

基于八元集合模板和专用模块的产品快速设计方法研究

李桂东 周来水 安鲁陵 谭昌柏

南京航空航天大学,南京,210016

摘要:在现有的模板设计理论基础之上,对常用的五元模板进行了改进和扩充,设计了八元集合模板。提出了基于八元集合模板和专用模块的产品快速设计方法,并给出了相应的设计软件系统框架。将要设计的产品结构分为创新设计和继承原有设计两部分,应用基于八元集合模板的方法辅助创新设计,应用专用模块实现对已有结构的重用。以飞机复合材料构件的成形工装设计为例,说明了该方法的有效性。

关键词:CAD;飞机工装;快速设计;模块化设计;设计模板

中图分类号:TH122;TP391

文章编号:1004—132X(2009)19—2348—07

Research on a Rapid Product Design Method Based on Eight Element Set Pattern and Dedicated Module

Li Guidong Zhou Laishui An Luling Tan Changbai

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016

Abstract: The routine five element set was improved and extended based on the research of traditional design pattern and an eight element set design pattern was designed. A rapid product design method based on the eight element set pattern and dedicated module was presented. The architecture of the rapid design system was given. The product structure to be designed was divided into inherit original design part and creative design part. The method of the eight element set pattern was used for aiding creative design, and the dedicated module method was used for inheriting original design. Finally, the method proposed herein was illustrated and verified by a rapid design system for molding tool of composite material component of airplane manufacture.

Key words: CAD; airplane tool; rapid design; module design; design pattern

0 引言

快速设计技术是当前市场在应对产品多样化、瞬变性等需求的形势下提出并发展起来的。快速设计技术的目标在于高效率地完成高质量设计,缩短产品设计开发周期,提高企业对市场的快速响应能力。在飞机制造领域,飞机工装的设计对保证飞机产品质量和生产效率起着重要作用,国外飞机工装设计已基本实现数字化,但国内飞机工装设计的数字化起步较晚,按现有的工装研制模式,生产准备周期长、成本高,已经无法满足新型号飞机的研制和批量生产的要求。工装的快速设计已成为我国航空企业亟待解决的问题之一^[1]。实现工装快速设计的途径主要有两种,一种是开发各种工装设计专用知识库,二是开发各种专用的工装快速设计系统^[2]。

在产品设计过程中,自由设计虽然灵活,但对设计者要求较高,设计质量取决于设计者的经验,

效率低;模块化设计尽管效率较高,但在一定的程度上约束了设计者的创新工作。实际中的产品设计大多是产品改型设计,即在原有产品的基础上进行必要的改进来获得新产品。这样,专家的知识 and 经验就显得尤为重要了。现有的快速设计方法大都只关注产品本身的功能和结构,例如模块化设计^[3-5]思想等,虽然实现了产品结构和功能上的快速设计,但这种方法刚性有余,柔性不足,难以完全反映专家的设计意图。针对该问题,本文通过对传统设计模板理论的研究,对常用的五元集合模板进行了改进和扩充,同时融合设计中专家知识和经验,设计了八元集合模板。以八元集合模板为基础,结合模块化设计的思想,提出了基于八元集合模板和专用模块的产品快速设计方法。从结构和功能上,将产品分为继承原有设计和创新设计两部分。创新设计部分采用基于八元集合模板的方法进行设计;继承原有设计部分采用专用模块的方法进行设计。给出了支持该方法的软件系统构架,并将其应用于飞机工装的快速设计中。

收稿日期:2008—11—29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60673026);高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划资助项目

1 八元集合模板

1.1 传统设计模板

设计模板的概念是建筑师 Christophe Alexander 提出的,他着眼于建筑物通用结构,并将这种通用结构称为设计模板^[6]。随着面向对象设计思想的发展,设计模板在数据库、人工智能、分布式处理系统等领域得到了一定的应用^[7-8],逐渐形成了独立的结构。设计模板的定义抽象并规范了面向对象设计的通用方法。其主要特征是从实际经验中发掘出的一系列可重复利用的知识,将其抽象为设计模板,用于建立类似的重复设计^[9]。随后,研究者对设计模板的表示形式进行了相关研究^[10-11],具有代表性的是 Erich 等在文献^[10]中提出的五元集合模板结构:

$$\text{Pattern} = \{ \text{Name}, \text{Context}, \text{Problem}, \\ \text{Configure}, \text{Consequence} \}$$

