

DOI: 10.3901/JME.2020.21.199

基于美学、人体工学及性能的多因素融合设计*

朱思羽 胡洁 戚进

(上海交通大学机电设计与知识工程研究所 上海 200240)

摘要: 传统设计方法主要考虑产品功能及性能, 较少考虑美学等其他因素, 难以满足综合要求的提升。为解决这一问题, 提出多因素的融合设计方法, 实现基于美学、人体工学及性能的智能化融合设计。首先确定多个因素的评价方法, 包括依据美学计算原理的多个美学维度的计算公式, 以及人体工学和性能的评价公式。结合粗糙层次分析法确定的各因素权重系数, 得到多因素的综合评价, 建立寻优模型。采用自适应边界的遗传算法求解模型, 实现优化设计和创新设计两种模式的设计, 最后由 NX10.0 的参数接口生成设计模型, 实现智能化的融合设计。通过自行车整体结构的设计案例对所提方法进行检验, 得到了明显优化的和具有创新性的设计方案。结果表明, 该方法可快速生成满足多因素综合要求的优化方案或若干优质的创新方案, 有效解决设计因素单一的问题。

关键词: 美学计算; 人体工学; 遗传算法; 多因素融合; 优化设计; 创新设计

中图分类号: TH122

Multi-factor Coupling Design Based on Aesthetic Measure, Ergonomics, and Performance

ZHU Siyu HU Jie QI Jin

(Institute of Mechatronic Design and Knowledge Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

Abstract: Traditional design processes mainly consider functions and performances, without other factors like aesthetics, and are therefore unable to satisfy comprehensive demands. To solve this problem, an automatic multi-factor coupling design method is proposed. Aesthetics, ergonomics and key performances are considered and coupled in an intelligent way. First, based on theory and formula of aesthetic measure, the scores for aesthetic dimensions are calculated. Scores of ergonomic comfort and performance are also calculated from formula. Multi-factor scores are combined with weights calculated by rough hierarchical process, and genetic algorithm with adaptive boundary is utilized to solve the design optimization problem. Optimized design and innovative design are both considered in the process. Finally, the results are transferred into 3D models with NX10.0 integrated parameter interface. The form design of bicycle is used as an example to illustrate the proposed method. According to results, optimized design and multiple innovative designs can be obtained effectively. With this method, product design with multiple factors are realized properly.

Key words: aesthetics; ergonomics; genetic algorithm; multi-factor coupling; optimization design; innovative design

0 前言

传统设计方法中, 功能与性能是主要考虑因素。但随着消费者对产品各方面要求的提升, 设计的多

样性和复杂性越来越突出, 功能性、工艺、美学感受、用户体验等各个因素都具有重要影响, 多因素融合是设计成功的必要条件。其中, 美学因素、用户体验、以及某些功能特性如便捷性、耐用性等成为关键。多因素融合的设计一方面需要对产品进行可靠的多因素的评价, 另一方面需要有效的融合设计方法。

美学的评价可采用计算美学的方法。美国 BIRKHOFF^[1]首先提出计算美学, 利用公式客观地

* 科技部创新方法工作专项(2018IM020100)、国家社科基金重大项目(17ZDA020)、国家自然科学基金(51975360, 51775332, 51675329, 51675342)、上海交通大学“医工交叉研究基金”(IH2018QNB03, YG2017QN61)和上海市工业强基项目(GYQJ-20118-1-13)资助项目。20200106 收到初稿, 20200612 收到修改稿

计算美学评价指标。DAVIS^[2]通过心理学实验,验证了计算公式的可靠性。NGO 等^[3-4]提出适用于平面网页的 14 维美学计算公式。此后经过拓展,计算美学在设计评价上有诸多成果,且不同场景下有不同的主要美学维度。例如,HSIAO 等^[5]利用三维物体的美学计算公式,对咖啡机外形进行评价和优化。LO 等^[6]根据一体式音响的特点,选择了平衡、协调、对称、比例、统一、简单 6 个维度进行评价。周爱民等^[7]对汽车前脸图像进行了 13 维的美学评价,并通过感性映射与灰熵关联分析法筛选出关键维度。张书涛等^[8]应用熵值法计算美学维度的权重,构建了产品美度综合评价。这些研究验证了计算美学在设计评价中的可靠性,进一步丰富了应用场景。

性能和人体工学的评价可采用特定函数或指标。例如,体压映射函数可用于评价坐垫接触面^[9]。人体力学模型可用于评价设备操作室舒适度^[10-11]。行驶平顺性和操纵稳定性可作为整车动力学性能指标^[12]。在特定领域,通过映射函数或衡量实际值与指标值的差异进行设计评价的方法已较为成熟。

