

# 多目标驱动的拖拉机产品族外形基因设计

柳 禄<sup>1,2</sup>, 章永年<sup>1</sup>, 丁为民<sup>1</sup>, 康 敏<sup>1,2\*</sup>

(1. 南京农业大学工学院, 南京 210031; 2. 南京农业大学(灌云)现代农业装备研究院, 灌云 222200)

**摘要:** 为塑造标志性的品牌造型元素及独特的品牌形象, 提高农机用户对拖拉机外形设计的满意度, 提出一种多目标驱动的拖拉机产品族外形基因进化设计方法。在拖拉机产品族外形基因的提取、变异系数分析的基础上, 构建了多目标驱动的拖拉机产品族外形基因进化设计模型, 研究了基于形态学矩阵的产品族外形基因进化解空间, 并采用快速非支配遗传算法对多目标决策模型进行求解。以某企业产轮式拖拉机为例, 分析了品牌识别、用户意象、社会情境 3 目标驱动的产品族外形基因进化设计过程, 并建立了拖拉机产品族侧面外形基因计算机辅助设计系统, 将获得的子代方案与所选取的样本 p15 的外形方案进行对比评价。结果表明: 子代方案能较好地延续该品牌原有产品造型特征与风格; 同时, 相较于样本 p15, 子代方案对品牌识别、用户意象、社会情境的符合程度分别提高了 30%、54%、80%, 验证了方法的可行性与有效性。

**关键词:** 拖拉机; 设计; 模型; 产品族; 外形基因; NSGA-II 遗传算法; 感性工学

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.17.011

中图分类号: TB472; S220.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2017)-17-0082-09

柳 禄, 章永年, 丁为民, 康 敏. 多目标驱动的拖拉机产品族外形基因设计[J]. 农业工程学报, 2017, 33(17): 82-90.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.17.011 <http://www.tcsae.org>

Liu Lu, Zhang Yongnian, Ding Weimin, Kang Min. Design of multi-objective driven product family shape gene for tractor[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(17): 82-90. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.17.011 <http://www.tcsae.org>

## 0 引 言

中国的农业机械企业虽然数量众多, 但产品设计美学风格不明显, 品牌影响力较小, 产品附加值低, 而拖拉机作为农业生产中最重要的动力机械, 在农业机械化中占有举足轻重的地位。因此, 利用现代工业设计方法对拖拉机进行美学设计以提升产品市场竞争力与附加价值, 受到越来越多学者和企业的重视<sup>[1]</sup>。然而在拖拉机美学设计过程中, 面临产品美学风格与用户审美需求存在差异, 产品美学设计与企业品牌建设脱节, 缺乏标志性的品牌外形元素及独特的品牌外形基因等诸多问题。如何科学地将企业品牌文化与用户审美需求融入拖拉机产品外形设计中, 继而形成品牌独有的产品族外形基因是本领域面临的关键问题。

产品的开发过程是一个反复迭代、不断优化与淘汰的过程。产品族外形基因, 就是将生物界中基因遗传与变异的概念引入产品外形设计中, 探讨面向工业设计的

产品族外形基因遗传和变异特质<sup>[2-3]</sup>。产品族外形基因研究的关键技术主要有外形基因的提取与表达、造型意象与产品族外形基因之间的映射、外形基因的进化生成。目前, 已有学者围绕以上内容进行了相关研究, 但主要集中在家用汽车<sup>[4-5]</sup>、手机<sup>[6-7]</sup>、电话机<sup>[8]</sup>等普通消费品, 研究外形基因的提取与表达。如周小舟等<sup>[9]</sup>综合应用多种感性工学方法提取产品族设计 DNA 可遗传因子; 胡伟峰等<sup>[10]</sup>运用口语分析、访谈和草图分析提取奥迪汽车品牌造型基因; 卢兆麟等<sup>[11]</sup>运用设计形态分析法和语意差异法分别提取产品的显性风格特征与隐性风格特征。另外, 在外形基因的进化生成方面, 现有研究主要面向单一驱动目标、多采用标准遗传算法<sup>[12-14]</sup>实现产品造型的进化设计。如柳禄等<sup>[15]</sup>分析了品牌约束下设计意象词汇与产品基因的提取过程, 提出面向品牌识别的产品造型基因设计模型; 罗仕鉴等<sup>[16]</sup>研究了消费者偏好与产品族外形基因之间的映射模型, 并运用遗传算法实现偏好驱动 SUV 产品族侧面轮廓线基因进化; 苏建宁等<sup>[17]</sup>消费者多意象需求的产品造型进化设计; 罗仕鉴等<sup>[18]</sup>探讨了产品族外形基因与品牌风格基因的映射、评价与优化。然而, 在实际设计项目中, 企业往往期望将品牌识别、用户风格意象、社会情境等因素同时融入产品外形基因设计中, 获得能体现品牌精神与内涵、符合消费者风格意象、体现当下社会的审美情趣的外形方案。综上, 由于中国拖拉机企业的品牌规模、发展历程、消费对象有着自身的特殊属性, 现有设计方法在解决拖拉机产品族外形基因设计时, 存在一定的局限性。

收稿日期: 2017-06-30 修订日期: 2017-07-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(51405239); 江苏省高校哲学社会科学基金项目(2015SJD085); 江苏省苏北科技发展计划项目(BN2014019); 南京农业大学中央高校基本科研业务费人文社会科学研究基金资助(SKTS2016036)。

作者简介: 柳 禄, 讲师, 主要从事农业机械美学设计与人机交互设计研究。南京 南京农业大学工学院, 210031。Email: paul\_nuaa@njau.edu.cn

\*通信作者: 康 敏, 博士生导师, 教授, 主要从事农业机械装备及特种加工技术研究。南京 南京农业大学工学院, 210031。

Email: kangmin@njau.edu.cn



式中 CV 为变异系数,  $\bar{x}$  为各外形特征在所有样本中得分的均值,  $\sigma$  为各外形特征在所有样本中得分均值的标准差。

## 2.2 基于形态学矩阵的产品族外形基因进化设计解空间

形态学分析 (morphological analysis, MA) 由物理学家 Fritz Zwicky 博士提出, 已广泛运用于设计工程<sup>[22]</sup>、制造工程<sup>[23]</sup>等领域。其主要特点是将研究对象分解为若干基本要素, 对每个基本要素分别提供可选方案并进行精确评价; 通过建立包含所有基本要素的多维矩阵, 评价目标问题所有可能的解决方案。根据提取的外形特征种类, 利用产品库建立外形元素库, 构成产品外形自动求解的基本单元。同时, 为避免同类产品外形元素引起的思维定势, 外形元素库中应包含一定数量的从其他产品借鉴并进行形态转换而来的外形元素。

