

结合形状文法与交互式遗传算法的列车头型设计*

戚百灵¹ 孙元² 闫宇婷² 林凤玲²

(1. 中车大连机车车辆有限公司, 116022, 大连; 2. 大连理工大学建筑与艺术学院, 116023, 大连)

摘要 [目的]典型的列车头型美学设计方法普遍依赖于设计人员的主观经验和直觉,已不能满足快速迭代和大规模定制的设计与生产需求。因此,针对列车头型的美学设计问题,提出了一种结合形状文法与交互式遗传算法的列车头型生成式设计方法。[方法]对列车头型不同层次的形状特征线进行分析与提取,结合形状文法对设计元素特征线进行抽象创作;采用交互式遗传算法对造型设计特征进行编码,考虑到用户在评价方案过程中审美认知的模糊性,适应度采用模糊赋值方法,实现头型设计的智能多样化选择;以磁悬浮列车头型设计为例进行验证。[结果及结论]与传统交互式遗传算法的精确赋值相比,采用高斯隶属函数来模糊表示进化个体的适应度值,可以降低用户评价过程中的心理负担。结合形状文法与交互式遗传算法的列车头型生成式设计方法,可以有效改善概念方案质量,提升设计效率。在交互评价过程中,随着进化代数的增加,用户针对方案的平均交互评价时间逐渐减少,这体现了用户对方案理解的渐进性,也说明了交互式生成技术方法符合用户的认知模式。

关键词 列车; 头型设计; 生成式设计; 形状文法; 交互式遗传算法

中图分类号 TP302; U270.3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.10.011

Train Vehicle Nose Design Combining Shape Grammar and Interactive Genetic Algorithm

QI Bailing¹, SUN Yuan², YAN Yuting², LIN Fengling²

(1. CRRC Dalian Co., Ltd., 116022, Dalian, China; 2. School of Architecture and Art, Dalian University of Technology, 116023, Dalian, China)

Abstract [Objective] The typical train nose aesthetic design method generally relies on the subjective experience and intuition of designers, and can no longer meet the design and production needs of rapid iteration and mass customization. Therefore, aiming at the aesthetic design problem of train nose, a generative design method of which combining shape grammar and interactive genetic algorithm is proposed. [Method] The shape feature lines at different levels of the

train nose are analyzed and extracted, and the feature lines of the design elements are abstractly created in combination with shape grammar. An interactive genetic algorithm is used to encode design features. Considering the ambiguity of users' aesthetic cognition in the scheme evaluation process, a fuzzy assignment method is used for the fitness to achieve intelligent and diversified selection of the vehicle nose design. The design of maglev train nose is used as an example for verification.

[Result & Conclusion] Compared with the accurate assignment of traditional interactive genetic algorithms, using Gaussian membership functions for fuzzy representation of the fitness values of evolving individuals can reduce the psychological burden of users in the evaluation process. The train nose generative design method combining shape grammar and interactive genetic algorithm can effectively improve conceptual scheme quality and enhance design efficiency. In the interactive evaluation process, with the increase of evolutionary algebra, the average user's interactive evaluation time for the scheme gradually decreases, which reflects the gradual understanding of the scheme by users, and also shows that the interactive generation technology method conforms to the user's cognitive mode.

Key words train; vehicle nose design; generative design; shape grammar; interactive genetic algorithm

轨道列车头型特征在列车造型创新设计过程中具有举足轻重的地位,头型的美学形状和整体外观设计对列车的空气动力学性能、视觉效果及乘客舒适度等方面具有重要影响^[1]。造型风格创新是工业设计的灵魂,以传统的设计思维方式进行头脑风暴和创意,很难解构产品造型规律及形态推演法则。

形状文法因其具有的形式可视化和启发式推理的特点,在建筑^[2]、图案设计^[3]、造型设计^[4-7]等领域得到了广泛应用。诸多研究从既有形态中提取特征确立文法规则,通过构造形态元素进行推演,形成造型的相似性或者系列化风格,有效地实

*教育部人文社会科学研究基金项目(18YJC760073)

现了产品风格系列化,并提高了方案生成效率。然而,在形状文法的演进过程中,过多的形状元素数量和复杂的推演规则导致了设计效率的降低。

在产品造型创新设计研究中,构建基于数据驱动的智能辅助设计系统,采用生成式设计技术已成为一种普遍趋势。本文提出了结合形状文法与交互式遗传算法的列车头型方案生成系统,该系统基于形状文法规则设定元素类型,遗传算法的评价部分则基于交互式评价的适应度值,由设计人员决定方案的发展方向,最终得到满足要求的设计方案。

