DOI: 10.3901/JME.2020.09.181

面向性能的定制产品感性意象评价方法研究*

冯毅雄 娄山河 王绪鹏 郑 浩 高一聪 王 云 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: 机械产品的设计已经从功能层面的满足上升到情感层面的满足, 功能不再是唯一的重点, 机械产品特别是定制产品的性能越来越受到重视。感性意象是用户对产品性能表现形成的印象, 决定了产品是否能够满足用户高层次的情感需求。提出一种面向性能的定制产品感性意象评价方法, 采集脑电信号用于反映用户的感性意象, 并以此为主要依据, 验证产品的性能。为了精确、全面地反映用户对于定制产品性能的感性意象评价, 综合客观评价法和用户主观评价结果对采集的脑电信号分级标定。以乘客对于高速电梯乘运性能的评价为例, 通过小波包分解提取乘客脑电信号的特征, 利用随机森林算法实现对于电梯运行过程中脑电信号的分类。从而建立一种针对高速电梯乘运性能的感性意象评价模型, 实现脑电数据特征的约简, 得到了一种新的电梯乘运性能评价指标。通过脑电信号将乘客使用电梯产品时的愉悦感、舒适性量化表达, 为定制产品感性意象评价提供了一个新的理论与方法。

关键词: 定制产品; 感性意象; EEG; 乘运性能

中图分类号: TG156

Research on Performance-oriented Perceptual Image Evaluation Method for Customized Products

FENG Yixiong LOU Shanhe WANG Xupeng

ZHENG Hao GAO Yicong WANG Yun TAN Jianrong

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

Abstract: The demand for mechanical products design has increased from the functional level to the emotional level. The function of mechanical products is no longer the only focus. The performance of mechanical products, especially customized products, has attracted more and more attention. The perceptual image is the impression of the user on the performance of the product, which determines whether the product can meet the high-level emotional needs of the user. A performance-oriented method for evaluating the perceptual image of customized products is presented. The main basis for verifying the performance of products is real-time acquired physiological signals of customers. To evaluate the physiological signals of customers, the objective evaluation method and subjective evaluation results are employed, which is able to reflect the performance of customized products accurately. This study takes evaluation of high-speed elevator's ride performance as an example. By wavelet packet transform and random forest algorithm, feature extraction and classification of collected passengers' EEG signals in the elevator's operation are respectively implemented. A perceptual image evaluation model of high-speed elevator's ride performance is established and the reduction of EEG data characteristics is realized. According to the proposed method, passengers can express the pleasure or comfort quantitatively, which provides a new perspective for exploring the evaluation method based on the perceptual image.

Key words: customized products; perceptual image; EEG; elevator's ride performance

0 前言

进入 21 世纪, 随着设计和制造技术的进步, 机械产品得到极大丰富, 机械产品功能同质化现象越

来越明显^[1-2]。机械产品的设计已经从功能层面的满足上升到情感层面的满足, 机械产品的“功能”不再是唯一的设计重点, 机械产品特别是定制产品的“性能”越来越受到重视^[3-4]。

感性意象由用户基于记忆、联想和感受的人脑反应产生。定制产品的性能表现作为外部刺激可以引发这些反应, 从而改变人的情感状态, 情感的变化决定了产品是否满足用户高层次情感需求^[5]。感

* 国家自然科学基金 (51935009, 51775489, 51675477) 和浙江省自然科学基金 (LZ18E050001) 资助项目。20190507 收到初稿, 20191219 收到修改稿

性意象在设计过程中体现出前所未有的重要性^[6],原因即在于这是一种面向情感感受、深层次影响定制产品性能评价的因素^[6]。产品性能评价方法的研究在国内外均有广泛开展,分为客观评价法和主观评价法。

目前使用最广泛的评价方法是客观评价法^[7],主要形式就是各类性能指标和标准,例如用于产品噪声等级评价的 A 计权声压级^[8]和用于振动性能评价的频率加权振动评价法^[9]等。PEAK 等^[10]基于小波变换的方法,改进了当前针对汽车声音、振动等因素的性能评价指标,并与乘客主观评价标准进行对比验证,发现具有较高的一致性。KIM 等^[11]基于声音的加权曲线和响度比等物理参数的优化,提出一种新的音调评价模型,并验证了有效性。但现有的客观评价法往往只能对单一性能指标进行评估,忽略性能指标之间的耦合关系。此外,产品性能指标不再是单纯的越大或者越小越好,还要使人在主观上感到满足和舒适。

