

基于形状文法的渔业机械设备造型设计

袁浩, 薛子安, 张先阳, 赵德安
(江苏大学, 江苏 镇江 212013)

摘要: **目的** 更好地平衡渔业机械设备的审美性与功能性。**方法** 提出一种形状文法和产品形态设计中多约束相结合的设计流程。基于形状文法, 通过将约束条件转化为量化指标的方式, 以感性约束与物质性约束为导向确定文法规则, 并结合参数化推演确定方案、优化设计。最后结合河蟹养殖池塘智能投饵船的造型设计实践进行可行性验证。**结果** 通过实践验证可得, 投饵船的造型符合风格意象定位, 且在功能使用方面易用、实用。**结论** 此设计流程可以在初期降低概念设计与最终成品的偏差, 最大程度地减少重复设计, 从而缩短开发周期、降低成本、提高市场竞争力, 同时也可以为渔业机械设备有效进行造型设计提供指导。

关键词: 形状文法; 多约束; 投饵船; 造型设计

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)20-0112-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.20.012

Modeling Design of Fishing Machinery Equipment Based on Shape Grammar

YUAN Hao, XUE Zi-An, ZHANG Xian-Yang, ZHAO De-An
(Jiangsu University, Jiangsu Zhenjiang 212013, China)

ABSTRACT: To better balance the aesthetic and functionality of fishing machinery equipment. A design process that combines shape grammar and multiple constraints in product form design is proposed. Based on shape grammar, by transforming constraints into quantitative indicators, grammatical rules are determined based on perceptual constraints and material constraints, and then combined with parameterized deduction to determine the plan and optimize the design. Finally, the feasibility verification is carried out by combining the design practice of intelligent baiting ship in crab culture pond. Through practical verification, it can be obtained that the shape of the bait-dropping boat conforms to the style image positioning and is easy to use and practical in terms of functional use. This design process can reduce the deviation between the conceptual design and the final product in the initial stage, minimize the repeated design, thereby shorten the development cycle, reduce the cost, and improve the market competitiveness. At the same time, it can also provide guidance for effective design of fishing machinery equipment.

KEY WORDS: shape grammar; multiple constraints; baiting ship; form design

近几年来, 我国在政策的支持下渔业发展迅速, 但也浮现出许多问题, 主要表现为行业生产效率低、门槛高、劳动力短缺、养殖基础设施不够完善、饵料投放依赖人工、养殖水域污染等^[1-2]。渔业机械设备

的出现是解决这些问题的一个主要突破口。渔业机械设备可以有效提高养殖户的投饵均匀性和效率, 减小水域污染给水产品带来的疾病危害, 提升水产品品质, 实现科学养殖^[3]。虽然目前已经形成了相关科研

收稿日期: 2022-05-03

基金项目: 国家自然科学基金项目“池塘河蟹养殖高效精准投饵系统关键技术研究”(62173162); 广东省重点领域研发计划项目“海水池塘生态工程化养殖技术与模式”(2020B0202010009); 江苏省现代农机装备与技术示范推广项目(NJ2022-28)

作者简介: 袁浩(1975—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为智能机械装备设计、产品造型设计研究。

通信作者: 薛子安(1997—), 男, 硕士生, 主攻工业设计。

成果,但这些研究过度注重技术的应用而缺少系统性的工业设计,导致渔业机械设备在审美性与功能性方面缺少一种平衡关系。例如在渔业养殖方面使用的智能投饵船存在着造型整体性差、美观性低、不易操作、对使用环境考虑不全面等问题。本研究旨在通过形状文法与产品形态设计中多约束相结合的造型设计流程,研究出一种解决渔业机械设备造型设计的方法,并以智能投饵船的设计实践进行验证。对渔业机械设备而言,在进行造型设计研究时,除了考虑产品风格形象等感性因素外,还需考虑功能结构、材料工艺、表面处理、人机环境等占比较大的物质性因素。因此,如何将物质性因素与感性因素的设计变量指标量化进行形状文法研究就显得极为重要。

1 研究方法

1.1 形状文法

形状文法是一种利用推演规则衍生出新形状的设计与分析方法。最初由乔治·斯蒂尼^[4]、詹姆斯·吉普士、威廉·米歇尔等人在 20 世纪 70 年代提出。因其具有节省人力、缩短周期、保持形态的延续性等特点,所以被有关设计者和学者应用于工业设计、艺术设计等领域。

根据形状文法的定义,公式为: $SG = (S, L, R, I)$, 其中 SG 为 S 通过推演规则生成的新形状集。 S 表示由初始形状构成的集, L 表示由符号构成的集, R 表示由推演规则构成的集, I 表示用于推演的初始形状^[5]。初始形状可通过推演规则衍生出新的形状,其