一种广泛采用的融合设计方法是通过建立综合评价模型,使用寻优算法求解。综合评价模型可通过权重系数建立。例如,JIA 等^[13]提出基于粗糙模糊数的多准则群决策方法,用于确定指标权重。这类多准则群决策方法整合了专家经验和数据分析,可降低主观性的影响。在寻优算法求解方面,一般使用遗传算法等^[14-17]。这类方法已成为设计领域的重要方向。

然而,当前多因素的融合设计难以兼顾美学、工学等范围较广的因素。这是由于不同领域下,建立设计评价的参数、建模方式等差异巨大,无法形成统一的综合评价模型,使用通用算法集中求解。同时,缺少创新设计模式下的融合设计研究。鉴于此,为实现更广泛的多因素融合设计,本文提出了基于美学、人体工学及性能的多因素融合设计方法,融合跨领域的多种因素,实现优化设计和创新设计两种设计模式。首先,基于计算美学和人体工学、性能领域的参数评价指标,结合粗糙层次分析法确定的权重系数,建立多因素综合评价。利用自适应边界的改进遗传算法求解寻优模型,实现两种模式的融合设计。最后,利用对象模板和参数接口快速生成 CAD 三维模型。以自行车整体结构设计作为案例进行实验,分析和检验了所提方法的有效性。

1 多因素综合评价的建立

多因素的综合评价由各因素评价通过权重系数

进行融合建立。其中,美学和人体工学因素的量化评价是本文的重点。美学上,依据美学计算公式进行评价计算,人体工学上,依据标准参数指标进行计算。

1.1 美学评价

产品形态美的定性评价依据是形式美学法则^[18-19]。计算美学从中提取关键的美学要素作为评价指标,包括平衡、比例、节奏、协调、连续、重复、对称、统一、规律、相似等,并提出相应的定量评价公式,根据形态布局参数进行计算。在设计应用中,可根据设计对象的形态特点选择主要指标。由于比例、平衡和规律指标的适用性广,尤其在整体设计中十分关键,因此选作综合评价中的美学评价指标。

(1) 比例。当整体或局部间的比例与某些特殊值^[20]接近时,美感较好。据此可计算比例维度评价(Proportional measure, PM)

$$PM = \frac{PM_O + PM_E}{2} \quad (1)$$

$$PM_O = 1 - \frac{\sum_{j=1}^3 \min |p_{oj} - x_i|}{3} \quad (2)$$

$$PM_E = 1 - \frac{\sum_{j=1}^n \min |p_{ej} - x_i|}{n} \quad (3)$$

$$X = (1, 1.31, 1.414, 1.618, 1.732, 2, 2.236) \quad (4)$$

式中, p_{o1} 、 p_{o2} 、 p_{o3} 分别为整体的长宽、长高、宽高比值。 p_{ej} 为某两个相邻的局部尺寸的比值。 X 为特殊比例集合。

整体与局部比例的示例为

$$p_{e1} = \frac{L_1}{L_2} \quad p_{o1} = \frac{W}{H} \quad (5)$$

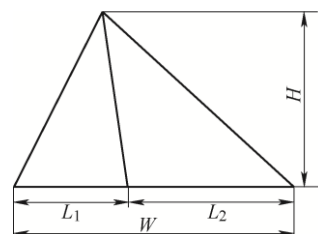


图 1 整体与局部比例示意图

(2) 平衡。平衡感是对体积分布的宏观感受^[21]。当物体各部分体积和空间位置分布整体均衡时,美感较好。据此计算平衡评价(Balance measure, BM)。

$$BM = 1 - \frac{M_x + M_y + M_z}{3} \quad (6)$$

$$M_z = \frac{\left| \sum_{i=1}^k m_{zi} \right| v_m}{\max |m_{zi}| V} \quad (7)$$

$$m_{zi} = \int x_i + y_i dv \quad (8)$$

式中, k 为物体的构件个数。选择物体内部某点作为空间坐标原点后, m_{zi} 为构件 i 的静矩矢量, v_m/V 为最大静矩构件与物体的体积比。

(3) 规律。规律是指物体具有某种规律下的统一。对于常见的由几何结构组成的物体, 规律性主要由几何的平行、相等体现。据此计算规律维度评价(Regularity measure, RM)。

$$RM = \frac{RM_p + RM_E}{2} \quad (9)$$

$$RM_p = 1 - \frac{n_p - 1}{k} \quad (10)$$

$$RM_E = 1 - \frac{n_e - 1}{k} \quad (11)$$

式中, k 为构件个数, n_p 为具有不同方向的构件个数, n_e 为具有不同尺寸的构件个数。

1.2 人体工学评价

人体工学中, 一般使用特定函数或指标进行评价。例如, 根据座椅高度与手臂舒适度的映射函数, 可得座椅高度的标准值。可通过衡量标准值与实际值的差异进行评价。据此计算人体工学评价价值(Ergonomic measure, EM)。

$$EM = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \frac{|x_i - x_i'|}{x_i}}{n} \quad (12)$$