主观评价法是一种将人的情感和产品性能评价过程融合的方法。等级评分法、排序法、语义细分法等是目前应用较为广泛的集中方法。LEE 等^[12]基于被试主观评价的噪声数据训练 ANN 分类模型,并将其用于汽车齿轮箱的噪声分析。LI 等^[13]应用 MLR 分析方法,探究声音特征和人体舒适度之间的关系,并指出造成不舒适性的主要因素在于响度和尖锐度。黄琦等^[14]运用专家访谈法结合眼动追踪技术,对汽车的造型特征进行认知。VERHAGEN 等^[15]运用定性、定量相结合的方法,阐明了语义差分法的作为评价方法的先决条件。赵丹华等^[16]针对设计师与用户的认知差异导致汽车造型设计评价可信度低的问题,基于造型意象认知模型构建了汽车造型可信性评价方法。但现有的主观评价法需要经过专业训练的专家分析评价结果,且由于人体本身的认知缺陷,只能对大尺度、大差别的性能给出较为可信的主观评价。

目前,认知行为与人体的神经激活的紧密关联已经在认知科学等相关领域的研究中得到证明。通过脑电信号(Electroencephalogram, EEG)频谱的变动可以推测脑部情绪感受和认知改变等活动^[17]。由于 EEG 不可伪装且时间分辨率高,其逐渐在设计领域得到了关注与应用。袁萍等^[18],基于自行车设计任务,研究脑电信号在不同的信息激励距离的变化,分析产品设计思维在认知行为上的机理。NGUYEN 等^[19]利用 EEG 分析设计师在不同的设计阶段各个脑区的活跃程度。LOU 等^[20]引入 Kano 模型和基于客户 EEG 的产品特征偏好识别,探究客户在概念设计模糊前端、需求定制时的心理状态。MATHIAS

等^[21]研究发现思维自顶向下的处理机制造成了 EEG alpha 波的活跃,且与创造性思维有关。然而在产品性能评价领域,EEG 的应用并没有受到重视。由于主客观评价法忽略了情感认知状态信息,无法获得反映终端用户真实情感的评价结果。通过 EEG 的不可伪装性和实时差异性可以有效探究用户实时的认知状态变化,对基于感性意象的产品性能评价具有重要的意义。但是当前面向产品性能评价的 EEG 研究也存在相应的难点,例如:如何在不同情况下建立 EEG 与产品性能之间的联系,以及如何准确地对 EEG 进行分级标定等。

对于用户的感性意象认知,现有的产品评价方法存在一定不足,还无法充分反映这种认知状态差异。针对现有问题,基于脑电信号开展了针对定制产品性能的感知意象评价方法的研究。在用户进行产品体验的同时,采集 EEG 信号作为评价依据,通过功率谱加权密度法结合主客观评价方法,对产品性能的感性意象评价得到更加精确、全面的结论。在传统的评价方法的基础上,结合神经认知过程相关的研究,探索解析用户的认知行为,为产品使用时用户心理状态的分析 and 面向人的产品设计、优化提供了一个新的研究方法。

1 面向性能的定制产品感性意象评价模型

感性意象是一种心理反映,它源于多种感官对产品性能产生的综合感受。针对这一特点,提出了一种基于用户神经认知的融合客观评价和主观评价的定制产品感性意象评价模型。如图 1 所示,形成了一个用于产品评价的四层架构模型:性能指标、数据采集、数据处理和结果分析。

振动、噪声和气压等产品的物理性能特征组成了性能指标层。耦合关系广泛存在与特征之间,以电梯为例,一方面在环境的物理原理上,气压、振动和噪声三者相互作用,相互影响;另一方面,对于用户而言,这些因素产生的感受是综合而又复杂的。因此对于这些因素无法独立地进行考量、评价,需要进行更将综合的评价。

数据采集层地作用在于定制产品的客观物理信号、揭示用户心理认知状态的感性意象 EEG 信号和用户的主观评价结果数据的采集,其中物理信号和用户 EEG 信号需要同时采集,这一层属于模型的输入层。需要采集的物理信号根据定制产品的性能指标来确定,例如对于电梯设计来说,需要采集的物理信号是噪声、振动等物理状态。

图1 面向性能的定制产品感性意象评价模型

数据处理层是整个评价模型的核心，对采集得到的性能物理信号、用户评价数据和 EEG 信号开展预处理、分级标定、特征提取与分类等过程。并最终实现 EEG 数据分类算法模型的训练，构建感性意象评价模型。

