, 2, \dots, n$ 。观测点 $\mathbf{X}_i$ 还可以表示成矢量 $[X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{ip}]$ 。其中, $j=1, 2, \dots, p$, 即每个观测点有 p 个维度。令 $d_{ii'}$ 表示观测点 i 到 i' 的距离, 这里的距离使用的是应用广泛的欧氏距离, 即

$$d_{ii'} = \sqrt{\sum_{j=1}^p (X_{ij} - X_{i'j})^2} \quad (2)$$

我们将数据分为 k 类, $C_1, C_2, \dots, C_k$, 在此 C_r 表示观测点属于 r 类, n_r 表示聚类 C_r 的观测点的个数。则第 r 类中任两点的距离和为

$$D_r = \sum_{i, i' \in C_r} d_{ii'} \quad (3)$$

样本内所有观测点的距离和为 W_k , 标准化后为

$$W_k = \sum_{r=1}^k \frac{1}{2n_r} D_r \quad (4)$$

则 $GAP(k)$ 为

$$GAP(k) = E_n^*(\lg W_k) - \lg W_k \quad (5)$$

这里 $E_n^*(\lg W_k)$ 指的是对参考数据求期望值。参考数据通常通过蒙特卡洛模拟产生, 在样本所在的

矩形区域中(高维的话就是立方体区域)按照均匀分布随机地产生和原始样本数一样多的随机样本。通过对平均分布的参考数据集的期望值 $E_n^*(\lg W_k)$ 和观测数据集的 $\lg W_k$ 进行比较,使得 $GAP(k)$ 最大的 k 值为最优聚类数。

2.2 SOM 网络模型的基本原理

SOM 是由输入层和竞争层(输出层)构成的双层网络。矢量 $\mathbf{X} = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 是一个 n 维矢量,用来表示输入层样本集^[16]。输出层由 m 个神经元组成一维或二维平面网络拓扑结构,输入层和输出层神经元个数不设限,视具体情况而定^[17]。SOM 的网络拓扑结构如图 2。

图 2 SOM 网络拓扑结构

权重矢量最接近输入矢量的神经元则为获胜神经元,根据式(6)对获胜神经元及其邻域范围内的神经元的权重矢量进行调整^[18]。当运算次数达到设定的迭代次数或学习率衰减为 0 时,训练结束^[18-19]。

$$\begin{cases} W_j(t+1) = W_j(t) + \eta [X_i(t) - W_j(t)] & j \in N_{j^*}(t) \\ W_j(t+1) = W_j(t) & j \notin N_{j^*}(t) \end{cases} \quad (6)$$

式中, $X_i(t)$ 为输入矢量; $W_j(t)$ 为权重矢量; $N_{j^*}(t)$ 为以获胜神经元 j^* 为中心的优胜邻域; $0 < \eta \leq 1$, 且随着学习的进展而减小,即调整的程度越来越小,逐渐趋于聚类中心。

SOM 算法具有无监督^[20]、优雅的拓扑关系图、可视化程度高等特性,是一种优良的聚类工具^[21]。

2.3 基于 Gap Statistic 和 SOM 的产品零部件综合相关矩阵的聚类划分

根据 Gap Statistic 的仿真计算结果确定 SOM 的网络结构,将这两种算法进行有效结合,提高了聚类划分的可靠性。在此基础上构建了基于产品零部件综合相关矩阵的聚类划分方法,划分流程如图 3。

图 3 基于 Gap Statistic 和 SOM 的产品聚类划分流程

3 模块划分方案评价

多种模块划分方案可通过调整聚类参数获得多种聚类结果来实现^[22]。模块划分方案的优劣评价是通过一定的评价指标进行优选的过程^[23]。逼近于理想解的排序方法(Technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS)是 HWANG 和 YOON 于 1981 年首次提出,也称为理想解法,是一种有效的多指标评价方法。应用 TOPSIS 法进行模块划分方案评价是使最终的模块划分方案最接近于最理想的模块划分方案,并尽量远离最不理想的划分方案。

