

文章编号:1000-582X(2009)03-0288-06

应用脑力负荷测量的设计能力评价方法

郭波, 张晓冬, 段爽月

(重庆大学机械工程学院, 重庆 400030)

摘要:分析了设计能力与脑力负荷、设计时间和设计效果之间的关系,提出了定量评价的方法。参试者脑力负荷由 NASA-TLX (national aeronautics and space administration-task load index) 量表测量,设计时间由专门开发的程序统计,设计效果通过专家打分给定分值。基于所评价出的设计者的能力等级,采用支持向量机技术对新设计任务的设计时间进行了预测。预测值和实测值的对比结果显示二者没有明显差异,说明该方法所评价的设计能力等级是有效的。

关键词:设计能力;设计时间;脑力负荷;设计效果;信效度评价

中图分类号:TH122;F406.15

文献标志码:A

An evaluation method of design ability using mental workload assessment

GUO Bo, ZHANG Xiao-dong, DUAN Shuang-yue

(College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

Abstract: By analyzing the relationship between design ability and design time, mental workload, and design effect, an evaluation method of design ability is proposed. As far as the factors involved in such method are concerned, mental workload is measured by NASA-TLX (national aeronautics and space administration-task load index) scale, design time is acquired with a special program, and design effect is scored by expert. Then, the time spent on new design tasks based on the evaluated ability level is predicted by using support vector machines, which is then compared with real-measured time. The result shows that the predicted time is well accorded with the real time, which indicates that the evaluation method of design ability is valid.

Key words: design ability; design time; mental workload; design effect; reliability and validity

产品设计的时间预测是近年来产品开发过程控制所关注的热点。然而,如何对产品设计活动的主体——设计者的能力进行评价一直是一大难题。目前大多数针对产品设计时间预测的研究往往回避了设计能力这一重要影响因素,极大影响了预测的准确性和客观性。

目前,用于描述和解释特殊能力的理论主要有

SEEK 理论、长时工作记忆理论、模块理论(template theory)、组块理论(chunking theories)等^[1-3]。然而,由于特殊能力的表现形式往往随专业领域而变化,上述理论所关注的重点在于如何对特殊能力进行解释和描述,而未能提供一种量化的测定方法。

显然,设计能力属于特殊能力,是从事产品设计活动所必需的能力。相对于单科专业领域,产品设

收稿日期:2008-10-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(70501036)

作者简介:郭波(1979-),男,重庆大学博士研究生,主要从事系统仿真、人因工程等研究。

张晓冬(联系人),女,重庆大学教授,博士生导师,(E-mail)xdzhang@cqu.edu.cn。

计所包含更多不良界定问题、涉及跨学科知识且目标涉及大量隐含的约束条件,因此对设计能力的描述更为复杂。目前国内外学者对设计能力的研究大多从设计行为和设计认知的角度着手。如文献[4]建立了专家技能模型,分析了专家和新手所具备的专业知识水平,并对比了不同能力的设计者在设计过程中所使用的问题解决策略;文献[5-6]分别分析了在航空工业和机械设计领域中新手成为合格设计者所必备的相关知识;文献[7]则重点从绩效角度来对比专家和新手差异;文献[8]从人工智能的角度描述了设计行为,重点研究了设计能力中智力的作用;文献[9]比较了设计者分别采用问题驱动、方案驱动、信息驱动和知识驱动这4种认知策略时对设计结果带来的影响,以及不同能力的设计者所偏好的认知策略;文献[10]分析了图式、策略和先例在专家能力中的作用。上述研究大多采用问卷或访谈的方式对被研究对象进行调查,从认知的角度研究设计能力,有利于探寻设计能力的本质,然而对如何测定和量化设计能力却无能为力。文献[11]通过66个设计案例,利用客户评价的方式评价了高年级工业设计类学生的设计技能,但其目的是调查教育质量是否满足社会需求,而不是针对设计者在某一领域所处的技能水平的评价。文献[12]比较了专家和新手在设计中使用类别推理的情况,并利用单位时间内设计者使用类别的数量来度量设计能力。但该方法所度量的能力值很难用于产品设计时间的预测。文献[13]利用实验中参试者完成一项测试任务的时间值量化了其设计能力,然而由于设计者的心理状态、主观努力程度等因素很难被研究者控制,该方法所度量的能力值的准确性还有待证明。