式中, n 为衡量的参数个数, x_i 为参数 i 的标准值, x_i' 为参数 i 的实际值。

1.3 权重系数

本文应用文献[22]的粗糙层次分析法实现多准则群决策, 并将粗糙数结果数值化, 确定权重系数。

1.3.1 粗糙数

给定空间 U 和空间全部个体的类集合 R , $R = \{G_1, G_2, \dots, G_t\}$, $G_1 < G_2 < \dots < G_t$ 。对 G_q , $1 \leq q \leq t$, 定义其下近似 $\underline{\text{apr}}(G_q)$ 、上近似 $\overline{\text{apr}}(G_q)$, 下极限 $\underline{\text{lim}}(G_q)$ 和上极限 $\overline{\text{lim}}(G_q)$ 。

$$\underline{\text{apr}}(G_q) = \bigcup \{Y \in U \mid R(Y) \leq G_q\} \quad (13)$$

$$\overline{\text{apr}}(G_q) = \bigcup \{Y \in U \mid R(Y) \geq G_q\} \quad (14)$$

$$\underline{\text{lim}}(G_q) = \frac{1}{M_L} \sum R(Y) \mid Y \in \underline{\text{apr}}(G_q) \quad (15)$$

$$\overline{\text{lim}}(G_q) = \frac{1}{M_U} \sum R(Y) \mid Y \in \overline{\text{apr}}(G_q) \quad (16)$$

式中, M_L 、 M_U 分别为下近似、上近似集的元素数。

则 G_q 可用粗糙数 $RN(G_q)$ 表示

$$RN(G_q) = [\underline{\text{lim}}(G_q), \overline{\text{lim}}(G_q)] \quad (17)$$

1.3.2 粗糙层次分析法

该方法步骤如下。

(1) 确定层次结构。由上至下依次为评价目标、评价因素和评价样本。

(2) 确定层次分析法的判断矩阵。通过问卷实验得到 s 位专家给出 $n \times n$ 维的判断矩阵 B_e , $1 \leq e \leq s$ 。

(3) 根据一致性指标检验判断矩阵的一致性。

(4) 构建粗糙判断矩阵 M 。根据各判断矩阵, 得到 n^2 个序列 \tilde{x}_{gh} 。将其转化为粗糙集表示。经过归一化, 得到粗糙判断矩阵 M 。

$$RN(\tilde{x}_{gh}) = \{[x_{gh}^{1L}, x_{gh}^{1U}], [x_{gh}^{2L}, x_{gh}^{2U}], \dots, [x_{gh}^{sL}, x_{gh}^{sU}]\} \quad (18)$$

$$x_{gh}^L = \frac{x_{gh}^{1L} + x_{gh}^{2L} + \dots + x_{gh}^{sL}}{s} \quad (19)$$

$$M = \begin{bmatrix} [1, 1] & [x_{12}^L, x_{12}^U] & \dots & [x_{1m}^L, x_{1m}^U] \\ [x_{21}^L, x_{21}^U] & [1, 1] & \dots & [x_{2m}^L, x_{2m}^U] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [x_{m1}^L, x_{m1}^U] & [x_{m2}^L, x_{m2}^U] & \dots & [1, 1] \end{bmatrix} \quad (20)$$

(5) 计算各因素权重系数。

$$w_g = [\sqrt[m]{\prod_{h=1}^m x_{gh}^L}, \sqrt[m]{\prod_{h=1}^m x_{gh}^U}] \quad (21)$$

$$w'_g = w_g / \max(w_g^U) = [w_g^{L'}, w_g^{U'}] \quad (22)$$

$$\alpha'_i = \frac{w_i^{L'} + w_i^{U'}}{2} \quad (23)$$

$$\alpha_i = \frac{\alpha'_i}{\sum_i \alpha'_i} \quad (24)$$

式中, α_i 为第 i 个因素的权重系数。

1.4 综合评价

综合评价(Overall measure, OM)为各因素评价结果的加权平均。

$$OM = \frac{\sum_i \alpha_i M_i}{\sum_i \alpha_i} \quad (25)$$

式中, M_i 为第 i 个所考虑因素的评价值。

2 多因素融合设计方法

基于建立的综合评价, 多因素融合设计方法流程如图2所示。

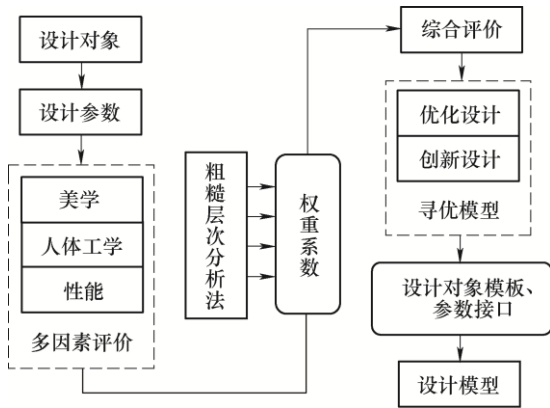


图2 多因素融合设计方法流程

2.1 确定设计参数

设计参数是经特征提取形成的设计对象的数学描述, 包括定量参数和定性参数。定量参数用于连续值的特征, 定性参数用于按类型提取的特征。一般有参数约束, 例如结构参数之间的干涉约束。确定设计参数后, 可对设计过程进行数学描述、模型建立与求解。定义参数为 p_1, p_2, \dots, p_n , 取值范围 D_1, D_2, \dots, D_n , 约束集 F 。满足约束的条件为

