DOI: 10.3901/JME.2020.07.151

基于设计情境与脑机反馈融合的产品 设计知识需求感知技术*

梁 野 裘乐森 刘晓健 张树有 谭建荣
(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: 针对产品设计知识主动推送过程中设计人员的知识需求难以自动获取的问题, 提出了一种基于设计情境与脑机反馈融合的产品设计知识需求感知方法。设计情境与脑机反馈融合构建知识需求感知框架, 由动态变化的设计活动信息驱动生成设计情境实例序列, 基于脑机反馈构建设计知识需求域。根据设计任务分解与产品结构的映射关系建立知识需求锚点, 以设计情景激活知识需求锚点的方式动态关联当前设计内容, 采用加权贝叶斯方法实现设计知识需求类型识别, 并在数控机床数字化设计中对提出的需求感知方法进行了应用验证。

关键词: 产品设计知识; 知识需求感知; 设计情境; 知识推送; 脑机接口

中图分类号: TH122; TP391

Technology for Product Design Knowledge Need Awareness Based on Design Context and Brain-computer Interface

LIANG Ye QIU Lemiao LIU Xiaojian ZHANG Shuyou TAN Jianrong
(State Key Laboratory of Fluid Power and Mechatronic Systems, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract: Aiming at the problem of automatic acquisition of designers' knowledge needs during knowledge push process, a product design knowledge need awareness based on design context and brain-computer interface is proposed. The design knowledge need awareness framework is constructed based on design context and brain-computer interface. The design context is generated using dynamically captured design activity information. The design knowledge need domain is constructed based on brain-computer interface. The knowledge need anchor points are established according to the mapping relationship between design task and product structure, and current design content is obtained using design context to activate corresponding knowledge need anchor point. The types of knowledge needs are recognized by weighted Bayesian method. The proposed knowledge need awareness method is verified in the process of CNC machine tool digital design.

Key words: product design knowledge; knowledge need awareness; design context; knowledge push; brain-computer interface

0 前言

现代机械产品设计过程中知识高度密集, 设计人员经常处于对设计知识的需求状态, 获取、辨别当前设计任务相关的设计知识需要消耗设计人员大量的时间与精力, 降低了设计效率, 不利于产品设计快速更迭。将设计知识主动提供给设计人员的知识推送技术成为了设计知识管理研究的热点^[1-3]。

为实现智能知识推送需要准确获取设计人员的

知识需求, 国内外学者对此进行了大量研究。吉祥等^[3]利用本体对设计知识与设计任务建模匹配, 通过历史浏览计算设计人员对设计知识的熟悉度, 从而获取设计人员的知识需求。徐荣振等^[4]通过历史信息挖掘频繁知识序列, 计算当前任务知识序列与频繁知识序列的相似性推理设计人员下一步的知识需求。谢强等^[5]对业务过程的知识需求建模形成知识需求模板, 并考虑用户知识背景构建用户知识需求模型。ZHANG 等^[6]通过构建知识地图组织和捕捉产品各生命周期中的知识资源, 利用个性化评级算法实现针对新产品设计的知识需求获取与知识导航。以上研究主要通过设计任务与设计知识的关联性间接获取设计人员的知识需求, 但通过设计任务进行需求建模会造

* 国家自然科学基金 (51675478)、流体动力与机电系统国家重点实验室青年基金(SKLoFP_QN_1702)和浙江省自然科学基金 (LY18E050001)资助项目。20190531 收到初稿, 20191129 收到修改稿

成知识推送量太大,导致推送效率较低。许多学者开始关注设计人员所处的情境,结合用户情境的个性化知识推荐取得了良好的应用效果^[7-9],张发平等^[10]将任务和用户的相关信息规范到多维层次情境模型中描述知识需求。LIU 等^[11]通过 workflow 情境建模和匹配实现设计任务相关设计知识的推送。SONG 等^[12]捕捉设计软件中的文本信息进行关键词提取与语义扩展,与相关论坛上的问答信息进行语义相似性计算匹配,推理设计人员可能面临的设计问题与知识需求。

在产品设计过程中难以判断设计人员的知识需求状态,导致推送的知识与实际需求脱节,影响知识推送的时效性和准确性。随着认知神经科学,脑电图,脑磁图等技术的不断发展,直观的想法是能否通过脑机接口直接判断设计人员的需求状态并反馈到知识推送系统中,提高知识推送效果。脑机接口通常应用于医疗领域辅助诊断大脑疾病或者帮助残障病人输出语言与控制信号,从而获得一定的自理能力。随着舒适便携脑电设备的出现,很多学者开始研究脑机接口在健康人群中的应用。ZANDER 等^[13]提出了被动脑机接口的概念,旨在从健康人群正常脑电信号中获得隐性思维状态信息,从而能判断用户工作状态,辅助用户更有效率的完成工作任务。WANG 等^[14]提出了分形维度谱分析方法,实现了对大脑放松与计算状态的实时分类,准确度达到了 97.87%。ZARJAM 等^[15]利用基于小波熵的脑电信号特征实现了对 7 个级别认知负荷的高准确率分辨。作为新一代人机交互方式,脑机接口也在 CAD/E 辅助设计领域受到了学者的广泛关注^[16]。LIU 等^[17]利用脑机接口与心电监测判断设计人员在 CAD 设计过程中的情绪状态,从而能直接评估设计软件的交互效果和设计人员的工作状态。NGUYEN 等^[18]利用脑机接口对脑力与心理压力的 U 型相关关系进行了研究。袁萍等^[19]利用脑电信号证实设计想法产生的思维过程以知识联系为核心并受信息激励距离影响。杨程等^[20]利用脑机接口结合模糊评估对产品意向进行推理,构建了一种产品意向量化推理方法。而利用脑机接口针对疑问状态的研究表明,被试在解决问题的过程中,如果遇到知识缺乏导致当前问题无法解决或者难以解决时会产生更多的大脑活动^[21]。虽然直接通过脑电信号精确再现人的思维状态尚有较大难度,但以上研究依然表明,通过脑机接口直接获取和辨别设计人员知识需求状态具有一定的前景。

