

面向变异设计的多粒度移植结构的划分与再生^①

任 彬^② 张树有^③ 施岳定

(浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室 杭州 310027)

摘 要 为了实现需求驱动的结构变异设计,提出了多粒度移植结构的划分与再生技术。结构变异设计是在现有零件基础上移植多粒度结构,改变零件的拓扑关系,移植结构库的构建是复杂零件结构变异设计的基础。针对多粒度移植结构库中大量的移植结构,引入变精度粗糙集,以知识为载体储存移植结构的属性信息,通过变精度粗糙集对知识粒度进行划分,从而实现多粒度移植结构的划分与再生,为复杂零件的变异设计提供基础。结合注塑机产品的结构变异设计,构建了注塑机产品的多粒度移植结构库。

关键词 变精度粗糙集,结构变异设计,多粒度,移植结构库,再生

0 引 言

结构变异设计是一种在已有零件的基础上,为满足客户需求而进行变结构、变拓扑的支持产品开发设计的方法。或者说,结构变异设计是在现有零件基础上移植多粒度结构,通过零件拓扑的改变实现产品创新设计的方法。变异设计过程可以根据不同的设计需求,通过移植结构的划分与再生,实现零件的创新设计。移植结构的划分与再生可以产生大量的移植结构,它们是快速响应客户需求,实现复杂零件结构变异设计的基础。因此,针对变异设计中的大量移植结构,需要构建移植结构库。在企业标准化的机械产品开发中,为了满足个性化需求仍然需要进行大量的零部件变异设计。变异设计支持企业在成熟产品的基础上迅速开发出新的个性化产品,缩短产品开发周期,减少设计人员在设计过程中的重复劳动,提高设计效率。

国内外相关研究人员在参数化理论逐渐完善的基础上,对变异设计进行了探索,在三维模型的形状相似性比较^[1-5]方面做了大量的研究。Martin^[6]提出用变量化技术解决结构变异问题;Breen 等^[7]提出了一种基于体素的三维模型变异方法。国内提出了一种基于模块化结构单元的变型设计方法^[8-10]支持产品多样化设计,胡蓉等^[11]在工业汽轮机的模块化中把一些复杂零件分成几个部分作为最小的结构

单元,并对这些结构单元进行标准化和模块化;另一种方法针对复杂产品的三维模型,从整体到局部,通过修改部分参数实现局部结构的变型设计^[12-17],刘夫云等^[17]提出了基于尺寸参数传递的配置产品尺寸参数修改与变型设计方法;另外,邹纯稳等^[18]将零件的功能、几何和语义等信息进行融合,定义了零件可变异模型结构,研究了零件可变异模型与再生技术;王书亭等^[19]提出一种结构待定和参数待定的变型产品结构模型,采用推理机推理确定产品的结构和参数,实现了基于仿真的动态变型设计。上述方法引起了零件结构和功能的变化,突破了拓扑约束,但受到变异结构库的限制,变异的目标局限于圆柱、长方体等基本体。变异设计中的零部件往往结构复杂,在变异过程中用于搭接的结构单元定义为移植结构,移植结构的划分与再生已成为变异设计中的一个重要问题。本文对这个问题进行了研究,将移植结构的功能特性、构型特征、生长方向、几何信息、定位信息和关联信息作为知识用于多粒度移植结构的划分与再生决策中,通过引入变精度粗糙集模型,实现了多粒度移植结构的划分与再生,并将这一技术应用在注塑机产品的结构变异设计中。

1 变异设计中的移植结构

结构变异设计的实现,需要移植结构库的支持。

① 国家自然科学基金(50775201),国家科技重大专项(2009ZX04014-031)和浙江省自然科学基金(Z1080339)资助项目。

② 女,1981 年生,博士;研究方向:产品数字化设计,虚拟样机仿真技术等;E-mail:renbin1981@zju.edu.cn

③ 通讯作者,E-mail: zsy@zju.edu.cn

(收稿日期:2010-09-04)