本文把模块内平均内聚度 C_{01} 和模块间平均耦合度 C_{02} 作为评价指标。模块内平均内聚度和模块间平均耦合度同等重要,根据模块划分的基本原则,块内关联大,块间关联小,即 C_{01} 越大越好, C_{02} 越小越好^[24]。

模块内聚度是指模块内部零部件关联的紧密程度,假设产品总共由 m 个模块组成,第 k 个模块中的零件数为 n_k , $r(p, q)$ 表示零件 p 和 q 的综合关

联度, 用 C_{O1}^k 表示该模块的内聚度如下

$$C_{O1}^k = \sum_{p=1}^{n_k} \sum_{q=1, q \neq p}^{n_k} r(p, q) / n_k^2 \quad (7)$$

用 C_{O1} 表示平均内聚度如下

$$C_{O1} = \sum_{k=1}^m C_{O1}^k = \left[\sum_{k=1}^m \sum_{p=1}^{n_k} \sum_{q=1, q \neq p}^{n_k} r(p, q) / n_k^2 \right] / m \quad (8)$$

耦合度是指模块间关联程度的度量, 假设 n_t 是第 t 个模块中的零件数, p 是模块 k 内的任意元素, w 是模块 t 内的任意元素。则模块 m_k 和 m_t 之间的耦合度可用式(9)表示

$$C_{O2}^{kt} = \frac{\sum_{w=1}^{n_t} \sum_{p=1}^{n_k} r(p, w) + \sum_{p=1}^{n_k} \sum_{w=1}^{n_t} r(w, p)}{2n_k n_t} \quad (9)$$

$\sum_{w=1}^{n_t} \sum_{p=1}^{n_k} r(p, w)$ 是模块 m_k 对模块 m_t 的支配度,

$\sum_{p=1}^{n_k} \sum_{w=1}^{n_t} r(w, p)$ 是模块 m_k 对模块 m_t 的被支配度。模块间的支配度和被支配度就构成了模块间的耦合度。 m 个模块共有 $m(m-1)/2$ 个两两组合, 故模块间平均耦合度为

$$C_{O2} = \frac{\sum_{k=1}^{m-1} \sum_{t=k+1}^m C_{O2}^{kt}}{m(m-1)/2} \quad (10)$$

从上述结果中选取 C_{O1} 和 C_{O2} 最大值和最小值, 分别记为

$$\begin{aligned} C_{O1}^* &= \max C_{O1} & C_{O1}^0 &= \min C_{O1} \\ C_{O2}^* &= \min C_{O2} & C_{O2}^0 &= \max C_{O2} \end{aligned} \quad (11)$$

由此, 可以获得正负解, 即最理想解和最不理想解, 如下

$$\begin{aligned} A+ &= \{C_{O1}^*, C_{O2}^*\} \\ A- &= \{C_{O1}^0, C_{O2}^0\} \end{aligned} \quad (12)$$

计算各个模块划分方案的 C_{O1}^i 和 C_{O2}^i 与最理想解 $A+$ 的距离 s_i^* 和最不理想解 $A-$ 的距离 s_i^0 , 这里 i 是模块划分方案的个数, $i=1, 2, \dots, z$