在获得外形基因及其变异系数分析的基础上, 对遗传过程中“性状”表现不稳定的外形特征, 从外形元素库中选择所有可能进化的外形元素。通过采用 MA 法对可能变异的各外形特征所有外形元素进行合理组合。假设外形元素间的组合均有效, 形成多个实现产品外形基因进化设计的方案解空间, 共有  $\prod_{i=1}^m f_{ij}$  个解, 其中  $f_{ij}$  表示外形特征  $P_{U_i}$  的可选外形元素  $P_F$  的数量。

## 2.3 驱动目标与外形元素的映射

产品族外形基因进化设计的目标包括品牌识别、用户风格意象、子代产品创新度、工艺成本等。对感性需求一般通过语义转化, 利用感性词汇进行描述, 并以语义差异法 (semantic differential, SD)、Likert 心理量表为基础、结合因子分析<sup>[6]</sup>、联合分析<sup>[8]</sup>、数量化一类<sup>[24]</sup>、模糊神经网络<sup>[25]</sup>等多种数学方法和计算机技术分别建立起感性词汇与产品族外形元素之间的映射关系。对工艺成本与产品创新度, 可通过成本调查法、企业产品案例库或企业设计知识库, 产品相似度等方法获取并建立与外形元素之间的映射关系。

## 2.4 多目标决策模型

以品牌识别、用户意象与社会情境 3 目标驱动的产品族外形基因的进化设计为例, 研究多目标驱动的拖拉机产品族外形基因设计。为方便建模, 对决策变量做如下定义:

定义 1:  $w_{kij}$  ( $k=1, 2, 3, \dots, l, i=1, 2, 3, \dots, m, j=1, 2, \dots, n$ ) 是 1 个 0~1 变量, 若选取的第  $k$  个外形方案中第  $i$  个外形特征的第  $j$  个外形元素被选中, 则  $w_{kij}=1$ , 否则  $w_{kij}=0$ 。

定义 2:  $x_{kij}$  ( $k=1, 2, 3, \dots, l, i=1, 2, 3, \dots, m, j=1, 2, \dots, n$ ) 是所选取的第  $k$  个外形方案中第  $i$  个外形特征的第  $j$  个外形元素在体现品牌识别度的分值。

定义 3:  $y_{kij}$  ( $k=1, 2, 3, \dots, l, i=1, 2, 3, \dots, m, j=1, 2, \dots, n$ ) 是所选取的第  $k$  个外形方案中第  $i$  个外形特征的第  $j$  个外形元素在满足用户风格意象程度的分值。

定义 4:  $z_{kij}$  ( $k=1, 2, 3, \dots, l, i=1, 2, 3, \dots, m, j=1, 2, \dots, n$ ) 是选取的第  $k$  个外形方案中第  $i$  个外形特征的第  $j$  个外形元素在符合社会情境程度的分值。

### 2.4.1 品牌识别度

品牌识别包括品牌精髓、品牌核心识别和品牌延伸识别, 具体又包括企业精神、企业理念、企业文化、品牌历史、品牌视觉识别系统 (visual identity system, VIS)、品牌个性产品特性、质量品质、使用体验等 9 项内容<sup>[7]</sup>。利用外形元素库与品牌识别度的映射关系, 对构筑的方案解空间中任意外形方案  $k$  的品牌识别度, 可由构成该方案的各外形元素在品牌识别度的均值体现。将品牌识别度的目标函数定义为

$$F(B_k) = [\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n w_{kij} \cdot x_{kij}] / m \quad (4)$$

式中  $F(B_k)$  表示外形方案  $k$  的品牌识别度。

### 2.4.2 用户意象满足度

用户意象指消费者对拖拉机产品造型的需求与审美偏好, 主要通过用户调研预测用户审美需求, 提取用户和市场的需求特征, 并建立外形元素与用户风格意象的映射关系。对构筑的方案解空间中任意外形方案  $k$  的用户意象满意度, 可由构成该方案的各外形元素在用户意象的平均满足程度体现。将用户意象满足度的目标函数定义为

$$F(U_k) = [\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n w_{kij} \cdot y_{kij}] / m \quad (5)$$

式中  $F(U_k)$  表示外形方案  $k$  的用户风格意象满足度。

### 2.4.3 社会情境符合度

社会情境指与社会流行文化、行业流行风格与发展趋势等密切相关的造型语言, 体现当下社会的审美情趣, 具有明显的时代气息, 主要通过对知名企业最新产品与概念产品的风格特征调研, 结合设计师敏锐的市场嗅觉捕获, 并建立外形元素与社会情境的映射关系。对构筑的方案解空间中任意外形方案  $k$  的社会情境符合程度, 可由构成该方案的各外形元素在社会情境的平均符合程度体现。将社会情境符合度的目标函数定义为

$$F(C_k) = [\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n w_{kij} \cdot z_{kij}] / m \quad (6)$$

式中  $F(C_k)$  外形方案  $k$  的社会情境符合度。

### 2.4.4 多目标决策模型

将以上 3 方面结合, 驱动拖拉机产品族外形基因的进化生成, 既能形成体现品牌精神与文化内涵的产品族外形基因, 又能满足农机用户的审美需求, 同时随着用户审美意象与社会情境的改变, 产品族外形基因得以进化。通过以品牌识别度目标函数最大化、用户意象满足度目标函数最大化、社会情境符合度最大化为优化目标, 建立多目标优化驱动模型及约束:

$$F(x) = [\max F(B_k), \max F(U_k), \max F(C_k)] \quad (7)$$

相应约束条件:

$$F(B_k) \geq A_1 \quad (8)$$

$$F(U_k) \geq A_2 \quad (9)$$

$$F(C_k) \geq A_3 \quad (10)$$

式中  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$  分别表示外形方案  $k$  所要求的品牌识别