根据零件设计过程的特征分类,可将移植结构的实体造型分为基本体素特征、扫描特征以及成型特征。其中,基本体素特征包括块、圆柱、圆锥、球;扫描特征包括拉伸、回转、扫描、管道;成型特征包括孔、圆

台、腔体、凸垫、键槽、沟槽。多粒度移植结构库的基本组成包括结构编码、结构名称、基本体素特征、材料特征、扫描特征、成型特征、功能语义和入库日期,如图1所示。

结构编码	结构名称	基本体素特征	扫描特征	成型特征	材料特征	功能语义	入库日期
200100	壳体零件块	块	无	无	铝合金	壳体	2017-07-09
200120	壳体零件头	块	无	无	铝合金	壳体	2017-07-09
200130	壳体零件头	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200140	壳体零件头	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200150	壳体零件	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200160	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200210	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200210	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200220	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200230	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200240	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200250	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200260	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200270	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200280	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200290	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200300	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200310	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200320	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200330	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200340	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200350	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200360	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200370	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200380	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200390	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200400	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200410	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200420	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200430	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200440	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200450	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200460	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200470	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200480	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200490	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200500	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200510	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200520	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200530	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200540	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200550	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200560	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200570	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200580	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200590	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200600	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200610	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200620	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200630	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200640	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200650	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200660	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200670	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200680	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200690	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200700	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200710	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200720	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200730	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200740	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200750	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200760	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200770	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200780	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200790	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200800	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200810	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200820	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200830	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200840	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200850	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200860	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200870	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200880	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200890	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200900	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200910	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200920	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200930	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200940	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200950	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200960	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200970	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200980	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09
200990	壳体	块	无	无	铝合金	壳体	2019-04-09

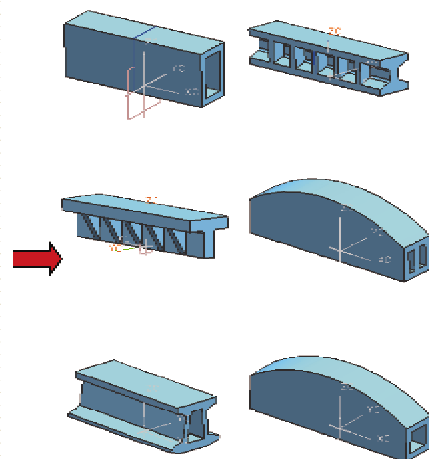


图1 变异设计中的移植结构库

移植结构可作为变异设计过程中的信息载体,它除了包含结构的几何信息和拓扑信息外,还包含了变异设计过程所需要的信息,如功能特性、构型特征、生长方向、定位信息和关联信息等。几何信息是指形体在欧氏空间中的形状、位置和大小;拓扑信息用来表达形体各分量间的连接关系。移植结构是由点、边、环、面、体等各种不同的几何元素构成的,各种几何元素相互间的关系构成了形体的拓扑信息。在相同几何信息的基础上,拓扑信息不同,移植结构的实体造型也可能完全不同^[20]。因此,移植结构是在更高层次上对几何形体的集成描述。

多粒度移植结构库需要标准化和规范化,这可通过建立完善的编码体系以及进行零件结构分类和零件结构名称分析、功能分析、几何形状分析、参数分析来实现^[21]。与多粒度移植结构直接相关的信息有几何信息和拓扑信息。

2 移植结构的多粒度划分

在变异设计中,移植结构是由大粒度的零件、中粒度的子结构和小粒度的结构单元构成的。不同粒度的移植结构包含的信息有几何信息、定位信息、关联信息、功能特性、构型特征和主要尺寸的变化方向,并可作为知识储存。但是,在移植结构的获取过

程,容易造成信息丢失,一些信息仅能近似描述,而且在对移植结构知识粒度的划分过程中,由于信息的不确定性,会产生太细的知识粒度,不利于结构变异设计,因此,引用变精度粗糙集模型来划分和再生多粒度移植结构。