脑机接口只能反馈判断设计人员是否处于对设计知识的需求状态,无法获取具体的知识需求内容,因此,提出了基于设计情境与脑机反馈融合的产品设计知识需求感知技术,设计情境与脑机反馈融合

构建知识需求感知框架,在设计活动信息驱动下动态生成设计情境,基于脑机反馈构建设计知识需求域,通过设计任务分解与产品结构映射构建知识需求锚点,设计情境动态激活需求锚点以关联匹配当前的设计内容,利用加权贝叶斯方法推理知识需求类型,从而实现设计知识需求的实时感知,并在数控机床的设计中进行了验证。

1 产品设计知识需求感知框架

产品设计人员对设计知识的需求会在完成设计任务的过程中不断产生,知识需求的感知即需要在动态变化的设计情境中,利用脑机反馈实时判断设计人员是否处于对知识的需求状态,结合设计情境判断当前的知识需求是针对哪些设计内容,并推理设计人员可能需要的设计知识类型。基于这一思路构建的产品设计知识需求感知框架如图 1 所示。

经过产品概念设计阶段、方案设计阶段后,复杂机械产品的详细设计需要根据产品结构树映射将设计任务分解为不同的子任务,每个子任务针对不同的设计对象,需要完成若干设计内容,设计人员的设计过程即逐步完成相应设计内容的过程。当设计人员进行产品设计时,产生的知识需求都与当前设计内容相关,故设计内容相关信息可以看作是设计知识需求的锚点。当设计人员在实施设计行为时,从知识库调用设计文档、使用设计软件等设计活动被捕捉记录为设计活动信息,结合任务管理和企业人员管理获得的信息,实时生成设计情境,表现为顺序产生的情境实例序列。每产生一个新的情境实例,即通过计算动态激活知识需求锚点,关联匹配当前设计内容。当通过脑机反馈判断设计人员处于需求状态时,即根据反馈的需求状态信息与设计情境构建知识需求域,利用加权贝叶斯方法推理判断当前设计人员最可能需要的知识类型。设计人员完成设计任务后,设计结果成为新的设计知识入库为以后的设计工作提供知识支持。

在上述设计知识需求感知框架中,脑机反馈提供知识需求产生的时间节点信息,该时间节点邻域内产生的设计情境即知识需求域,通过设计情境判断当前知识需求锚点以确定设计人员需要完成什么样的设计任务,然后对设计情境利用加权贝叶斯方法实现知识需求类型的推理。脑机反馈信息与设计情境信息配合完成的“知识需求状态判断—当前设计内容确定—知识需求类型分类”这一设计知识需求感知过程体现了主动知识服务的思想,避免了设计人员额外的时间精力消耗,并充分利用了设计过程产生的信息,提高了知识服务的准确性与智能性。

图1 产品设计知识需求感知框架

2 设计情境生成及知识需求域构建

2.1 设计活动信息驱动的设计情境动态生成

情境是指任何可以用于描述实体特征的信息。所谓实体可以指人、地点或者用户与程序的交互相关的客体(包括用户与程序本身)^[22-23]。设计情境即机械产品设计场景中的情境信息,一般将设计情境归纳为对(Who, When, Where, What, How)这5个维度信息的描述^[22],即设计人员(User/Who)在某一时间(Time/When)某一地点(Location/Where)利用设计工具软件和设计知识(Activity/How)执行当前设计任务(Task/What)。因此,可以将设计情境(Design context)表示为: $DC =$,

$\{D_{user}, D_{time}, D_{location}, D_{activity}, D_{task}\}$ 其中: D_{user} 为用户维度,即设计人员相关的信息,包括姓名,职位,角色,领域等属性信息。 D_{time} 为时间维度,包含开始时间和结束时间。 $D_{location}$ 为位置维度,因为地理位置在设计活动中没有实际意义,这里将设计情境发生的组织机构信息作为位置信息。 $D_{activity}$ 为活动维度,表示设计人员设计活动信息,包括对知识资源的调用,设计工具软件的使用,设计产物的创建等活动。 D_{task} 为任务维度,表示设计任务相关信息,