度的最低限度、用户风格意象满足度的最低限度、社会情境符合度的最低限度。

### 2.5 基于 NSGA- II 的产品族外形基因决策模型求解

上述多目标决策模型求解属于典型的带约束多目标优化 (multi-objective optimization, MO) 问题。由于产品外形设计本质上是一个复杂的基于知识与经验的创造性活动, 因此, 在求解结果时更希望得到有助于设计师后续设计的多个最优解, 而非将多目标问题分解为单目标求单个最优解。NSGA-II 是由 Deb 等<sup>[26]</sup>在非支配遗传算法 (non-dominated sorting genetic algorithm, NSGA) 的基础上改进而来, 因其在问题空间搜索能力、解的分布与覆盖度方面优于其他多目标求解算法, 如小生境遗传算法、多目标遗传算法、强度帕累托进化算法, 而被用于产品开发<sup>[27]</sup>, 工程优化设计<sup>[28-29]</sup>等领域。在建立上述多目标决策模型的基础上, 本文基于 NSGA-II 对多目标驱动的产品族外形基因进化模型进行求解, 具体流程如图 2 所示。

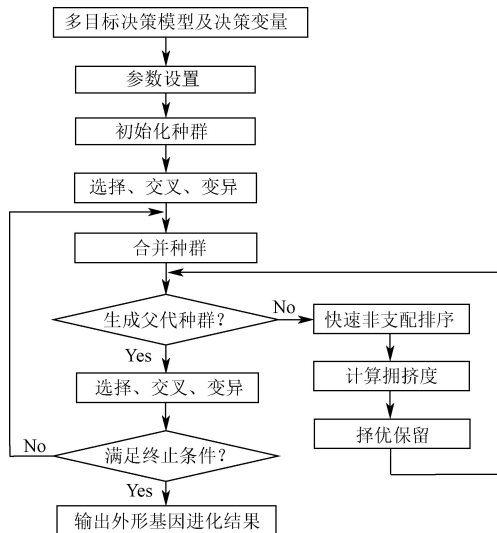


图 2 基于 NSGA- II 产品族外形基因进化模型求解流程

Fig.2 Solving flow of product family shape gene evolution model based on NSGA- II

## 3 应用实例

以某企业产轮式拖拉机为例, 说明上述品牌识别、用户意象、社会情境 3 个目标驱动的产品族外形基因生成模型与方法应用。

### 3.1 感性词汇的提取

建立信息库与产品库。信息库包括品牌识别的具体内容、感性词汇库。品牌识别内容可从企业直接获取, 感性词汇库以体现农业机械美学风格为原则, 通过网络、书籍、报刊等途径获取。产品库分为用户意象与社会情境两类, 包括自有产品、同类产品、其他产品。用户意象样本库要求广泛选取不同种类与风格的农业机械产品; 社会情境样本库包括汽车、服装、电子等行业知名品牌的最新产品与概念产品。从样本库中各优选出 1 组具有代表性的产品作为试验样本。

对于用户意象与社会情境的产品样本, 首先通过访

谈话获取被试对产品样本外形的原始感性语言描述, 即利用生活化的简短语句描述其当时的想法与感觉。然后利用语义转化法结合感性词汇库, 将以上描述性语言、品牌识别的内容转化为感性词汇, 获取初步感性词汇。将获得初步感性词汇利用 SD 法, 分别针对品牌识别内容、用户意象产品样本、社会情境产品样本制定 1~9 分 Likert 调研问卷。用户意象与社会情境需加入一对反映偏好的形容词, 即“不喜欢~喜欢”。

将获取的数据利用 SPSS19.0 处理。首先将初步感性词汇对用户意象与社会情境做相关性分析, 剔除与偏好相关性较小的词汇; 然后利用因子分析进行降维; 最后将各感性词汇的因素负荷量进行系统聚类, 初步确定分类数量, 再进行 K-均值聚类, 选取距离其所属群中心点距离最短的词汇作为该群所代表性意象词汇, 提取的感性词汇如表 1 所示。

表 1 感性词汇  
Table 1 Kansei word

驱动目标 Driven targets	感性词汇 Kansei adjectives			
	形容词 1 Adjective 1	形容词 2 Adjective 2	形容词 3 Adjective 3	形容词 4 Adjective 4
品牌识别 Brand identity	稳重感	大气感	流畅感	科技感
用户意象 User image	时尚感	流畅感	粗犷感	整体感
社会情境 Social situation	科技感	专精感	现代感	流畅感

经与企业商讨, 选取稳重感、大气感作为品牌识别的感性词汇。用户意象则呈现出两种不同的风格意象需求, 一种偏向时尚感与流畅感; 另一种偏向整体感与粗犷感; 可根据产品的实际目标人群进行选择, 本次选择时尚感与流畅感。社会情境中有现代感和流畅感, 与用户意象的时尚感、流畅感相似, 也印证了消费者的审美需求会受到社会流行风格的影响, 为更好地满足社会情境, 本次选择科技感与专精感。

### 3.2 产品族外形基因的提取与变异系数分析

以该企业的轮式拖拉机作为研究对象, 从产品库中选取该企业轮式拖拉机的图片, 去除类型接近的。根据产品上市时间及专家建议, 该企业轮式拖拉机可分为 3 代。在 3 代轮式拖拉机中各选取 5 款具有代表性的车型 (不同用途、型号、功率) 作为调查样本并进行 p1~p15 编号, p1~p5 为第一代, p6~p10 为第二代, p11~p15 为第三代。其中, 无驾驶室样本 10 个, 有驾驶室样本 5 个 (第二代 2 个, 第三代 3 个, 第一代样本由于产品所处的历史阶段较早, 均无驾驶室)。每个产品样本图片要求具备正视图、侧视图、轴测图 3 个视角。

产品造型一般有很多外形特征构成, 让所有外形特征都成为吸引消费者视线的外形元素几无可能。而某些外形特征因具备高度识别性, 因而能够成为消费者的视觉重点。根据专家建议, 列举出可体现轮式拖拉机产品整体外形特征与局部外形特征的典型外形特征 10 项, 构成轮式拖拉机产品族外形基因, 如图 3 所示, 并按照产

