



Research  
Intelligent Manufacturing—Review

## 定制化产品智能设计关键技术研究综述

张树有, 徐敬华\*, 苟华伟, 谭建荣

State Key Laboratory of Fluid Power and Mechatronic Systems, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 5 April 2017

Revised 16 May 2017

Accepted 21 June 2017

Available online 31 October 2017

#### 关键词

定制化产品

用户需求

变形设计

智能设计

知识推送

### 摘要

大数据和信息物理系统(CPS)等技术的发展使人们对产品设计的需求增加。产品数字设计包括使用先进的数字技术完成产品设计过程,如几何建模、运动学和动态仿真、多学科耦合、虚拟装配、虚拟现实(VR)、多目标优化(MOO)以及人机交互。定制产品智能设计的关键技术包括:客户需求的描述与分析、客户基础的产品族设计(PFD)、定制产品的配置和模块化设计、定制产品的变型设计,以及产品智能设计的知识推送。定制产品智能设计的发展趋势包括定制产品的大数据驱动智能设计技术及定制的设计工具和应用。通过计算机的高精度数控机床设计,我们验证了该方法的有效性。

© 2017 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of the Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. 引言

产品数字设计包括使用先进的数字技术完成产品设计过程,如几何建模、运动学和动态仿真、多学科耦合、虚拟装配、虚拟现实(VR)、多目标优化(MOO)以及人机交互。虽然对于自定义设计没有通用的定义,但其基本含义是,定制的产品是为了满足客户个人和多样化的需求,做到尽可能快,且实现尽可能低的成本。许多学者对产品设计的方法论和关键技术进行了研究[1–3]。定制设计通常涉及以客户为导向设计[4]的策略。面向客户的设计是基于对客户需求的分析,并涉及通过序列化开发的模块化的预制产品系列。以现有产品家族为基础的有序设计,可以快速设计产品结

构,以满足客户的定制需求。以客户为导向的设计会影响市场新产品的成本和时间。客户订单的设计影响了个人定制产品的交付。定制产品的设计和制造是按订单生产的。

复杂的设备,如计算机数控(CNC)机床、低温空气分离装置(ASU)、板翅式换热器(PFHE)和注射成型设备等,具有需求多样性、模糊动力学、繁琐的设计响应以及复杂的设计过程等特点。如何满足客户的个性化需求,实现复杂定制设备的快速设计与创新,已成为决定设备制造企业生存和竞争力的重要因素。

因此,我们迫切需要开发一个智能设计平台,以支持制造产品的开发。这样,数字设计或产品就会朝着智能化和个性化的方向发展。

\* Corresponding author.

E-mail address: [xujh@zju.edu.cn](mailto:xujh@zju.edu.cn)

## 2. 关键技术

专家预测，未来制造业的一半以上将涉及个人定制。尽管这些研究是由中国机械工程学会[5]进行的，但它表明制造业企业对产品开发和变革的需求将会更加强烈，而残酷的现实是现代企业缺乏先进的设计能力。值得一提的是，许多机构[6,7]对大数据和定制产品的设计技术进行了研究。斯坦福大学[8]的结构化设计模型结合了需求、技术和产品性能的映射。耶鲁大学[9]也基于大数据的分析方法支持设计研究。

定制产品智能设计的关键技术包括：客户需求（CR）的描述与分析；面向客户基础的产品族设计（PFD）；定制产品的配置和模块化设计；定制产品的变型设计；以及面向产品智能设计的知识推送。

### 2.1. 客户需求的描述与分析

客户需求（CR）通常包括一些明显的特征，如模糊、不确定性或动态化。对于定制设计的实现，准确描述模糊CR是很重要的。

定制化设计涉及通过分析、数据挖掘和预测来满足CR的定制需求。常见的设计方法包括基于卡诺模型的分析方法和QFD。在卡诺分析方法[10]中，CR分为基本要求、预期要求和令人兴奋的要求。定制设计首先要满足基本要求，然后尽可能满足期望和激动人心的要求。QFD方法[11]是一种多级演绎分析方法，将CR转化为设计要求、零件特性、工艺要求和产品要求。然后建立一个名为“质量之屋”的产品规划矩阵。在这一点上，基于需求的设计困难在于如何分析、预测和跟踪客户的潜在需求。

关于CR的描述和分析，Jin等[12]研究了信息的代表性、信息的比较和信息多样性，提出了三种贪婪算法，以获得最优化问题的最优解。Wang和Chin[13]提出了一个线性目标规划（LGP）方法来评估QFD中CR的相对权重。Juang等[14]利用模糊推理和专家系统，在机床行业提出并开发了客户需求信息系统（CRIS）。Haug[15]基于十个工业设计师的访谈和参考项目的研究，建立了一个概念框架；这个框架定义了整体的CR生成模型和相关的通信问题，使得设计者能够更有效地激发CR，并允许设计者减少CR，避免在设计路径上浪费精力。Wang和Tseng[16]提出了一种简易的，基于贝叶斯公式理论基础的方法来描述客户的技术功能需求和主观偏好，并根据详细的属性和设计参数对其进行

映射。Raharjo等[17]提出了一种新的系统的方法来处理QFD中的CR动态。Elfvengren等[18]研究了集团决策支持系统（GDSS）在工业企业CR评估中的有用性和可用性。Cevik Onar等[19]提出了一个模糊的模糊QFD，它能比其他模糊集的经典扩展更客观地反映人类的不坚定性，然后将其应用于计算机工作站的选择问题。Osorio等[20]提出将通用产品数据模型（PDM）扩展到MC和可持续性范式，以满足支持可持续的大规模定制（S-MC）产品设计过程的需求。

关于产品需求的描述，研究主要集中在以下几点：基于集合论的需求描述，基于本体需求的更广泛的描述，以及基于模糊聚类的需求描述。

基于CR的设计面临以下挑战：

（1）对定制的广义要求建模。为了快速提高定制化需求的标准化，保证设计过程的准确性和一致性，对于CR的理解，需要从时间维度、空间维度、过程维度等方面构建一个多层次的通用需求模型。

（2）预测和深入发掘顾客潜在需求。随着大数据的发展和成熟，我们可以通过互联网和物联网来收集数据。从海量数据中挖掘用户的行为模式和消费习惯，以预测定制需求，因此，确定隐藏的定制需求就显得尤为重要。

（3）映射和转换CR。为了保证CR转换为技术要求过程中的连贯性、精确性和及时性，就有必要建立一个能够自动映射和转换CR的模型，包括CR的变化性、模糊性、潜在性，这些都需要转换到技术要求中去。

（4）为客户定制需求创造价值设计。基于对已有的CR的分析，进而预测和创造新的CR是比较困难的。并且，在考虑到成本、可行性、紧迫性等因素时，也很难再去构建定制化服务。

