

DOI:10.19344/j. cnki. issn1671-5276.2024.03.004

高技术产品造型意象机器评价方法研究—— 以航空发动机为例

周海海¹, 张哲睿¹, 陈黎¹, 张岚云¹, 李同日²

(1. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016; 2. 中国航发沈阳发动机研究所, 辽宁 沈阳 110066)

摘要:基于图像信息熵原理提出一种机器评价高技术产品造型意象的方法,可用于产品美学评价、辅助产品工程设计等领域。以航空发动机产品为例,通过用户眼动实验探究工业设计领域专家和发动机行业人员造型评价的隐性关注点,基于优化支持向量机的造型美学算法构建航空发动机图像特征数据与其造型意象评价之间的映射模型。实验结果显示:机器评价与专家评价的拟合度评价达到 75% 以上,商用航空发动机的预测准确率高于军用发动机。

关键词:造型意象;信息熵;航空发动机;美学评价

中图分类号:V23 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2024)03-0020-05

Research on Evaluation Method of High-tech Product Form Image by Machine: A Case Study of Aeroengin

ZHOU Haihai¹, ZHANG Zherui¹, CHEN Li¹, ZHANG Lanyun¹, LI Tongri²(1. College of Mechanical & Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing 210016, China; 2. AEOS Shenyang Aeroengine Research Institute, Shenyang 110066, China)

Abstract:Based on the principle of image information entropy, this paper proposes a method for high-tech product form image evaluation by machine, which can be used in the fields of product aesthetics evaluation and assisted product engineering design. Taking aeroengine products as an example, the implicit concerns of experts in the field of industrial design and engine industry personnel are explored through user eye movement experiments, and the mapping model between aeroengine image feature data and its form image evaluation is constructed based on the aesthetics algorithm of optimized support vector machine. The experiment results show that the fitting degree evaluation between machine evaluation and expert evaluation reaches more than 75%, and the prediction accuracy of commercial aeroengine is higher than that of military engine.

Keywords:form image; information entropy; aeroengine; aesthetics evaluation

0 引言

高技术产品设计以工程设计为主,工业设计难以介入产品设计开发过程,其设计效果几乎完全凭借工程师个人的设计美学素养。本文旨在运用计算机视觉和支持向量机等人工智能相关技术赋能传统感性工学研究,针对高技术产品的造型特征,提出一种产品造型意象的机器自主评价方法,以拓宽感性工学评价技术的应用场景。该方法在航空发动机产品设计上得以运用,可以辅助工程师的设计工作,提升航空发动机产品的造型美学水平。

目前,产品造型意象评价主要以感性工学评

价方法为主,机器智能评价技术仍然存在较大争议。胡晓燕、胡勇、HSIAO 等^[1-3]研究通过人工神经网络建立了产品造型特征与设计评价之间的映射;林丽、苏建宁、高新勤等^[4-6]运用自然语言识别技术,从网络评价中自动提取产品评价词汇,省去了人工搜集重复劳动。本文将探索运用计算机视觉技术提取产品造型特征的可能性,运用优化的支持向量机构建特征-评价之间的映射关系,以实现自主程度更高的机器造型意象评价。

1 基于眼动实验的专家评价隐性关注点

构建产品造型意象的计算机视觉算法之前,需

基金项目:南京航空航天大学前瞻布局科研专项资金资助项目(ILA22060)

第一作者简介:周海海(1979—),男,江苏南京人,副教授,研究方向为产品创新设计方法、交互设计中的认知工效,
zhouhaihai@nuaa.edu.cn。

通信作者:张哲睿(1999—),男,江苏苏州人,硕士研究生,研究方向为产品创新设计方法,3597379@qq.com。

要研究专家感性评价时认知过程中的隐性关注点。

1.1 专家评价认知过程

罗仕鉴等^[7-8]认为,人们在认识一款新产品时,会调用脑海中已有的对过去事物的认识和经验,从而对某款产品形成特定的“印象”和“感觉”。根据专家造型意象评价的认知过程对航空发动机造型意象机器评价模型进行设计(图1)。通过计算机视觉技术模拟专家对产品造型特征的识别,通过机器学习算法建立产品特征与产品造型意象之间的映射关系,模拟专家脑中运用隐性设计知识进行产品造型意象评价的过程。