规则如图 1 所示。

目前国内外针对形状文法在形态设计上的研究可大致分为四类:(1)结合感性工学,利用语义差异法对产品进行意象研究;(2)结合产品族理论,引入产品基因等概念对产品形态转化的相似性、继承性进行研究;(3)结合参数化,运用可视化算法编程、参数化建模等技术手段进行形状推演研究;(4)结合算法,利用在解决工程问题上应用成熟的神经网络、进化算法进行自动化形态生成与迭代研究。Rosidah 等^[6]通过对品牌特征和形状文法关系的研究,得出了形状文法可以作为一种方法用来捕捉品牌标识并生成新形状;Ang 等^[7]将形状文法的形状合成能力与进化算法的进化和优化能力结合在一起,以支持新产品形状的生成和评估;彭国华等^[8]通过用户感知,提取其中最具有代表性的核心设计因子,以形状文法进行推敲;王伟伟等^[9]提出了基于形状文法的产品形态创新设计方法和模型,并以电动踏板车的设计为例进行了验证。

然而目前研究仍存在一些亟待解决的问题:(1)基于形状文法,引入感性工学和产品族理论后,虽然能解决产品品牌识别、风格继承、造型同质化等问题,但是缺少对产品功能的关注,不利于缩短周期,快速响应市场;(2)引入参数化和算法辅助后,虽然可以优化方案、缩短周期、提高效率,但是无法有效解决用户或设计师的感性因素,如审美、心理情感、直觉等。因此可以得知,对于形状文法的研究,仅进行单一研究存在一定的局限,需要进行学科融合、方法创新才能更加高效地解决实际问题。



图 1 形状文法推演规则示意图
Fig.1 Diagram of shape grammar deduction rules

1.2 产品形态设计中的多约束关系

产品设计的过程是自上而下的,在设计过程中会受到多方面因素的制约。作为产品设计中一个重要的环节,产品形态设计也会受到影响。图2为渔业机械设备形态设计中的多约束关系,在设计过程中既要综合考量产品的感性因素,又要解决形态与产品物质性因素的冲突,还要协调好产品与用户、环境之间的关系。产品形态设计的主要目标是实现功能需求与审美需求的统一,从本质上来说就是对设计中存在的约束与冲突的一个求解过程,优秀的设计方案应该是对所有设计约束的一种巧妙的折中,或者是最大程度的满足。

现代工业设计追求的是多约束下的创造性设计,未来渔业机械设备的发展也并不会仅仅注重技术的开发,也会越来越多地注重工业设计,注重人-机-环境的和谐统一,注重产品审美性与功能性的协调。因此为了得到更加可行有效的结果,在设计过程中,设计人员必须进行分析 and 推理并做出有效的决策与评价。

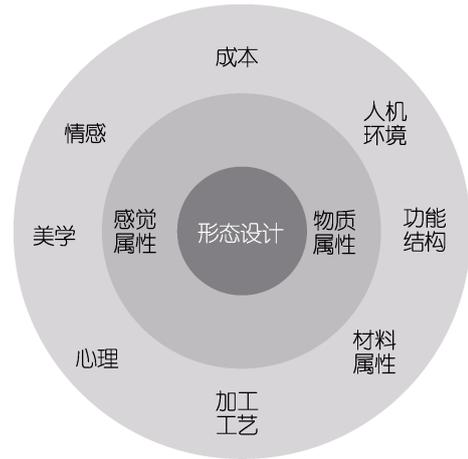


图2 渔业机械设备设计中的多约束关系
Fig.2 Multi constraint relationship in the design of fishing mechanical equipment