针对上述问题,笔者提出了一种基于主观脑力负荷和时间测量的设计能力评价方法——利用产品设计时间、设计者的脑力负荷和设计效果这3个要素测量其设计能力。

1 设计能力的表现形式

1.1 设计中的问题解决

产品设计本质上是一个把初始要求转化为可接受的解决方案的过程^[14],也即一个问题解决过程。Meyer认为,问题解决是人在没有明显的解决方案的情况下,将给定情境转化为目标情境的认知过程。问题解决的认知过程大致可以分为4个阶段:发现问题阶段、分析问题阶段、提出解决问题的假设阶段

和验证假设的阶段,其具体内容如图1所示。这4个阶段构成了问题解决的周期,即为了解决问题,达到目标状态而克服困难或障碍所花费的时间。

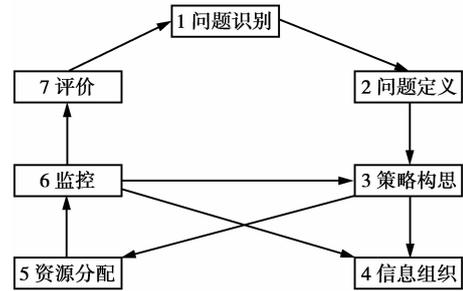


图1 问题解决的周期

对于产品设计这一专门领域而言,设计能力在问题解决中的作用体现在:1)对较低能力设计者是问题的部分,对较高能力的设计者可能就不是问题;2)设计能力包含了对相关知识的储备,这决定了设计者在问题空间中搜索的时间;3)先验知识和设计经验对设计者组织脑力资源解决问题的效率有显著影响。因此,设计能力和问题解决的周期是一个明显的负相关关系。

1.2 设计中的脑力负荷

脑力负荷是反映工作时人的信息处理系统被使用程度的指标。脑力负荷与人的闲置未用的信息处理能力之和就是人的信息处理能力。根据组块理论,可将产品设计中的问题解决看作一个信息通过组块化过程而被编码的过程(图2)。由于设计任务中包含了大量相互作用的信息元素,这些信息元素必须同时在工作记忆中处理,从而给设计者带来了工作记忆负荷。

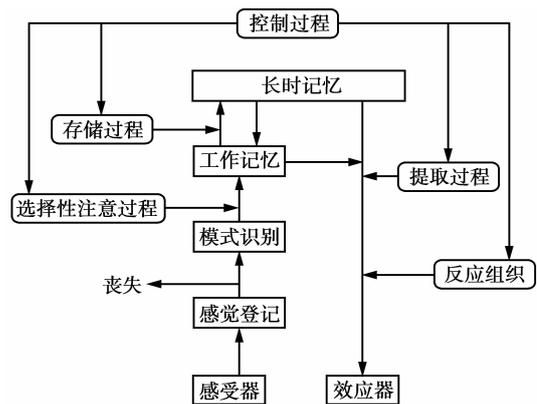


图2 信息处理过程

由于产品设计中设计者的脑力负荷是由任务所包含的相互作用的元素引起, Swell 等人将其称为内在认知负荷, 内在认知负荷与设计能力有关。熟练的设计者的工作记忆包含 7 个左右(正负 2)的组块, 而设计能力较低的设计者所拥有组块少于这一数目^[15]。组块的数量反映了设计者的设计能力, 进而对其内在认知负荷造成了影响, 这主要体现在: 当设计者处理信息的能力较高时, 更多的信息元素能被组块化为图式, 在人的工作记忆中可以被作为单一元素进行处理。因此, 设计者的设计能力越高, 任务所带来的内在认知负荷越低。

1.3 设计能力表达式的假设

根据前面的讨论, 设计者在完成一项特定测试任务时的脑力负荷值可以从一定程度反映其设计能力。然而, 产品设计是一个有目的的、主动的认知过程, 测试中设计者的主观能动性极易引起脑力负荷的变化。笔者假设图 3 描述了设计者在积极(实线)和消极(虚线)2 种状态下脑力负荷(L)和设计时间(T)的交互变化。其中, 曲线表示在测试过程中设计者的实际脑力负荷值, 直线表示测量所得到的脑力负荷值。设计者在测试过程中表现得越主动和积极, 其脑力资源被使用的程度越高, 相应地脑力负荷越大。同时, 由于设计者积极地分配大量脑力资源用于问题解决中, 这使得问题解决的周期得以缩短。