CR描述和分析就形成了智能设计的定制化产品。车床切削中心的布局设计如图1所示。

### 2.2. 面向客户基础的产品族设计

产品族设计（PFD）是指根据CR，对某一特定客户群的产品参数进行提取，以及主体结构、主模型、主文档等动态产品的变量模型的形成。根据不同的变量驱动模式，PFD方法可以是模块驱动的或参数驱动的[21]。模块驱动的产品系列包括一系列基本的、必需的和可选的模块，并且可以通过不同模块的组合来满足来自客户的不同需求。参数驱动的产品族包括一系列产品，它们具有相同的公共变量，但有不同的可调变量；产品的结

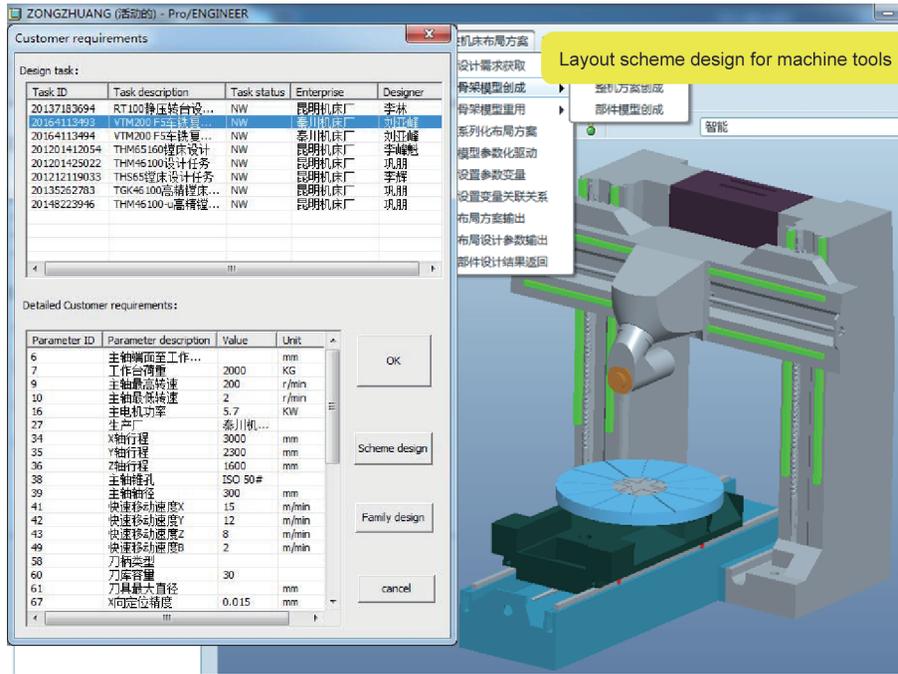


图1. 一个车床切削中心的布局方案设计。

构和性能可以通过在保持相同的公共变量的同时，上下缩放可调变量来改变，以满足单个的CR。

PFD方法聚焦于如何确保产品族的最优化、数据一致性，以及产品在其使用寿命期内的可追溯性。PFD面临的挑战主要包括以下几个方面：

(1) PFD任务书。鉴于CR和产品性能特征的优先性和重要性，对一个产品族如何选择其合理的变量参数和取值范围，从而实现该产品族整体的最优化调整以及成本的降低和竞争力的增强，是很困难的。

(2) 产品族的模块化。产品族的模块化设计聚焦于在基于设计约束条件得到的主体结构条件下，如何构建出一系列的功能模块和结构模块。构建一个个性化产品是有难度的，这需要结合不同模块，从而满足不同客户的定制化需求。

(3) 产品族的动态模型。由于市场、技术创新、维护、回收等原因，在产品寿命期内产品族数据是不断变化的。产品族工艺动态模型的构建可以确保产品族数据的连贯性、精确性以及生命周期内的可追溯性。

(4) 产品族进化遗传算法。基于对产品族目前进化历史和现状的分析和深入挖掘，从而构建其遗传算法模型是不容易的。与此同时，根据生物进化史和相应的遗传进化原理，要想实现产品族的重复利用和自我重组革新，也是有难度的。

(5) 产品族的设计评估。通过PFD的评估指导，来获取产品最低成本和市场竞争力等信息有难度。但通过

利用产品和元件的重复利用率和维修服务大数据，上述难题就可以得到解决。

### 2.3. 定制产品的配置和模块化设计

配置设计意味着对面向客户的动态产品模型进行一个合理的变体，以形成满足MC[22]和CR的单个产品结构。目前对配置设计的研究侧重于三个方面：配置知识的表示、配置知识的建模以及配置问题的解决方案[23]。在未来，配置设计的主要问题是挖掘配置知识，以提高自动化和智能化、优化配置设计。

关于定制产品的配置和模块的设计，Stone等[24]提出了三种启发式方法：主导流、分支流和逆行传输函数。Fujita[25]讨论了产品种类的设计和优化问题。Carnduff和Goonetillake[26]提出了一个配置管理模式，其中配置作为版本管理。Jiao等[27]提出了一种通用遗传算法(GGA)，为PFD开发了一套通用编码方案，以适应不同的PFD场景。Tsai和Chiu[28]采用基于案例的推理(CBR)系统来推断出一个新的印刷电路板(PCB)产品的主要工艺参数，并使用最近邻点插值法(SNN)来客观地检索类似的设计情况。在产品设计中，Yadav等[29]合并了组件模块化和功能模块，以使用一种通用的材料清单(GBOM)来解决设计-供应链(DFSC)问题。Schuh等[30]提出了一种三阶段的整体方法来开发模块化产品架构。Pakkanen等[31]提出了一种将现有产品种类合理化的方法，用于支持产品配置的模块化产品

线, 即所谓的棕地过程 (BfP)。Chen和Liu[32]利用产品的内部和外部两个方面以及接口的开放性, 构建了模块化产品创新的接口可能性的战略矩阵。Dahmus等[33]提出了一种建立产品组合的方法, 该方法利用功能结构的产品功能建模, 同时也利用了产品家族中的模块以及可能存在的共性。Dou等[34]提出了一种基于犹豫度的交互式遗传算法 (IGA-HIIF), 以实现复杂产品设计和定制的用户需求的快速、准确响应。Du等[35]开发了一种斯塔尔博格博弈理论模型, 用于产品系列配置和缩放设计的联合优化, 其中, 两层决策结构揭示了模块配置与参数缩放的耦合决策过程。Ostrosi等[36]提出了一种基于模糊分析的方法来辅助产品配置。Khalili-Araghi和Kolarevic[37]提出了一个维度定制系统的概念框架, 它反映了建筑行业中基于约束的参数设计的潜力。Modrak等[38]开发了一个用于生成所有可能的产品配置的方法框架, 并提出了一种方法, 通过指定产品配置的种类和子类来确定所谓的产品配置的复杂性。他们还利用玻尔兹曼熵理论[39]计算了产品结构的复杂性。Chandrasekaran等[40]提出了一种采用PFD模板的电子机械消费产品的结构化模块化设计方法。