1 理论基础与方法流程

1.1 形状文法

乔治·斯蒂尼于 1972 年系统地阐述了形状文法的概念,为这一领域奠定了坚实的理论基础。形状文法不仅能够将复杂的形态拆解为基本的点、线、面元素,还能巧妙地利用这些元素重构出复杂的造型。具体而言,形状文法可以表达为 $S_G = (S, L, R, I)$, 其中 S_G 代表一个形状集合, S 为形状的有限集合, L 为符号的有限集合, R 为形状衍生规则的有限集合, I 为带标记的非空初始形状,作为规则迭代的基础。在 S_G 中,衍生形状是通过特定的符号标记后,依据规则 R 生成的。所有参与衍生的形状都必须遵循特定的符号标记,以便被规则 R 所驱动。形状集 S_G 中的所有设计方案,均源自初始形状 I ,经过有限集规则 R 的变换而来。

在实际操作中,该方法首先提取选定意象元素的设计形状,记为 I ;随后,根据技术限制和意象风格要求,设定衍生规则 R ;最后,对初始设计形状 I 进行规则 R 的推演迭代。形状文法各要素间的关系如图 1 所示,具体的推演规则如表 1 所列。

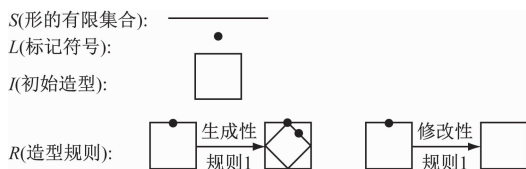


图 1 形状文法四元组

Fig. 1 Shape grammar quad

1.2 设计交互式遗传算法

GA(遗传)算法是基于自然选择过程的进化搜索策略,是一种并行、高效及自适应全局优化搜索的最优解的方法。GA 通过模拟自然进化过程搜索最优解,在产品造型设计领域逐渐得到广泛应

表 1 形状文法推演规则

Tab. 1 Rules for shape grammar deduction

项目	规则	方法	示意图
生成性规则	$R_1 =$ 置换	图形的一部分用其他形状替换	
	$R_2 =$ 增删	对图形元素增加不同的元素或删除局部图形	
	$R_3 =$ 缩放	缩小或放大部分图形或全部曲线	
	$R_4 =$ 旋转	对初始图形的角度转换	
修改性规则	$R_5 =$ 拉伸	沿轴向一个方向对初始形状进行拉伸	
	$R_6 =$ 平移	对初始形状的局部结点进行直线移动	
	$R_7 =$ 微调	对图形元素进行细微调整,幅度较小	

用^[8-10]。由于造型方案评价取决于个人的直觉、审美价值和经验,具有模糊性和主观性的特点,这导致提前制定与用户偏好相关的适应度函数非常困难,为此,人们尝试将智能评估与传统遗传算法的优化能力相结合演化出交互式遗传算法。为弥补传统遗传算法的不足,IGA(交互式遗传)算法通过将计算机交互技术与遗传算法相结合,将主观判断全部或部分替换为适应度函数。目前,IGA 主要通过算法的编码、初始种群生成、以评分机制获取方案适应度,通过选择、交叉与变异等逐渐生成最优解^[11]。

轨道交通车辆头型的评价语义具有多元化特点,且其评价结果具有主观性,求解方案数量较大,这使得方案求解复杂度增大。因此,应用交互式方法探究设计师或利益相关者的偏好,辅助设计方案的寻优,可提高寻找最优方案的效率。

1.3 方法与流程

遗传算法的收敛速度和求解精度直接受到染色体编码方式的影响。为此,本研究结合了列车头型的设计特征与形状文法规则来构建染色体编码,并以此作为初始种群。在算法中,列车头型的特征被抽象为向量结构,而每条染色体编码则代表了一个多维解空间中的候选方案集合。用户可对这些候选方案进行交互式的评价,随后遗传算法会根据用户反馈在解集中搜索最优或满意的解决方案。一旦方案满足评价标准,便通过解码操作将向量结构转化为设计预想图,以便直观地展示设计成果。