$$\forall f_i \in F, f_i(p_1, p_2, \dots, p_n) < 0 \quad (26)$$

式中, f_i 为第 i 个约束。

2.2 确定综合评价函数

针对特定的设计对象, 美学评价可由美学公式计算。人体工学的评价, 可选择关键参数指标, 由公式(12)计算。性能评价(Capacity measure, CM)一般有固定且成熟的量化评价方法。将性能评价结果归一化为 0(最差)–1(最好)。最后, 根据粗糙层次法确定的权重系数, 得到综合评价函数 f_{OM} 。

2.3 寻优问题求解

基于综合评价函数, 多因素融合设计问题可转化为式(27)的寻优问题。

$$\begin{aligned} \max \quad & f_{OM}(p_1, p_2, \dots, p_n) \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} p_i \in D_i, i=1, 2, \dots, n \\ \forall f_i \in F, f_i(P) < 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (27)$$

该模型一般参数众多且约束复杂, 宜采用启发式寻优算法。遗传算法具有高效、灵活、适用性强的优点, 可用于寻找已知点附近的局部最优解, 或进行大范围的优质解的搜索^[23-27]。前者可用于优化

设计, 后者可用于创新设计。通过改变变异率、种群规模等, 可调整算法特性, 适应不同模式。

采用自适应边界的改进遗传算法求解, 算法流程如图3所示。自适应边界的原理是根据约束, 在算法迭代过程中动态调整可行域, 用于可行性检查和确定变异操作的边界。可行域的计算

$$S_i^t = \{x \in D_i | \forall f_i \in F,$$

$$f_i(p_1^{t-1}, \dots, p_{i-1}^{t-1}, x, p_{i+1}^{t-1}, \dots, p_n^{t-1}) < 0\} \quad (28)$$

式中, S_i^t 为第 t 次迭代时第 i 个参数的可行域。 p_i^{t-1} 为第 $t-1$ 次迭代时第 i 个参数值。

满足可行性的条件为

$$p_i^t \in S_i^t, i=1, 2, \dots, n \quad (29)$$

取综合评价函数为适应度函数。使用浮点编码制, 交叉操作中, 随机交换两个体的部分参数。变异操作中, 对两个体的部分参数在当前可行域内随机取值。

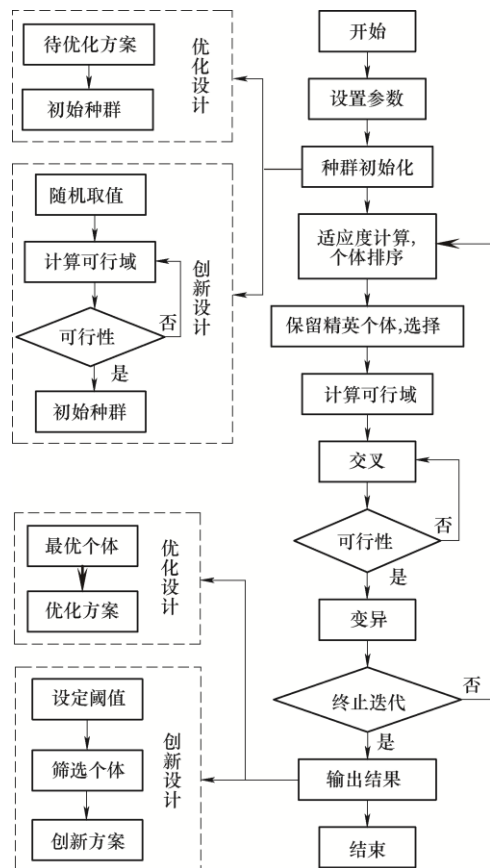


图3 自适应边界的改进遗传算法流程

优化设计模式下, 采用较小的变异率和种群规模, 使种群分布基本在初始点附近。使用待优化方案初始化种群。终止迭代后, 取末代种群中的最优个体作为优化方案, 实现优化设计。

创新设计模式下, 采用较大的变异率和种群规

模，增强算法的广域搜索能力。经过循环的随机取值和可行性检查，获得发散分布的初始种群。终止迭代后，根据设定的适应度阈值，筛选出若干较优个体作为创新方案，实现创新设计。