验证结果层是对数据处理层 EEG 分类算法的实际应用。根据实际定制产品使用过程中采集的多模态数据，实现定制产品性能的多尺度评价，获得感性意象评价结果。

由主观评价法得到产品的整体性能评价结果，客观评价法完成对于不同性能指标的定量分析，用户真实的神经认知状态由生理信号确定，最终实现一种综合的产品感性意象评价方法。将模型输出的用户感性意象评价结果重新输入到产品的设计制作过程，实现对产品定制服务的优化。

2 基于功率谱频率加权密度的感性意象 EEG 信号分级

产品性能的主观评价结果是用户在较大时间尺度上对产品使用体验给出的综合语义评价。但用户的使用体验会随外界刺激和环境的变化产生实时的波动，这种较小时间尺度上的波动可以从 EEG 数据中得到体现，从而弥补主观评价准确性不足的缺点。客观评价法虽然利用设备运行的物理数据对产品性能进行实时监测和分析，但其不符合产品感性意象

以用户为中心的本质，无法客观的反映用户的心理认知过程。本文利用主观用户评价数据和客观产品性能数据，通过定性和定量相结合的方式对用户感性意象 EEG 信号进行多尺度的分类标定。首先根据用户主观评价结果在较大时间尺度上对 EEG 信号进行标定，随后结合功能频率谱加权密度法在较小的时间尺度上进行分级，以获得感性意象 EEG 信号对应的具体标签。

定制化产品的性能度量是基于多种性能指标同时实现的，记为 $\mathbf{X}=(x^1, x^2, \dots, x^i)$ ，其中 x 为某一性能指标，例如振动、气压以及噪声等^[7-9]， i 表示不同的性能物理信号。频率加权性能评价指标 $x_w^1, x_w^2, \dots, x_w^i$ 由 $x^1, x^2, \dots, x^i$ 等性能物理信号处理得到。产品的单一性能评价指标 $x_w^1, x_w^2, \dots, x_w^i$ 无法有效地反映产品的性能，现有的专家系统没有考虑性能指标数据自身特征的缺陷，缺乏有效的综合评价方法。为克服现有问题，提出一个综合的产品性能评价指标，基于功率谱频率加权密度法，对各种客观性能评价指标实现融合。

经过滤波等常规预处理之后，得到时序的 m 维幅值向量，代表物理性能信号：

$$x_m^i(j)=[x^i(j), \dots, x^i(j+m-1)], 1 \leq i \leq L-m+1 \quad (1)$$

式中， m 为模式维数， L 为所获得的数据采样点总数， i 为性能指标编号， j 为采样点序号， $x^i(j)$ 表示第 i 个性能指标第 j 采样点的信号的幅值， $x_m^i(j)$ 表示第 i 个性能指标在第 j 采样点后得到的 m 维的

幅值向量; $x_m^i(j)$ 经过傅里叶变换后, 得到 $x_{jm}^i(w)$ 。产品性能等级由1/3 倍频程法^[9] 初步计算得到; 对不同频率的外界刺激, 人体的敏感程度不同, 如表1 所示。因此, 在不同频带上, 对物理刺激信号需要赋予不同的加权值, 才能得到有效的频率加权性能平均值 x_{jmw}^i

$$x_{jmw}^i = \left(\sum_{k=1}^K \left(u(w_{cjk}^i) x_{jm}^i(w_{cjk}^i) \right)^2 / (w_{ujk}^i - w_{ljk}^i) \right) \quad (2)$$

式中, $u(w_{cjk}^i)$ 为频率加权系数^[9], 如图2 中的纵坐标 u_k ; k 为采样点序号, $w_{ujk}^i, w_{cjk}^i, w_{ljk}^i$ 分别对应每一采样点1/3 倍频程的高、中、低频。

表1 身体各部位的共振频率

编号	身体部位	共振频率/Hz
1	头部	2~30
2	心脏	5
3	脊柱	30
4	臀和足部	4~8
5	肩部	2~6
6	躯干	6

图2 频率加权系数曲线

对于产品的某一物理性能的评价, 频率加权性能由其对应的评价指标基准, 记为 x_{0mw}^i 。例如某项指标 x^1 , 若 $x_{jmw}^1 > x_{0mw}^1$, 则可以认定此段时间内, 产品的该项性能无法满足用户需求。对于每一性能物理信号可以得到一组性能数据

$$x_{mw}^i = (x_{0mw}^i, x_{1mw}^i, x_{2mw}^i, \dots, x_{jmw}^i) \quad (3)$$

对每一组性能数据归一化处理

$$x_{jmw}^{i'} = \frac{\max(x_{mw}^i) - x_{jmw}^i}{\max(x_{mw}^i) - \min(x_{mw}^i)} \quad (4)$$