1.3 研究模型构建

为了有效解决以上问题,提出了一种以产品形态设计中多约束为导向的推演设计流程。图3为推演模

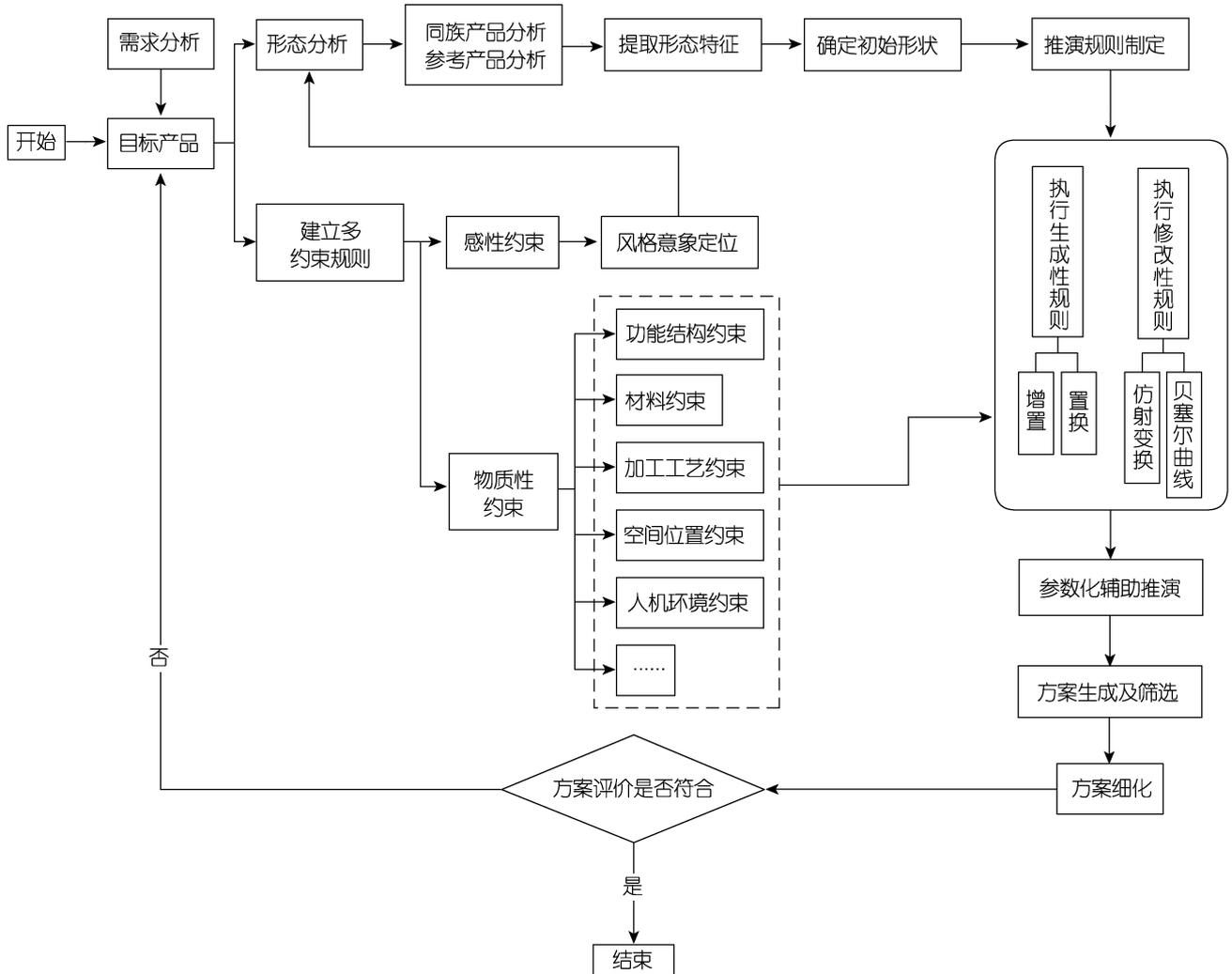


图3 多约束推演模型
Fig.3 Multi constraint deduction model

型, 其中所涉及的研究内容有: (1) 对目标产品设计要求进行分析并构建约束规则; (2) 结合感性约束进行风格意象定位并收集样本, 提取产品形态特征, 通过设计形态分析法 (Design Form Analysis, DFA) 确定初始形状; (3) 对初始形状进行参数化描述, 并结合产品的物质性约束确定推演规则; (4) 借助计算机进行推演, 对产品造型以外的工程问题进行优化, 并提高效率; (5) 将生成的方案进行筛选并进行细化形成最终方案, 最后对产品设计方案进行评价。

2 智能投饵船约束建立

2.1 总体设计需求

智能投饵船是适用于河蟹养殖的无人船, 材质为共聚聚丙烯 (Polypropylene, PP) 工程塑料。采用全球定位系统 (Global Positioning System, GPS)、地理信息系统 (Geographic Information System, GIS) 技术并结合惯性导航仪、方位传感器等手段实现自动巡航。料仓、药仓采用一体化设计, 体积小, 自重轻, 载重大, 配合电机可实现自动投料、自动施药。动力采用锂电加明轮的方式, 同时配置转塘轮, 实现一机多塘使用。

2.2 感性约束

感性意象是人对于物心理上产生的感受或期待, 代表了用户对产品特征的感知及主观感受。通过对感性意象的研究能帮助设计师清晰地了解用户的情感需求, 指导设计师进行针对性的设计。