变异设计中不同的需求驱动,可通过不同级别的知识粒度来表达。当要求较粗时,将移植结构中相似的信息作为一个知识粒度聚在一起;如果需要更详细地处理,则展示更细的信息,并将这些信息定义为另一层次知识粒度。移植结构所包含的信息是知识粒度的集合,这些知识由于它们的功能相似性、不可分辨性而被聚合在一起。在移植结构的分类过程中,由变精度粗糙集^[22],需定义一个正确的分类阈值 β 。

定义移植结构的知识表示系统为

$$S = (U, A, V, f) \quad (1)$$

其中, $A = C \cup D, X \subseteq U, P \subseteq C$, 给定阈值 $0.5 < \beta \leq 1$, 则 X 的 β -下近似和 X 的 β -上近似分别为

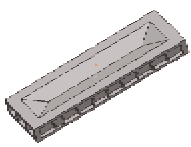
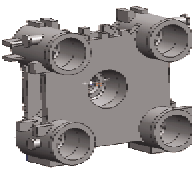
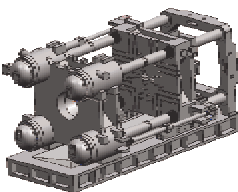
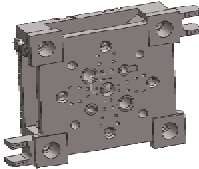
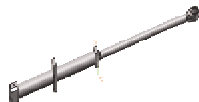
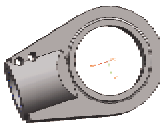
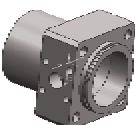
$$\underline{apr}_\beta(X) = \bigcup \left\{ x \in U \mid \frac{|I(x) \cap X|}{|I(x)|} \geq \beta \right\} \quad (2)$$

$$\overline{apr}_\beta(X) = \bigcup \left\{ x \in U \mid \frac{|I(x) \cap X|}{|I(x)|} > 1 - \beta \right\} \quad (3)$$

其中, β 值与分类精度逆相关。随着 β 值的增大, 分类精度减小, X 的正域与负域将缩小, 即只有少数对象被分类; 随着 β 值的减小, 分类精度增大, X 的正域与负域将扩大, 边界将缩小, 大多数移植结构被分类, 但可能被误分。因此, 在移植结构划分的过程

中, 或者少数不被分类, 而大多数移植结构形成正确的知识粒度; 或者大多数没被分类, 而少数移植结构形成正确的知识粒度。以注塑机中的合模装置为例, 多粒度结构的划分, 如表 1 所示。

表 1 合模装置中多粒度结构的划分

二板式合模装置		子零部件	
	底座	头板	锁模杆头盖
			
	支撑梁	动模板	滑脚
			
快速移模装置	快速移模子结构	快速移模子结构	快速移模子结构
			
			⋮

3 多粒度移植结构的再生

在移植结构知识表示系统的论域 U 上定义一个关系顺序 $I_1 \subset I_2$, 等价关系 I_1 比等价关系 I_2 更细, I_2 中的每个等价粒度是 I_1 中一些等价粒度的并, 即 I_1 中的每一个粒度通过进一步划分 I_2 中的粒度获得。将上述等价关系扩展为 m 个嵌套:

$$I_1 \subset I_2 \subset \cdots \subset I_m \quad (4)$$

相应的等价知识粒度应满足条件:

$$I_1(x) \subseteq I_2(x) \subseteq \cdots \subseteq I_m(x) \quad (5)$$

根据嵌套的等价关系, 可以再生出不同置信阈值 β 、不同级别分类质量 $\gamma^\beta(P, D)$ 的知识粒度树状结构图。在再生移植结构的树状图中, 每一个结点表示一类, 根是由移植结构知识表示系统 U 中所有元素组成的最大聚类, 根被分成不相交的一组知识粒度, 因此, 根的子类可形成根的一个划分。给定一个属性集, 就可以再生一个分层知识粒度图, 每一个知识粒度与一个属性子集相对应, 较高层次的知识粒度较粗。在这样一个分层知识粒度结构中, 可