包括整体设计目标,设计约束和当前流程节点信息。

产品设计过程中生成的设计情境即顺序产生的设计情境实例序列,可以表示为 $dc_i = \{d_i^u, d_i^t, d_i^l, d_i^a, d_i^{dt}\}$, 其中 $d_i^u, d_i^t, d_i^l, d_i^a, d_i^{dt}$ 分别表示该情境实例的5个维度信息。从情境的表示形式上看,任意维度信息变化即对应产生一个新的设计情境实例,但是在实际设计活动中,对于特定设计人员,用户信息 d_i^u 和位置信息 d_i^l 在一个产品设计过程中是固定的,设计任务 d_i^{dt} 是阶段性变化的,时间 d_i^t 为情境实例标记时间,只有设计活动 d_i^a 是在不断的动态变化,而且设计活动是对设计行为的自然分割,因此,利用设计活动对设计情境进行划分,即每一项设计活动信息对应产生一个设计情境实例,既能完整记录情境信息,也方便后续对情境信息的处理分析。随着设计工作的进行,设计活动信息不断生成,需要根据实际应用场景将设计活动信息动态转化为5维描述的设计情境,如图2所示。

设计人员完成产品设计的过程中,对文档的读取创建、设计软件的使用等都可以被记录成为设计活动信息,具体包括行为信息和行为对象信息。设计人员的行为包括:打开,关闭,保存,删除,输入等操作,行为的对象包括:文档,二维图纸,三

表 1 产品设计过程中的知识需求类型

知识需求类型	说明	案例
基本原理和方法	机械产品设计基本概念、原理和方法	机床承载结构设计基本要求
参数、功能和约束	相关零部件产品的参数、功能以及设计需求约束	车铣复合产品系列主要性能指标
设计过程	相关产品的设计文档，设计结果，设计描述	实用机床设计手册
规范标准	产品设计涉及到的国家标准、行业标准、企业标准以及相关设计规范	滚动支承主轴设计规范， GB 6474-86 导轨磨床参数
二维图纸	相关产品的二维图纸	立柱零件图
三维结构	相关产品的三维模型	进给箱装配图
材料	产品中零部件材料的相关信息	主轴用 40Cr 性能
测试信息	相关产品试制、测试结果	试制分析报告
分析计算与性能	仿真分析相关结果	床身模态分析结果
问题、反馈与解决方法	设计试制使用中遇到的问题以及相关的解决方法。	产品故障分析报告

图 3 基于脑机反馈的产品设计知识需求域构建

3 产品设计知识需求动态感知

3.1 产品设计内容动态激活匹配

机械产品设计过程是自顶向下的,如图 4 所示,按照整机设计-部件设计-零件设计的产品设计结构树展开,可以将设计任务进行细分,在不同的设计层级有不同的设计对象,而针对设计对象又有不同的设计内容,设计内容是阶段性改变的,即设计人员可能有很多设计活动,但都是围绕某一个阶段的设计内容开展。如果设计人员产生知识需求,可以推断需求的知识与当前的设计层级,设计对象以及具体的设计内容相关。因此,设计人员当前设计内容相关信息可以看作是知识需求的锚点。

知识需求锚点可以由三元组 $\{DS,DT,DC\}$ 来表示。 DS 表示产品结构树中的层级,包括整机设计、部件设计和零件设计三层。 DT 表示设计对象,为产品结构树中的产品及产品结构, DC 表示设计内容,

为进行产品及产品结构设计需要完成的设计内容。

现代产品设计过程是在数字化设计系统中完成,系统对设计任务及设计流程进行管理,设计层级 DS 和设计对象 DT 即设计情境中设计任务维的流程节点信息,可以通过管理系统获取。由于产品设计过程本身具有往复迭代的特点,设计任务及流程管理只能针对设计层级和设计对象,具体的设计内容 DC 都是由设计人员自行控制完成,个体差异很大,当设计人员产生知识需求时,当前设计内容无法从系统直接获取。由于设计活动信息与设计内容的高度相关性,通过分析动态生成的设计情境实例活动维内容属性与流程节点下设计内容的匹配度可以反向推理当前的设计内容。

设计内容 DC 为领域专家以短语形式对设计内容的概括,包含的信息有限,而设计情境内容是由情境实例中文本特征词组成的特征向量,很难进行直接比较判断,故采用文献[27]中伪相关反馈的方法,对所有设计内容 DC 进行扩展,具体方

图4 设计知识需求锚点构建

法为：由主任设计师或者领域专家为每个设计内容选取三个特征文档，先进行中文分词，然后利用 TF-IDF 方法提取三个文档中的特征词，其计算方法为

$$tf_i \cdot idf_i = \frac{n_i}{\sum_{k=1}^N n_k} \cdot \log \frac{N_d}{N_{di} + 1} \quad (2)$$

式中， n_i 表示目标词在特征文档中出现的次数； n_k 表示各词语在特征文档中出现的次数； N 表示特征文档中包含的词语总数； N_d 表示所有文档的总数； N_{di} 表示包含目标词的文档数量。排序后取前 10 个特征词作为设计内容 DC 的反馈特征向量，若设计内容都具有一相同的特征，则该特征对区分设计内容是没有贡献的，则将该特征剔除。