自适应边界的改进遗传算法中，交叉操作主要促进优势个体在种群中的扩散，在保留精英个体后，直接交换部分参数，提高算法收敛性。变异操作主要增强算法的广域搜索能力，容易产生非可行解，因此采用自适应边界的方式，保证算法高效运行。

2.4 设计模型生成与检验

根据设计方案，在 CAD 平台如 Siemens NX10.0 下快速生成三维模型。建立设计对象模型模板后，由平台的集成化参数更新接口导入参数值，自动生成三维结果，便于后续检验和分析。

3 自行车整体结构设计案例

3.1 自行车整体结构设计参数

自行车整体结构设计参数共 25 个，见图 4。参数定义见表 1。

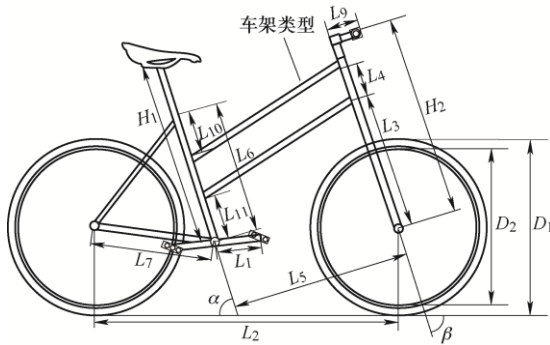


图 4 自行车整体结构设计参数

表 1 自行车结构设计参数

定义	取值范围
坐垫高度 H_1/mm	[100,1 000]
车把高度 H_2/mm	[100,1 000]
车轮直径 D_1/mm	[400,800]
轮毂内径 D_2/mm	[400,800]
曲柄长度 L_1/mm	[100,400]
车轮中心距 L_2/mm	[200,1 200]
前叉长度 L_3/mm	[100,1 000]
前通管长度 L_4/mm	[0,400]
前轮曲柄距离 L_5/mm	[100,1 000]
立管长度 L_6/mm	[100,1 000]
后叉长度 L_7/mm	[100,500]
车把长度 L_8/mm	[100,400]
车头长度 L_9/mm	[0,400]
上叉位置 L_{10}/mm	[0,500]
下叉位置 L_{11}/mm	[0,500]
前叉倾角 $\beta/(^\circ)$	[10, 90]
立管倾角 $\alpha/(^\circ)$	[10, 90]
上叉截面直径 d_1/mm	[10, 80]
下叉截面直径 d_2/mm	[10, 80]
立管截面直径 d_3/mm	[10, 80]
后叉截面直径 d_4/mm	[10, 80]
前叉截面直径 d_5/mm	[10, 80]
车把截面直径 d_6/mm	[10, 80]
轮胎宽 d/mm	[10, 30]
车架类型 T	{0,1,2,3}, 有无上叉、下叉四种组合

3.2 自行车整体结构综合评价

美学上，考虑比例、平衡、规律 3 个维度。其中，比例维度考虑 3 个整体比例和 7 个局部比例，由式(1)~(4)计算。平衡维度考虑 11 个主要构件，由式(6)~(8)计算。规律维度考虑 9 个主要构件，由式(9)~(11)计算。人体工学上，考虑 5 个参数，包括坐垫与车把距离 x_1 、车把长度 x_2 、躯干与踏板中心夹角 x_3 、坐垫高度 x_4 和曲柄长度 x_5 ，根据标准骑行姿势^[28-29]的要求解出标准值，由式(12)计算。性能上，考虑重量指标，不考虑材质，由式(30)计算。以上各公式所用变量见表 2。

表 2 多因素的评价计算中间参数

参数	定义	参数	定义	参数	定义
p_{o1}	总长/总宽	m_{z6}	坐垫	x_1'	$\left \frac{(L_2 - L_7 \cos \theta - H_2 \cos \beta + L_9 \sin \beta + H_1 \cos \beta, \frac{D_1}{2} - L_7 \sin \theta + H_2 \sin \alpha + L_9 \cos \alpha - H_1 \sin \beta)}{2} \right $
p_{o2}	总长/总高	m_{z7}	车把	x_2	标准最大肩宽
p_{o3}	总宽/总高	m_{z8}	上叉	x_2'	L_8
p_{e1}	H_2/H_1	m_{z9}	下叉	x	$L_2 - L_7 \cos \theta$
p_{e2}	$L_5/(L_2 \sin \beta)$	m_{z10}	下后叉	y	$L_7 \sin \theta$
p_{e3}	L_3/L_4	m_{z11}	曲柄	z	$ (x + H_1 \cos \alpha, y - H_1 \sin \alpha) $
p_{e4}	L_6/H_1	k	11	x_3	130°
p_{e5}	$(L_6 - L_{10} - L_{11})/H_1$	a	标准臂长	x_3'	$\arccos(\frac{a^2 + c^2 - b^2}{2ac}) + \arctan(\frac{y - H_1 \sin \alpha}{x + H_1 \cos \alpha}) + \alpha$
p_{e6}	L_6/L_7	b	标准坐姿肩高	x_4	$\sqrt{c^2 - (H_1 \sin \beta - d)^2} - H_1 \cos \beta$
p_{e7}	L_9/H_2	c	标准大腿长	x_4'	L_1
m_{z1}	前叉	d	标准小腿长	x_5	$0.883e$
m_{z2}	前轮	e	标准站立胯高	x_5'	H_1
m_{z3}	后轮	x_1	$\sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \cos(55^\circ)}$		
m_{z4}	立管	θ	$\alpha - \arcsin(\frac{L_2 \sin \beta - L_5}{L_7})$		
m_{z5}	上后叉				