其中,Name 为模板的标识;Context 为模板所面对的系统环境和前提;Problem 为模板所解决的问题;Configure 为组成模板的每个基本元素以及它们之间的合作关联关系;Consequence 为模板的输出结果。

这种设计模板仅仅是对问题抽象的解决方法的描述,在其结构中并未涉及具体的实现过程和方法,其应用主要是解决多种多样复杂条件下所产生的某一类软件结构问题,但是针对不同的应用背景,并不能表达特定设计过程内部隐藏的信息,特别是针对具体问题的实现过程和方法,这些信息往往是指导设计的关键因素,因此该设计模板在指导具体的设计过程中一定程度上缺乏可操作性,这阻碍了设计模板在工程实际中的应用。另外,随着计算机应用技术的不断发展,基于知识的设计思想在工程领域中得到了广泛的应用,现有的设计模板虽然在其方法上可将这些可重用的知识抽象为类或者模板形式,但在具体应用过程中设计者并没有得到很好的支持,在结构上也没有给设计者提供相应的接口。为此,笔者对传统的设计模板进行拓展,设计了适用于工程实际的八元集合模板。

1.2 八元集合模板

1.2.1 八元集合模板的表示形式

八元集合模板是对经典的 Erich 五元集合模板结构进行改进和扩充得到的,在该结构中引入了与实际问题映射的接口、解决问题的方法和实现过程。

本文提出的八元集合关系的结构为

$$\text{Pattern} = \{ \text{Name}, \text{Mapping}, \text{Context}, \text{Problem},$$

$$\text{Method}, \text{Configure}, \text{Consequence}, \text{Knowledge-base} \}$$

其中,Mapping 为与专家经验和知识映射的接口;Method 为解决问题的方法;Knowledge-base 为模板工程知识库;其余参数与 Erich 五元集合模板的相应元素的含义相同。

根据其在模板中的不同作用,各元素表达的方法不一样,可以是文字性描述、计算机程序等。

1.2.2 专家知识和经验的表达

在产品的设计过程中,将产品的设计过程与领域专家知识相结合,充分发挥专家知识和经验的作用,是提高产品设计效率的有效途径。对产品知识的表达,国内外学者进行了大量的研究^[12-16],Chandrasekaram^[14]提出将产品的功能(function, F)、行为(behavior, B)、结构(structure, S)三者联系起来描述一般的产品以支持不同级别的产品抽象,这一思想被越来越多的学者所认同,其抽象模型的最底层是产品的物理结构。

产品设计是对产品的结构和功能等方面进行综合的设计,其最终的表现形式为产品的几何结构特征。但是专家知识和经验不仅表现为对产品结构的认识,还应包括更多的对产品需求的说明,设计知识、标准、约束条件和设计原理等描述信息,以及设计过程信息,这些统称为专家行为。对专家行为进行抽象的目的在于,将其表达为设计过程中能识别和利用的形式,以支持产品的设计。

本文通过接口的方式,将专家行为(B)映射为八元集合模板(P)中的 Method,再将模板与对产品结构或者功能(S)的某一具体操作相对应,其抽象过程模型如图 1 所示。这样在产品的设计时,设计者可以不用过多地考虑经验或知识对设计的影响,直接利用模板中的 Method 进行产品的结构和功能的设计。例如在复合材料构件模具的设计过程中,专家根据自身的经验在基准平面投影轮廓线上选取 4 点构成模具体的轮廓四边形,将这一经验抽象为 Method 就是“根据投影曲线拟合给定要求的四边形”。

1.2.3 八元集合模板的接口

八元集合模板中,除了 Erich 五元集合模板所包含的各模块元素集合之间的关联接口以及模板输入输出接口之外,还应具有如下两类接口:一类是与专家行为映射的接口,另一类是在使用具体的解决方法时与知识库的连接接口。

(1)与专家行为映射的接口。在模板中提供的表达专家行为的输入函数 Mapping 即为其映射接口,在接口中应包含与专家行为对应的产品结构或者几何特征。根据以往的经验,在对某一