整个研究框架如图 2 所示。

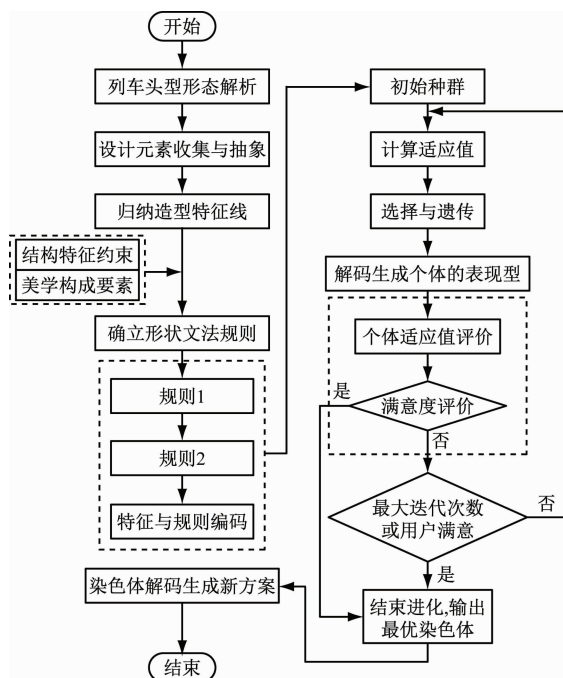


图 2 研究框架

Fig. 2 Research framework

2 设计验证

头型设计是列车工业设计的重点也是产品系列化设计的着力点,以磁悬浮列车头型为例,其头型的美学特征与其他类型轨道车辆相比具体体现在以下几个方面:① 车体表面平滑,摩擦阻力更小。车钩、车灯等设备全部被包裹起来,头尾部没有任何突出车体表面的物体,传统列车的排障器部分也被完全封闭,将冲向车体的气流引向车体两侧;② 横截面形状圆滑,车体侧壁上下均向内收缩,横截面形状接近圆形从而减小横风影响;③ 列车头部更加细长,“斜鼻型”造型符合空气动力学理论,具有显著的速度特征。

2.1 头型设计特征提取

头型特征包括大形态、侧面轮廓、前脸分割、车灯形态等方面,为提取设计特征构建形状文法准则,将头型的复杂三维型面转换为二维的关键视觉特征线进行研究。邀请 60 名从事工业设计的设计师与学生(年龄平均值 M 为 21.833,标准差 SD 为 4.005)对图 3 中的 5 种磁悬浮列车头型的各个要素的重要度进行主观测评,并按照 5 分制量表打分,最后求取均值。重要度排名前 5 名的列车头型美学特征要素如表 2 所示。

表 2 特征元素重要度

Tab. 2 Importance of feature elements

序号	形状元素				
	大形态	前脸分割	侧面轮廓	侧围板	车灯
1	4.51 0	3.520 0	3.520 0	4.200 0	4.200 0
2	3.82 0	3.890 0	3.890 0	3.250 0	3.500 0
3	4.76 0	4.710 0	4.710 0	4.730 0	4.230 0
4	4.82 0	4.620 0	4.620 0	4.850 0	4.350 0
5	4.23 0	4.800 0	4.800 0	3.520 0	4.220 0
平均值	4.428 0	4.298 0	4.308 0	4.100 0	4.110 0
标准差	0.368 6	0.399 9	0.509 3	0.304 6	0.636 8

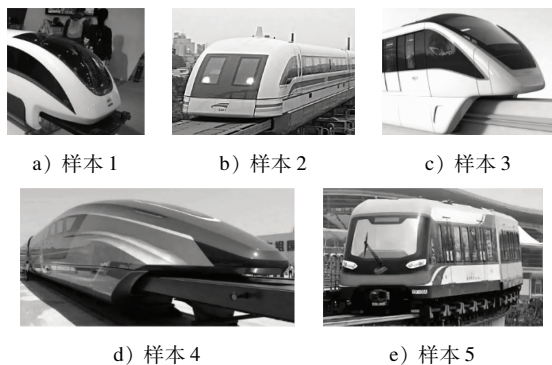


图 3 特征线评价样本

Fig. 3 Feature line evaluation sample

以“脸谱”元素为例,将列车头型进行特征线归纳与提炼处理。对大形态、前脸分割、侧面轮廓线、侧围板特征及车灯形态分别进行提取。归纳头型特征的推演步骤规律如图 4 所示。

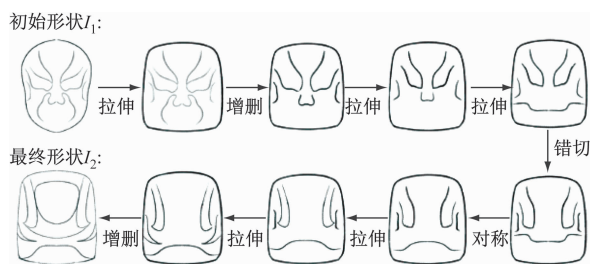


图 4 列车前脸造型推演步骤

Fig. 4 Train front face modeling deduction steps

2.2 形状文法规则的确立与实施

基于特征元素重要度提取关键造型特征线,细化为纵向特征线,车头引擎盖线、风挡轮廓线、侧窗轮廓线、前脸横向特征线、防爬器特征线、车灯特征线等 7 类。结合从自然素材中提取的设计元素与 7 类设计特征制定的形状文法规则见表 3。设计特征元素的生成规则以离散形式进行表示,各特征之间