上述研究主要集中于设计结构矩阵的定制产品模块规划方法、规则的配置设计方法、实例的配置设计方法等。

在配置和模块化设计中遇到了以下挑战:

(1) 实现多目标优化 (MOO) 的配置设计。在满足客户订单的要求时, 配置设计需要综合考虑制造成本、服务方式、低碳和绿色的特性, 以及许多其他的产品目标, 以实现多目标优化。

(2) 挖掘配置知识。使用大数据技术, 很难挖掘企业现有的历史数据, 并将其转化为可提供的配置知识和产品配置设计的基础。

(3) 使用推理和决策技术进行配置设计。随着个性化配置知识复杂性的增加, 推理和决策技术影响了配置设计的效率, 影响了配置结果的有效性、经济性和可行性。

(4) 实现基于VR的配置设计。在虚拟现实技术、增强现实技术和混合现实技术方面的进步, 配置设计将提供在线感知和体验功能, 并得到相应的服务, 从而极大地提高客户满意度。

图2和图3分别显示了龙门三阶和四阶模态的总结构变形。为了研究动力特性, 进行了基本框架和竖向柱模态分析。第一、二、三、四、五阶模态频率分别为72.042 Hz、78.921 Hz、115.390 Hz、162.860 Hz、163.680 Hz。

## 2.4. 定制产品的变型设计

变型设计是指完成一种几何结构或产品模块的设计, 以产生与CR相对应的更多设计方案。

Nidamarthi等[41]提出了一种系统的方法来确定盈利的产品线的基本设计要素。Snaveley和Papalambros[42]提出了一种方法, 通过将组件抽象为更高的抽象级别来减小配置问题的大小。Yu等[43]提出了一种基于CR变化的复杂产品变异型设计的联合优化模型, 以最大化客户满意度和最小化成本。Gero[44]提出了一些创造性设计的计算模型。Hong等[45]提出了一种两步相似的边界表示 (B-rep) 文件的相似性比较方法, 以便在设计

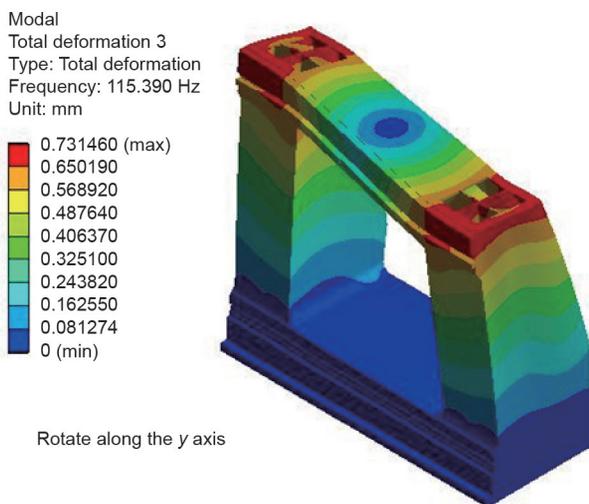


图2. 龙门三阶模态的结构变形。

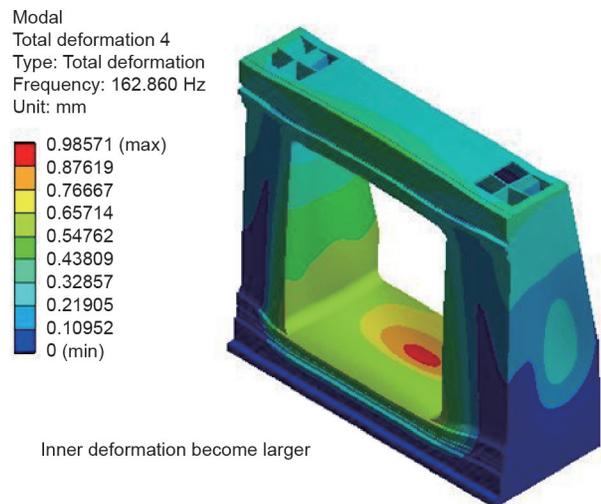


图3. 龙门四阶模态的结构变形。

过程中比较机械成分之间的相似性。Fowler[46]注意到, 变型设计是一种适应现有设计规范的技术, 以满足新的设计目标和约束, 并提出了目前系统中不同设计的障碍, 以改进现有系统、支持变式设计。Chen等[47]提出了一种基于属性、面向对象的方法, 有效和全面地实现了变更影响分析(CIA)任务的变体设计。Lo等[48]提出了一种基于QFD三维形态学图的整体方法, 以支持序列化产品的改型设计, 并为了满足技术成熟和高度模块化产品的特殊需要, 简化传统的QFD级联过程。Modrak等[49]研究并提出了一种新颖的方法, 可以根据给定的基本组件数量和可选的组件数量来创建所有可能的产品配置和变化。Wang等[50]提出了一种装配型设计体系结构和互补装配方法。Ketan等[51]基于不同特征的工程描述概念, 引入了三种不同类型的特征模型。Prebil等[52]研究了与计算机辅助设计(CAD)系统的能力相关的设计过程方法的可能性, 该系统用于制造旋转连接和车间文档的设计。Nayak等[53]提出PFD的基于差异的平台设计方法(VBPDM), 该方法利用家庭产品设计的最小变化来满足一系列性能要求。Jiang和Gao[54]提出了一种绘图工具圆锥曲面。3D图的范围可以用一个圆锥来画, 比只用平面和球体画的要大。在添加了一个圆锥曲面之后, 设计者可以画出一个图形, 可以用自由度小于9的方程来描述。Lee[55]提出了一种基于自由度(DOF)的图形简化方法, 以最大限度地提高几何约束求解器的效率、鲁棒性和可扩展性。

变型设计的挑战包括: 建立基于多领域互用模型的结构变型设计, 定制基于进化的设计, 并为复杂设备开发提高性能的设计。

为了完成一个几何结构或产品模块的设计, 以产生与CR相对应的更多设计方案, 表1对比了多轴机床的两种设计方案。图4和图5分别显示了一个车床切割中心的方案1和方案2。方案1的运动学链是WCOYZXAD, 方案2的运动链是WCYOZXAD, 其中, W代表工件, O代表机器床, D代表加工工具, X、Y、Z、A、C代表机床的坐标轴。

## 2.5. 面向产品智能设计的知识推送

为了决定某种特定产品的最佳设计标准, Younesi和Roghianian[56]就智能设计的产品支持方面, 针对可持续产品设计, 提出了一种系统化的实验室方法和模糊网络分析法, 该方法面向环境的QFD, 包括模糊决策试行与评价。Pitiot等[57]研究了一种初步产品设计方法, 该

表1 多轴机床两种设计方案的比较

	Scheme 1	Scheme 2
Traverse path X/Y/Z (mm)	500/380/380	500/450/400
Drive power (40%/100% DC) (kW)	35/25	35/25
Maximum speed ( $r \cdot \min^{-1}$ )	18 000	18 000
Torque (40% DC) (N·m)	130	121
Rapid traverse X/Y/Z ( $m \cdot \min^{-1}$ )	80/50/50	60/60/30
Feed power (kN)	5.0	4.8
Fixed table-clamping area (mm)	800 × 500	700 × 500
Fixed table-clamping area maximum load (kg)	500	500
Rotary table-clamping area (mm)	$\phi 500 \times 380$	$\phi 630 \times 500$
A swivel range ( $^{\circ}$ )	+90—-18	+110—-5
C swivel range ( $^{\circ}$ )	360	360
Rotary table-clamping area maximum load (kg)	200	200/300
Control system	Heidenhain iTNC 530	Heidenhain iTNC 530 Siemens 840D

DC: direct current.