$$CM = 1 - \frac{V_d}{V_{\max}} \quad (30)$$

式中, V_d 为设计体积, V_{\max} 为最大体积。

应用粗糙层次分析法, 由 6 名专家给出判断矩阵。以其中一名专家为例, 结果见式(31)、(32)。各因素权重系数见表 3。

$$B_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1/2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1/3 & 1 & 1/2 \\ 2 & 3 & 1 & 2 & 3 \\ 1 & 1 & 1/2 & 1 & 1/2 \\ 1 & 2 & 1/3 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (31)$$

$$CR_1 = 0.0287 < 0.1 (\text{满足一致性}) \quad (32)$$

结合上述各因素的评价结果和权重系数, 由式(25)计算综合评价值。

表 3 各因素权重系数

因素	w_i'	α_i'	α_i
PM	[0.556, 0.845]	0.700	0.196
BM	[0.475, 0.966]	0.721	0.202
RM	[0.452, 0.972]	0.712	0.199
EM	[0.509, 0.918]	0.713	0.200
CM	[0.451, 1.000]	0.726	0.203

4 案例结果分析与检验

4.1 优化设计

取交叉概率 0.6, 变异概率 0.08, 种群大小 20, 进行遗传算法求解。初始方案及优化后方案的三维模型见图 5, 各因素评价值见表 4。



图 5 优化设计模型

表 4 优化方案评价结果

方案	PM	BM	RM	EM	CM	OM
初始	0.73	0.78	0.47	0.39	0.84	0.64
优化	0.98	0.93	1	0.89	0.84	0.93

与初始方案相比, 优化方案具有明显优势, 尤其在美学和人体工学上有较大提升。分析两方案美学上的差异。优化方案的整体长宽比为 1.618, 整体长高比为 2.236, 后又三角形近似为等腰, 底边与腰的比为 0.618, 均为特殊比例。前叉和立管、下叉和后叉平行。各构件间或具有特殊比例、或相互平行, 故呈现出良好的美感。而初始方案没有接近特殊值的比例, 下叉和后叉、上叉和下叉不平行, 两后又长度不一致, 故美感较差。

分析两方案人体工学的差异。标准骑行姿势建议上臂与躯干夹角为 55° , 躯干与下肢夹角为 130° 。初始方案中, 上臂与躯干夹角为 130° , 躯干与下肢夹角为 120.61° 。而优化方案中, 上臂与躯干夹角为 58.07° , 躯干与下肢夹角为 130° 。优化方案明显更加符合标准骑行姿势的要求。

通过专家问卷法检验优化设计结果。试验参与者均为交互设计、工业设计等领域的研究人员, 共 20 人, 其中男女各 10 人。问卷试验中, 研究人员通过分析和对比初始方案与优化方案的设计模型, 从比例、平衡、规律、舒适、轻便 5 个维度对两方案的优越性打分, 分值范围为 1~10。问卷试验结果见表 5, 优化方案在各因素上表现更优。由此验证了所提出方法用于优化设计的有效性。

表 5 问卷试验结果

方案	比例	平衡	规律	舒适	轻便	综合
初始	6.2	6.35	6.55	6.2	6.55	6.37
优化	6.75	6.5	7.2	6.4	6.7	6.71

4.2 创新设计

取交叉概率 0.6, 变异概率 0.15, 种群大小 80 进行求解。试验中, 自适应边界保证了变异操作的高效性, 但也增大了初始种群对结果的影响, 因为上一代个体的分布决定了下一代个体的变异边界, 不利于广域搜索。同时, 试验发现若增大设计参数的取值范围, 能够得到更加新颖的结果, 但初始种群对结果的影响更为显著。因此, 创新设计模式下应采用尽量大的种群规模。部分创新方案见图 6。



图6 创新设计实例

由图6可见,所生成的创新方案在满足结构基本合理的同时,在美学、人体工学及性能上均有良好表现,并且具有很强创新性。概念设计阶段中,大量优质的创新设计方案能够启发设计师的设计,有效提升设计效率。同时,遗传算法的广域搜索能力保证了创新方案的广泛性,因此借助这些创新方案进行创新性的概念设计,相比其他依靠主观的创新方法更为科学可靠。所提出的方法用于创新设计的优越性。