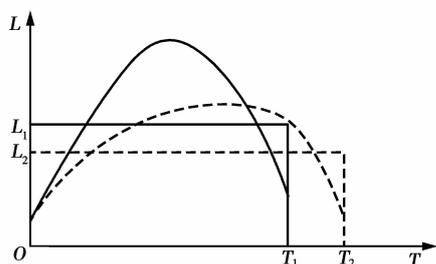


图 3 脑力负荷与设计时间的关系

基于图 3 的描述可以看出, 尽管脑力负荷的测量值容易随设计者的主观能动性而变化, 但是其和完成测试任务所耗费时间的乘积呈相对稳定的状态。这是因为设计者要将待解决的问题推至某种目标状态就必须调用相应程度的脑力资源, 即在这个过程中设计者所须承担的负荷总量是相对固定的。因此, 可将设计能力表示为负荷总量的形式

$$A = L \times T, \quad (1)$$

其中: A 为设计能力; L 为设计者在完成测试任务时所测得的脑力负荷; T 为理想状态时设计者完成测

试任务所耗用的时间。

由于实际测试中设计能力局限所带来的设计错误、方案的合理性等缺陷将影响设计效果, 即并非所有设计者均能以理想的结果完成一项测试任务。针对这一情况, 笔者将 T 表达为

$$T = T_i + T_c, \quad (2)$$

式中: T_i 为设计者完成一项测试任务所测得的时间; T_c 为设计者修正设计缺陷使设计效果达到理想状态所需要再花费的时间。

假设修正过程中设计者产生的学习系数为 α , 则 T_c 可表达为

$$T_c = \alpha T_i \times (1 - P). \quad (3)$$

其中, 理想设计效果分值为 1, 设计者的设计效果所得评分值为 P , P 越大表示该设计者完成测试任务的效果越好, 即需要修正的内容越少。

将式(2)和式(3)带入式(1), 可得设计能力的表达式为

$$A = L \times T_i \times (1 + \alpha - \alpha P). \quad (4)$$

2 设计能力测试及验证实验

2.1 实验任务

为验证所提出假设的有效性, 笔者以变速箱传动轴的设计进行了实验。实验任务分为 2 个环节。

2.1.1 环节 1

目的是测定各参试者的设计能力值。在本环节, 所有参试者完成相同的设计任务。其中, 参试者完成任务所耗用的时间 T_{i1} 通过笔者专门开发的程序予以记录; 设计效果 P_1 采用专家打分的方式在 0~1 给定分值; 参试者的脑力负荷值 L 利用 NASA-TLX (national aeronautics and space administration-task load index) 量表进行评价。NASA-TLX 是一项主观负荷评估技术, 具体步骤是: 1) 采用两两比较法, 对每个因素在脑力负荷中形成的相对重要性进行评定, 求得各因素的权重; 2) 在 0~100 分别对每个因素的状况进行评定, 求得各因素的评估值; 3) 对权重和评估值加权平均, 计算出脑力负荷值。

2.1.2 环节 2

目的是产生衡量设计能力预测效度的效标。为反映实际设计中任务难度的影响, 笔者设置了 6 个难度系数(用字母 D 表示)不同的任务。参试者经过第一个环节后, 随机从中抽取一个任务。其中, 参试者完成任务所耗用的时间 T_{i2} 和设计效果 P_2 与第

一环节评价方法相同。

2.2 实验条件

本实验使用的软硬件包括:30台PC,各PC的CPU相近,内存512MB;基于Windows操作平台的计算机辅助设计软件AutoCAD以及Microsoft Access数据库、Word和Excel软件。每台PC均能保证参试者在使用软件时无停滞现象。轴承、联轴器等设计标准文件放置于Windows操作软件桌面,

参试者在设计过程中可随时查询。为使实验过程规范化,缩短设计时间并有效统计参试者信息和实验数据,笔者利用Microsoft VC++开发了一套面向轴类零件的设计时间研究实验程序(图4),其输出平台使用了Microsoft的Access数据库,并提供了Auto-CAD接口。该程序实现了以下几个功能模块:参试者基本信息录入和收集、设计时间记录、轴的关键部位的应力计算与校核。

图4 面向轴类零件的设计时间研究实验程序

2.3 实验流程

基于所开发的程序,参试者执行2个环节的任务时均按以下步骤进行:

- 1)输入参试者基本信息;
- 2)选择轴材;
- 3)计算轴最小直径;
- 4)轴的结构设计及作图;
- 5)应力校核,合格则保存结果结束实验,否则转4)。

3 结果评价和讨论

信度即可靠性程度,是指测量工具或方法能否稳定地测量到它要测量的事项的程度;效度(validity)即正确性程度,是指测量工具或方法在多大程度上反映了想要测量的概念的真实含义。为验证假设的合理性,笔者对27名完成了2个环节任务

的参试者所产生的数据进行了相应的信度和效度检验。

3.1 脑力负荷值的信效度检验

NASA-TLX量表在国外的应用中表现了较高的可靠性。然而,考虑到东西方文化的差异以及翻译的准确性,笔者首先对脑力负荷的测量结果进行了信度检验。评价方法采用分半法,根据Spearman-Brown公式校正可得,测量结果的分半信度为0.676,大于0.600,表明该测量结果的信度可接受。

同时,由于NASA-TLX主要针对人机操作系统中操作者的脑力负荷,这与内在认知负荷有一定区别,所以对脑力负荷测量结果的效度检验重点集中在建构效度上,以考察所观测的变量对概念理论结构的正确反映程度。检验方法采用主成分分析

法,经过对 NASA-TLX 量表各条目进行因子分析(表 1),选择特征值大于或等于 1 的因子,其累计贡献率超过 70%,由第一因子 F_1 的载荷看,除努力程度外,其余各条目都具备了一定载荷量;努力程度在第二因子 F_2 上具有很大载荷量。同时,从共同度看,各条目对 3 个因子的依赖度都较大,说明他们的方差有相当大部分可以被这 3 个公共因子所解释。以上分析表明,NASA-TLX 量表的各条目比较平均地承担了主成分因子载荷,可认为测量结果比较正确地反映了内在认知负荷的概念理论结构。

表 1 脑力负荷测量结果主成分分析

条目	因子载荷			共同度
	F_1	F_2	F_3	
脑力要求	0.424	-0.189	-0.790	0.841
体力要求	-0.612	0.664	-0.036	0.816
时间要求	-0.731	-0.254	0.097	0.608
操作业绩	0.524	0.021	0.661	0.711
努力程度	0.053	-0.749	0.190	0.599
挫折程度	0.590	0.559	0.048	0.662
特征值	1.714	1.414	1.110	
贡献率/%	28.559	23.560	18.501	
累积贡献率/%	28.559	52.120	70.621	

3.2 设计能力值的效度检验

由于目前尚无研究对知识工作的学习系数进行界定,所以这里暂不考虑参试者的学习效应,即取 $\alpha=1$ 。将脑力负荷值 L 、测试时间 T_{11} 和设计效果 P_1 代入公式(4),计算出各参试者的设计能力值 A 。该测定值是否有价值在于能否对参试者在将来设计中的表现作出有效的预测,因此,笔者对所测定的能力值 A 进行了预测效度检验。

预测效度是一种效标关联效度。具体的应用方式是:将环节 2 中的 4 个维度的样本分成 2 部分,其中前 18 个样本数据为训练样例,其余 9 个样本数据为测试样例(表 2)。

表 2 环节 2 中的数据分类

样本	自变量		因变量		数据范围
训练	A^{tr}	D^{tr}	P_2^{tr}	T_{12}^{tr}	1~18
测试	A^{te}	D^{te}	P_2^{te}	T_{12}^{te}	19~27

由于环节 2 所得到的数据为一组小样本,基于 Matlab 7.1 利用支持向量机(support vector machines, SVM)进行了回归分析,具体步骤为:

- 1)对数据进行归一化处理;
- 2)定义第 1 个自变量 $X_1 = \{A^{tr}, D^{tr}\}$,第 1 个因变量 $Y_1 = T_{12} \times P_2^{tr}$;
- 3)利用 Matlab 7.1 编译回归程序,对自变量和因变量进行拟合;
- 4)定义效标 $Y_2 = \{T_{12}^{te}\} \times \{P_2^{te}\}$;
- 5)定义第 2 个自变量 $X_2 = \{A^{te}, D^{te}\}$,根据所拟合的函数预测出第 2 个因变量 Y_2 ;
- 6)计算 \hat{Y}_2 和 Y_2 的相关系数,将其与通用可接受标准进行比较。