品族外形基因的表达方式区分整体外形基因、通用外形基因, 个性外形基因。利用专家访谈法对该品牌轮式拖拉机典型造型特征进行分析, 对其主要的形态特征进行描述, 并绘制示意图。制作 DFA 调查表, 以非常符合、较为符合、不符合分别对应分值 2 分、1 分、0 分, 将产品样本 p1~p15 与典型造型的形态特征进行逐一对照。共得到有效调查表 37 份, 无效调查表 0 份。数据用 SPSS 软件处理, 统计结果如表 2 所示。从表 2 可以看出, 10 项典型造型特征在各样本中得分均值的总分普遍较高 (以 15 分为基准分, 驾驶室侧面轮廓基准分为 5 分), 验证了这些典型造型特征具备突出的代表性, 能够作为该企业轮式拖拉机的产品族外形基因的构成要素。

利用式 (3) 进行变异系数分析, 如表 2 所示, 变异系数较小分别是特征 1、特征 2、特征 3、特征 5、特征 8 (变异系数小于 20%), 表明该项特征在所有样本中分布较为均匀, 在代际变换中被稳定的遗传下来, 因此在产

品族外形基因进化生成时主要进行遗传。特征 4、特征 6、特征 7、特征 9、特征 10 的变异系数较大 (变异系数大于 20%), 其“性状”表现不稳定, 在产品族外形基因进化生成时主要进行变异。

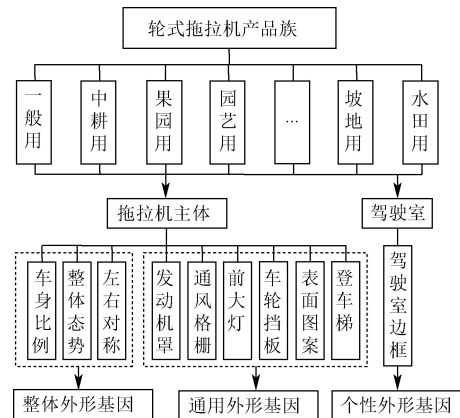


图3 轮式拖拉机产品族外形基因的构成  
Fig.3 Constitution of product family shape gene of wheeled tractor

表 2 典型外形特征设计形态分析法统计结果  
Table 2 Statistical results of shape features based on design format analysis

类别 Category	外形特征 Shape features	样本 Samples															总分 Total	变异系数 Variable coefficient/%	
		p1	p2	p3	p4	p5	p6	p7	p8	p9	p10	p11	p12	p13	p14	p15			
整体外形基因 Whole shape gene	1.车头与车身的长度比例大于 1	1.14	1.02	1.08	1.08	1.05	1.32	1.22	1.30	1.32	1.38	1.35	1.32	1.00	0.97	1.08	<b>17.63</b>	<b>12.3</b>	
	2.顶型线与地平线构成稳重态势	1.08	1.12	1.10	0.99	1.08	1.27	1.32	1.22	1.30	1.46	1.57	1.57	1.57	1.68	1.76	<b>20.09</b>	<b>18.5</b>	
	3.整体造型左右对称	1.43	1.38	1.38	1.57	1.54	1.32	1.27	1.27	1.38	1.51	1.54	1.65	1.49	1.27	1.38	<b>21.38</b>	<b>8.4</b>	
通用外形基因 General shape gene	4.发动机罩前端采用大圆弧过渡	0.27	0.24	0.27	0.24	0.38	1.30	1.19	0.97	1.00	1.11	1.59	1.81	1.68	1.70	1.68	<b>15.43</b>	<b>59.0</b>	
	5.横条式通风格栅	1.62	1.46	1.42	1.46	1.57	1.16	1.02	1.38	1.35	1.30	1.38	1.22	1.35	1.40	1.43	<b>20.52</b>	<b>11.1</b>	
	6.椭圆形前大灯	0.42	0.47	0.45	0.46	0.48	0.82	0.83	0.86	0.88	0.83	1.78	1.81	1.83	1.89	1.90	<b>15.71</b>	<b>57.8</b>	
	7.车轮挡板侧视图轮廓为弧线	0.51	0.38	0.35	0.35	0.43	0.84	1.24	0.95	0.86	0.76	1.68	1.32	1.68	1.92	1.73	<b>15.00</b>	<b>55.8</b>	
	8.表面图案由品牌名加型号构成且位于机罩两侧	0.95	1.54	1.59	1.49	1.40	1.08	0.92	1.32	1.49	1.49	1.49	1.51	1.49	1.32	1.62	<b>20.70</b>	<b>16.2</b>	
	9.登车梯: 矩形框架+矩形踏板	0.70	0.70	0.68	0.73	0.83	0.97	0.86	1.03	1.14	0.95	1.27	1.35	1.73	1.76	1.76	<b>16.46</b>	<b>35.9</b>	
个性外形基因 Individual shape gene	10.驾驶室侧面轮廓为: 弧线形 A 柱+后倾车顶线+前倾直线 C 柱	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.97	1.01	-	-	1.26	1.49	1.63	<b>6.36</b>	<b>22.8</b>
均值 Average		0.90	0.92	0.92	0.93	0.97	1.12	1.10	1.14	1.17	1.18	1.52	1.51	1.51	1.54	1.60			

注: p1~p15 分别为样本 1~样本 15 的编号; “-” 为此特征。

Note: p1-p15 are serial numbers of sample 1-15, respectively. “-” is without this feature.