4.3 方法比较

本文所提出的多因素融合设计方法适用于概念设计阶段后期的方案确定与选择。与其他典型方法的特点归纳见表6。其中,功能-行为-结构模型和感性工学等主要针对特定因素,难以实现广泛的融合设计。基于案例推理的设计需要大量案例支持,或是设计模式上有待提升。基于TRIZ的创新方法难以指导详细设计,无法快速迭代。对比可见,本文的多因素融合设计方法具有融合跨领域多种因素,

表6 多因素融合设计方法与其他典型方法特点

方法	支持的设计模式	多因素融合范围	需要案例支持	人工决策的依赖程度
功能-行为-结构模型	两种模式	功能因素	否	依赖人工构建映射关系
感性工学	两种模式	感性因素	否	大部分依赖人工评价
基于案例推理的设计	优化设计	跨领域多种因素	是	大部分依赖人工推理
基于TRIZ的创新方法	创新设计	跨领域多种因素	否	难以指导详细设计,依赖人工决策
本文多因素融合设计方法	两种模式	跨领域多种因素	否	智能决策,仅依赖专家确定权重

同时实现两种设计模式的优势。此外,本文方法无需案例支持,通过综合评价模型和智能算法实现设计决策,具有高效易用的特点,更加适应工程应用实践中快速迭代、智能决策的需求。

5 结论

(1) 结合跨领域成果,建立了可靠的多因素综合评价。基于计算美学,利用比例、平衡、规律性等维度的美学计算公式,结合人体工学量化指标和公式,得出各因素的评价方法。利用粗糙层次分析法确定权重系数,建立多因素综合评价。

(2) 提出支持优化设计与创新设计两种模式的多因素融合设计方法。根据综合评价,利用自适应边界的改进遗传算法求解寻优问题,通过参数接口生成三维模型。以自行车整体结构设计进行案例实验。结果表明,优化设计模式的优化效果明显,创新设计下快速生成了大量优质方案,均验证了方法的有效性。

(3) 所提方法融合美学、人体工学和性能因素,可用于优化设计、创新设计两种模式,相比于同类研究,实现了更广泛和高效的融合设计,和较全面的智能设计决策。

(4) 在本文成果的基础上,尚有相关工作需要进一步展开。例如,研究如何筛选出关键的影响因素,对遗传算法参数的分析,以及参数化建模环境下实时评价的研究等。

参 考 文 献

- [1] BIRKHOFF G D. Aesthetic measure[D]. Cambridge: Massachusetts Harvard University Press, 1933.
- [2] DAVIS R C. An evaluation and test of Birkhoff's aesthetic measure and formula[J]. General Psychol, 1936, 15(2): 231-240.
- [3] NGO D C L, BYRNE J G. Aesthetic measures for screen design[C]//Australasian Computer Human Interaction Conference, November 30-December 04, 1998, Adelaide, Australia. 1998: 64-71.
- [4] NGO D C L, LIAN S T, BYRNE J G. Modelling interface aesthetics[J]. Inform. Sci., 2003, 152: 25-46.
- [5] HSIAO S W, CHIU F Y, LU S H. Product form design model based on genetic algorithms[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2010, 40(3): 237-246.
- [6] LO C H, KO Y C, HSIAO S W. A study that applies aesthetic theory and genetic algorithms to product form