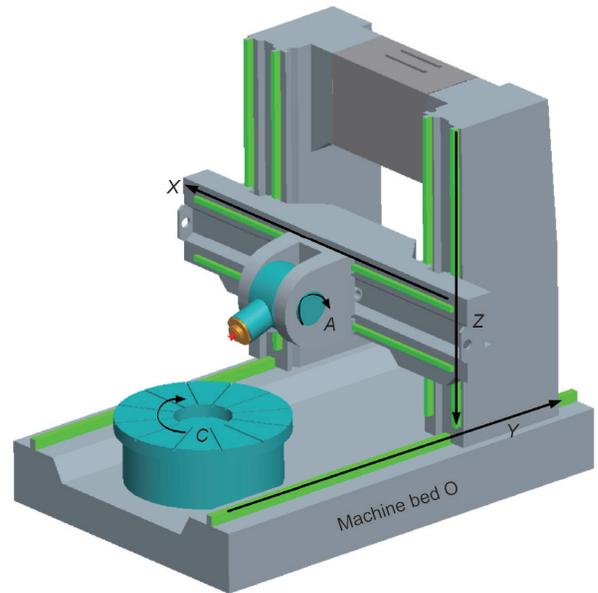


图4. 车床切割中心方案1。

方法基于名为“知识导向进化算法”(EAOK)的原始进化算法。Costa等[58]提出一种将CBR和规则库系统相结合的产品范围模型(PRM), 以提供产品设计决策支持。Winkelman[59]提出智能设计目录, 其包括与标准件目录相关的虚拟设计环境。Hahm等[60]提出了检索工程文件的框架, 语义歧义更少, 同时更强调个性化信息需求。Akmal等[61]提出了基于本体的方法, 该方法可使用基于特征的相似性测量来决定两个类别之间的相似处。Morariu等[62]从整合方面出发, 提出了智能产品

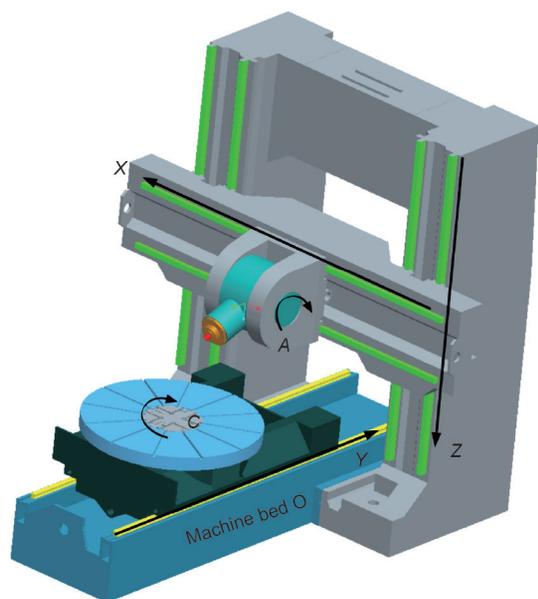


图5. 车床切割中心方案2。

的分类，并引入了针对智能产品的正式化数据结构。Li等[63]基于信息系统、数据挖掘和可拓学理论，提出知识训练方法，并设计了知识管理平台来提高决策制定的质量。Diego-Mas和Alcaide-Mazal[64]提出了基于神经网络的方法，模拟用户对表单设计的情绪反应，并发展出针对个人用户认知的理论架构。Tran和Park[65]提出了8组29个评分标准，以帮助设计者和从业者比较和选择产品服务系统（PSS）设计的合适方法论。Kuo等[66]使用纵向优先搜寻，创造了前瞻性生态设计流程。Andriankaja等[67]提出一种详尽的PSS设计框架来支持PSS语境中的集成产品和服务设计。Muto等[68]提出了任务管理框架，该框架能使生产者为他们产品销售业务发展出不同的PSS选择。Ostrosi等[69]提出了基于代理技术的方法，来协助概念性设计中的产品配置。Chan等[70]提出了一种智能的模糊回归方法形成模型，该模型能够表示情绪反应和设计变量间的非线性和模糊关系。

影响知识推送设计的挑战包括：建立基于实例的产品设计方法；根据基于知识的工程（KBE），运用智能设计的方法；开发出一个以任务为导向需求的知识推送。

脑电图（EEG）通过使用生物反馈和电磁场的生物效应，测量并记录了大脑的电活动。名为电极的特殊传感装置连接头部。脑电活动的正常图形的改变，可以传达某种特定状态，如顿悟、想象和推理。图6为机床的智能设计，该设计运用了旨在智能设计的EEG。图7为测量EEG的图形用户界面（GUI），图8为EEG的相对电压和知识推送的光谱分析。

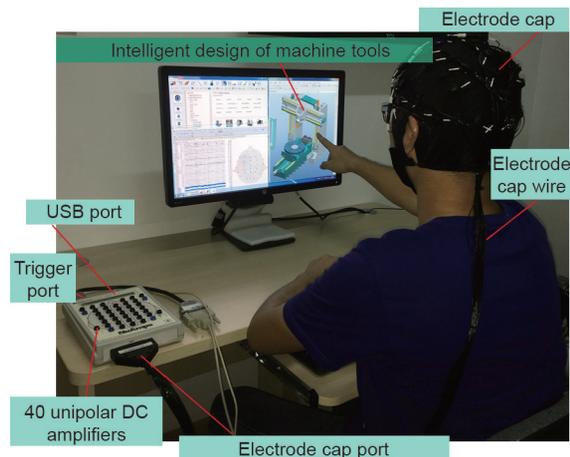


图6. 一种用于机床的智能设计。DC：直流电。

### 3. 难点与我们之前的研究工作

现有的定制产品智能设计方法往往要求提前建立设计规则和设计模版，并利用知识匹配，以提供设计知识推送和增强设计智能。

目前完成个性化需求的定制产品的设计仍然困难重重。以下技术难点仍然阻碍了快速且创新的复杂定制设备设计的实现。

(1) 难以适应基于大数据的需求挖掘。在大数据环境中，个人的数据来源主要来自照片、视频、动作和以无线射频识别技术形式存在的非结构化数据，这些并不限于结构化数据。建立异构和非结构化多来源数据之间的个性化需求的匹配和协调的关系是很困难的。所以需求数据分析的精确性受到影响。