得到性能指标矩阵 X

$$X = \begin{bmatrix} \frac{x_{1mw}^{1'}}{x_{0mw}^{1'}} & \frac{x_{2mw}^{1'}}{x_{0mw}^{1'}} & \dots & \frac{x_{jmw}^{1'}}{x_{0mw}^{1'}} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{x_{1mw}^{i'}}{x_{0mw}^{i'}} & \frac{x_{2mw}^{i'}}{x_{0mw}^{i'}} & \dots & \frac{x_{jmw}^{i'}}{x_{0mw}^{i'}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

由 $x_{jm}^i(w)$ 计算每段信号的功率谱 $P_{jm}^i(w)$, 与图2 中频率加权系数曲线拟合, 得到拟合函数 $H(w)$ 。

计算其功率谱频率加权密度

$$G_{jmw}^i = \frac{1}{w_{\max} - w_{\min}} \int_{w_{\min}}^{w_{\max}} P_{jm}^i(w) H(w) dw \quad (6)$$

计算不同性能指标在同一时间段内融合权重

$$y_{jmw}^i = G_{jmw}^i / \sum_i G_{jmw}^i \quad (7)$$

得到权重矩阵 Y

$$Y = \begin{bmatrix} y_{1mw}^1 & y_{2mw}^1 & \dots & y_{jmw}^1 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y_{1mw}^i & y_{1mw}^i & \dots & y_{1mw}^i \end{bmatrix} \quad (8)$$

计算 n 个性能指标融合后的客观性能指标

$$C_{jw} = X(:, j)^T \cdot Y(:, j) \quad (9)$$

用户主观评价在大时间尺度上对产品性能进行定性评价, 随后针对小时间尺度数据采用基于功率谱频率加权密度法的客观性能指标 C_{jw} 定量评价, 根据 C_{jw} 值的大小将产品性能进一步分为不同等级, 实现对 EEG 数据的分级标定。

3 基于小波包分析和随机森林法的感性意象特征提取与分类

3.1 EEG 信号数字特征提取

同一般信号相比, 生理信号具有一些独特的特征: 信号强度弱, 主要集中在低频段, 随机性强, 噪声强。导致传统信号分析方法无法有效提取信号中的有用成分。小波包分解(Wavelet packet transform, WPT)基于傅里叶分析的思想, 采用一系列尺度可变的函数作为基函数来逼近任意信号。因此, 其具备了良好的时频定位特性和对于各种信号的自适应能力, 同时 WTP 方法的多层分解有效地将噪声从原始信号中剔除, 从而在生物医学信号处理领域受到了关注。此外, 不同的 EEG 信号节律处在不同的频带, 也可以通过多分辨率分析有效获得。

小波包分解会得到低频和高频两个子带, 对于某一频段的 EEG 数据的小波系数 $E_n^{ik}(f)$, i 表示频率段编号, k 表示脑电导联编号, 对应频率区间为 $[f_{ik \min}, f_{ik \max}]$, n 表示每个子带的深度。计算其功率谱 $P_{E_{ik}}(f)$, 并按式(10)计算其功率谱频率加权密度

$$g_{ik} = \frac{1}{f_{ik\max} - f_{ik\min}} \int_{f_{ik\min}}^{f_{ik\max}} P_{E_{ik}}(f) H(f) df \quad (10)$$

对应第 j 段产品信号的客观性能指标为 C_j , EEG 的特征矩阵 G_j 为

$$G_j = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & \cdots & g_{1k} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ g_{i1} & g_{i2} & \cdots & g_{ik} \end{bmatrix} \quad (11)$$