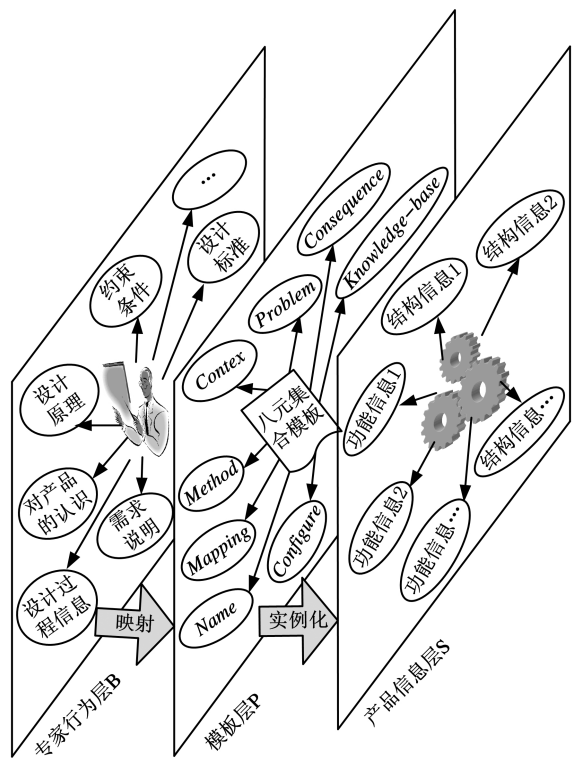


图 1 B-P-S 抽象过程模型

特定产品进行设计时,在设计流程的每一阶段,专家的行为以及其对产品结构和功能的影响都是已知的,即专家行为反映在产品结构或者功能上的变化是已知的,在设计模板时,将这些结构或者功能抽象为模板的输入参数,通过这些输入参数反映模板对专家行为的抽象。

(2)与知识库的连接接口。八元集合模板对所有问题的解决方法都是基于工程知识库的,所以与知识库的连接接口也是必要的,这种接口视知识库的类型而定,原则是:在设计模板时只需要提供简单的调用接口,以简化设计模板的结构。例如在复合材料构件模具快速设计系统中,知识库包括几何算法库、规则库、产品实例库等,每一种知识库都可以封装为相应的类模板结构,在八元集合模板中只需要提供连接调用各种类模板的接口即可。

2 八元集合模板与模块化设计

八元集合模板与当前许多学者研究的模块化设计方法^[3-5]不同,模块化设计是在对产品功能和结构进行分析的基础上,划分并设计出一系列功能模块,通过模块的选择和组合构成不同产品的快速设计方法^[3],该方法主要应用在继承原有的设计过程中。本文提出的八元集合模板是指在对产品设计过程中的专家经验和知识进行分析的基础上,发掘出一系列可重复利用的知识和经验,将

其抽象为设计模板,用于类似的设计中,并将其集成于快速设计系统中的设计方法,主要应用在产品的设计过程中。实际上在模块化设计过程中,对产品功能和结构的分析也是建立在专家经验和知识的基础上的,且模块是一个参数化模板模型,是从大量类似模块实例中总结出来的设计模板^[4],称为指导具体设计的专用模块,它是比八元集合模板具有更高层次的固化,其关系如图 2 所示。一般而言,对产品设计方法固化程度越高,其隐藏原有设计方法的信息就越多,展现给用户的信息就越少,从应用的角度来说,使用往往就越方便。但是,固化在专用模块中的信息过多,会使得原本对创新设计很有帮助的专家经验和知识得不到很好的表达,且专用模块设计系统典型的特点是系统比较僵硬,一旦形成就很难改变。

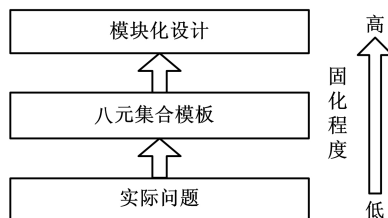


图 2 八元集合模板与专用模块的关系

基于以上分析,虽然模块化设计使设计人员容易掌握产品全局,设计者可以屏蔽掉与自身领域无关的细节,从而关注更高层次的设计逻辑,但在创新设计活动中显得柔性不足。八元集合模板在创新设计活动中融入了专家的设计经验和知识,弥补了专用模块设计柔性不足的缺陷,建立的可扩充的知识库解决了模块化设计知识难以扩充的问题,使产品设计以专家经验和知识为基础,使设计更柔性化。