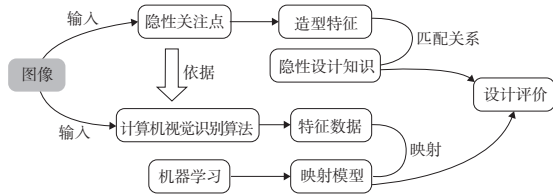


图1 航空发动机造型意象机器评价模型

1.2 基于眼动实验与访谈的隐性关注点挖掘

通过航空发动机造型的用户偏好眼动实验,

研究专家对航空发动机造型意象评价时的隐性关注点。实验设计以4个维度造型意象词和6款不同型号的发动机为自变量,招募20名5年以上从业经验的工业设计领域专家(11名)和航空发动机行业人员(9名)作为被试,分别进行了造型语义评价和眼动数据收集以及回顾访谈。简约度指标用户没有相关评价,因此只用视觉热区图呈现(图2,图3)。

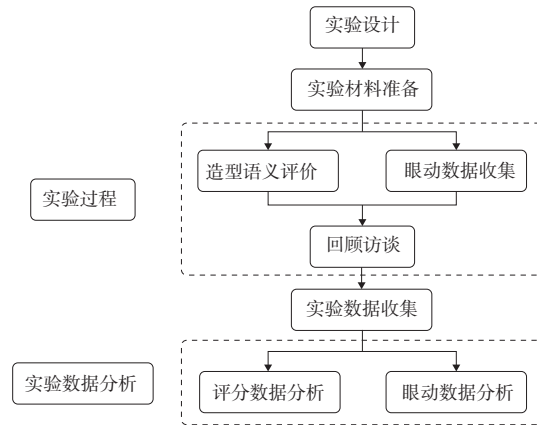


图2 用户偏好眼动实验研究流程图

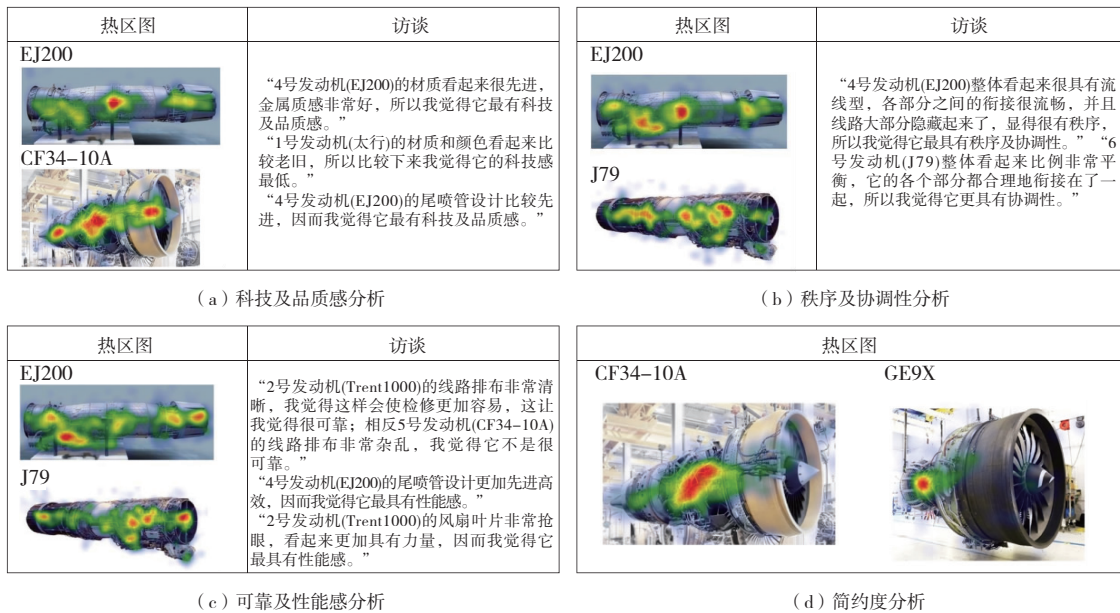


图3 航空发动机造型眼动实验与用户访谈

因篇幅限制,实验过程略。实验结果方面,工业设计专家在评价科技及品质感一词时,热区图的热区涵盖范围较广,可见用户偏向于全面观察发动机以得出整体感受。发动机行业人员除了关注风扇叶片、尾喷管等各个功能部件,还会着重考虑发动机整体的材质和色彩。

2 基于隐性关注点的图像信息熵造型美学评价原理

根据眼动实验数据和相关访谈分析,可以挖掘专家在设计评价时的隐性关注点^[9]。对于机器评价来说,要实现这一过程,首先需要获得产品造