由于设计人员设计活动不可能与设计内容精确对应，如果只取最新产生的情境实例可能会误判；同时，由于设计过程迭代往复的特点，当前设计内容会往复变化，选取需求域内所有情境实例可能会忽略这种变化，匹配出大部分情境实例所对应的设计内容。因此，采用动态激活的方法判断当前设计内容，确定知识需求锚点。参考文献[28]，构建知识需求锚点激活函数

$$a_c = a_i + (1 - a_i)e - a_i i - a_i p \quad (3)$$

式中， a_c 为当前激活值； a_i 为上次激活后的激活值； e 为激活系数； i 为衰减系数； p 为惩罚系数。即新的激活值由初始值、增加值、自然衰减值和惩罚值计算生成。

当有新的设计情境实例产生，将该设计情境实例的活动内容特征向量分别与各设计内容的特征向量求交，若交集不为空，则对该知识需求锚点进行激活，激活系数 e 按公式(4)计算

$$e = 0.1 * \text{num}\{v_a^j \cap v_c^k\} \quad (4)$$

式中， v_a^j 为设计内容特征向量； v_c^k 为设计情境的活动内容特征向量。

同时，所有设计内容的激活值需要减去自然衰减值，衰减系数取 0.1，由于设计情境实例可能会被设计人员保留，即与当前设计情境中除新加入的设计情境实例特征向量有交集的设计内容不进行衰减。若设计内容特征向量与新产生的设计情境实例特征向量没有交集，则需要计算惩罚值，惩罚系数 P 按公式(5)计算

$$p = 0.1 * \max(\text{num}\{v_a^j \cap v_c^k\}) \quad (5)$$

式中， $\max(\text{num}\{v_a^j \cap v_c^k\})$ 表示当前设计情境实例活动内容特征向量与各知识需求锚点特征向量求交后，交集中特征数量的最大值。

最后，对当前所有需求锚点的激活值进行比较，激活值最大的即当前激活的知识需求锚点。激活值的取值范围为[0, 1]，当激活值计算小于 0 时，激活值归 0。动态激活流程如图 5 所示。

3.2 基于加权贝叶斯的知识需求分类

(1) 基于贝叶斯方法的知识需求推理过程。

产品设计过程中，产品、设计人员不同，具体的知识需求对应情境实例也各不相同，很难用相似性计算判断需求类型，故采用基于概率模型的贝叶斯方法对需求域内情境进行分析，推理感知当前的知识需求类型。若当前需求域内设计情境实例的集合为 $C_c = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ ，要判断当前最有可能的知识需求类型，即计算在具有情境实例集合 C_c 的条件下各类型的条件概率，概率最大的类型即当前最有可能的知识需求类型。根据贝叶斯公式，每种类型的条件概率表示为

$$P(R_i | C_c) = \frac{P(C_c | R_i)P(R_i)}{P(C_c)} \quad (6)$$

假设集合 C_c 中各情境实例相互独立，则公式变为

$$P(R_i | C_c) = \frac{\prod_{j=1}^n P(c_j | R_i)P(R_i)}{\prod_{j=1}^n P(c_j)} \quad (7)$$

图5 设计知识需求锚点动态激活过程

由于分母对于每个需求类型的计算都是相同的，因此将其忽略，公式两边取对数得

$$\log P(R_i | C_c) = \sum_{j=1}^n \log P(c_j | R_i) + \log P(R_i) \quad (8)$$

式中， $P(R_i)$ 为 R_i 需求类型在所有知识需求中的先验概率； $P(c_j | R_i)$ 为 R_i 需求类型下，情境实例 c_j 出现的先验概率。

每一次设计知识的使用即可以看作是一次知识需求满足的过程，而设计知识可以通过领域专家标定为对应的知识需求类型，因此知识管理系统中每条设计知识使用记录即对应知识需求的一个实例，统计每种需求类型产生的实例数量就可以计算出知识需求类型的先验概率 $P(R_i)$ 。同理，统计计算每一个需求类型下的所有知识需求实例所处需求域中情境实例 c_j 出现频次即可计算出某一需求类型下，情境实例 c_j 的先验概率 $P(c_j | R_i)$ 。

由于设计情境的核心是设计活动，因此在进行情境实例出现频次统计时，采用活动维 d_i^a 的属性值作为匹配目标，若 $d_j^a = \{a_j^c, a_j^b, a_j^{bv}\}$ 为某一需求类型

实例的其中一设计情境实例，当需求域情境实例的活动维信息 $d_i^a = \{a_i^c, a_i^b, a_i^{bv}\}$ 满足

$$\begin{cases} a_i^c \cap a_j^c \neq \text{null} \\ a_i^b = a_j^b \\ a_i^{bv} = a_j^{bv} \end{cases} \quad (9)$$