3.2 EEG 信号数字特征分类

EEG 信号具有高维度、非线性和非平衡的特点,为了解决这一类问题,学者提出众多用于高维非平衡数据的抽样和分类方法^[22-23]。

文献[24]设计实验,通过被试对于视频的情感反应,利用 KNN 和 LDA 建立了一种基于 EEG 的情感状态识别模型,分类正确率达到 83.04%。LIN 等分析人对于声音的情感反应,研究被试听到不同音乐时表现出的高兴、伤心等状态,利用 SVM 算法建立分类模型,正确率达到 82.29%^[25]。文献[26]和[27]分别用 Elman ANN、SVM、KNN、MDA 等方法对于被试者的情感状态进行了分类研究,实现了 80% 以上的正确率。之前的研究在分析脑电信号时,均由专家基于现有研究的先验知识,直接进行主观选择与研究目标关联较大的导联电极采集到的 EEG 信号。现有研究还没有确定与产品性能评价关联较大的导联,因此本文使用了设备中所有导联采集到的数据,然而这必然导致数据维度较高。因此,综合考虑 EEG 分类算法的特点,选择随机森林(Random forest, RF)对本文数据进行分类。在计算量没有显著增加的前提下,RF 算法可以有效地调高预测精度,且其投票机制对多元线性不敏感,对于缺失数据和非平衡数据可以得到较为稳健的结果。本研究中,RF 算法一方面可以适应生理信号数据的特点,另一方面可以在分类的同时给出产品性能评价任务的导联重要度评分,作为后续相关研究的基础。

4 实例与试验

当今社会人们对高速电梯的需求不断增大,但是随着电梯速度的增大,高速电梯的振动和噪声等问题不可避免的显现出来。因电梯振动频率与乘客身体器官共振频率相近,所以很容易引起乘客呕吐、恶心等症状,进而会在很大程度上影响用户体验;高速电梯的声品质和振动特性又能够向用户传达一系列复杂的信息,如安全、舒适和可靠等。同时,只有具有了科学合理的评价方法才能对高速电梯的乘运性能实现更好的控制和优化。

目前对于高速电梯乘运性能的研究,主要集中在通过机械和控制角度的振动、噪声优化方法,提高产品乘运性能^[28-33],所以有必要对高速电梯乘运性能评价方法进行深入研究。本文提出了一种面向性能的定制产品感性意象评价方法,并在某高速电梯设计过程的性能评价阶段进行了应用验证。

选取了根据不同方案研制的两种电梯 A 和 B,由于设计样梯的主要目的为检验电梯结构不同带来的影响,因此样梯装潢风格相同,电梯结构上的主要特点如表 2 所示,试验过程及试验设备如图 3 所示。利用脑电设备采集乘运状态的用户脑电信号;统计用户对于乘运性能的评价,定性分析电梯的性能;根据电梯振动和噪声等物理数据,定量分析性能等级,完成 EEG 信号分级标定。应用功率谱频率加权密度法和 WPT 方法提取 EEG 信号的特征;根据得到的特征数据训练随机森林 RF 算法,生成测试数据的 EEG 分级结果,最终得到高速电梯乘运性能的评价模型。试验分为三部分。

(1) 数据采集:采集高速电梯乘运性能物理数据,统计主观评价结果,采集被试脑电数据。

(2) 特征提取:功率谱频率加权密度法评估电梯乘运性能,小波包分解提取 EEG 信号特征。

(3) 模型训练:基于提取的 EEG 特征训练 RF 分类算法,得到感性意象评价模型。

表 2 电梯 A、B 主要结构特征

类别	电梯 A	电梯 B
导流罩	无	有
减震方式	橡胶垫	弹簧
导靴类型	普通滚动导靴	弹性滚动导靴
隔音填充物	离心玻璃棉	聚酯纤维隔音棉
轿厢宽×深×高/mm	2150×1800×2940	2150×1800×2940

4.1 数据采集

试使用 32 导联的脑电帽采集记录用户的 EEG 数据,图 4 为标准电极点位置图。PMT(Physical Measurement Technologies)公司的 EVA-625 振动仪和其相关软件采集振动和噪声数据。

(a) EVA-625 振动仪

(b) 脑电采集设备

图3 试验相关图片

表 3 所示, 展示了 F_z 、 F_{p2} 和 F_3 三个导联在两个最低频段的特征。抽取 1 2000 组试验采集的数据, 随机选择其中的 9 000 组作为训练集, 另外 3 000 组作为测试集用于得到模型的测试验证; G_j 为分类数据, 对应的性能等级标签为分类目标。RF 算法根据 Gini 系数最小原则建立分支, 并利用袋外数据(Out-of-bag)估计误差, 误差曲线如图 7 所示。训练集数据的等级用 1、2、3、4 标记, 若测试集数据的等级预测结果与真实等级相同, 则认为预测结果正确。