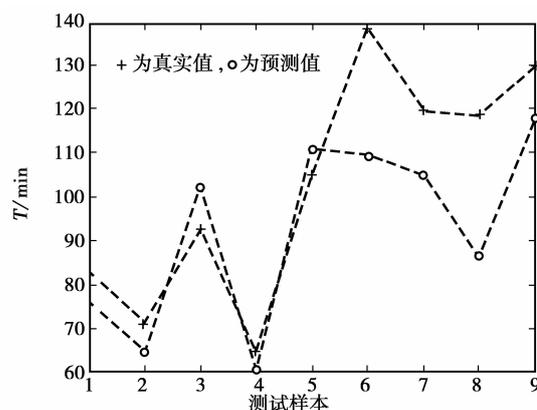


图 5 设计时间的预测值与实际值的对比

经过程序运行,当选择高斯径向基函数为核函数, $C=10\ 000$ 、 $\epsilon=0.01$ 时,所拟合的回归曲线最优。此时 \hat{Y}_2 和 Y_2 的相关系数为 0.89,大大超过了通用可接受标准 0.70。该结果表明采用本方法所评价的设计能力等级是有效的。

4 结 论

针对产品设计时间预测中设计能力评价的问题,笔者提出了一种综合考察设计时间、设计者的脑力负荷和设计效果的设计能力的评价方法。实验结果表明该方法具有良好的预测效度。同时由于对设

计能力进行了定量评价,所以该方法在产品设计时间的预测中具有良好的可操作性。

产品设计是一种复杂的认知行为,涉及大量不良界定问题,某些设计能力所包含的要素很难通过定量的方法进行评价,如创造性等。因此笔者所提出的方法主要适用于对创造力要求较少的常规设计活动,而对设计能力的全面考察还有待进一步研究。然而,设计时间、脑力负荷和设计效果是任何产品设计中都必然出现的指标。因此,该方法在产品设计领域有很好的通用性和适应性。

参考文献:

- [1] 凌文铨,方俐洛. 心理与行为测量[M]. 北京:机械工业出版社,2003.
- [2] 艾克森,基恩. 认知心理学[M]. 高定国,肖晓云,译. 上海:华东师范大学出版社,2004.
- [3] 梁宁建. 当代认知心理学[M]. 上海:上海教育出版社,2003.
- [4] POPOVIC V. Expertise development in product design-strategic and domain-specific knowledge connections [J]. Design Studies, 2004, 25(5): 527-545.
- [5] AHMED S, WALLACE K M. Understanding the knowledge needs of novice designers in the aerospace industry[J]. Design Studies, 2004, 25(2): 155-173.
- [6] BROENS R C, VRIES M J. Classifying technological knowledge for presentation to mechanical engineering designers[J]. Design Studies, 2003, 24(5): 457-471.
- [7] CROSS N. Expertise in design: an overview[J]. Design Studies, 2004, 25(5): 427-441.
- [8] CROSS N. Natural intelligence in design[J]. Design Studies, 1999, 20(1): 25-39.
- [9] KRUGUR N, CROSS N. Solution drive versus problem driven design: strategies and outcomes[J]. Design Studies, 2006, 27(5): 527-548.
- [10] LAWSON B. Schemata, gambits and precedent: some factors in design expertise[J]. Design Studies, 2004, 25(5): 443-457.
- [11] LEWIS W P. An analysis of professional skills in design: implication for education and research[J]. Design Studies, 2002, 23(4): 385-406.
- [12] LINDEN J B, THOMAS C O, NICOLA J M. Spontaneous analogizing in engineering design: a comparative analysis of experts and novices[J]. Design Studies, 2004, 25(5): 495-508.
- [13] GUO B, ZHANG X D, DUAN S Y, et al. An experimental evaluation method for mechanical CAD task of students[C]// 1st International Symposium on Information Technologies and Application in Education, November 23-25, 2007, Kunming, Yunnan, P. R. China. [S. l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineer Inc, 2007: 61-65.
- [14] ZDRAHAL Z, MULHOLLAND P, VALASEK M. Worlds and transformations: supporting the sharing and reuse of engineering design knowledge[J]. International Journal of Human-Computer Studies, 2007, 65(12): 959-982.
- [15] TAMARA V G, FRED P, JEROEN J G, et al. Effects of studying sequences of process-oriented and product-oriented worked examples: no troubleshooting transfer efficiency[J]. Learning and Instruction, 2007, 18(3): 1-12.

(编辑 张 苹)