(2) 难以满足纷繁的个性设计需求和快速响应支持针对个人要求的定制产品的设计创新方案。通过群体智能，完成来自不同专业和不同学科背景的智能设计以发展公共团体的智慧，存在难点。

(3) 难以掌握设计者的固有知识和经验。现有的智能设计需要基于学习专业、自有技能以及现有设计经验的相关知识。

我们研究了精确数控机床、超大型低温ASU、PFHE、注射成型设备和低压断路器（CB）[71–81]的智能设计理论、方法和定制设备的应用。

### 4. 发展趋势

#### 4.1. 定制产品的大数据驱动智能设计

近年来，随着如互联网、信息物理系统和其他技术的发展和运用，人类已经进入了大数据时代。基于互联

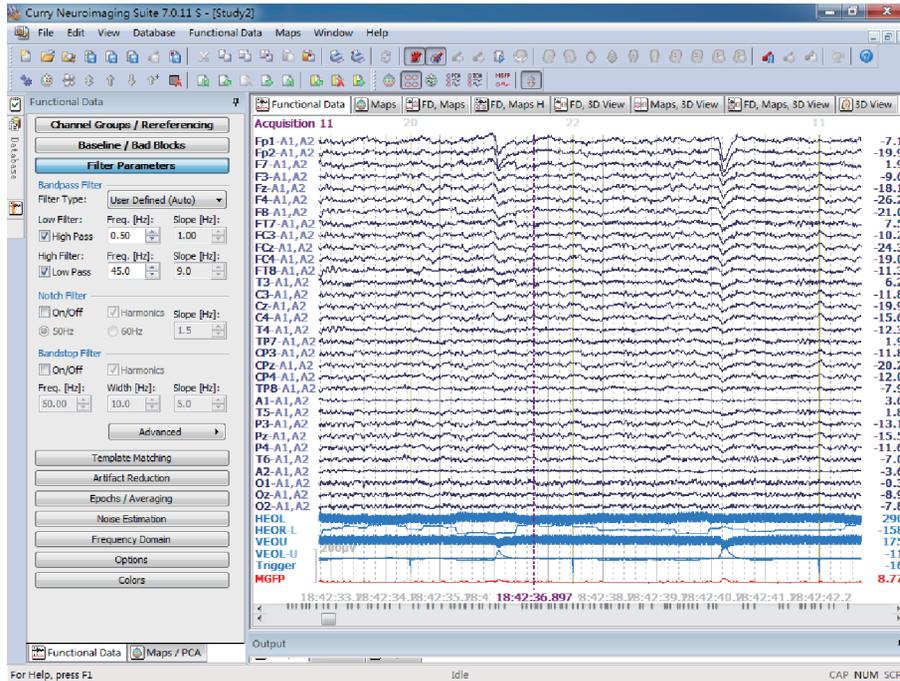


图7. 用于测量EEG的GUI。

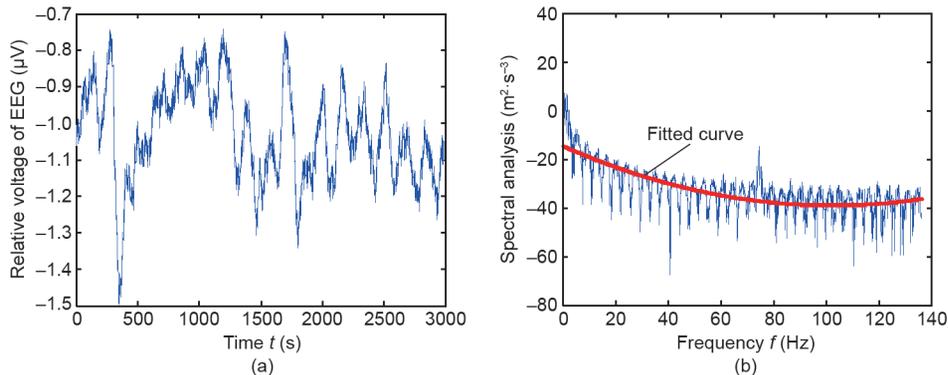


图8. (a) EEG的相对电压和 (b) 知识推送的光谱分析。

网平台，中国的互联网+（始于2015年）倡议，跨越国界，通过信息和交流技术的使用，将所有行业连接在一起，创造新的产品、新的商业和新的模式。

大数据改变了产品设计和工业生产环境。这些改变强烈地影响了个性化需求的分析和定制设备设计的方法。具体产品性能如下。

#### 4.1.1. 大数据对个性化要求的影响

设计定制设备与设计大众化产品不同，因为其通常反映来自客户订单的特别需求。这些CR信息往往不存在规律。不同订单之间的关系并不明显，从而导致出现产品要求信息的类型极其混杂、信息总量庞大的情况。随着电子商务概念的发展，如线上对线下（O2O）、商家对个人（B2C）、商家对商家等，大量关于有效个体

需求的信息开始隐没于大数据之下。产品设计中的一个基本问题就是如何挖掘和转换个人需求，来设计具有高效率、低成本的定制设备。

#### 4.1.2. 群体智能设计对设计模式的影响

定制设备设计通常基于批量生产，并进一步开发，来满足顾客的个人需求。根据客户的特殊要求，对基本产品及其组成模块，进行了模块化重组和变种设计。一个新的进化设计方案被引进，该方案能够配套提供选择和改进现有的设计方案。为客户提供个人定制产品，大众产品和传统定制设计的有机结合得到实现。在互联网时代，定制设备的设计源于知识和经验集成的公共团体，并不局限于单个设计师。通过这种方式，通过群体智能设计，提高了定制设备的创新能力。因此，互联网+环境

就能将原始技术授权，从制造企业内部或一对一的设计向融合了变种设计和群体智能设计的设计模式转变。

#### 4.2. 定制设计工具和应用

使用智能CAD系统和KBE的智能设计是产品设计发展中的新趋势。这是一个数据处理和应用的逐渐深化的过程，从数据库到数据仓库，再到知识库。

图9为数控机床的精确分配设计的GUI。图10展示了数控机床的设计集成的GUI。图11为使用五轴数控切削中心的表面加工，立铣头倾斜角度为45°。

## 5. 结论

### 5.1. 智能设计与个体需求的呼应

与个体需求相对应的智能设计过程包括实现个体需求和参数的相互融合，并提供一个解决动态响应和个体需求的智能转化基础。

未来定制设备设计的基本特点是数量庞大、不完整、嘈杂和随机。非结构化设计需求信息同样在个体需求间映射。迫切需要从大数据环境中获取不同需求和设计参数的相互融合映射模型。