型特征的数据,再根据特征数据映射到造型意象的评价。

本研究以图像信息熵为技术基础,以专家的隐性关注点为依据,根据航空发动机的造型意象识别规律,设计了如下计算机视觉识别算法,用以提取造型图像特征数据。部分算法原理如下。

1) 图像轮廓熵

原理:图像轮廓熵,即在计算图像熵值之前先对图像进行预处理,通过边缘识别算法过滤其颜色信息^[10-12],只保留轮廓信息。图像边缘识别算法主要包括 Sobel 算子、Roberts 算子、Kirsch 算子、Prewitt 算子等^[13]。本文采用 Sobel 算子作为图像边缘识别算法,算法效果如图 4 所示。

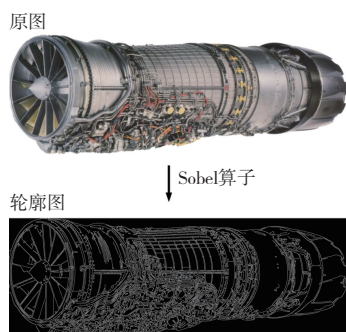


图 4 Sobel 边缘检测算法效果

对处理后的轮廓图计算图片信息熵,获得图

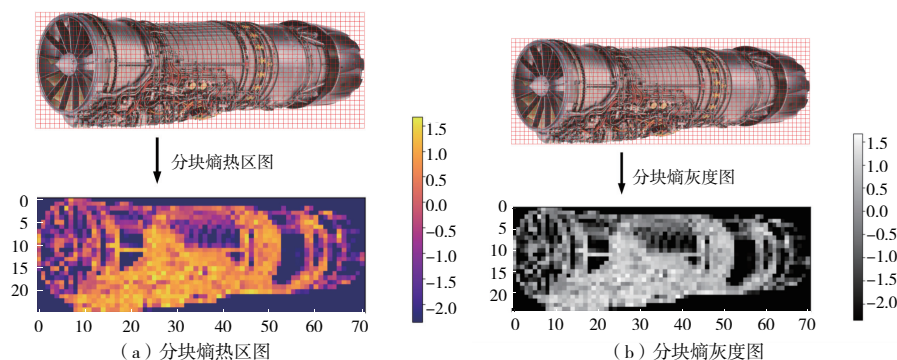


图 5 分块熵算法结果呈现

含义:同物理学中的力矩平衡一样,产品造型特征分部的平均、平衡会给人带来心理感受上的安逸、平静。从眼动实验数据也可以发现,复杂的造型区域往往会成为人观察的视觉质心。因此,通过计算产品复杂造型区域的质心与产品几何中心的距离可以衡量产品造型的视觉平衡度。