则视该情境实例在该需求类型实例中出现。同时，需要考虑设计人员经验水平的影响，在计算情境实例先验概率时，只将同级或者更高级设计人员的使用记录作为数据集进行计算。

(2) 设计情境实例的权重。

知识需求是设计人员在遇到设计问题时的反馈，因此靠近知识需求的新产生的设计情境，可能与当前知识需求更相关，为了将这种情境产生时间的影响考虑到计算中，得到更加准确的感知结果，为每个情境实例赋权重 k_j ，则需求类型 R_i 的条件概率表示为

$$\log P(R_i | C_c) = \sum_{j=1}^n k_j \log P(c_j | R_i) + \log P(R_i) \quad (10)$$

接近需求产生的情境实例赋予较高的权重,故采用具有 S 型的 Hyperbolic 函数,对其进行变换,使值域为[1,2],表达为

$$w = \frac{1}{1 + \exp(-2x + 16)} + 1 \quad (11)$$

将情境实例按时间顺序映射到[1,10]之间,即若需求域内情境实例数量为 N_c , 则对于序号为 n_j 的情境实例,其权重 k_j 计算为

$$k_j = \frac{1}{1 + \exp\left(-2 * \frac{10n_j}{N_c} + 16\right)} + 1 \quad (12)$$

3.3 产品设计知识需求动态感知流程

基于设计情境与脑机反馈融合的产品设计知识需求感知流程如图 6 所示,主要步骤包括:① 以设计任务、设计人员及设计人员的设计活动信息作为需求感知的信息输入,动态顺序生成设计情境实例序列;② 根据产品结构树映射对设计任务分解,生成知识需求锚点,以不断产生的设计情境实例动态激活知识需求锚点,关联匹配当前的设计内容;③ 通过脑电监测反馈获得需求状态信息,结合设计情境构建需求域,为情境实例赋予不同的权重,利用加权贝叶斯方法推理当前最有可能的知识需求类型。

图 6 基于设计情境与脑机反馈融合的产品设计知识需求感知流程

4 实例验证与讨论

基于 ASP.NET 技术体系,采用 SQL Server 2008 R2 数据库,开发了设计知识需求感知原型系统,以数控机床数字化设计工具集以及设计资源共享平台在机床企业应用中获得的知使用记录为数据集,在机床设计中对所提方法进行验证,并与目前企业常规知识服务过程进行了对比。

4.1 实例验证过程

如图 7 所示,为机床企业的设计人员利用数控机床数字化设计工具集进行机床设计时的任务管理

信息与部分设计活动信息。

将以上设计活动信息利用 2.1 节中的方法动态生成设计情境。设计人员,设计任务及位置情境信息为,

$d_i^u = \{\text{王志源, 设计员, 部件设计师, \{主轴设计, 2 年\}\}$;

$d_i^d = \{\text{数控卧式坐标镗床 TK01, 主轴部件-主轴, \{主轴最高转速 7 000 r/min, 主轴锥孔径向跳动} \leq 0.003 \text{ mm, 主轴端面跳动} \leq 0.002 \text{ mm}\}$;

$d_i^l = \{\text{数控 1 室, 技术研究院, 镗床系列设计}\}$;设计活动与时间信息如表 2 所示。

图 7 数控机床设计任务管理与设计活动信息记录(部分)

表 2 设计活动信息

序号	标题	内容	行为	类型	时间
1	主轴端部结构设计准则	端部，刀具，卡盘，悬伸，夹具	浏览	设计规范	开始 8:45:23 结束 8:52:32
2	端面定位主轴端部结构	端面，换刀，定位，精度，锥孔	浏览	设计手册	开始 8:46:45 结束 8:50:06
3	TH001 数控镗床主轴	镗床，三维模型，零件图	浏览	三维零件图	开始 8:55:51 结束 9:16:24
4	常用主轴端部结构特点	端部，铣床，刀具，镗床，悬伸	浏览	设计手册	开始 9:06:15 结束 9:43:55
5	主轴主要参数的确定	主参数，平均直径，内孔直径，悬伸量，支承跨距	浏览	设计规范	开始 9:14:42 结束 9:31:17
6	主轴悬伸量	悬伸量，端部，位移，抗振性，支承	浏览	设计手册	开始 10:08:39 结束 10:37:13
7	TK01 设计任务书	精度，工作台，进给，滚珠丝杠，轴承	浏览	设计文档	开始 10:10:16 结束 10:41:22
8	常用机床主轴前轴直径	切削功率，前轴颈，车床，铣床，镗床	浏览	设计手册	开始 10:12:02 结束 10:49:56
9	TK01 设计计算书-主轴	主参数，主轴直径，转速，切削力，负载	编辑	设计文档	开始 10:25:01 结束 ~
10	主轴支承跨距确定	支承，刚度，变形，位移，最佳跨距	浏览	设计规范	开始 10:27:38 结束 10:43:09
11	主轴模型	三维模型，零件图	编辑	三维零件图	开始 10:32:29 结束 ~
12	主轴刚度验算项目及指标	端部，挠度，刚度，回转精度，变形	浏览	设计规范	开始 10:56:33 结束 11:20:54
13	主轴端部位移计算公式	位移，载荷，端部，切削力，力矩	浏览	设计手册	开始 10:57:12 结束 11:23:08
14	主轴扭转刚度计算	刚度，弯曲，扭转，转矩，转角	浏览	设计文档	开始 11:09:26 结束 11:17:11
15	主轴主要参数的确定	主参数，平均直径，内孔直径，悬伸量，支承跨距	浏览	设计规范	开始 11:23:48 结束 11:34:14
16	平均直径对主轴刚度影响	平均直径，刚度，轴端位移，惯性矩，弯曲变形	浏览	设计分析报告	开始 11:25:50 结束 ~
17	主轴孔径对主轴刚度影响曲线	刚度，抗弯，惯性矩，重量，孔径	浏览	设计手册	开始 11:31:21 结束 ~
18	TH001 主轴分析报告	材料，频率，模态振型	浏览	设计分析报告	开始 11:35:34 结束 11:51:53
19	最佳跨距精确计算	端部，位移，刚度，卡丹公式，最佳跨距	浏览	设计文档	开始 11:39:10 结束 ~
20	影响主轴支承跨距的因素	主轴箱，导轨，头架，刚度，最佳跨距	浏览	设计文档	开始 11:45:57 结束 ~