3 基于八元集合模板和专用模块的产品快速设计

根据以上分析,再结合模块化设计方法的优点,设计者首先对产品的功能和结构进行分析,将产品结构分为继承原有设计部分和创新设计部分。所谓继承原有设计部分是指产品的该部分结构在功能上相对独立,设计过程对专家经验和知识应用较少,在原有设计的基础上,可以将该部分作为一个整体模块参与设计。创新设计部分是指产品的该部分在设计过程中可变因素较多,不能简单地将其作为一个整体模块参与设计,而必须根据相应的专家经验和知识来对这些可变因素进行设计。

因此,在进行产品设计的过程中,首先根据八

元集合模板和模块化设计方法^[3-5],对产品的结构进行分解,其分解流程如图3所示,将产品设计分为两部分进行,一部分针对继承原有设计部分,采用基于专用模块方法进行设计,专用模块可以按照一定规则进一步划分子模块,根据用户的需求在模块化和集成化之间寻找一个最佳平衡点,最后针对不同的模块结构建立相应的产品实例库和规则库^[17],以支持产品的快速设计;另一部分针对产品的创新设计部分,采用基于八元集合模板方法进行设计,因为创新设计部分专家经验和知识应用较多,因此在产品创新设计部分,除设计流程分析以外,还设计了相应的八元集合模板与专家经验和知识的映射,设计者根据相应的设计模板对产品的各个部分进行设计。

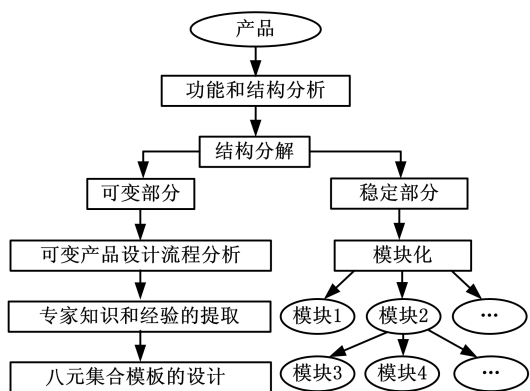


图3 产品结构分解的正向分析流程

在上述基于八元集合模板和专用模块的产品快速设计方法的指导下,即可开发相应的设计软件。针对创新设计部分开发基于八元集合模板的快速设计工具,这样当设计的产品局部需要变形时,只需针对相应的设计模板进行修改,而不影响产品的其他结构和功能,具有较好的灵活性。开发专用模块快速设计工具时,首先对需要继承原有设计的产品结构进行分解,使其在结构和功能上相对独立,建立专用模块的知识库系统,开发专用模块结构设计推理机和规则库等,采用向导的方式集成于快速设计系统中,引导设计者进行产品的设计。

综上所述,对产品进行基于八元集合模板和专用模块的快速设计可分为两个阶段进行:第一阶段,对产品结构进行分析,确定各部分的设计原理和方法;第二阶段,对设计系统进行集成。针对第一阶段分析的结果,完成八元集合模板的系统集成,完成专用模块产品配置的系统集成,设计出支持快速设计的系统的产品实例库(针对专用模块设计)、规则库、基础数据库(支持八元集合模板)等知识库和数据库。其软件系统构架如图4所示。

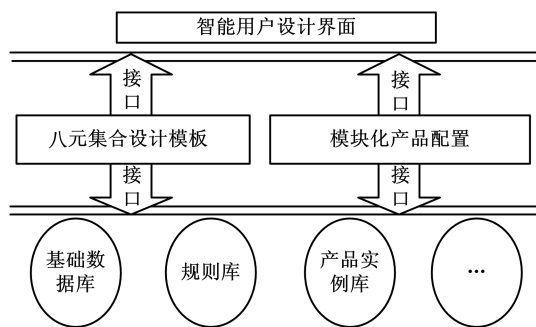


图4 快速设计系统构架

4 应用实例

模具是复合材料构件制造用的主要工艺装备,用以确定制件形状、结构关系以及控制外缘和获得良好的表面质量。复合材料构件制造时,在模具上完成复合材料聚合固化,有时还在成形模上进行预浸料的铺叠。随着复合材料在航空领域的广泛应用,复合材料构件模具的设计和制造时间在飞机研制周期中所占的比重越来越大。提高模具的设计效率,对缩短飞机研制周期起着重要作用。