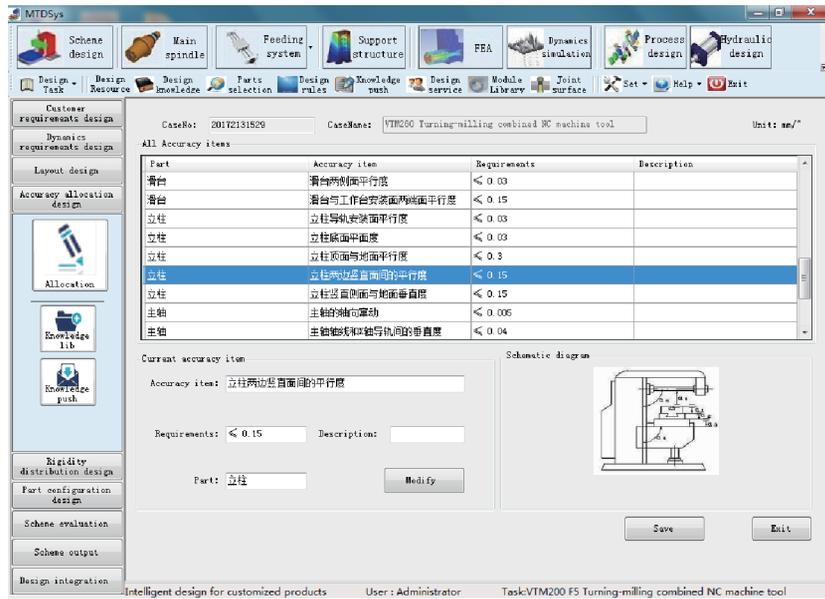


图9. 运动链层次视图中精确分配设计的GUI。

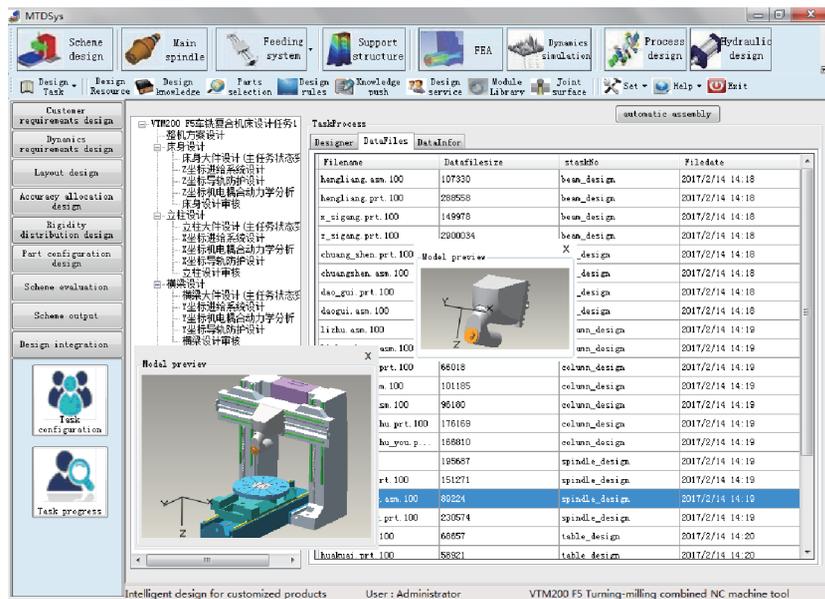


图10. 车床切割中心组件和整机的智能设计GUI。

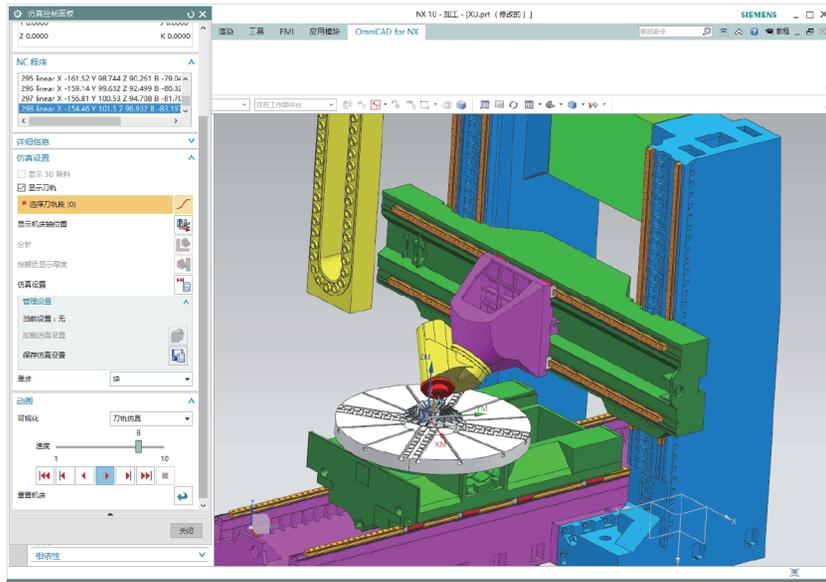


图11. 使用五轴数控切削中心的表面加工，立铣头倾斜角度为45°。

## 5.2. 使用群体智能，而不是单一的设计师的定制设计

使用群体智能的定制设计过程包括实现群体智能平台设计的驱动和反馈，并为互联网+定制设备的进一步结构创新设计平台，提供技术支持。

定制产品的未来设计在于公共社区的多个成员之间的相互合作的过程中，不局限于单一设计师的群体智能设计。群体智能设计可以集成到公共组织的智能中。

## 5.3. 使用知识推送的定制产品的智能设计

知识推送的定制产品的智能设计过程包括实现基于反馈特性的设计来源的主动推送，增强复杂定制设备的智能设计。在未来，定制产品的智能设计可通过基于知识推送的设计状态反馈和场景触发来实现。随着先进技术的发展，如云数据和事件-条件-动作规则（ECA），定制产品的未来智能设计将更以需求为中心并且知识多元化，同时具有相当高的专业水平和较高的设计效率。

## 致谢

本文所进行的工作由国家自然科学基金（51375012和51675478）、浙江省科技计划项目（2017C31002）和中央高校基本科研业务费专项资金（2017FZA4003）资助。