表 3 不同条件下的部分脑电数据特征

编号	F_z		F_{p2}		F_3		ComV
	AAA3	DAA3	AAA3	DAA3	AAA3	DAA3	
1	1.71	3.54	3.38	4.32	2.2	4.91	1.56
2	2.73	3.96	4.32	10.02	1.8	3.61	1.26
3	4.41	8.54	4.29	6.85	4.43	8.1	0.62
4	4.2	10.79	4.31	8.07	5.17	8.08	0.76
5	1.78	7.55	4.96	10.53	11.77	14.88	1.14
6	5.55	5.65	9.2	6.05	6.36	9.75	1.31
7	1.52	15.61	2.25	12.14	2.69	10.41	0.88
8	4.05	8.14	6.15	7.76	3.55	10.5	1.55
9	1.77	9.68	2.57	9.2	2.06	10.47	1.45
10	4.19	17.75	5.34	12.88	3.19	15.54	0.96
11	6.83	19.76	5.11	15.87	4.89	12.25	0.59
12	4.3	9.51	8.77	11.96	10.02	12.96	1.21
13	10.13	17.52	7.12	13.13	8.08	13.08	0.61
14	2.84	19.75	3.14	15.56	2.95	12.32	0.76
15	3.03	9.63	7.36	13.74	10.61	10.31	1.18
16	2.31	10.26	8.43	12.89	14.26	10.76	1.23

图 7 OOB 错误率随迭代次数变化趋势

4.3 结果分析

表 4 是模型在测试集上预测的正确率结果, 列出了总体正确率和各个舒适度等级的正确率。整个测试集的预测正确率达到 93.75%。在某个乘运性能等级 1 的状态下, F_7 导联的一段 EEG 信号如图 8 所示; 在某个乘运性能等级 4 的状态下, F_7 导联的一段 EEG 信号如图 9 所示。

表 4 测试集总体正确率和各个舒适度等级正确率

总体	舒适度 等级一	舒适度 等级二	舒适度 等级三	舒适度 等级四
0.934 7	0.950 4	0.912	0.914 4	0.962

图 8 乘运性能等级为 1 的情况下某段 EEG 特征

图 9 乘运性能等级为 4 的情况下某段 EEG 特征

图 8 和图 9 中的 EEG 地形图对应了信号中的同一个点, 对比可以发现, 即使是舒适度的两个极端状态, 仍然不存在明显区别, 由此可见 EEG 信号在时域上没有明显的规律性。对于脑电信号这种非线性、高维度、非平衡生理信号数据, 需要提取更高层次的信号特征, 利用更加有效的分类算法, 分析信号与状态的关联性。因此, 本文使用了 WPT 法提取特征, RF 算法训练分类模型。

图 10 为以平均精确率减少为准则的 10 个最优特征, 其中排名前三的为编号 25、17、5 对应的数值特征, 图 11 为以平均不纯度减少为准则的 10 个最优特征, 其中排名前三的为编号 25、5、17 对应的数值特征。在不同的评价标准下, 各个特征在训练的分类器中的重要程度会存在一定的差异; 但在训练的分类模型中, 与任务目标关联重要程度最大的前几个特征是相似的, 例如第 25 号特征, 无论哪种评价标准, 其重要度都是最高的。表 5 展示了两种标准下重要度最高的 10 组脑电信号特征及其对应的导联编号和频带。可以看出, F_z 、 F_7 和 F_{p1} 等脑电信号的低频部分, 重要程度较高。说明, 在电梯运行时, 这些导联对应的脑区对乘运性能较敏感, 对应的 EEG 信号能够更好地反映用户在某一情境下的舒适度感受。

图 10 平均精确率减少为准则的 10 个最优特征

图 11 平均不纯度减少为准则的 10 个最优特征

表 5 不同标准下 EEG 特征重要程度排序

特征排序	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
平均精确率减少	25	17	5	71	72	32	57	93	69	70
导联编号	F_z	F_7	F_{p1}	C_4	T_4	F_8	T_3	T_{p8}	C_4	C_4
频段	AAA3	AAA3	AAA3	ADA3	DDA3	DDA3	AAA3	AAA3	AAA3	DAA3
平均不纯度减少	25	5	17	57	93	72	101	71	73	69
导联编号	F_z	F_{p1}	F_7	T_3	T_{p8}	T_4	T_5	C_4	T_4	C_4
频段	AAA3	AAA3	AAA3	AAA3	AAA3	DDA3	AAA3	ADA3	AAA3	AAA3

5 结论

传统的评价方法,无论是主观评价法还是客观评价法都存在一定的局限性,不能在兼顾细化的时间尺度和用户自身感受的情况下给出准确评价结果。为了克服现有方法存在的不足,提出了一种面向性能的定制产品感性意象评价模型,并应用于高速电梯试制样机的性能评价过程中。