再生适宜知识粒度的移植结构, 并获得相应的变异设计结果。

移植结构再生过程中, 定义移植结构库的一个知识表示系统 $S = (U, A, V, f)$, 如表 2 所示。其中论域 $U = \{n_1, n_2, n_3, n_4, n_5, n_6\}$, 条件属性集 $C = \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6\}$, 决策属性集 $D = \{d\}$, 注塑机动模板为例, 求不同置信阈值 β 的分层知识粒度。

对论域进行划分, 可得如下等价类:

$$U/C = \{X_1, X_2, X_3, X_4, X_5\} \quad (6)$$

$$U/D = \{Y_A, Y_D, Y_C\} \quad (7)$$

(6) 式中, $X_1 = \{n_1\}$, $X_2 = \{n_2\}$, $X_3 = \{n_3, n_4\}$, $X_4 = \{n_5\}$, $X_5 = \{n_6\}$; (7) 式中, $Y_A = \{n_1, n_2, n_3\}$, $Y_D = \{n_3, n_4\}$, $Y_C = \{n_6\}$ 。

根据变精度粗糙集^[22], 可求出一个嵌套的子集系列为 $\{a_1, a_2, a_3\}$ 、 $\{a_2, a_3\}$ 、 $\{a_3\}$ 。显然, $I_{(n_1, n_2, n_3)}(p) \subseteq I_{(n_2, n_3)}(p) \subseteq I_{(n_3)}(p)$, 由此得到不同置信阈值、不同级别分类质量的一个移植结构分层知识粒度, 如表 3 所示。

表 2 知识表示系统

U	条件属性						决策属性 (d) (功能特性)
	a_1 (功能特性)	a_2 (构型主特征)	a_3 (生长方向)	a_4 (几何信息)	a_5 (定位信息)	a_6 (关联信息)	
n_1	0	2	4	1	1	6	7
n_2	1	3	4	1	1	6	7
n_3	1	3	2	0	0	2	8
n_4	1	3	2	0	0	2	8
n_5	1	3	5	1	1	6	7
n_6	0	3	4	1	0	6	9

表 3 移植结构分层知识粒度表

分类属性集	β	知识粒度	β -下近似	$\gamma^{\beta}(P, D)$
$\{a_3\}$	$0.67 < \beta \leq 1$	$\{n_1, n_2, n_6\},$ $\{n_3, n_4\}, \{n_5\}$	$\{n_3, n_4\}, \{n_5\}$	3/6
$\{a_2, a_3\}$	$0.5 < \beta \leq 1$	$\{n_1\}, \{n_2, n_6\},$ $\{n_3, n_4\}, \{n_5\}$	$\{n_1\}, \{n_3, n_4\},$ $\{n_5\}$	4/6
$\{a_1, a_2,$ $a_3\}$	$\beta = 1$	$\{n_1\}, \{n_2\}, \{n_6\},$ $\{n_3, n_4\}, \{n_5\}$	$\{n_1\}, \{n_2\}, \{n_6\},$ $\{n_3, n_4\}, \{n_5\}$	1