## Compliance with ethics guidelines

Shuyou Zhang, Jinghua Xu, Huawei Gou, and Jianrong

Tan declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

## References

- [1] Koren Y, Hu SJ, Gu P, Shpitalni M. Open-architecture products. *CIRP Ann Manuf Technol* 2013;62(2):719–29.
- [2] Kutin A, Dolgov V, Sedykh M. Information links between product life cycles and production system management in designing of digital manufacturing. *Procedia CIRP* 2016;41:423–6.
- [3] Jackson K, Efthymiou K, Borton J. Digital manufacturing and flexible assembly technologies for reconfigurable aerospace production systems. *Procedia CIRP* 2016;52:274–9.
- [4] Tang G, Tseng MM. Incorporating customer indifference into the design of flexible options for customized products. *CIRP Ann Manuf Technol* 2015;64(1):427–30.
- [5] Chinese Mechanical Engineering Society. *Technology roadmap of Chinese mechanical engineering*. 2nd ed. Beijing: Science and Technology of China Press; 2016. Chinese.
- [6] Carty A. An approach to multidisciplinary design, analysis & optimization for rapid conceptual design. In: *Proceedings of the 9th AIAA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization*; 2002 Sep 4–6; Atlanta, GA, USA. Reston: The American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc; 2002.
- [7] Bae HR, Ando H, Nam S, Kim S, Ha C. Fatigue design load identification using engineering data analytics. *J Mech Des* 2015;137(1):011001.
- [8] Aquino Shluzas LM, Leifer LJ. The insight-value-perception (iVP) model for user-centered design. *Technovation* 2014;34(11):649–62.
- [9] Carpo M. Breaking the curve: Big data and design. *Artforum Int* 2014;52(6):168–73.
- [10] Kano N, Seraku K, Takahashi F, Tsuji S. Attractive quality and must be quality. *J Jpn Soc Qual Control* 1984;14(2):147–56.
- [11] Hong Y, Feng K. Fuzzy cluster analysis on customer requirement elicitation pattern of QFD. In: *Proceedings of the 6th International Asia Conference on Industrial Engineering and Management Innovation*; 2015 Jul 25–26; Tianjin, China. Amsterdam: Atlantis Press; 2016. p. 761–71.
- [12] Jin J, Ji P, Gu R. Identifying comparative customer requirements from product online reviews for competitor analysis. *Eng Appl Artif Intell* 2016;49:61–73.
- [13] Wang YM, Chin KS. A linear goal programming approach to determining the relative importance weights of customer requirements in quality function deployment. *Inf Sci* 2011;181(24):5523–33.
- [14] Juang YS, Lin SS, Kao HP. Design and implementation of a fuzzy inference system for supporting customer requirements. *Expert Syst Appl* 2007;32(3):868–78.
- [15] Haug A. Emergence patterns for client design requirements. *Des Stud* 2015;39: 48–69.
- [16] Wang Y, Tseng MM. Integrating comprehensive customer requirements into product design. *CIRP Ann Manuf Technol* 2011;60(1):175–8.
- [17] Raharjo H, Xie M, Brombacher AC. A systematic methodology to deal with