$$s_i^* = \sqrt{(C_{O1}^i - C_{O1}^*)^2 + (C_{O2}^i - C_{O2}^*)^2}$$

$$s_i^0 = \sqrt{(C_{O1}^i - C_{O1}^0)^2 + (C_{O2}^i - C_{O2}^0)^2} \quad (13)$$

最后根据 s_i^* 和 s_i^0 计算各个模块划分方案与最理想方案的贴合度 ρ [25]。

$$\rho_i = \frac{s_i^0}{s_i^* + s_i^0} \quad (14)$$

显然, ρ 越大对应的模块划分方案最接近理想方案, 是模块划分结果中的最优方案。

4 变双曲圆弧齿线圆柱齿轮专用机床模块化分析

根据本文提出的模块划分及评价方法, 针对变双曲圆弧齿线圆柱齿轮专用机床的设计需求对机床展开模块化分析。

4.1 基于 F-P-B-S 的机床零部件综合相关矩阵

按照图 1 的基于 F-P-B-S 的产品设计过程对机床进行分析, 可以实现机床功能、原理、行为、结构要素的纵向设计分解。经过逐层迭代分解, 得到变双曲圆弧齿线圆柱齿轮传动专用机床的结构, 结构及零部件编号见图 4。

其中 12 大刀盘结构是此专用机床特有的结构。加工变双曲圆弧齿线圆柱齿轮的大刀盘安装在机床主轴上并绕自身轴线按照既定转速转动, 刀具固定在刀盘上随刀盘一起转动, 在加工过程中, 齿坯除绕自身轴线转动外还沿水平方向按一定速度进给, 与刀具间形成紧密的展成运动, 加工时刀具同时切出齿面的凹凸面。

大刀盘与齿坯的空间运动严格按照齿轮成形原理进行设计。采用此专用机床可以有效地减少机床的冗余, 大幅度降低加工成本, 提高加工精度和加工效率。

分析此机床零部件之间功能、原理、行为和结构这四个相关要素的相关性并进行量化, 构建相应的子相关矩阵。用标准 AHP 法计算得到四个相关要素的权重分别为: $\omega_1=0.4658$, $\omega_2=0.096$, $\omega_3=0.156$, $\omega_4=0.2822$ 。运用式(1)计算机床零部件的综合相关系数 r_{ij} , 构建零部件的综合相关矩阵 R , 对 R 进行归一化后结果如下。

图4 变双曲圆弧齿线圆柱齿轮专用机床功能结构图

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0.904 & 0.904 & 0.056 & 0.096 & \cdots & 0.047 & 0 & 0.141 & 0 \\ 0.904 & 1 & 0.904 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.904 & 0.904 & 1 & 0.299 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.056 & 0 & 0.299 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.096 & 0 & 0 & 0 & 1 & \cdots & 0.047 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0.187 & 1 & 0.466 & 0 \\ 0.141 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0.187 & 0.466 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0.187 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

4.2 基于 Gap Statistic 和 SOM 的机床模块划分

本文将 Gap Statistic 与 SOM 算法相结合, 这种方法可以提高神经网络辨识数据的能力, 提高模块划分的可靠性。

首先, 将归一化的零部件综合相关矩阵 R 作为 Gap Statistic 算法的样本数据, 通过 MATLAB 计算可以得到不同聚类个数的 GAP 值, 并得出最优聚类

个数。

图5给出了样本数据的分布图。通过图6得出: Gap Statistic 算法给出了不同聚类数下的 GAP 值, 并将首次出现的正峰值对应的类别数认定为最优聚类数。即机床的最优聚类数为 3。由于 Gap Statistic 算法得到的最优聚类数与观测值的分布有一定的关系, 导致计算结果不一定是理想的聚类数。因此,

我们将与最优聚类数 3 对应的 GAP 值相近的类别数都作为参考。由此聚类数分别设置为 3, 5, 6, 8。

图 5 样本数据分布图

图 6 GAP 值和最优聚类数

在 SOM 网络中, 聚类数即获胜神经元的个数。将零部件综合相关矩阵 R 作为 SOM 网络的输入矩阵 P , 归一化后, 按行输入, 即输入层神经元个数为 25, 维度为 25。随机初始化权值矢量。映射层的神经元结构随聚类数不同进行调整, 接下来对不同的网络分别进行训练, 步数分别设置为 100, 600, 1 600, 2 600, 图 7 是聚类数为 8 时 SOM 网络的不同步数时的权值矢量的前三维权值分布。