由表 3 可再生不同置信阈值 β 、不同级别分类质量 γ 的分层知识粒度图。分层知识粒度图支持移

植结构的进一步划分和再生。注塑机动模板中多粒度移植结构的划分与再生,如图 2 所示。

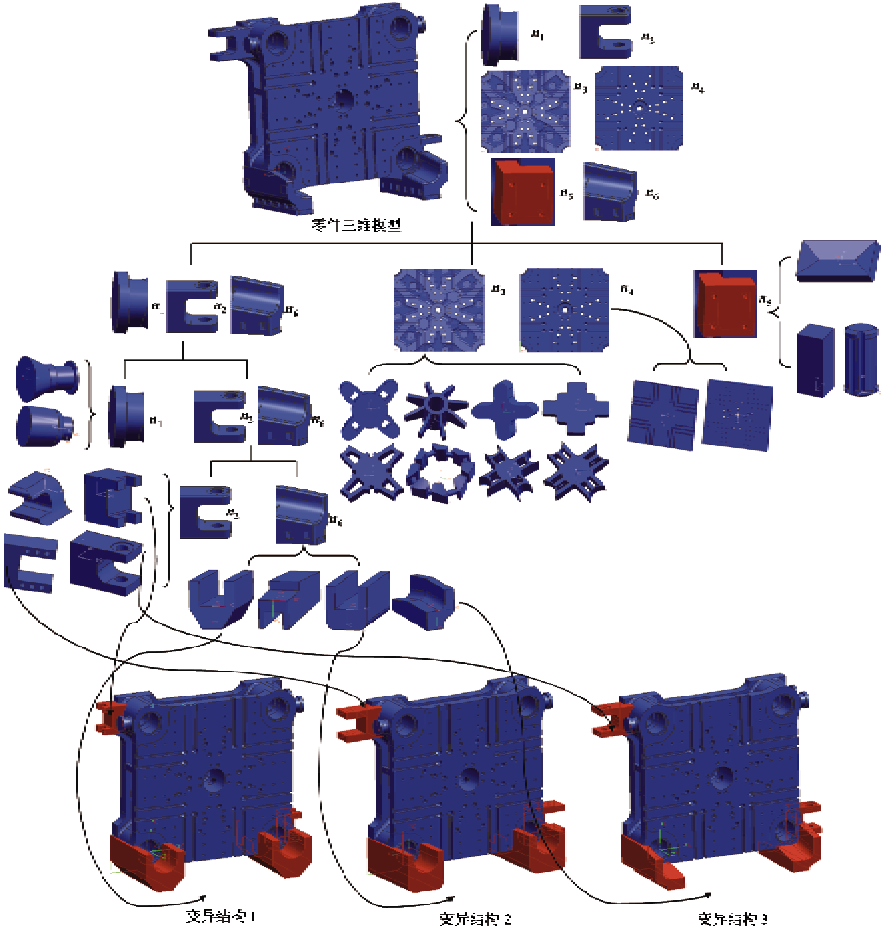


图 2 注塑机动模板移植结构的划分与再生

4 应用实例

本文以 Unigraphics NX3.0 为基础,结合 UG/Open API 技术,后台数据库是 Microsoft SQL Server2000,通过对变异设计中多粒度移植结构的划分和再生,构建了注塑机产品的多粒度移植结构库。

变异设计过程从零件的三维模型开始,检索多粒度结构库,将检索到的结构移植到切割面,同时对移植结构进行参数驱动。变异设计突破了参数设计中“变结构、不变拓扑”的局限,是对结构的更细粒度的划分。构建的多粒度移植结构库具有如下特点:

(1)多粒度移植结构有完备的几何信息和拓扑信息,以适应一般零件的结构变异设计;

(2)移植结构库的组织方式便于操作和管理,方便用户对移植结构库中的结构单元进行修改、增加和删除。

多粒度移植结构库的系统框架,如图 3 所示。其中,材料库、移植结构库和产品库分别对应各自的材料数据、形状数据和产品数据,从中获得结构的描述信息。移植结构库建立在变异设计系统之上,通过变异系统与数据库之间的双向数据交流,查询变异过程所需要的参数,并将变异后的零件信息存在结构库中,且零件信息随变异过程不断更新。