- the dynamics of customer needs in quality function deployment. *Expert Syst Appl* 2011;38(4):3653–62.
- [18] Elfvingren K, Kärkkäinen H, Torkkeli M, Tuominen M. A GDSS based approach for the assessment of customer needs in industrial markets. *Int J Prod Econ* 2004;89(3):275–92.
- [19] Çevik Onar S, Büyükközkcan G, Öztaysi B, Kahraman C. A new hesitant fuzzy QFD approach: An application to computer workstation selection. *Appl Soft Comput* 2016;46:1–16.
- [20] Osorio J, Romero D, Molina A. A modeling approach towards an extended product data model for sustainable mass-customized products. *IFAC Proceedings Volumes* 2013;46(9):579–83.
- [21] Tseng MM, Jiao J, Merchant ME. Design for mass customization. *CIRP Ann Manuf Technol* 1996;45(1):153–6.
- [22] Levandowski CE, Jiao JR, Johannesson H. A two-stage model of adaptable product platform for engineering-to-order configuration design. *J Eng Des* 2015;26(7–9):220–35.
- [23] Ulrich J. Solving large configuration problems efficiently by clustering the ConBaCon model. In: *Proceedings of the 13th International Conference on Industrial and Engineering Applications of Artificial Intelligence and Expert Systems*; 2000 Jun 1–4; Cordoba, Spain. Berlin: Springer; 2000. p. 396–406.
- [24] Stone RB, Wood KL, Crawford RH. A heuristic method for identifying modules for product architectures. *Des Stud* 2000;21(1):5–31.
- [25] Fujita K. Product variety optimization under modular architecture. *Comput Aided Des* 2002;34(12):953–65.
- [26] Carnduff TW, Goonetillake JS. Configuration management in evolutionary engineering design using versioning and integrity constraints. *Adv Eng Softw* 2004;35(3–4):161–77.
- [27] Jiao J, Zhang Y, Wang Y. A generic genetic algorithm for product family design. *J Intell Manuf* 2007;18(2):233–47.
- [28] Tsai CY, Chiu CC. A case-based reasoning system for PCB principal process parameter identification. *Expert Syst Appl* 2007;32(4):1183–93.
- [29] Yadav SR, Mishra N, Kumar V, Tiwari MK. A framework for designing robust supply chains considering product development issues. *Int J Prod Res* 2011;49(20):6065–88.
- [30] Schuh G, Rudolf S, Vogels T. Development of modular product architectures. *Procedia CIRP* 2014;20:120–5.
- [31] Pakkanen J, Juuti T, Lehtonen T. Brownfield process: A method for modular product family development aiming for product configuration. *Des Stud* 2016;45:210–41.
- [32] Chen KM, Liu RJ. Interface strategies in modular product innovation. *Technovation* 2005;25(7):771–82.
- [33] Dahmus JB, Gonzalez-Zugasti JP, Otto KN. Modular product architecture. *Des Stud* 2001;22(5):409–24.
- [34] Dou R, Zong C, Li M. An interactive genetic algorithm with the interval arithmetic based on hesitation and its application to achieve customer collaborative product configuration design. *Appl Soft Comput* 2016;38:384–94.
- [35] Du G, Jiao RJ, Chen M. Joint optimization of product family configuration and scaling design by Stackelberg game. *Eur J Oper Res* 2014;232(2):330–41.
- [36] Ostrosi E, Fougères AJ, Ferney M. Fuzzy agents for product configuration in collaborative and distributed design process. *Appl Soft Comput* 2012;12(8):2091–105.
- [37] Khalili-Araghi S, Kolarevic B. Development of a framework for dimensional customization system: A novel method for customer participation. *J Build Eng* 2016;5:231–8.
- [38] Modrak V, Marton D, Bednar S. The influence of mass customization strategy on configuration complexity of assembly systems. *Procedia CIRP* 2015;33(2):538–43.
- [39] Modrak V, Bednar S. Entropy based versus combinatorial product configuration complexity in mass customized manufacturing. *Procedia CIRP* 2016;41:183–8.
- [40] Chandrasekaran B, Stone RB, McAdams DA. Developing design templates for product platform focused design. *J Eng Des* 2004;15(3):209–28.
- [41] Nidamarthi S, Mechler G, Karandikar H. A systematic method for designing profitable product families. In: *ASME 2003 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*; 2003 Sep 2–6; Chicago, IL, USA. New York: ASME; 2003. p. 67–75.
- [42] Snavely GL, Papalambros PY. Abstraction as a configuration design methodology. *Adv Des Autom* 1993;65(1):297–305.
- [43] Yu G, Yang Y, Liu A. Joint optimization of complex product variant design responding to customer requirement changes. *J Intell Fuzzy Syst* 2016;30(1):397–408.
- [44] Gero JS. Computational models of innovative and creative design processes. *Technol Forecast Soc Change* 2000;64(2–3):183–96.
- [45] Hong T, Lee K, Kim S. Similarity comparison of mechanical parts to reuse existing designs. *Comput Aided Des* 2006;38(9):973–84.
- [46] Fowler JE. Variant design for mechanical artifacts: A state-of-the-art survey. *Eng Comput* 1996;12(1):1–15.
- [47] Chen CY, Liao GY, Lin KS. An attribute-based and object-oriented approach with system implementation for change impact analysis in variant product design. *Comput Aided Des* 2015;62:203–17.
- [48] Lo CH, Tseng KC, Chu CH. One-step QFD based 3D morphological charts for concept generation of product variant design. *Expert Syst Appl* 2010;37(11):7351–63.
- [49] Modrak V, Marton D, Bednar S. Modeling and determining product variety for mass-customized manufacturing. *Procedia CIRP* 2014;23:258–63.
- [50] Wang A, Koc B, Nagi R. Complex assembly variant design in agile manufacturing. Part II: Assembly variant design methodology. *IIE Trans* 2005;37(1):17–33.
- [51] Ketan HS, Adel MB, Abbasi GY. Developing variant feature model for design by feature. *J Eng Des* 2002;13(2):101–20.
- [52] Prebil I, Zupan S, Lučić P. Adaptive and variant design of rotational connections. *Eng Comput* 1995;11(2):83–93.
- [53] Nayak RU, Chen W, Simpson TW. A variation-based method for product family design. *Eng Optim* 2002;34(1):65–81.
- [54] Jiang K, Gao X. 3D geometric constraint solving with conicoid. *J Softw* 2002;13(4):482–9.
- [55] Lee YL. A 2D geometric constraint solver for parametric design using graph analysis and reduction. In: *Proceedings of the 2nd International Workshop on Automated Deduction in Geometry*; 1998 Aug 1–3; Beijing, China. Berlin: Springer; 1998. p. 258–74.
- [56] Younesi M, Roghanian E. A framework for sustainable product design: A hybrid fuzzy approach based on quality function deployment for environment. *J Clean Prod* 2015;108:385–94.
- [57] Pitiot P, Coudert T, Geneste L, Baron C. Hybridation of Bayesian networks and evolutionary algorithms for multi-objective optimization in an integrated product design and project management context. *Eng Appl Artif Intell* 2010;23(5):830–43.
- [58] Costa CA, Luciano MA, Lima CP, Young RIM. Assessment of a product range model concept to support design reuse using rule based systems and case based reasoning. *Adv Eng Inform* 2012;26(2):292–305.
- [59] Winkelman P. A theoretical framework for an intelligent design catalogue. *Eng Comput* 2011;27(2):183–92.
- [60] Hahm GJ, Yi MY, Lee JH, Suh HW. A personalized query expansion approach for engineering document retrieval. *Adv Eng Inform* 2014;28(4):344–59.
- [61] Akmal S, Shih LH, Batres R. Ontology-based similarity for product information retrieval. *Comput Ind* 2014;65(1):91–107.
- [62] Morariu C, Morariu O, Borangiu T, Sallez Y. Formalized information representation for intelligent products in service-oriented manufacturing. *IFAC Proceedings Volumes* 2013;46(7):318–23.
- [63] Li X, Zhu Z, Pan X. Knowledge cultivating for intelligent decision making in small & middle businesses. *Procedia Comput Sci* 2010;1(1):2479–88.
- [64] Diego-Mas JA, Alcaide-Marzal J. Single users' affective responses models for product form design. *Int J Ind Ergon* 2016;53:102–14.
- [65] Tran T, Park JY. Development of a novel set of criteria to select methodology for designing product service systems. *J Comput Design Eng* 2016;3(2):112–20.
- [66] Kuo TC, Smith S, Smith GC, Huang SH. A predictive product attribute driven eco-design process using depth-first search. *J Clean Prod* 2016;112(Pt 4):3201–10.
- [67] Andriankaja H, Boucher X, Medini K, Vaillant H. A framework to design integrated product-service systems based on the extended functional analysis approach. *Procedia CIRP* 2016;47:323–8.
- [68] Muto K, Kimita K, Tanaka H, Numata E, Hosono S, Izukura S, et al. A task management method for product service systems design. *Procedia CIRP* 2016;47:537–42.
- [69] Ostrosi E, Fougères AJ, Ferney M, Klein D. Distributed fuzzy product configuration using a multi-agent approach. *IFAC Proceedings Volumes* 2009;42(4):52–7.
- [70] Chan KY, Kwong CK, Dillon TS, Fung KY. An intelligent fuzzy regression approach for affective product design that captures nonlinearity and fuzziness. *J Eng Des* 2011;22(8):523–42.
- [71] Zhang S, Xu J. Acquisition and active navigation of knowledge particles throughout product variation design process. *Chin J Mech Eng* 2009;22(3):395–402.
- [72] Zhang S, Ren B, Gao Z. Feedback decoupling technology of fuzzy configuration based on generalized mapping for complex equipment. *Adv Sci Lett* 2011;4(8–10):2828–34.
- [73] Xu J, Chen X, Zhang S, Chen Q, Gou H, Tan J. Thermal design of large plate-fin heat exchanger for cryogenic air separation unit based on multiple dynamic equilibriums. *Appl Therm Eng* 2017;113:774–90.
- [74] Xu J, Zhang S, Tan J, Liu X. Non-redundant tool trajectory generation for surface finish machining based on geodesic curvature matching. *Int J Adv Manuf Technol* 2012;62(9–12):1169–78.
- [75] Xu J, Zhang S, Tan J, Sheng H. Interruption performance design of variable freedom mechanism triggered by electro-mechanical-magnetic coupling. *J Mech Eng Sci* 2017;231(18):3330–41.
- [76] Xu J, Zhang S, Zhao Z, Lin X. Metamorphic manipulating mechanism design for MCCB using index reduced iteration. *Chin J Mech Eng* 2013;26(2):232–41.
- [77] Xu J, Zhang S, Tan J, Sa R. Collisionless tool orientation smoothing above blade stream surface using NURBS envelope. *J Zhejiang Univ Sci A* 2013;14(3):187–97.
- [78] Xu J, Zhang S, Tan J, Zhao Z. Multi-actuated mechanism design considering structure flexibility using correlated performance reinforcing. *J Zhejiang Univ Sci A* 2015;16(11):864–73.
- [79] Sa R, Zhang S, Xu J. Transmission system accuracy optimum allocation for multi-axis machine tools scheme design. *J Mech Eng Sci* 2013;227(12):2762–79.
- [80] Luo S, Xu J, Zhang S. Decompose image into meaningful regions based on contour detector and watershed algorithm. *J Intell Fuzzy Syst* 2017;32(6):4259–71.
- [81] Luo S, Zhou H, Xu J, Zhang S. Matching images based on consistency graph and region adjacency graphs. *Signal Image Video Process* 2017;11(3):501–8.