- optimization[J]. Adv. Eng. Inf., 2015, 29(3): 662-679.
- [7] 周爱民, 苏建宁, 阎树田, 等. 基于形态美度的产品多意象预测模型[J]. 图学学报, 2018, 39(4): 654-660.
- ZHOU Aimin, SU Jianning, YAN Shutian, et al. Product multi-image prediction model based on aesthetic measure of form[J]. Journal of Graphics, 2018, 39(4): 654-660.
- [8] 张书涛. 基于熵理论的产品美学综合评价方法[J/OL]. 重庆: 包装工程, 2020[2020-07-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1094.TB.20200401.1154.018.html>.
- ZHANG Shutao. Integrated evaluation method of product aesthetic based on entropy theory[J/OL]. Chongqing: Packaging Engineering, 2020[2020-07-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1094.TB.20200401.1154.018.html>.
- [9] 张志飞, 李春雨, 梁玲, 等. 基于体压数据映射的定制坐垫接触面设计方法[J]. 机械工程学报, 2019, 55(17): 162-171.
- ZHANG Zhifei, LI Chunyu, LIANG Ling, et al. Custom-contoured cushion interface design method based on interface pressure mapping[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(17): 162-171.
- [10] 王涛. 起重机操纵动作分析与人机工效评价研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- WANG Tao. The research of motion analyze and ergonomic evaluation on crane operation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [11] 于泽洋. 数控机床操作动作分析及工效学评价研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- YU Zeyang. Research on motion analysis and ergonomic evaluation on CNC machine[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [12] 蒋荣超, 刘大维, 王登峰. 基于熵权 TOPSIS 方法的车动力学性能多目标优化[J]. 机械工程学报, 2018, 54(2): 150-158.
- JIANG Rongchao, LIU Dawei, WANG Dengfeng. Multi-objective optimization of vehicle dynamics performance based on entropy weighted TOPSIS method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(2): 150-158.
- [13] JIA Fan, LIU Yuanyuan, WANG Xingyuan. An Extended MABAC method for multi-criteria group decision making based on intuitionistic fuzzy rough numbers[J]. Expert. Syst. Appl., 2019, 127: 241-255.
- [14] 范克健, 刘苏俊, 马晓东, 等. 基于神经网络的车灯副反射器注塑工艺参数优化[J]. 塑料科技, 2017, 45(4): 89-92.
- FAN Kejian, LIU Sujun, MA Xiaodong, et al. Headlamp vice-reflector based on neural network optimization of injection molding parameters[J]. Plastics Science and Technology, 2017, 45(4): 89-92.
- [15] 张雷, 杨凯, 张城, 等. 基于属性映射的产品绿色设计方案优化方法[J]. 机械工程学报, 2019, 55(17): 153-161.
- ZHANG Lei, YANG Kai, ZHANG Cheng, et al. Optimization method of product green design scheme based on attribute mapping[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(17): 153-161.
- [16] LI Y F, SHIEH M D, YANG C C. A Posterior preference articulation approach to Kansei engineering system for product form design[J]. Res. Eng. Design., 2019, 30(1): 3-19.
- [17] 徐弓岳, 丁华锋, 孙玉玉. 基于改进非支配排序遗传算法的正铲挖掘机工作装置优化设计[J]. 机械工程学报, 2016, 52(21): 35-43.
- XU Gongyue, DING Huafeng, SUN Yuyu. Optimization of face-shovel excavator's attachment based on improved NSGA-II[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(21): 35-43.
- [18] GRAVES M. The art of color and design[M]. New York: McGraw-Hill, 1941.
- [19] KIM N. A history of design theory in art education[J]. The Journal of Aesthetic Education, 2006, 40(2): 12-28.
- [20] MARCUS A. Graphic design for electronic documents and user interfaces[M]. New York: ACM Press, 1992.
- [21] TATEPSIAN L. Characterizing aesthetic visualizations [D]. PhD Preliminary Oral Exam Report, Raleigh: North Carolina State University, 2006.
- [22] ZHU Guoniu, HU Jie, QI Jin, et al. An integrated AHP and VIKOR for design concept evaluation based on rough number[J]. Adv. Eng. Inform., 2015, 29(3): 408-418.
- [23] 张鑫源, 胡晓敏, 林盈. 遗传算法和粒子群优化算法的性能对比分析[J]. 计算机科学与探索, 2014, 8(1): 90-102.
- ZHANG Xinyuan, HU Xiaomin, LIN Ying. Comparisons of genetic algorithm and particle swarm optimization[J]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2014, 8(1): 90-102.
- [24] GHAMISI P, BENEDIKTSSON J A. Feature selection based on hybridization of genetic algorithm and particle swarm optimization[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing, 2015, 12(2): 309-313.

- [25] 莫鸿强. 遗传算法搜索能力和编码方式研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2001.
- MO Hongqiang. Study of search efficiency and encoding schemes of genetic algorithms[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2001.
- [26] KIM Y H, YOON Y, GEEM Z W. A comparison study of harmony search and genetic algorithm for the max-cut problem[J]. Swarm Evol. Comput., 2019, 44: 130-135.
- [27] SONG Yingying, WANG Fulin, CHEN Xinxin. An improved genetic algorithm for numerical function optimization[J]. Appl. Intell., 2019, 49(5): 1880-1902.
- [28] BINI R, HUME P A, CROFT J L. Effects of bicycle saddle height on knee injury risk and cycling performance[J]. Sport. Med., 2011, 41(6): 463-476.
- [29] 胡林, 程启寅, 黄晶, 等. 自行车座椅高度对事故中骑车人动力学响应的影响[J]. 机械工程学报, 2018, 54(21): 81-89.
- HU Lin, CHENG Qiyin, HUANG Jing, et al. Research on the effect of seat height on cyclists' dynamics response in vehicle-bicycle accident[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(21): 81-89.
-
- 作者简介: 朱思羽, 女, 1996年出生。主要研究方向为智能设计。
E-mail: 601381@sjtu.edu.cn
- 胡洁(通信作者), 男, 1973年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为基于知识的工程和设计形态学。
E-mail: hujie@sjtu.edu.cn