### 3.3 建立形态学矩阵与映射关系

相关研究表明, 侧面外形是影响汽车类产品整体外形意象的主要视觉特征<sup>[30]</sup>, 因此, 本例中以拖拉机侧面外形特征作为研究对象。首先通过工业设计专家依据提取的感性词汇, 将变异系数较大的 5 项外形特征, 从外形元素库中分别选取 10 个外形元素并编号, 建立形态学矩阵, 通过排列组合可产生  $10^5$  种外形方案, 选取的外形元素如表 3 所示。然后制作 Likert 5 级心理量表, 选取 46 名被试者, 针对提取的感性词汇对每个外形元素进行感性评价, 依据获取的数据建立外形元素与驱动目标的映射关系, 并对数据归一化处理。选取的外形元素与驱动目标的映射关系如表 4 所示。

### 3.4 产品族外形基因进化设计求解

本例采用 MATLAB R2014b 对以上 3 个目标驱动的

拖拉机产品族外形基因进化设计进行求解。采用实数编码的方式, 以设定的品牌识别度、用户意象满足度、社会情境符合度的目标函数作为适应度函数。设定最大进化代数  $G_{max}=200$ , 内部种群规模  $N=100$ , 交叉概率为  $P_c=0.9$ , 变异概率  $P_m=0.1$ , 设定约束条件  $A_1 \geq 0.6$ ,  $A_2 \geq 0.6$ ,  $A_3 \geq 0.6$ , 并将最大进化代数作为本程序的终止条件。经程序运行求得 Pareto 最优解如图 4 所示, 共计 5 个。表 5 为 5 个 Pareto 最优解对应的产品族外形元素构成。

### 3.5 拖拉机产品族计算机辅助侧面外形设计系统

在多目标驱动的拖拉机产品族外形基因进化设计方法的基础上, 构建了面向拖拉机产品族的计算机辅助侧面外形设计系统。该系统基于 C++ 环境构建, 通过 Qt 开发框架实现用户交互操作以及矢量图形调用与绘制, 可快速实现拖拉机侧面造型的整车方案生成与表达。

表 3 选取的外形元素  
Table 3 Selected shape elements

外形特征 Shape features $P_U$	外形元素 Shape elements $P_F$									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. 发动机罩										
2. 驾驶室轮廓										
3. 前大灯										
4. 车轮挡板										
5. 登车梯										

表 4 外形元素与驱动目标的映射

Table 4 Mapping of shape elements to driven objectives

外形特征 Shape features $P_U$	外形元素 Shape elements $P_F$	驱动目标 Driven objectives		
		品牌识别 Brand identity $x_{ij}$	用户意象 User image $y_{ij}$	社会情境 Social situation $z_{ij}$
发动机罩 Engine cover	$P_{F11}$	0.595	0.560	0.517
	$P_{F12}$	0.543	0.569	0.491
	$P_{F13}$	0.664	0.457	0.500
	$P_{F14}$	0.621	0.681	0.534
	$P_{F15}$	0.638	0.543	0.500
	$P_{F16}$	0.603	0.517	0.621
	$P_{F17}$	0.560	0.569	0.595
	$P_{F18}$	0.638	0.621	0.534
	$P_{F19}$	0.569	0.716	0.552
	$P_{F110}$	0.647	0.638	0.534
驾驶室轮廓 Cab profile	$P_{F21}$	0.534	0.741	0.552
	$P_{F22}$	0.784	0.483	0.638
	$P_{F23}$	0.802	0.362	0.483
	$P_{F24}$	0.612	0.629	0.578
	$P_{F25}$	0.621	0.621	0.612
	$P_{F26}$	0.716	0.629	0.603
	$P_{F27}$	0.543	0.595	0.560
	$P_{F28}$	0.707	0.379	0.560
	$P_{F29}$	0.517	0.724	0.690
	$P_{F210}$	0.629	0.638	0.638
前大灯 Headlight	$P_{F31}$	0.491	0.871	0.603
	$P_{F32}$	0.810	0.500	0.543
	$P_{F33}$	0.457	0.534	0.569
	$P_{F34}$	0.638	0.733	0.534
	$P_{F35}$	0.716	0.440	0.526
	$P_{F36}$	0.466	0.810	0.483
	$P_{F37}$	0.724	0.716	0.621
	$P_{F38}$	0.336	0.629	0.612
	$P_{F39}$	0.448	0.647	0.629
	$P_{F310}$	0.405	0.414	0.578
车轮挡板 Wheel baffle	$P_{F41}$	0.586	0.724	0.560
	$P_{F42}$	0.560	0.526	0.603
	$P_{F43}$	0.603	0.534	0.578
	$P_{F44}$	0.552	0.552	0.595
	$P_{F45}$	0.526	0.534	0.466
	$P_{F46}$	0.560	0.466	0.526
	$P_{F47}$	0.526	0.560	0.569
	$P_{F48}$	0.578	0.681	0.603
	$P_{F49}$	0.517	0.517	0.560
	$P_{F410}$	0.526	0.595	0.543

续表

外形特征 Shape features $P_U$	外形元素 Shape elements $P_F$	驱动目标 Driven objectives		
		品牌识别 Brand identity $x_{ij}$	用户意象 User image $y_{ij}$	社会情境 Social situation $z_{ij}$
登车梯 Boarding ladder	$P_{F51}$	0.793	0.388	0.466
	$P_{F52}$	0.655	0.664	0.543
	$P_{F53}$	0.707	0.491	0.534
	$P_{F54}$	0.448	0.560	0.586
	$P_{F55}$	0.655	0.595	0.595
	$P_{F56}$	0.681	0.595	0.578
	$P_{F57}$	0.629	0.483	0.552
	$P_{F58}$	0.603	0.569	0.569
	$P_{F59}$	0.569	0.603	0.638
	$P_{F510}$	0.500	0.603	0.638