图 7 不同训练步数的权值分布

从图 7a、图 7b 和图 7c 看出, 神经元的分布随着训练步数的增多更加合理, 从图 7c 和图 7d 看出, 权值分布比较相似, 这时再增加训练步数对网络性能的改变就不明显了。但此时的权值分布只显示了前三维数据, 对于更多维数的数据, 则不能同时可视化。这时用 SOM Neighbor Distances 来显示相邻神经元的距离, 如图 8 所示。

从图 9a 和图 9b 看出, 内圈六边形的大小随属于此聚类块的神经元数量的多少而变, 即内圈六边

形越大属于该聚类块的神经元越多。

图 8 不同聚类数的相邻神经元距离

图 9 不同聚类数包含的零件数

划分为同一模块的零部件在下表中输出的数字是相同的, 4 种聚类结果见表 3。

表 3 变双曲圆弧齿线圆柱齿轮专用机床聚类结果

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
聚类数 3	2	2	2	3	1	1	1	3	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2
聚类数 5	3	3	3	5	4	4	4	5	2	2	2	1	1	1	3	5	5	5	3	3	3	3	3	3	3
聚类数 6	5	5	5	4	6	6	6	4	1	1	1	2	2	2	3	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3
聚类数 8	4	4	4	8	7	7	7	8	2	2	2	1	1	1	5	8	8	8	5	6	5	5	3	3	5

4.3 机床模块划分结果评价

在获得机床多个模块划分方案之后, 采用 TOPSIS 法进行划分方案的优选, 根据式(7)~(12)计算所有模块划分方案的平均内聚度 C_{o1}^i 和模块间平均耦合度 C_{o2}^i , 从中选出正负理想解。计算结果如表 4 所示。

表 4 各模块划分方案的平均内聚度和平均耦合度

序号	划分方案	C_{o1}^i	C_{o2}^i
1	聚类数为 3	0.336	0.017 8
2	聚类数为 5	0.444	0.021 7
3	聚类数为 6	0.467	0.014 4
4	聚类数为 8	0.505	0.012 6

正负理想解如下

$$A^+ = \{C_{o1}^*, C_{o2}^*\} = \{0.505, 0.012\ 6\}$$

$$A^- = \{C_{o1}^0, C_{o2}^0\} = \{0.336, 0.021\ 7\}$$

根据式(13)计算各个模块划分方案与正负理想解之间的距离 s_i^* 和 s_i^0 , 如图 10 所示。

图 10 各模块划分方案与正负理想解的距离关系图

然后根据式(14), 计算所有模块划分方案与正

理想解的贴合度 ρ ，如图 11 所示。

图 11 各模块划分方案与正理想解的贴近度值

从图 11 可以看出，第 4 个模块划分方案的贴合度值最高，其值为 1。此结果即经过 Gap statistic 和 SOM 共同求解后得到的最优模块划分方案。变双曲圆弧齿线圆柱齿轮专用机床的最终模块划分结果如表 5 所示。

表 5 变双曲圆弧齿线圆柱齿轮专用机床最终模块划分方案

模块名称	组成模块的零部件
X 向数控滑台	X 向伺服电动机, X 向丝杠, X 向导轨
Y 向数控滑台	Y 向伺服电动机, Y 向丝杠, Y 向导轨
工件固定及分度模块	顶尖机构, 数控分度盘, 工件旋转伺服电动机
切削模块	大刀盘, 主轴电机, 主轴箱体
支撑及防护模块	床鞍, 立柱, 床身, 地脚, 机床防护罩
检测模块	激光干涉仪, 速度传感器
排屑模块	排屑系统
控制模块	数控系统, 冷却系统, 气动液压系统, 电控系统, 润滑系统