当前设计任务为主轴部件中的主轴设计, 设计内容包括: 主轴端部结构设计, 主参数计算, 主轴静刚度验算, 主轴材料与热处理, 主轴技术要求 5 部分。通过相关反馈获得各设计内容的特征向量如表 3 所示, 共同特征词“主轴”被剔除。

表 3 设计内容特征向量

设计内容	特征向量
主轴端部结构设计	端部, 刀具, 悬伸, 精度, 锥孔, 定位, 顶尖, 卡盘, 法兰, 定心
主参数计算	主参数, 平均直径, 内孔直径, 悬伸, 支承跨距, 轴颈, 刚度, 支承, 轴端, 轴承
主轴静刚度验算	挠度, 回转精度, 扭转, 端部, 支承, 弯曲, 刚度, 位移, 力矩, 变形
主轴材料与热处理	材料, 热处理, 负荷, 硬度, 淬火, 淬硬, 载荷, 转速, 精度, 耐磨性
主轴技术要求	工艺, 粗糙度, 精度, 公差, 检验, 误差, 定位, 配合, 基准, 光洁度

按照第 3.1 节方法分别计算各设计知识需求锚点的激活值, 如第一个情境实例, 特征向量为{端部, 刀具, 卡盘, 悬伸, 夹具}, 与设计内容特征向量的交集分别为{端部, 刀具, 悬伸, 卡盘}, {悬伸}, {端部}, {无}, {无}, 则分别计算其激活值为{0.4, 0.1, 0.1, 0, 0}, 对于每一个情境实例, 计算各设计知识需求锚点的激活值, 得到如图 8 所示折线, 每次计算后, 激活值最高的知识需求锚点为当前的设计内容, 可以看到, 设计人员的设计内容开始为“主轴端部结构设计”, 然后是“主参数计算”, 又进行了“主轴静刚度验算”, 可能由于验算没有通过, 又返回进行“主参数计算”, 即当前激活的知识需求锚点为“主轴主参数计算”。

图 8 设计知识需求锚点激活值变化

当前设计情境中有 5 个设计情境实例, 以其中最早的开始时间为起始点, 构建设计知识需求域, 包括序号{9-20}共 12 个情境实例, 则将数值[1-12]带入公式

$$k_j = \frac{1}{1 + \exp\left(-2 * \frac{10n_j}{N_c} + 16\right)} + 1 \quad (13)$$

求得各情境实例的权重为, $W = \{1, 1, 1, 1, 1, 1.01, 1.06, 1.27, 1.66, 1.91, 1.98\}$ 。

根据公式

$$\log P(R_i | C_c) = \sum_{j=1}^n k_j \log P(c_j | R_i) + \log P(R_i) \quad (14)$$

以初级及以上设计人员的知识使用记录为数据集, 分别计算各知识需求类型的条件概率, 并排序得到表 4。

表 4 知识需求类型的条件概率排序

知识需求类型	条件概率 log 值
基本原理和方法	-9.258
设计过程	-12.051
分析计算与性能	-15.743
规范标准	-17.323
二维图纸	-17.922
测试信息	-18.416
三维结构	-19.895
材料	-21.108
参数、功能和约束	-23.289
问题、反馈与解决方法	-23.370

可见当前可能的知识需求为与主轴主参数计算相关的基本原理和方法, 在感知知识需求后将相关设计知识提供给设计人员。

基于数控机床设计资源共享平台对知识需求感知方法进行应用验证的场景如图 9 所示, 通过脑电信号采集设备在设计过程中监测脑电变化, 实时分析知识需求状态, 在获取到需求状态时, 输入到数字化设计工具集中的需求感知模块, 结合设计情境, 构建设计知识需求域①, 计算需求域中的情境实例权重②, 利用加权贝叶斯方法得到知识需求类型排序③, 利用设计情境动态激活需求锚点, 获得当前设计内容④, 最后结合③、④产生当前设计人员可能的需要的设计知识⑤, 并通过主动推送的方式提供给设计人员。