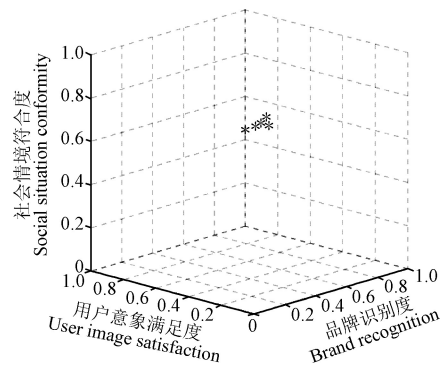


图 4 Pareto 最优解

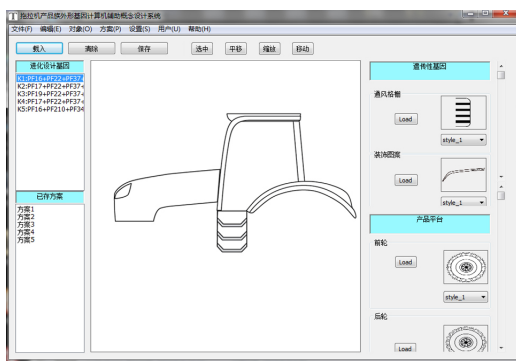
Fig.4 Pareto optimal solutions

表 5 Pareto 最优解对应的产品族外形元素

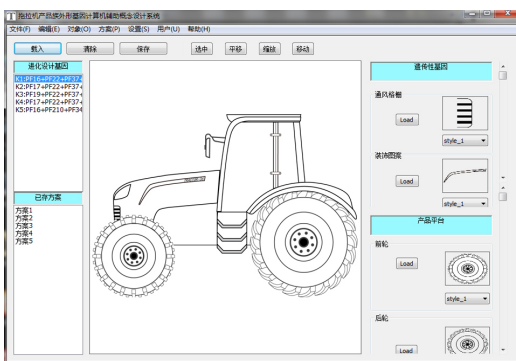
Table 5 Product family shape elements corresponds to Pareto optimal solutions

编号 No.	方案 Scheme $K$	外形元素构成 Shape elements
1	方案 $K_1$	$P_{F16} + P_{F22} + P_{F37} + P_{F41} + P_{F55}$
2	方案 $K_2$	$P_{F17} + P_{F22} + P_{F37} + P_{F48} + P_{F59}$
3	方案 $K_3$	$P_{F19} + P_{F22} + P_{F37} + P_{F48} + P_{F55}$
4	方案 $K_4$	$P_{F17} + P_{F22} + P_{F37} + P_{F48} + P_{F56}$
5	方案 $K_5$	$P_{F16} + P_{F210} + P_{F34} + P_{F43} + P_{F55}$

图5为拖拉机产品族侧面外形的概念设计辅助系统界面。如图5a所示,设计辅助系统界面分为快速操作、进化设计基因、遗传性基因、产品平台与已存方案、方案显示6个区域。打开软件系统后,用户首先点击“载入”按钮,系统会加载通过遗传算法获得的进化设计基因编码组合。双击进化设计基因编码组合或已存方案,系统会调用相应图形并显示于显示区,并可通过“选中”、“平移”、“缩放”按钮对载入到显示区域的图形进行选择、平移、缩放的编辑操作。



a. 拖拉机侧面外形概念设计辅助系统界面  
a. Assistance system interface of tractor side shape concept design



b. 整车侧面外形  
b. Side shape of wheeled tractor

图5 拖拉机侧面外形概念设计辅助系统

Fig.5 Assistance system of tractor side shape concept design

然后,用户可点击遗传性基因或产品平台的“Load”按钮继续添加遗传性基因与产品平台部件,以完成整车侧面外形的组合,生成系列子代产品外形设计方案,实现拖拉机外形的家族化设计。组合后形成的方案示例如图5b所示。当用户获得满意的整车侧面设计方案后,可点击“保存”按钮进行方案保存,可保存为图片格式或矢量图形,为进一步精细设计提供参考。

### 3.6 结果评价

选取子代产品外形方案  $K_1$  与初始方案 p15(样本 p15 的均值最高,最具代表性)进行对比评价,评价目标包括两方面:原有造型特征的延续性及对品牌识别、产品意象、社会情境的符合程度;评价方法采用语义差异法。建立7点 Likert 心理量表(-3~3),组织32名受试者进行测试,包括专业设计师、工业设计学生、农机用户。评价结果显示:①认为子代方案与该品牌原有产品造型

特征完全符合、符合、较为符合的共有26人,占测评人数的81.25%,平均分为1.47;②如表6所示,相较于样本 p15,子代方案对品牌识别、用户意象、社会情境的3方面平均得分分别提高了0.60、1.08、1.60,符合程度分别提高了30%、54%、80%(以2分为标准分);2分及以上人数比例分别由34.37%、28.12%、31.25%提高到71.87%、68.75%、62.5%,说明新造型方案达到了设计目标。

表6 外形方案评价结果

Table 6 Evaluation results of shape scheme

统计量 Statistics	子代方案 Progeny scheme $K_1$			样本 Sample P15		
	品牌识别 Brand identity	用户意象 User image	社会情境 Social situation	品牌识别 Brand identity	用户意象 User image	社会情境 Social situation
平均值	1.81	1.85	1.72	1.21	0.77	0.12
标准差	0.83	0.95	0.98	1.17	1.53	1.64
符合程度/%	90.5	92.5	86	60.5	38.5	6.0
2分以上人数	23	22	20	11	9	10

## 4 结论与讨论

1) 从产品族外形基因进化设计流程出发,提出多目标驱动的拖拉机产品族外形基因进化设计模型,探讨了产品族外形基因的提取、变异系数的确定,外形基因与驱动目标的映射,并基于形态学矩阵与NGSA-II,对产品族外形基因进化设计解空间的构建与求解过程进行了详细研究。

2) 实例评价结果表明,子代方案能较好地延续该品牌原有产品造型特征与风格;同时,子代方案对品牌识别、用户意象、社会情境的符合程度分别提高了30%、54%、80%。弥补了以往设计方法仅仅考虑单一驱动目标,以及方案生成过程仅依靠设计师创意与灵感的模糊性与不确定性的不足。

本文仅仅研究了拖拉机的侧面外形基因进化设计。因此,后续工作将以此为基础,研究二维平面外形方案向三维立体外形方案的转化生成技术;进一步探讨融合技术、工艺、成本、标准等多目标约束的拖拉机产品外形基因进化设计方法,以提高该方法的适用性与完整性。

### [参考文献]

- [1] 高喜银, 苏珂. 工业设计创新驱动河北农机企业发展的路径研究[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(6): 336-339.  
Gao Xiyin, Su Ke. Study on the path of agricultural machinery enterprise development in Hebei driven by industrial design innovation[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014, 35(6): 336-339. (in Chinese with English Abstract)
- [2] 罗仕鉴, 朱上上, 冯骋. 面向工业设计的产品族设计DNA[J]. 机械工程学报, 2008, 44(7): 123-128.  
Luo Shijian, Zhu Shangshang, Feng Cheng. Product family design DNA in industrial design[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(7): 123-128. (in Chinese with English Abstract)
- [3] 卢兆麟, 李升波, 张悦, 等. 面向工业设计的产品设计DNA研究现状与进展[J]. 机械设计, 2014, 31(12): 1-7.  
Lu Zhaolin, Li Shengbo, Zhang Yue, et al. Review on design DNA in industrial design[J]. Journal of Machine Design, 2014, 31(12): 1-7. (in Chinese with English Abstract)