根据传统机床模块设计，此结果符合实际工程情况。例如把 X 向伺服电动机、X 向丝杠及 X 向导轨划分到同一个模块中，既可以提高产品设计的效率，又避免了模块化设计中的反复迭代。

通过以上方法可以获得机床的最优模块划分方案，变双曲圆弧齿线圆柱齿轮专用机床的可重构设计可以根据需求替换其中的一个或多个模块来实现。此模块划分方法对其他的加工机床同样适用。

5 结论

(1) 以设计概念为主线，以功能-原理-行为-结构的设计过程模型为映射原则对机床进行了迭代分解，得到了机床的功能结构图。

(2) 提出了以功能-原理-行为-结构(F-P-B-S)为要素进行相关性分析并进行量化的原则，建立了机

床的归一化加权零部件综合相关关系矩阵。

(3) 应用间隙统计法与自组织映射神经网络(SOM)相结合的方法，构建了基于产品零部件综合相关矩阵的聚类划分方法，通过调整聚类参数，得到了多种模块划分方案。

(4) 通过 TOPSIS 法对模块划分方案进行了优选，获得最优模块划分方案。

采用的模块化设计研究方法为变双曲圆弧齿线圆柱齿轮专用机床的快速设计提供了一套可行的设计思路与方法，为新型齿轮专用机床的可重构奠定了基础。同时，此方法对其他复杂产品的模块划分提出了一种新思路，有很好的实践意义。

参 考 文 献

- [1] 徐小明, 张武翔, 丁希仑. 基于模块化的缠绕机设计方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(4): 746-758. XU Xiaoming, ZHANG Wuxiang, DING Xilun. Modular design method for filament winding machine[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 44 (4): 746-758.
- [2] HUANG C. Overview of modular product development[J]. Proceedings of the National Science Council, 2000, 24(3): 149-165
- [3] MEHRABI M, ULISOY A, KOREN Y. Reconfigurable manufacturing systems and their enabling technologies[J]. Int. J. Manufacturing Technology and Management, 2000(1)1: 114-131.
- [4] BRUSHER G, KABAMBA P, ULISOY A. Coupling between the modeling and controller-design problems-part I: Analysis[J]. Transactions of the ASME, 1997(119): 498-502.
- [5] 黄华, 李爱平, 徐立云. 可重构机床模块划分研究[J]. 农业机械学报, 2010, 41(7): 198-204. HUANG Hua, LI Aiping, XU Liyun. Modular division oriented to reconfigurable machine tools[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7): 198-204.
- [6] 王鹏家, 巩亚东, 刘永贤, 等. 基于谱系聚类的数控机床模块划分系统[J]. 东北大学学报, 2014(5): 739-742. WANG Pengjia, GONG Yadong, LIU Yongxian, et al. Module division system of CNC machine tools based on hierarchical clustering[J]. Journal of Northeastern University, 2014(5): 739-742.
- [7] 高羨明, 洪军, 刘瑞萍, 等. 多准则数控机床模块谱系聚类的划分方法研究[J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(5): 131-136. GAO Xianming, HONG Jun, LIU Ruiping, et al. Numerical control machine tool module partition with