的位置关系由头型的结构数据参数约束。设计师可根据形状规则进行方案演进,直至产生符合预期风格的方案:① 搜集与提取意象元素,确定设计风格;② 在分析归纳意象素材基础上提取设计元素,包括特征线元素与图案等,构建设计元素与产品美学特征之间的映射关系;③ 依据头型的功能结构,匹配设计特征线;④ 在头型结构数据和美学特征的约束下,拟定形状文法推演规则并且执行,产生新一代的形状;⑤ 将新生成的二维形状渲染为三维头型方案。

2.3 方案编码和初始方案生成

针对头型设计特征进行编码,以向量结构来表

示头型的特征参数。车辆头型方案作为进化过程中的染色体,根据形状文法规则将设计特征分为 7 部分,选择二进制编码,该编码方法更简单清晰且可容纳大容量的样本。“0”和“1”的不同组合表示设计特征变量,二进制编码方案如图 5 所示, x_1 为车头纵向特征线形状, x_2 为车头引擎盖形状, x_3 为风挡形状, x_4 为侧窗形状, x_5 为车头横向特征线形状, x_6 为防爬器区域形状, x_7 为车灯形状。代码的长度取决于每个设计特征中设计元素的数量,每个方案总计需要 27 位二进制编码,随机选取方案作为初始种群。当遗传算法结束获得满意方案时,根据方案编码方式解码。

表 3 形状文法规则

Tab.3 Shape grammar rules

特征 x_1	特征 x_2	特征 x_3	特征 x_4	特征 x_5	特征 x_6	特征 x_7
1	9	19	27	33	44	54
2	10	20	28	34	45	55
3	11	21	29	35	46	56
4	12	22	30	36	47	57
5	13	23	31	37	48	58
6	14	24	32	38	49	59
7	15	25		39	50	60
8	16	26		40	51	61
	17			41	52	62
	18			42	53	63
				43		64

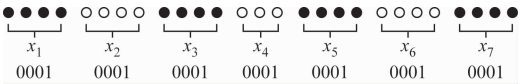


图 5 二进制编码方案

Fig.5 Binary coding scheme

2.4 适应度评价

考虑到用户对于方案的审美偏好认知具有模糊性和渐进性,而且精确赋值容易带来用户疲劳,因而个体适应度采用模糊赋值方法,采用高斯隶属函数代表的模糊数表示进化个体的适应度值(公式(1)),高斯型隶属函数的参数 σ 代表隶属度函数曲线的宽度,参数 c 代表隶属度函数曲线的中心。用户根据其认知来确定中心值和模糊数表示的宽度,其中宽度由模糊语气词确定,考虑了 3 类语气词,分别为“大约”、“符合”、“很符合”。采用模糊数例如“大约”来表示个体适应度值,更贴近用户认知的模糊性,当进化收敛或用户认为进化结果满意时,则手动终止种群进化。基于 MATLAB 软件提供的 GUI 平台开发原型系统,用户适应度评价的交互界面如图 6 所示,界面展示了 6 个概念方案供用户选择评价。

$$f(x,\sigma,c) = e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}} \tag{1}$$

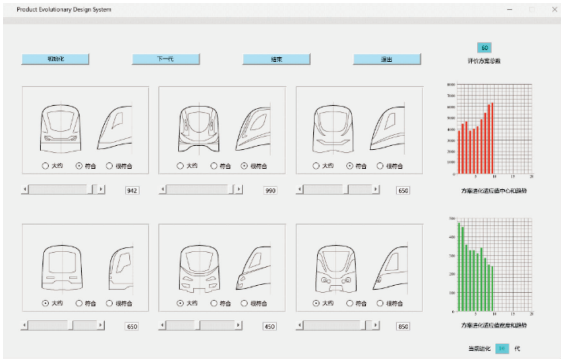


图 6 用户评价界面截图

Fig.6 User evaluation interface screenshot

式中:

σ —隶属度函数曲线的宽度;

C —隶属度函数曲线的中心。

2.5 交叉和变异

遗传操作采用轮盘赌选择法。种群规模设置为 8,采用双点交叉法进行杂交过程,交叉概率设置为 0.6,变异概率取值 0.2。在两个选择的父代样本中随机确定基因的交叉位置,并且替换和重新组合生成新一代的编码,满足用户审美偏好的方案传递给下一代。为了防止种群过大时导致输出结果陷