- [4] McCormack J P, Cagan J. Speaking the Buick language: capturing, understanding, and exploring brand identity with shape grammars[J]. *Design Studies*, 2004, 25(1): 1-29.
- [5] Chen Xiaoli, Li Xiang. Research on the design and extraction of vehicle brand form gene[J]. *Applied Mechanics and Materials*. 2014, 483: 497-501.
- [6] 卢兆麟, 汤文成, 薛澄岐. 一种基于形状文法的产品设计 DNA 推理方法[J]. *东南大学学报: 自然科学版*, 2010, 40(4): 704-711.  
Lu Zhaolin, Tang Wencheng, Xue Chengqi. Method of design DNA reasoning based on shape grammar[J]. *Journal of Southeast University: Natural Science Edition*, 2010, 40(4): 704-711. (in Chinese with English Abstract)
- [7] 卢兆麟, 张悦, Fritz F. 基于映射关系的产品设计 DNA 描述方法研究[J]. *机械设计*, 2016, 31(9): 1-5.  
Lu Zhaolin, Zhang Yue, Fritz F. Study on description method of product design DNA based on mapping[J]. *Journal of Machine Design*, 2016, 31(9): 1-5. (in Chinese with English Abstract)
- [8] 傅业焘, 罗仕鉴. 面向风格意象的产品族外形基因设计[J]. *计算机集成制造系统*, 2012, 18(3): 449-456.  
Fu Yetao, Luo Shijian. Style perception-oriented product family shape gene design[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2012, 18(3): 449-456. (in Chinese with English Abstract)
- [9] 周小舟, 薛澄岐, 王海燕, 等. 产品族设计 DNA 可遗传因子提取[J]. *东南大学学报: 自然科学版*, 2016, 46(6): 1192-1197.  
Zhou Xiaozhou, Xue Chengqi, Wang Haiyan, et al. Extraction of heritable factors of product family design DNA[J]. *Journal of Southeast University: Natural Science Edition*, 2016, 46(6): 1192-1197. (in Chinese with English Abstract)
- [10] 胡伟峰, 陈黎, 刘苏, 等. 汽车品牌造型基因提取及可视化研究[J]. *机械设计与研究*, 2011, 27(2): 65-68.  
Hu Weifeng, Chen Li, Liu Su, et al. Research on the extraction and visualization of vehicle brand form gene[J]. *Machine Design and Research*, 2011, 27(2): 65-68. (in Chinese with English Abstract)
- [11] 卢兆麟, 薛澄岐, 汤文成, 等. 工业设计中基于风格特征的产品设计 DNA 研究[J]. *机械设计*, 2010, 27(7): 8-14.  
Lu Zhaolin, Xue Chengqi, Tang Wencheng, et al. Research on product design DNA based on stylistic feature in industrial design[J]. *Journal of Machine Design*, 2010, 27(7): 8-14. (in Chinese with English Abstract)
- [12] 景春晖, 赵江洪. 基于进化思想的汽车造型优化设计方法研究[J]. *中国机械工程*, 2014, 25(11): 1517-1523.  
Jing Chunhui, Zhao Jianghong. Optimization design method of automobile styling based on evolution strategy[J]. *China Mechanical Engineering*, 2014, 25(11): 1517-1523. (in Chinese with English Abstract)
- [13] 苏建宁, 陈肖, 张书涛, 等. 基于进化算法的产品造型创新设计方法研究[J]. *工程设计学报*, 2016, 23(2): 136-142.  
Su Jianning, Chen Xiao, Zhang Shutao, et al. Product styling innovative design method based on evolutionary algorithm[J]. *Chinese Journal of Engineering Design*, 2016, 23(2): 136-142. (in Chinese with English Abstract)
- [14] Lo Chihung, Ko Yachuan, Hsiao Shihwen. A study that applies aesthetic theory and genetic algorithms to product form optimization[J]. *Advanced Engineering Informatics*. 2015, 29(3): 662-679.
- [15] 柳禄, 傅秀清, 康敏. 面向品牌识别的中小企业产品造型 DNA 设计研究[J]. *机械设计*, 2014, 31(9): 105-108.  
Liu Lu, Fu Xiuqing, Kang Min. Research on product DNA of SME facing brand identity[J]. *Journal of Machine Design*, 2014, 31(9): 105-108. (in Chinese with English Abstract)
- [16] 罗仕鉴, 李文杰, 傅业焘. 消费者偏好驱动的 SUV 产品族侧面外形基因设计[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(2): 173-181.  
Luo Shijian, Li Wenjie, Fu Yetao. Consumer preference driven SUV product family profile gene design[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(2): 173-181. (in Chinese with English Abstract)
- [17] 苏建宁, 张秦玮, 吴江华, 等. 产品多意象造型进化设计[J]. *计算机集成制造系统*, 2014, 20(11): 2675-2682.  
Su Jianning, Zhang Qinwei, Wu Jianghua, et al. Evolutionary design of product multi-image styling[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2014, 20(11): 2675-2682. (in Chinese with English Abstract)
- [18] 罗仕鉴, 翁建广, 陈实, 等. 基于视觉-行为-情感的产品族设计基因[J]. *计算机集成制造系统*, 2009, 15(12): 2289-2295.  
Luo Shijian, Zhu Shangshang, Ying Fangtian, et al. Vision-behavior-emotion based product family design gene[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2009, 15(12): 2289-2295. (in Chinese with English Abstract)
- [19] 朱斌, 江平宇. 面向产品族的设计方法学[J]. *机械工程学报*, 2006, 42(3): 1-8.  
Zhu Bin, Jiang Pingyu. Methodology of design for product family[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(3): 1-8. (in Chinese with English Abstract)
- [20] Lee H C, Herawan T, Noraziah A. Evolutionary grammars based design framework for product innovation[J]. *Procedia Technology*, 2012, 1(1): 132-136.
- [21] 王贞, 谭征宇. 基于整体性认知的汽车造型特征研究[J]. *包装工程*, 2013, 12(34): 51-54.  
Wang Zhen, Tan Zhengyu. Research on vehicle modeling features based on holistic cognition[J]. *Packaging Engineering*, 2013, 12(34): 51-54. (in Chinese with English Abstract)
- [22] Luo Shijian, Fu Yetao, Korvenmaa P. A preliminary study of perceptual matching for the evaluation of beverage bottle design[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2012, 42(2): 219-232.
- [23] 杨涛, 杨育, 张东东. 考虑客户需求偏好的产品创新概念设计方案生成[J]. *计算机集成制造系统*, 2015, 4(21): 875-884.  
Yang Tao, Yang Yu, Zhang Dongdong. Generation of product innovation conceptual design schemes for considering the demand preferences of customers[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2015, 4(21): 875-884. (in Chinese with English Abstract)
- [24] 苏建宁, 李鹤岐. 应用数量化一类理论的感性意象与造型设计要素关系的研究[J]. *兰州理工大学学报*, 2005, 2(31): 36-39.  
Su Jianning, Li Heqi. Investigation of relationship of form design elements to Kansei image by means of quantification-I theory[J]. *Journal of Lanzhou University of Technology*, 2005, 2(31): 36-39. (in Chinese with English Abstract)
- [25] Moseleh M, Allahviranloo L, Otadi M. Evaluation of fully fuzzy regression models by fuzzy neural network[J]. *Neural Computing and Applications*, 2012, 21(1): 105-112.
- [26] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6(2): 182-197.
- [27] Wu Zhiqiao, Kwong C K, Aydin R, et al. A cooperative negotiation embedded NSGA-II for solving an integrated product family and supply chain design problem with remanufacturing consideration[J]. *Applied Soft Computing*, 2017, 57: 19-34.
- [28] 刘孟楠, 周志立, 徐立友, 等. 基于多性能目标的拖拉机运输机组优化设计[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(8): 62-68.