根据本文提出的基于八元集合模板和专用模块的产品快速设计方法,复合材料构件模具结构的分解流程如图5所示(以某飞机复合材料构件模具结构设计为例加以说明)。从功能结构上来分,可将整个模具分为模具体和底座支架两部分。根据不同的复合材料构件,模具体结构差异较大,在设计过程中需要设计者具有工艺、制造等多方面的知识,其设计主要有两方面,一是对模具体可加工性的分析,以保证模具体的质量。对快速设计系统的要求是,设计者能够在设计阶段根据现有的条件快速判断模具体的可加工性,以支持模具体的快速设计。二是对模具体外形的设计。模具体外形设计的原始数据为复合材料构件的数学模型,传统的设计方法是,设计人员根据经验在产品轮廓线上选取合适的 n 个点组成 n 多边形,此即为模具体外形。此时设计者的经验和知识在设计过程中起着决定性的作用,这样所设计的模具结构存在很大的随机性。据此,专家的知识 and 经验可保证以下四点:①可尽量保证设计的模具体外形与产品数学模型相似;②使得设计的模具体尽量节省材料;③使得设计的模具结构有利于在加工时的装夹;④使得设计的模具体在现有加工条件下能合理加工。为了能有效地指导模具的快速设计,将专家的这些知识和经验映射为 *DesignPolygon*、*GetMinAera*、*VerifySurface*、*FixFeature* 四个八元集合模板,详细信息如表1所示。针对每一个设计模板设计了相应的设计工具以支持模具体的快速设计,其系统界面如图6所示。