4.2 实例验证讨论

实例验证结果表明, 在根据脑电信号判断设计人员的需求状态后, 结合设计情境构建设计需求域, 可以实现动态判断当前设计内容与设计人员需要的知识类型, 说明论文研究的产品设计知识需求感知技术具有实际应用的可能性。

与企业传统知识服务过程对比, 本文方法体现出一定优势, 从以下几个方面提高了知识服务的准确性和智能性: ① 在需求状态的获取上, 传统方法都需要设计人员主动反馈对知识的需求状态, 而本文方法通过脑电信号分析, 可以实时监测设计人员是否处于对知识的需求状态, 避免额外的精力消耗; ② 在判断当前设计内容方面, 传统方法只能

图9 产品设计知识需求感知应用验证

根据任务管理系统确定到子任务级别,例如实例中只能确定设计人员在进行主轴设计子任务,而不能确定其具体在进行主轴主参数计算,而本文结合设计情境以动态激活的方法可以判断当前具体设计内容;③在知识需求类型判断上,传统方法往往忽略对知识需求类型的关注,本文基于加权贝叶斯方法可以推理设计人员更有可能需要哪些类型的知识。

结合设计情境对设计内容以及需求类型的推理方法已经在企业进行了一定应用验证,而脑电信号的获取与分析需要特定的试验环境,原型系统的功能和适应性还需要进一步改进与完善,尚未达到商用的成熟程度。但随着脑电技术的进步,舒适便携脑电设备的改进,论文研究的技术及开发的系统在产品设计知识推送领域具有一定的应用价值,可以提高设计人员获取设计知识的效率,缩短产品设计周期。

5 结论

为解决产品设计知识智能推送中设计人员知识需求精准获取难题,提出了基于设计情境与脑机反馈融合的产品设计知识需求感知技术,主要的工作与特点如下。

(1) 以产品设计过程中动态捕捉的设计活动信

息为核心驱动生成设计情境,产生设计情境实例序列;基于脑机反馈得到的需求状态信息并结合设计情境构建设计知识需求域;构建产品设计知识需求感知框架,实现了设计情境与脑机反馈融合。

(2) 根据设计任务分解与产品结构的映射关系建立知识需求锚点,以伪相关反馈方法扩展内容特征向量,与不断生成的设计情景实例活动维特征匹配计算,考虑了设计过程往复迭代的特性,以动态激活知识需求锚点的方式实现了当前设计内容的感知。

(3) 基于加权贝叶斯的方法考虑了情境实例位置对知识需求的影响,实现了更加准确的设计知识需求类型推理。以数控机床设计资源共享平台上的设计知识为基础,在数控机床主轴设计活动中对所提方法进行了验证。

参 考 文 献

- [1] XU Yuanhao, YIN Guofu, NIE Yong, et al. Research on an active knowledge push service based on collaborative intent capture[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2013, 36(6): 1418.
- [2] 董思洋, 许建新, 王克勤, 等. CAD 平台下基于免疫过程的知识主动推送模型[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(7): 1520-1531.