- multi-criteria pedigree clustering method[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(5): 131-136.
- [8] 赵斐. 变双曲圆弧齿线圆柱齿轮成形理论研究及啮合特性分析[D]. 成都: 四川大学, 2018.
- ZHAO Fei. Research on forming theory and meshing characteristics of variable-hyperbolic-circular-arc-tooth cylindrical gear[D]. Chengdu: Sichuan University, 2018.
- [9] PAHL G, BEITZ W. Engineering design[M]. London: Design Council, 1984.
- [10] 方晓耿, 谌炎辉, 谢国进. 模块划分的多目标评价方法研究[J]. 广西科技大学学报, 2017, 28(4): 119-123.
- FANG Xiaogeng, CHEN Yanhui, XIE Guojin. Research on multi-objective evaluation method of module partition[J]. Journal of Guangxi University of Science and Technology, 2017, 28(4): 119-123.
- [11] GAO Yicong, FENG Yixiong, TAN Jianrong. Product modular design incorporating preventive maintenance issues[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2016, 29(2): 406-420.
- [12] 滕晓艳. 复杂产品系统的模块划分方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.
- TENG Xiaoyan. Research on module partition method of CoPS [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2011.
- [13] KOHONEN T. Self-organizing maps [M]. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1995.
- [14] GERMEN E, BASARAN M, FIDAN M. Sound based induction motor fault diagnosis using Kohone self-organizing map[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2014, 46(1): 45-58.
- [15] SARLIN P. A weighted SOM for classifying data with instance-varying importance[J]. International Journal of Machine Learning and Cybernetics, 2014, 5(1): 101-110.
- [16] 胡丛林. 产品设计结构聚类优化算法研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2014.
- HU Conglin. A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of master in engineering[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2014.
- [17] 胡鑫杰, 路川, 齐斌. 基于 SOM 的神经网络的网络舆情信息分类模型[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(3): 108-111.
- HU Xinjie, LU Chuan, QI Bin. Classification model of internet public opinion information based on SOM neural network[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(3): 108-111.
- [18] 马梅, 刘东苏, 李慧. 基于大数据的网络舆情分析系统模型研究[J]. 情报科学, 2016, 36(3): 25-28.
- MA Mei, LIU Dongsu, LI Hui. Research on the network public opinion analysis system model based on big data[J]. Information Science, 2016, 36(3): 25-28.
- [19] SONG H, NAI Q J, ZHANG B, et al. Formation, evolution and control of network public opinion for emergencies[J]. Journal of Henan Institute of Engineering, 2010 (5): 78-89.
- [20] 张袅娜, 郭孔辉, 丁海涛. 基于多源信息融合的行驶工况识别及其在整车转矩分配中的应用[J]. 机械工程学报, 2017, 53(24): 135-143.
- ZHANG Niaoona, GUO Konghui, DING Haitao. Driving cycle recognition algorithm based on multi-source information fusion and application in vehicle torque distribution[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(24): 135-143.
- [21] 李颖, 应保胜, 容芷君, 等. 基于 SOM 的产品设计结构模块划分及其评价[J]. 武汉科技大学学报, 2018, 41(4): 301-306.
- LI Ying, YING Baosheng, RONG Zhijun, et al. SOM-based product design structure clustering and its evaluation[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2018, 41(4): 301-306.
- [22] 程贤福, 万冲, 邱浩洋, 等. 基于密度算法和 DSM 的模块划分方法[J]. 华东交通大学学报, 2019, 36(2): 105-110.
- CHENG Xianfu, WAN Chong, QIU Haoyang, et al. A module partition approach based on density algorithm and design structure matrix[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2019, 36(2): 105-110.
- [23] 梅晓朋. 面向客户需求的数控机床模块化设计方法研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2015.
- MEI Xiaopeng. Modular design research of CNC machine tools oriented to customer requirements[D]. Shenyang: Northeastern University, 2015.
- [24] CHENG Xianfu, XIAO Renbin, WANG Haolun. A method for coupling analysis of association modules in product family design[J]. Journal of Engineering Design, 2018, 29(6): 327-352.
- [25] 郑维强, 刘振宇, 刘达新, 等. 基于模糊关联的复杂产品模块化设计方法及其应用[J]. 机械工程学报, 2015, 51(5): 130-142.
- JIA Weiqiang, LIU Zhenyu, LIU Daxin, et al. Modular design method and application for complex product based on fuzzy correlation analysis[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(5): 130-142.

作者简介: 张海燕, 女, 1983 年出生, 博士研究生。主要研究方向为机构学及新型传动技术。

E-mail: liuyunzhy@163.com

侯力(通信作者), 男, 1956 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机电一体化、机械传动。

E-mail: houli4@163.com