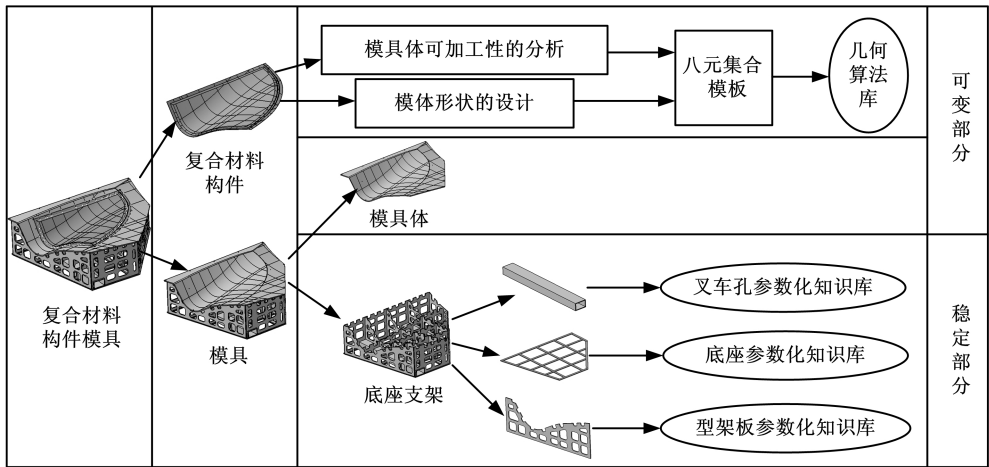


图 5 复合材料构件模具结构分解图

表 1 模具体设计的八元集合模板

Knowledge	Name	Mapping	Context	Problem	Method	Consequence	Configure	Knowledge-base
专家通过选取轮廓线上的点组成生成模具体轮廓	DesignPolygon	DesignPolygon(); { GetProfile(); GetDatumPlane(); }	产品轮廓线以及基准平面已知	设计模具体轮廓外形使其与产品轮廓外形相似	基于遗传算法的物体轮廓线多边形拟合算法	给定约束的多边形	Mapping (Problem) ↓ Name ↓ Context ↓ Method (Knowledge-base) ↓ Consequence	规则: ①面积最小 ②曲面局部曲率小于刀具半径 ③..... 算法库: ①遗传算法 ②多边形拟合算法 ③.....
根据经验使得设计的模具体最大限度地节省材料	GetMinAera	GetMinAera(); { Getprofile(); GetDatumPlane(); }	产品轮廓线以及基准平面已知	在满足功能前提下,使得设计的模具体最大限度的节省材料	拟合多边形的面积最小	保证多边形的面积最小		
根据经验判断成型曲面的可加工性	VerifySurface	VerifySurface(); { GetSurface(); DiscreteSurface(); }	成形曲面已知	判断成型曲面的能否使用现有的制造资源加工	对曲面连续性、曲率、单值性、是否存在闭角的检查	可加工的成形曲面		
根据经验使得设计的模具最有利于装夹	FixFeature	DesignFixFeature(); { GetDatumPlane(); GetFixtureMode(); }	基准平面以及机床的装夹方式已知	设计的模具体有利于在机床上的装夹,装夹方位保证对曲面零件的顺利加工	对曲面零件设计基准的检查	零件的正确装夹方式		

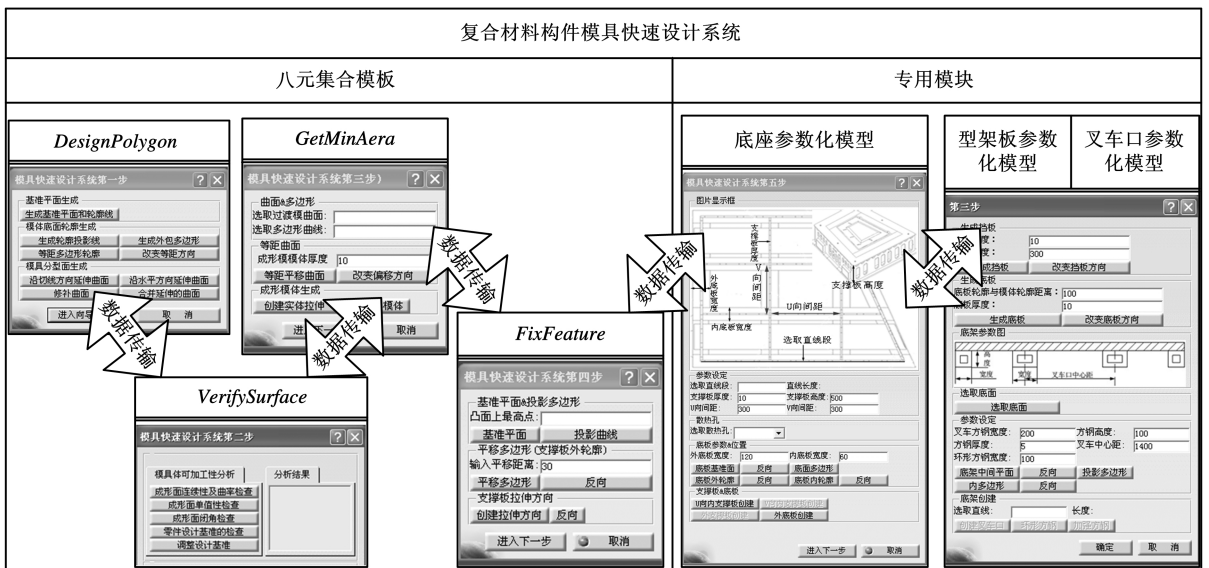


图 6 复合材料构件模具快速设计系统界面

在设计模具体的过程中, 专家的经验 and 知识通过模板集成于快速设计系统中, 设计者不需要过多地考虑专家行为对设计过程的影响, 便可以快速地生成合格的模具体。例如, 根据以往的设计, 专家凭经验设计模具体的轮廓外形, 使其耗材最少; 在基于八元集合模板的设计过程中, 设计者只需根据 *GetMinAera* 模板中的 *GetMinAera()* 映射接口函数调用拟合多边形最小面积的方法, 便可以准确地设计出最节省材料的轮廓多边形。