- DONG Siyang, XU Jianxin, WANG Keqin, et al. Active push model of manufacturing process knowledge in CAD platform based on immune process[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2013, 19(7): 1520-1531.
- [3] 吉祥, 顾新建, 代风, 等. 基于本体和粗糙集的产品设计知识推送技术[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(1): 7-20.
- JI Xiang, GU Xinjian, DAI Feng, et al. Technology for product design knowledge push based on ontology and rough sets[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2013, 19(1): 7-20.
- [4] 徐荣振, 高琦, 王昊, 等. 基于序列模式挖掘的变型设计知识推送[J]. 计算机集成制造系统, 2016(5): 1179-1186.
- XU Rongzhen, GAO Qi, WANG Hao, et al. Product design knowledge recommendation based on sequential pattern mining[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2016(5): 1179-1186.
- [5] 谢强, 张磊. 基于任务类知识需求模板和用户模型的知识需求研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2006, 39(2): 36-41.
- XIE Qiang, ZHANG Lei. Study on knowledge need based on task class knowledge need model and user model[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2006, 39(2): 36-41.
- [6] ZHANG Chao, ZHOU Guanghui, LU Qi, et al. Graph-based knowledge reuse for supporting knowledge-driven decision-making in new product development[J]. International Journal of Production Research, 2017, 55(23): 7187-7203.
- [7] HAWALAH A, FASLI M. Utilizing contextual ontological user profiles for personalized recommendations[J]. Expert Systems with Applications, 2014, 41(10): 4777-4797.
- [8] JIANG Meng, CUI Peng, WANG Fei, et al. Scalable recommendation with social contextual information[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2014, 26(11): 2789-2802.
- [9] VISWANATHAN V, ILANGO K. Ranking semantic relationships between two entities using personalization in context specification[J]. Information Sciences, 2012, 207(10): 35-49.
- [10] 张发平, 李丽. 基于多维层次情境模型的业务过程知识推送方法研究[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2017, 29(4): 751-758.
- ZHANG Faping, LI Li. Research on knowledge push method for business process based on multidimensional hierarchical context model[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2017, 29(4): 751-758.
- [11] LIU Tingyu, WANG Huifen, HE Yong. An intelligent knowledge recommending approach for new product development based on workflow context matching[J]. Concurrent Engineering Research and Applications, 2016, 24(4): 318-329.
- [12] SONG Bo, JIANG Zuhua. Proactive search enabled context-sensitive knowledge supply situated in computer-aided engineering[J]. Advanced Engineering Informatics, 2013, 27(1): 66-75.
- [13] ZANDER T, KOTHE C. Towards passive brain-computer interfaces: applying brain-computer interface technology to human-machine systems in general[J]. Journal of Neural Engineering, 2011, 8(2): 250052.
- [14] WANG Qiang, SOURINA O. Real-time mental arithmetic task recognition from EEG signals[J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2013, 21(2): 225-232.
- [15] ZARJAM P, EPPS J, CHEN Fang, et al. Estimating cognitive workload using wavelet entropy-based features during an arithmetic task[J]. Computers in Biology and Medicine, 2013, 43(12): 2186-2195.
- [16] ESFAHANI E, HORVÁTH I. Application of brain-computer interfaces in CAD/E systems[J]. Computer-Aided Design, 2014, 54(SI): 1-2.
- [17] LIU Y, RITCHIE J, LIM T, et al. A fuzzy psychophysiological approach to enable the understanding of an engineer's affect status during CAD activities[J]. Computer-Aided Design, 2014, 54(SI): 19-38.
- [18] NGUYEN T, ZENG Yong. A physiological study of relationship between designer's mental effort and mental stress during conceptual design[J]. Computer-Aided Design, 2014, 54(SI): 3-18.
- [19] 袁萍, 熊艳, 李彦, 等. 基于 EEG α 波活动探究信息激励距离对产品设计思维的影响[J]. 机械工程学报, 2017, 53(15): 40-48.
- YUAN Ping, XIONG Yan, LI Yan, et al. An exploration into the influence of stimulation distance of stimulus information on design thinking based on EEG alpha activity[J]. 2017, 53(15): 40-48.
- [20] 杨程, 陈辰, 唐智川. 基于脑电的产品意象推理模型研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(23): 126-136.
- YANG Cheng, CHEN Chen, TANG Zhichuan. An study of electroencephalography cognitive model of product image[J]. 2018, 54(23): 126-136.
- [21] LIANG Ye, LIU Xiaojian, QIU Lemiao, et al. An EEG study of a confusing state induced by information insufficiency during mathematical problem-solving and reasoning[J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2018, 18: 1-13.

- [22] 刘庭煜, 汪惠芬, 贲可存, 等. 基于多维情境本体匹配的产品开发过程业务产物智能推荐技术[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(12): 2727-2750.
- LIU Tingyu, WANG Huifen, BI Kecun, et al. Intelligent business artifact recommending approach for product development processes based on context ontology matching[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2016, 22(12): 2727-2750.
- [23] DEY A. Understanding and using context[J]. Personal and Ubiquitous Computing, 2001, 5(1): 4-7.
- [24] ZHANG Huaping, YU Hongkui, XIONG Deyi, et al. HHMM-based Chinese lexical analyzer ICTCLAS[C]. Sapporo, Japan: Association for Computational Linguistics, 2003.
- [25] AHMED S, WALLACE K. Understanding the knowledge needs of novice designers in the aerospace industry[J]. Design Studies, 2004, 25(2): 155-173.
- [26] HEISIG P, CALDWELL N, CLARKSON P. Core information categories for engineering design - contrasting empirical studies with a review of integrated models[J]. Journal of Engineering Design, 2014, 25(1-3): 88-124.
- [27] 王蒙, 林兰芬, 王锋. 基于伪相关反馈的短文本扩展与分类[J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, 48(10): 1835-1842.
- WANG Meng, LIN Lanfen, WANG Feng. Short text expansion and classification based on pseudo-relevance feedback[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2014, 48(10): 1835-1842.
- [28] SAPPELLI M, VERBERNE S, KRAAIJ W. Evaluation of context-aware recommendation systems for information re-finding[J]. Journal of the Association for Information Science and Technology, 2017, 68(4): 895-910.
-
- 作者简介: 梁野, 男, 1989 年出生, 博士研究生。主要研究方向为制造业信息化关键技术、产品数字化设计制造、知识管理。
E-mail: liangye@zju.edu.cn
- 裘乐淼(通信作者), 男, 1977 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为产品数字化设计、智能制造与数字工厂、计算机集成制造、制造业信息化。
E-mail: qiuml@zju.edu.cn
- 刘晓健, 男, 1983 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为产品数字化设计与制造, 制造业信息化。
E-mail: liuxj@zju.edu.cn
- 张树有, 男, 1963 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为产品数字化设计、计算机图形学、机器视觉、制造业信息化关键技术。
E-mail: zsy@zju.edu.cn
- 谭建荣, 男, 1954 年出生, 博士, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士。主要研究方向为机械设计及理论、数字化设计与制造。
E-mail: egi@cmec.zju.edu.cn