所提出的方法将传统基于用户判断的主观评价法和基于性能物理信号的客观评价法结合,并以反映用户感性意象的脑电信号作为舒适状态判断依据。另外,对于传统的评价方法背后的神经认知机理进行了探究,分析了在舒适度感知判断时对应的脑部电信号活跃状态。借鉴神经科学的研究方法,综合传统的产品主观、客观评价方法,解析用户的认知状态,为产品的感性意象评价方法研究提供了一个全新的视角。

本文对真实情况下的高速电梯乘运性能评价进行了脑电试验,初步提取出了脑电中的数字特征建立了预测模型,虽然取得了一定的成功,但是仍然在一些方面具有局限性。例如,目前提出的方法对高速电梯及相似产品的乘运性能验证提供了一种新的思路,但是并没有建立乘运性能和具体设计参数之间的动态联系;本文中的感性意象属于人的一种情感反映,这种情感和标准情感之间的关系并不明确,这些将是我们接下来研究的重点。

参 考 文 献

- [1] 闻邦椿, 李小彭. 科学发展观指导下的产品系统化设计的理论与方法[J]. 机械工程学报, 2013, 49(19): 77-86.
WEN Bangchun, LI Xiaopeng. Systematized design theory and method of products based on scientific development outlook[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(19): 77-86.
- [2] 檀润华, 苑彩云, 张瑞红, 等. 基于技术进化的产品设计过程研究[J]. 机械工程学报, 2002, 38(12): 60-65.
TAN Runhua, YUAN Caiyun, ZHANG Ruihong, et al. Study on product design process based on technology evolution[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(12): 60-65.
- [3] LINDGAARD G, DILLON R, TRBOVICH P, et al. User needs analysis and requirements engineering: theory and practice[J]. Interacting with Computers, 2006, 18(1): 47-70.
- [4] DONALD A N. Emotional design[M]. New York: Basic Books, 2004.
- [5] 罗仕鉴, 潘云鹤. 产品设计中的感性意象理论、技术与应用研究进展[J]. 机械工程学报, 2007, 43(3): 8-13.
LUO Shijian, PAN Yunhe. Review of theory, key technologies and its application of perceptual image in product design[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(3): 8-13.
- [6] 谢友柏. 现代设计理论中的若干基本概念[J]. 机械工程学, 2007, 43(11): 7-16.
XIE Youbai. Some basic concepts in modern design theory[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,