入局部最优,在变异过程中随机交换编码 0 和 1 位置,新代码将改变部分设计特征,进一步促进新方案的生成,并保持全局搜索。

2.6 验证

邀请了 22 名工业设计人员作为被试,参数设置如表 4 所示。经过 15~20 次迭代,被试可以在 10 min 内找到自己喜欢的设计风格,经过多次迭代演进,搜索空间逐渐缩小,当迭代进化终止时输出满意解。种群生成的二维概念方案经渲染后列车前脸效果如图 7 所示。

表 4 参数设置

Tab.4 Parameter setting

编码	种群规模	交叉概率	变异概率	进化代数
二进制	8	0.6	0.2	20



图 7 渲染后列车前脸效果图

Fig.7 Rendered front view of the train

3 结论

1) 以中车大连机车车辆有限公司的磁悬浮轨道车辆为例,利用形状文法演绎提取了文法规则,构建了列车头型特征编码,在算法中设置特征线约束机制,以保持各种造型特征线合理与精确的匹配。

2) 采用高斯隶属函数代表的模糊数表示进化个体的适应度值,较传统的交互式遗传算法的精确赋值,可以降低用户评价过程中的心理负担。随着进化代数的增加,用户的评价时间逐渐减少,这体现了用户对方案理解的渐进性,也说明了本研究方法符合用户的认知模式。

3) 本研究仍然存在不足,仅用于列车头型的二维概念设计,特征线的生成演化规则仍然需要细化扩展,精确的产品三维形态生成式设计探索以及形态与色彩涂装设计的结合研究将是未来研究的重点。

参考文献

[1] XIANG Z R, ZHI J Y, HUANG J H, et al. A systematic approach for streamlined head form design and evaluation of Chinese

high-speed train[J]. International Journal of Rail Transportation, 2019, 7(2): 117.

[2] MANDOW L, PÉREZ-DE-LA-CRUZ J L, RODRÍGUEZ-GAVILÁN A B, et al. Architectural planning with shape grammars and reinforcement learning: Habitability and energy efficiency[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2020, 96: 103909.

[3] AGIRBAS A. Algorithmic decomposition of geometric Islamic patterns: a case study with star polygon design in the tombstones of Ahlat[J]. Nexus Network Journal, 2020, 22(1): 113.

[4] ALCAIDE-MARZAL J, DIEGO-MAS J A, ACOSTA-ZAZUETA G. A 3D shape generative method for aesthetic product design[J]. Design Studies, 2020, 66: 144.

[5] MATA M P, AHMED-KRISTENSEN S, SHEA K. Implementation of design rules for perception into a tool for three-dimensional shape generation using a shape grammar and a parametric model[J]. Journal of Mechanical Design, 2019, 141(1): 011101.

[6] 陈威,董石羽,向泽锐. 基于襄阳三国文化的轻轨车辆外观造型设计研究[J]. 包装工程, 2017, 38(12): 145.

CHEN Wei, DONG Shiyu, XIANG Zerui. Form design of LRV based on culture of three Kingdoms in Xiangyang[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(12): 145.

[7] 孙元,闫宇婷. 基于形状文法的城轨头型相似性设计研究[J]. 设计, 2021, 34(7): 122.

SUN Yuan, YAN Yuting. Research on the similarity design of urban rail head based on shape grammar[J]. Design, 2021, 34(7): 122.

[8] HAN J X, MA M Y, WANG K. Retracted article: product modeling design based on genetic algorithm and BP neural network[J]. Neural Computing and Applications, 2021, 33(9): 4111.

[9] WU Y. Product form evolutionary design system construction based on neural network model and multi-objective optimization[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2020, 39(5): 7977.

[10] LI Y, ZHU L. Product form design model based on the robust posterior preference articulation approach[J]. Concurrent Engineering, 2019, 27: 126.

[11] 张卓,丛洪莲,蒋高明,等. 基于交互式遗传算法的 Polo 衫快速款式推荐系统[J]. 纺织学报, 2021, 42(1): 138.

ZHANG Zhuo, CONG Honglian, JIANG Gaoming, et al. Polo shirt rapid style recommendation system based on interactive genetic algorithm[J]. Journal of Textile Research, 2021, 42(1): 138.

· 收稿日期:2022-08-26 修回日期:2022-11-17 出版日期:2024-10-10

Received:2022-08-26 Revised:2022-11-17 Published:2024-10-10

· 第一作者:戚百灵,高级工程师,qibailing0810@163.com

通信作者:孙元,副教授,dutid@dlut.edu.cn

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license