底座支架的结构相对固定, 采用模块化设计思想^[3-5]进行设计, 根据对底座支架的功能和结构分析, 可将其分解为底座、型架板, 以及叉车孔等子模块(图 5), 这些子模块从制造的角度已经不能再分解, 而且这些子模块形状规则, 易于参数化驱动。根据具体的需求分别建立各子模块的参数化驱动模型, 包括底座的参数化模型、型架板的参数化模型、叉车口的参数化模型。以管材、板材的截面以及叉车口、散热口的参数化模型为例, 其形状为操场形、圆形、矩形或者倒角矩形, 其统一的参数化模型如图 7 所示。如果 $r = 0$, 则为矩形, 且当 $w = h$ 时为正方形; 如果 $r = w/2 = h/2$, 则为圆; 如果 $r = w/2$ 且 $h > w$, 则为操场形。当 $m = 0$ 时为散热口截面, 当 $m \neq 0$ 时为其他型材或者叉车口截面。

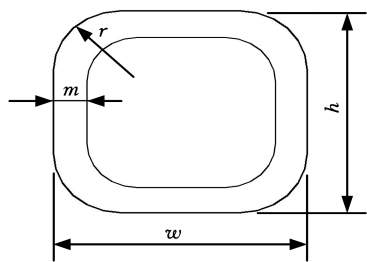


图 7 截面的统一参数化模型

根据专用模块开发相应的模块化设计支持界面如图 6 所示。在进行设计时, 设计者只需在系统界面中输入相应的参数即可快速生成底座支架的结构。

飞机工装快速设计系统根据企业的需求, 利用 CATIA 提供的二次开发接口 CAA 开发, 集成于 CATIA 中, 现已成功应用于某型号飞机的工装设计中, 大大提高了工装设计的效率和产品的设计质量, 取得了良好的效果。

5 结束语

本文对传统的设计模板理论进行了改进和扩充, 设计了八元集合模板, 通过模板来映射设计过

程中的专家知识和经验, 并将其应用于产品的创新设计中, 解决了模块化设计方法柔性不足的问题。结合模块化设计方法的优点, 提出了基于八元集合模板和专用模块的产品快速设计方法, 该方法符合设计者的设计习惯, 在该方法的指导下, 设计的软件系统构架能较好地支持产品的快速设计。该方法在飞机工装快速设计系统中的应用, 表明了其合理性和有效性。

结合工程项目实际, 在今后的工作中将以八元集合模板为基础, 对专家经验和知识的获取以及知识库的快速检索作进一步深入的研究。

参考文献:

- [1] 刘洪. 飞机工装设计制造技术探讨[J]. 航空制造技术, 2006(12): 69-71.
- [2] 顾雨甜. 飞机装配型架卡板快速设计及分析技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
- [3] 侯亮, 唐任仲, 徐燕申. 产品模块化设计理论、技术与应用研究进展[J]. 机械工程学报, 2004, 40(1): 56-61.
- [4] Ito Y, Shinno H. Structural Description and Similarity Evaluation of the Structural Configuration in Machine Tools[J]. International Journal of Machine Tool Design and Research, 1982, 22(2): 97-110.
- [5] Fujita K. Product Variety Optimization under Modular Architecture [J]. Computer - aided Design, 2002, 34:953-965.
- [6] Alexande C. The Timeless Way of Building[M]. London:Oxford University Press, 1979.
- [7] Menzies T. Applications of Abduction: Knowledge Level Modeling[J]. International Journal of Human Computer Studies, 1996, 45(3):305-335.
- [8] Schmidt D C. A Family of Design Patterns for Flexibly Configuring Network Services in Distributed Systems[C]//Third International Conference on Configurable Distributed Systems (ICCDs' 96). Washington, 1996: 124-135.
- [9] 邓昕, 陈意云, 史翔. 支持面向对象技术的设计模板[J]. 小型微型计算机系统, 1998, 19(6): 1-7.
- [10] Erich G, Richard H, Ralph J, et al. Deign Patterns: Abstraction and Reuse of Object-oriented Design[C]//European Conference on Object-oriented Programming Proceedings (ECOOP' 93), Volume 707 of Lecture Notes in Computer Science. London:Springer-Verlag, 1993:406-431.
- [11] Opdyke W F, Johnson R E. Refactoring: An Aid in Designing Application Frameworks and Evolving Object-oriented Systems[C]//SOOPPA Conference proceedings. New York, 1990: 145-161.