3) 图像平均分块熵和分块熵方差

原理:同上一参数一样,对图像做分块熵处

片轮廓熵值。

含义:轮廓熵能一定程度上反映航空发动机造型轮廓的复杂度。这一数据可能与“简约度”的隐性关注点相关。

2) 图像分块熵重心偏离度

原理:图像分块熵是指将图像分割为 $m \times n$ 个边长为 K 个像素的正方形小块,对每个小块做图像信息熵计算并将其绘制为热区图或灰度图等(图 5)。为了更清楚地区分造型复杂的区域,本研究认为等于或大于所有小块平均信息熵的区域为造型复杂多变区域,对这些区域进行熵值标准化,其余区域赋予标准化后的最小值,将标准化后的数值绘制为灰度图,以便后续计算。

在分块熵灰度图中,记第 i 行第 j 列(共 m 行, n 列)的像素明度值为 $l_{i,j}$,将像素明度视为质量,则有整个图像的质心与图像的几何中心距离为:

$$D_x = \frac{n}{2} - \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (i - 0.5) \cdot l_{i,j}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n l_{i,j}} \quad (1)$$

$$D_y = \frac{m}{2} - \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (j - 0.5) \cdot l_{i,j}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n l_{i,j}} \quad (2)$$

式中: D_x 为水平方向距离; D_y 为垂直方向距离。

理,分为 m 行 n 列,计算所有小块分块熵值的方差。记第 i 行第 j 列的分块熵值为 $e_{i,j}$,则分块熵数组为

$$E = \begin{bmatrix} e_{1,1} & e_{1,2} & \cdots & e_{1,n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ e_{m,1} & e_{m,2} & \cdots & e_{m,n} \end{bmatrix} \quad (3)$$

令 E' 为去除所有包含透明像素小块的熵值的集合,共 k 个元素,则

$$E' = \{d_1, d_2, \dots, d_k\} = \{e_{1,1}, e_{1,2}, \dots, e_{i,j}\} \quad (4)$$

记平均分块熵为 $\bar{d}$,则

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^k d_i}{k} \quad (5)$$

则图像分块熵 $v_{ar,d}$ 为

$$v_{ar,d} = \frac{\sum_{i=1}^k (d_i - \bar{d})^2}{k} \quad (6)$$

含义:同图像信息熵一样,计算分块熵的平均数可以辅助判断图像的复杂程度。计算图像分块熵的方差,可以从方差的数值上了解图像分块复杂程度的变化。图像分块熵方差越小,则图像每一块的复杂度相对变化较小,复杂度越统一;图像分块熵方差越大,则图像每一块的复杂度变化相对更大,复杂度越不统一。这一数据可能与“秩序及协调性”的隐性关注点相关。

3 基于优化支持向量机的造型美度计算

以 GWO-SVM 为机器学习模型,通过机器学习实验构建航空发动机图像特征数据与其造型意象评价之间的映射模型。其中航空发动机图像特征数据包括图像一维熵、图像二维熵、图像轮廓熵、图像对比度、图像整体度、图像分块熵重心偏离度、图像平均分块熵、图像分块熵方差、超平均分块熵占比以及图像的宽高像素值共 11 维数据,造型意象评价维度为简约度、可靠及性能感、秩序及协调性、科技及品质感。

3.1 实验前准备

首先配置计算机图像识别所需的 Python 环境。实验用 1 台 MacBook Air M1、安装 Python 包管理工具 Pip 3 和安装实验所需要的 OpenCV、matplotlib、numpy、math、PIL 等 Python 库,完成机器视觉图像识别环境配置。最后通过 Visual Studio Code 平台编写图像识别代码。

在采集航空发动机样本图像特征数据之前,先对样本图像进行筛选和预处理。保留样本图像中最短边像素高于 150 像素且拍摄角度接近于侧视图的图像,在 113 个样本中共筛选出 71 个符合条件的样本(其中军用航空发动机样本 45 个,商用航空发动机样本 26 个),对样本做去背景处理,保存为透明底的 PNG 格式图片。