- Liu Mengnan, Zhou Zhili, Xu Liyou, et al. Multi-objective optimization and design of tractor trailer systems[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(8): 62—68. (in Chinese with English abstract)
- [29] 王春林, 冯一鸣, 叶剑, 等. 基于 RBF 神经网络与 NSGA-II 算法的渣浆泵多目标参数优化[J]. 农业工程学报, 2017, 33(10): 109—115.  
Wang Chunlin, Feng Yiming, Ye Jian, et al. Multi-objective parameters optimization of centrifugal slurry pump based on RBF neural network and NSGA-II genetic algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(10): 109—115. (in Chinese with English abstract)
- [30] 胡伟峰, 赵江洪. 用户期望意象驱动的汽车造型基因进化[J]. 机械工程学报, 2011, 47(16): 176—181.  
Hu Weifeng, Zhao Jianghong. Automobile styling gene evolution driven by users' expectation image[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(16): 176—181. (in Chinese with English Abstract)

## Design of multi-objective driven product family shape gene for tractor

Liu Lu<sup>1,2</sup>, Zhang Yongnian<sup>1</sup>, Ding Weimin<sup>1</sup>, Kang Min<sup>1,2\*</sup>

(1. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China;

2. Guanyun Institute for Modern Agricultural Equipment, Nanjing Agricultural University, Guanyun 222200, China)

**Abstract:** To shape the iconic elements for brand modeling and unique brand image, and improve the users' satisfaction of aesthetic design, a method of Multi-objective driven product family shape gene design of tractor was proposed. Through analyzing the extraction and expression of product family shape gene, the model of Multi-objective driven product family shape gene design of tractor was constructed, and the detailed processes and key technologies were expounded. Firstly, the product library and the information base were established. Product library included tractors selected from own brand and other products which were widely selected from well-known brands' latest products and concepts, including agricultural machinery products, cars, clothing, electronics, etc. Information base included the specific content of brand identification and the kansei words library. Specific content of brand identification were obtained from the enterprise directly, kansei words library which reflect the aesthetic style of agricultural machinery came from the network, books, newspaper, etc. Meanwhile, the overall modeling features and local modeling features of products were extracted by expert interview method, the product family shape gene was extracted by Design Format Analysis (DFA) to analysis the coefficient of variation. Then, based on the morphological matrix, the solution space of product family shape gene was developed (In order to avoid the mind-set caused by similar product shape, shape gene should contain a certain amount of shape elements reference from other products). The mapping relations between Kansei words and shape elements were developed by semantic differential method. At last, the multi-objective decision model driven by brand identity, user imagery as well as social situation was established and the multi-objective decision model was solved based on NSGA-II genetic algorithms. Taking the wheeled tractor, which was manufactured by an agricultural machinery enterprise as an example, an analysis for the generation of tractor product family shape gene was explored. Based on C++ environment, a computer-aided design system of tractor product family shape gene was built. The system realized user interaction operation and vector graphics calling and drawing by Qt development framework, which could quickly realize the profile scheme generation and expression of tractor. Series of progeny schemes were obtained by the computer-aided design system. The experimental results demonstrated that: 1) 81.25% of the subjects considered the progeny scheme could be well continue the characteristics and style of the brand's original products, the average score was 1.47; 2) Compared with the sample p15 modeling schemes (The mean of the sample p15 was the most representative), the degree of compliance increased separately by 30%, 54% and 80% in brand identity, user imagery, and social situation, and the average proportion of the population increased from 34.37%, 28.12%, 31.25% to 71.87%, 68.75%, 62.5% in 2 points and above respectively, by using seven-point Likert scales based on semantic differential method. Therefore, the feasibility and validity of this method is verified. Furthermore, different from just considering a single factor in previous research, as the proposed product family shape gene generation for tractor was conducted by the simultaneous action of brand identification, product imagery and the social situation, and the ambiguity and uncertainty in visualization process which rely on designers' creative thinking and inspiration had been conquered, it also provides the reference for aesthetic design of agricultural machinery products.

**Keywords:** tractors; design; models; product family; shape gene; NSGA-II genetic algorithms; kansei engineering