基于模糊理论的数控车床故障分析

张英芝¹ 申桂香¹ 吴 甦² 郑 锐¹ 何 宇¹

1. 吉林大学, 长春, 130025 2. 清华大学, 北京, 100084

摘要: 根据收集的 17 台某型数控车床可靠性数据, 首先采用统计分析方法从整体上确定出各种故障部位与模式的比例, 然后针对危害度值排序法中故障影响概率不确定的问题, 将模糊数学中的模糊语言变量和模糊综合评价方法引入到危害度分析中, 进而找出对数控车床可靠性影响较大的故障模式与薄弱环节。

关键词: 数控车床; 故障影响概率; 模糊变量; 模糊评价

中图分类号: TG659; TB114.3 **文章编号:** 1004—132X(2009)19—2354—04

Failure Analysis of NC Lathe Based on Fuzzy-set Theory

Zhang Yingzhi¹ Shen Guixiang¹ Wu Su² Zheng Rui¹ He Yu¹

1. Jilin University, Changchun, 130025 2. Tsinghua University, Beijing, 100084

Abstract: According to the data collected from 17 NC machine tools of one certain type, the statistical method was firstly used to carry out the rate between the failure positions and the failure modes. To solve the uncertain problem of the failure effect probability when sorting the criticality values, fuzzy linguistic variables and fuzzy comprehensive evaluation were introduced to the criticality analysis. Then the weakness and the failure modes can be identified, which has greater effect on the reliability of NC machine tools.

Key words: NC lathe; failure effect probability; fuzzy variable; fuzzy assessment

0 引言

故障模式、故障影响及危害度分析 (failure mode effect and criticality analysis, FMECA) 又称故障效应分析, 是通过分析系统与组成系统的各零部件之间的可靠性功能关系, 找出导致系统失效的原因, 有针对性地加强和改进造成系统失效的薄弱环节, 从而提高系统可靠性和使用寿命的一种故障分

析方法^[1]。

在近几年的数控车床可靠性研究中, 虽然也有采用 FMECA 方法的, 但由于数控车床是机电一体化产品, 其故障模式复杂多样, 故障原因、故障现象与故障机理之间存在着随机性和模糊性等十分复杂的不确定性关系, 致使在评估数控车床的故障影响即估算其危害度时, 存在很大的模糊性, 用常规的分析方法很难给出有效而准确的点估计值。因此, 本文引入模糊数学方法, 利用模糊集合论中的模糊语言变量和模糊综合评判方法来对故障危害度进行模糊分析, 以提高分析的准确性^[2-6]。

收稿日期: 2008—11—21

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (2007AA04Z402); 国家自然科学基金资助项目 (50875110)

[12] 胡玉杰, 李善平, 郭鸣. 基于本体的产品知识表达 [J]. 计算机辅助设计图形学报, 2003, 15(12): 1531-1537.

[13] 谢永春, 朱才朝, 张晶. 旋转机械故障诊断 KBE 系统中的知识表达技术 [J]. 中国机械工程, 2004, 15(14): 1262-1265.

[14] Chandrasekaran B. Functional Representation: a Brief Historical Perspective [J]. Applied Artificial Intelligence, 1994, 8(2): 173-197.

[15] Iwasaki Y, Vescovi M, Fikes R, et al. Casual Functional Representation Language with Behavior-based Semantics [J]. Applied Artificial Intelligence, 1995, 9(1): 5-31.

[16] Bogoni L. More Than Just Shape: a Representa-

tion for Functionality [J]. Artificial Intelligence in Engineering, 1998, 12(4): 337-354.

[17] 陈永亮, 徐燕申, 齐尔麦. 机械产品快速设计平台的研究与开发 [J]. 天津大学学报, 2002, 35(6): 744-748.

(编辑 王艳丽)

作者简介: 李桂东, 男, 1982 年生。南京航空航天大学机电学院博士研究生。研究方向为 CAD/CAM、工装快速设计。发表论文 5 篇。周来水, 男, 1962 年生。南京航空航天大学机电学院教授、博士研究生导师。安鲁陵, 男, 1962 年生。南京航空航天大学机电学院教授、博士研究生导师。谭昌柏, 男, 1978 年生。南京航空航天大学机电学院讲师、博士。