对这 71 个样本输入图像识别算法,进行图像特征数据采集。对已采集的 20 个样本数据进行相

关性分析。通过 Pearson 相关系数分析发现图像二维熵和图像对比度之间的相关系数值为 0.944,并且呈现出 0.01 水平的显著性,说明二维熵和对比度之间有着显著的正相关关系。考虑到运行速度,剔除图像二维熵,只保留剩余的 10 项图像特征数据。最后,将采集的 10 项图像特征数据与 4 项造型意象评价数据整合为机器学习的数据集。

3.2 映射模型训练

以计算机视觉识别算法采集的 10 项图像特征数据作为模型的输入,4 项造型意象评价作为输出,分别训练军用和商用航空发动机的映射模型,即总共训练 $4 \times 2 = 8$ 个映射模型。通过灰狼优化算法,搜寻支持向量机的最优参数设置^[14-15],即最优的惩罚因子 C 和核函数超参数 g (图 6)。具体训练过程如下。

1) 参数初始化,SVM 选用高斯核,设定惩罚因子 $C \in [-100, 100]$,超参数 $g \in [2^{-5}, 2^{10}]$;设定灰狼优化算法的种群规模为 20,迭代次数 100。

2) 对于军用航空发动机样本,随机取 36 个作为模型的训练集,剩余 9 个作为测试集;对于商用航空发动机样本,随机取 22 个作为模型的训练集,剩余 4 个作为测试集。