- 2007, 43(11): 7-16.
- [7] The International Organization for Standardization. ISO 18738-2012 Measurement of ride quality—Part 1 Lifts (elevators)[S]. Switzerland: ISO Publishing House, 2012.
- [8] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 3096-2008 声环境质量标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, National Standardization Administration Committee of China. GB/T 3096-2008 sound environmental quality standards [S]. Beijing: China Standards Press, 2008.
- [9] The International Organization for Standardization. ISO 8041-2005 Human response to vibration – Measuring instrumentation[S]. Switzerland: ISO Publishing House, 2005.
- [10] PEAK S K, LEE S K. Development of a new sound metric for impact sound in a passenger car using the wavelet transform[J]. International Journal of Automotive Technology, 2010, 11(6): 809-818.
- [11] KIM E Y, LEE Y J, LEE S K. Sound metric design for evaluation of tonal sound in laser printer[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2012, 13(8): 1349-1358.
- [12] LEE H H, KIM S J, LEE S K. Design of new sound metric and its application for quantification of an axle gear whine sound by utilizing artificial neural network[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2009, 23: 1182-1193.
- [13] LI D, HUANG Y. The discomfort model of the micro commercial vehicles interior noise based on the sound quality analysis[J]. Applied Acoustics, 2018, 132: 223-231.
- [14] 黄琦, 孙守迁. 基于意象认知模型的汽车草图设计技术研究[J]. 浙江大学学报, 2006, 40(4): 552-559.
- HUANG Qi, SUN Shouqian. Research on automobile sketch design based on image cognition model[J]. Journal of Zhejiang University, 2006, 40(4): 552-559.
- [15] VERHAGEN T, VAN D, MEENTS S. Toward a better toward a better use of the semantic differential in is research: an integrative framework of suggested action[J]. Journal of the Association for Information Systems, 2015, 16(2): 108-143.
- [16] 赵丹华, 景春晖. 基于设计师-用户意象认知模型的汽车造型可信性评价方法[J]. 包装工程, 2006, 40(4): 77-83.
- ZHAO Danhua, JING Chunhui. The credibility evaluation methods of vehicle modeling based on the designer-user image cognition model[J]. Packaging Engineering, 2006, 40(4): 77-83.
- [17] BOLINGER E, MATUZ T, HETTICH D T. Emotion detection in infant EEG[J]. Psychophysiology, 2013, 50: 49-49.
- [18] 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]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(15): 40-48.
- [19] NGUYEN T A, ZENG Y. Analysis of design activities using EEG signals[C] // ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, 2010: 227-236.
- [20] LOU S, FENG Y, TIAN G, et al. A cyber-physical system for product conceptual design based on an intelligent psycho-physiological approach[J]. IEEE Access, 2017, 5: 5378-5387.
- [21] MATHIAS B, SABINE B, TANJA K, et al. EEG alpha synchronization is related to top-down processing in convergent and divergent thinking[J]. Neuropsychology, 2011, 49(12): 3505-3511.
- [22] HE H, GARCIA E A. Learning from imbalanced data[J]. IEEE Transaction on Knowledge and Data Engineering, 2009, 21(9): 1263-1284.
- [23] SUN Y, WONG A K C, KAMEL M S. Classification of imbalance data: A review[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2009, 23(4): 687-719.
- [24] MURUGAPPAN M, NAGARAJAN R, YAACOB S. Combining spatial filtering and wavelet transform for classifying human emotions using EEG signals[J]. Medical and Biological Engineering, 2010, 31(1): 45-51.
- [25] LIN Y P, WANG C H, JUNG T P, et al. EEG-based emotion recognition in music listening[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2010, 57(7): 1798-1806.
- [26] HOSSEINI S A, KHALIZADEH M A, NAGHIBI S M B, et al. Higher order spectra analysis of EEG signals in emotional stress states[C] // Proceedings of the 2nd International Conference on Information Technology and Computer Science (ITCS'10), 2010: 60-63.
- [27] STELIOS K, HADJIDIMITRIOU L J. Toward an EEG-based recognition of music liking using time-frequency analysis[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2012, 59(12): 3498-3510.
- [28] GUO Y P. Slat noise modeling and prediction[J]. Journal of Sound and Vibration, 2012, 331(15): 3567-3586.
- [29] LA V D. Semi-active on-off damping control of a dynamic vibration absorber using coriolis force[J]. Journal of Sound and Vibration, 2012, 331(15): 3429-3436.
- [30] YANG D, KIM K, KWAK M K, et al. Dynamic modeling and experiments on the coupled vibrations of building and

- elevator ropes[J]. Journal of Sound and Vibration, 2017, 390: 164-191.
- [31] BOJAN Z K, BRANO B, DARKO P M. A synergistic method for vibration suppression of an elevator mechatronic system[J]. Journal of Sound and Vibration, 2017, 406: 29-50.
- [32] 包继虎, 张鹏, 朱昌明, 等. 基于张紧装置的高速电梯提升系统振动控制[J]. 振动与冲击, 2017, 36(14): 221-226.
- BAO Jihu, ZHANG Peng, ZHU Changming, et al. Vibration control of high-speed elevator hoisting systems based on tensioning devices[J]. Chinese Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(14): 221-226.
- [33] 郭丽峰, 张国雄, 李醒飞, 等. 电梯轿厢—导轨耦合动力系统建模及其动态特性[J]. 机械工程学报, 2007, 43(8): 186-191.
- GUO Lifeng, ZHANG Guoxiong, LI Xingfei, et al. Modeling of elevator cabin-rail coupled dynamic system and its properties[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(8): 186-191.
-
- 作者简介:** 冯毅雄, 男, 1975 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为现代设计理论与方法。
E-mail: fyxtv@zju.edu.cn
- 娄山河, 男, 1993 年出生, 博士研究生。主要研究方向为产品创新设计理论、设计认知。
E-mail: loushanhe@zju.edu.cn
- 王绪鹏, 男, 1992 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为产品创新设计理论。
E-mail: wangpengvs2008@163.com
- 郑浩, 男, 1988 年出生, 博士后。主要研究方向为产品设计理论、智能设计与信息融合技术。
E-mail: haozheng@zju.edu.cn
- 高一聪(通信作者), 男, 1982 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为产品设计方法学。
E-mail: gaoyicong@zju.edu.cn
- 王云, 男, 1978 年出生, 博士, 讲师, 主要研究方向为制造业信息化、先进制造技术。
E-mail: iwangbruce@126.com
- 谭建荣, 男, 1954 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师, 中国工程院院士。主要研究方向为 CAX 方法学、工程图学、企业信息化。
E-mail: egi@zju.edu.cn