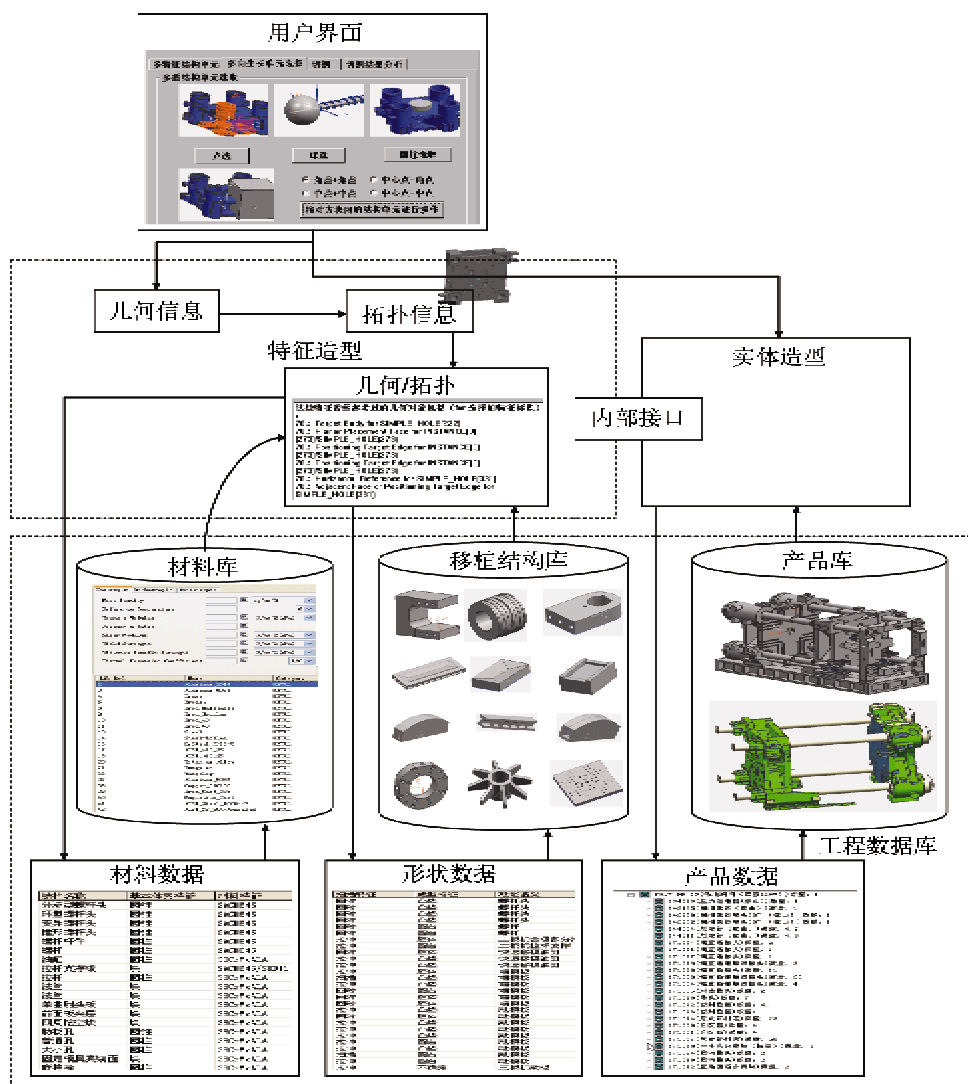


图3 注塑机产品的多粒度移植结构库

5 结论

本文通过引入变精度粗糙集,实现了变异设计中的多粒度移植结构的划分与再生,支持复杂零件

的变异设计,为需求驱动的快速响应设计提供了方法。本研究给出以下结论:(1)变异设计中移植结构通过实体造型和拓扑信息来表达和描述。其中,实体造型包括体素特征、扫描特征以及成型特征。

拓扑信息包括功能特性、构型特征、生长方向、定位信息和关联信息。(2)多粒度移植结构的划分是实现复杂结构变异设计的基础。需将移植结构的属性信息以知识的形式进行存储,用于多粒度移植结构的定义和划分。(3)引入变精度粗糙集,对移植结构的知识粒度进行划分与再生,能够构建更为灵活的多粒度移植结构库,支持复杂零件的变异设计。