3) 对训练集样本数据进行归一化。

4) 用支持向量机训练模型,采用五折交叉验证法验证其准确率并通过灰狼优化算法寻找最优的 C 、 g 参数。

5) 迭代结束,找到最优参数并输出模型、分类准确率以及各类相关参数。

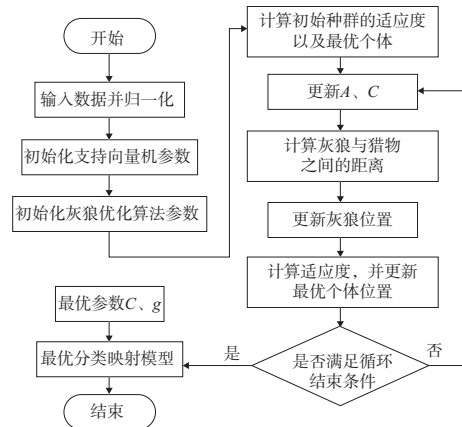


图 6 GWO-SVM 算法流程

4 实验结果与分析

实验结果显示,模型的分类准确率除了军用航空发动机的科技及品质感预测准确率为

66.67%(图7),其余的分类预测准确率均达到了75%以上,部分达到了100%。商用航空发动机的预测准确率明显高于军用发动机。

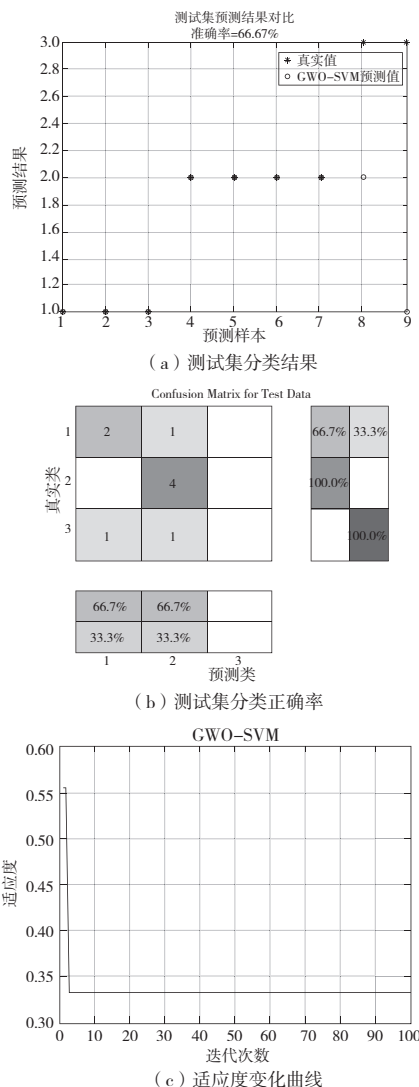


图7 军用航空发动机 GWO-SVM 科技及品质感预测结果

实验结果分析:从样本数量来说,商用发动机样本少于军用发动机,因此在分类时更容易找到最优的分割超平面;此外,从样本的分布情况来看,商用发动机在“低”、“中”、“高”三类中分布得更加平均,不容易出现对某一类或者某几类的过拟合。考虑到样本本身问题对训练结果的影响以及专家在进行产品造型意象时也存在个体差异,本研究认为基于 GWO-SVM 训练的映射模型基本达到工业设计专家的评价水平。

5 结语

本文通过眼动实验与访谈,研究专家评价的认知过程,挖掘评价过程中的隐性关注点。根据

关注点设计了9类基于图像信息熵的计算机视觉识别算法以帮助提取产品图像特征数据。最后通过训练 GWO-SVM,建立了产品图像特征数据与产品造型意象评分之间的关系,实现了机器自主程度更高的产品造型意象评价,使得评价技术能够更方便地被调用,拓展了评价技术的应用场景,以便辅助工程师的设计工作,提升高技术产品造型设计质量。

参考文献:

- [1] 胡晓燕. 基于神经网络的产品造型美学特征识别与修正[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2004,26(3):21-24.
- [2] 胡勇. 基于感性工学的笔记本电脑形态设计研究[D]. 北京:北京服装学院,2015.
- [3] HSIAO S W, TSAI H C. Applying a hybrid approach based on fuzzy neural network and genetic algorithm to product form design [J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2005,35(5):411-428.
- [4] 林丽,张云鹏,牛亚峰,等. 基于网络评价数据的产品感性意象无偏差设计方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2020,50(1):26-32.
- [5] 苏建宁,李菁楠,邱凯,等. 自然语义驱动的产品意象外观创新设计[J]. 机械设计, 2022,39(10):119-125.
- [6] 高新勤,金雨昊,王雪萍,等. 基于在线评论挖掘的产品感性评价方法研究[J]. 现代制造工程, 2021(12):13-20.
- [7] 罗仕鉴,潘云鹤,朱上上. 产品设计中基于图解思维的隐性知识表达[J]. 机械工程学报, 2007,43(6):93-98.
- [8] 罗仕鉴,朱上上,应放天,等. 产品设计中的用户隐性知识研究现状与进展[J]. 计算机集成制造系统, 2010,16(4):673-688.
- [9] 卢国英,侯冠华. 产品造型设计决策过程中的眼动机机制研究[J]. 包装工程, 2018,39(14):215-220.
- [10] 钱文华,徐丹,徐瑾,等. 基于信息熵的风格绘画分类研究[J]. 图学学报, 2019,40(6):991-999.
- [11] 孙君顶,丁振国,周利华. 基于图像信息熵与空间分布熵的彩色图像检索方法[J]. 红外与毫米波学报, 2005,24(2):135-139.
- [12] 孙君顶,毋小省,周利华. 基于信息熵的图像检索[J]. 西安电子科技大学学报, 2004,31(2):223-228.
- [13] 张红霞,王灿,刘鑫,等. 图像边缘检测算法研究新进展[J]. 计算机工程与应用, 2018,54(14):11-18.
- [14] 陈小娥,陈昭炯. 多类 SVM 在图像艺术属性分类中的应用研究[J]. 智能系统学报, 2009,4(2):157-162.
- [15] MIRJALILI S, MIRJALILI S M, LEWIS A. Grey wolf optimizer[J]. Advances in Engineering Software, 2014, 69:46-61.

收稿日期:2023-12-04