参考文献

- [1] Hong T, Lee K, Kim S C. Similarity comparison of mechanical parts to reuse existing designs *Computer-Aided Design*, 2006, 38(9): 973-984
- [2] Ei-Mehalawi M, Miller R. A database system of mechanical components based on geometric and topological similarity. Part I: Representation. *Computer Aided Design*, 2003, 35(1): 83-94
- [3] Tsai C Y, Chang C A. A two-stage fuzzy approach to feature-based design retrieval. *Computer-Aided Design*, 2005, 37(5): 439-505
- [4] Iyer N, Jayanti S, Lou K, et al. Three-dimensional shape searching: state-of-the-art review and future trends. *Computer-Aided Design*, 2005, 37(5): 509-530
- [5] Biasotti S, Marini S, Spagnuolo M, et al. Sub-part correspondence by structural descriptors of 3D shapes. *Computer-Aided Design*, 2006, 38(9): 1002-1019
- [6] Martin M V. Design for variety: A methodology for developing product platform architectures: [Ph. D dissertation]. USA: Stanford University, 1999
- [7] Breen D E, Whitaker R T. A Level-Set Approach for the Metamorphosis of Solid Models. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2001, 7(2): 173-192
- [8] 刘伟洪, 魏修亭, 刘海波. 基于 3D 结构单元的概念设计与详细设计研究. *中国机械工程*, 2006, 17(22): 2346-2349
- [9] 赵秀燕, 赵婷婷, 魏小鹏等. 变型设计中的基因模型与产品优化方法实现. *计算机工程与应用*, 2009, 45(19): 68-71
- [10] 龚京忠, 邱静, 李国喜等. 产品模块可拓变型设计方法. *计算机集成制造系统*, 2008, 14(7): 1256-1267
- [11] 胡蓉, 孙静, 邱进冬等. 工业汽轮机中的大批量定制原理. *成组技术与生产现代化*, 2001, 1: 55-58
- [12] 吴伟伟, 唐任仲, 侯亮等. 基于参数化的机械产品尺寸变型设计研究与实现. *中国机械工程*, 2005, 16(3): 218-222
- [13] 李强, 方水良. 基于参数化的产品变形设计建模研究与实现. *机械制造*, 2006, 44(497): 11-13
- [14] 骆康, 陈国金, 苏少辉等. 基于变量化的产品变型设计研究与实现. *机电工程*, 2009, 26(11): 98-100
- [15] 方水良, 沈振华. 复杂变型产品参数传递结构研究. *计算机集成制造系统*, 2006, 12(12): 1934-1938
- [16] 吴庆鸣, 宗驰, 张强等. 复杂产品变型设计及其参数传递方法研究. *中国机械工程*, 2008, 19(24): 2955-2959
- [17] 刘夫云, 邓小林. 配置产品尺寸参数修改与变型设计方法研究. *计算机集成制造系统*, 2008, 14(11): 2092-2096
- [18] 邹纯稳, 张树有, 裘乐森. 面向结构移植变异设计的零件可变异模型与再生技术. *计算机集成制造系统*, 2009, 15(11): 2081-2088
- [19] 王书亭, 吴义忠, 蒋占四. 支持动态变型设计的多领域系统知识建模与推理求解. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2010, 22(1): 85-93
- [20] 袁清珂. CAD/CAE/CAM 技术. 北京: 电子工业出版社, 2010. 72-83
- [21] 苏宝华, 祁国宁, 顾新建等. 结构单元的基本原理及其在产品建模中的应用. *中国机械工程*, 1999, 18(3): 371-374
- [22] 张贤勇, 莫智文. 变精度粗糙集. *模式识别与人工智能*, 2004, 17(2): 151-155

The partition and regeneration of multi-granularity transplantable structures for structural variant design

Ren Bin, Zhang Shuyou, Shi Yueding

(The State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract

A technique of partitioning and regenerating multi-granularity transplantable structures was proposed to achieve the structural variant design, a demand-driven-method characterized by modification of the topological relations of existing parts through transplantation of multi-granularity structures, with the construction of a transplantable structure library being its foundation for structural variant design of complex parts. The variable precision rough set was introduced to the transplantable structure library for its abundant transplantable structures. The attribute information of transplantable structures was stored as the knowledge and the knowledge granularity was divided through the variable precision rough set, thus, the partition and regeneration of multi-granularity transplantable structures were implemented, and the feasibility for implementation of structural variant design of complex parts was achieved. A multi-granularity transplantable structure library of an injection molding machine was developed to testify the proposed method for the structural variant design.

Key words: variable precision rough set, structural variant design, multi-granularity, transplantable structure library, regeneration