本研究以智能投饵船为对象, 首先对样本和感性意象词汇进行收集, 通过养殖户调研、网络、文献、杂志等方式收集, 最终得到 36 个感性意象词汇, 如表 1 所示。

表 1 感性意象词汇收集结果

Tab.1 Results of perceptual image vocabulary collection

感性意象词汇			
直线的	平稳的	流线的	简洁的
实用的	前卫的	现代的	轻量的
独特的	小巧的	安全的	硬朗的
和谐的	可靠的	坚固的	便利的
智能的	功能的	协调的	易用的
轻巧的	时尚的	整体的	严谨的
美观的	秩序的	干练的	简单的
前瞻的	人性的	耐用的	刚毅的
专业的	方正的	节能的	大气的

由于过多的词汇在后续感性评价过程中会对被测者造成巨大的负担, 因此需将 36 个意象词汇进行聚类, 从而确定更具代表性的感性意象词汇。通过相似度评分调研得到 36×36 的相似系数矩阵, 然后利用 SPSS 进行系统聚类分析, 聚类分析是研究多要素事

物分类问题的方法。聚类的依据为距离越小、相似性越大的感性意象词最先合并为一类, 反之则最后合并。根据聚类分析的结果, 最终筛选出 6 个感性意象词并将其反义词补充完整, 分别为: X1 可靠的一易损的、X2 简洁的一复杂的、X3 实用的一花哨的、X4 智能的一死板的、X5 轻巧的一笨重的、X6 和谐的一凌乱的。

最后利用这 6 对感性意象词汇对与收集的产品样本进行感性评价, 建立样本风格意象与感性认知的关联。选取 15 名被测者 (其中养殖户、设计师、工程师各 5 名) 利用语义差异法建立 7 级李克特量表 (从 -3 到 3 分) 探索样本的造型风格意象。如可靠的一易损的这一对感性词汇, -3 表示非常易损, -2 表示比较易损, -1 表示偏易损, 0 表示中立, 量表另一端则依次对应偏可靠、比较可靠和非常可靠。根据调查结果计算出均值如表 2 所示。

表 2 智能投饵船样本感性意象评价均值
Tab.2 Mean value of perceptual image evaluation of intelligent baiting ship samples

样本	X1	X2	X3	X4	X5	X6
S1	0.33	0.93	1.23	0.4	0.87	0.77
S2	0.33	0.67	0.93	0.03	0.70	0.50
S3	0.83	0.43	1.10	1.10	0.70	0.50
S4	-0.2	-0.03	0.47	0.50	-0.57	0.10
S5	0.8	0.53	0.87	0.53	-0.63	0.33
S6	-0.03	0.33	0.57	0.20	0.50	0.37
S7	0.43	0.6	1.13	0.53	0.77	0.73
S8	0.07	1.07	1.17	0.43	0.93	0.80
S9	0.47	0.47	1.17	0.47	0.43	0.53
S10	0.37	0.63	0.57	0.01	0.70	0.70

为进一步研究样本的感性意象, 需利用因子分析来对数据进行处理。通过因子分析可以得到影响智能投饵船造型的是哪些代表性的因子, 从而进行下一步分析。将数据导入 SPSS 进行降维处理, 得出相关数据图表, 其中总方差解释见表 3, 因子旋转后的成分矩阵见表 4。

表 3 因子分析输出解释的总方差表
Tab.3 Total variance table of factor analysis output explanation

成分	初始特征值			旋转载荷平方和		
	总计	方差百分比	累积/%	总计	方差百分比	累积/%
1	3.222	53.706	53.706	3.110	51.840	51.840
2	1.692	28.197	81.903	1.804	30.063	81.903

表 3 呈现了原始变量和提取主成分的贡献率 (即解释度) 以及累计贡献率, 主成分选择依据是特征根

表4 旋转后的成分矩阵
Tab.4 Rotated component matrix

	成分	
	1	2
易损的—可靠的	0.151	0.812
复杂的—简洁的	0.927	0.038
花哨的—实用的	0.689	0.613
死板的—智能的	-0.195	0.873
笨重的—轻巧的	0.881	-0.067
凌乱的—和谐的	0.969	0.05

大于1。由表3可知，特征根大于1的指标有两个，选取两个主成分对原样本数据的解释程度可达81.903%，说明这2个公因子包含了所有测量指标的主要信息。表4则很好地表达了原变量与选择主要因子之间的关系。由表4可知，复杂的—简洁的、笨重的—轻巧的、凌乱的—和谐的在第1个因子上载荷较高，倾向于描述投饵船的形态特征与整体风格感受。可以将其命名为外观造型。易损的—可靠的、花哨的—实用的、死板的—智能的在第2个因子上载荷较高，倾向于描述投饵船的使用功能、材料、实用性等方面，可以将其命名为物质功能。最终确定智能投饵船的2个主要风格意象为：外观上——简洁、轻巧、和谐，功能上——智能、可靠、实用。

2.3 物质性约束

作为小型渔业机械设备，智能投饵船的设计要在满足其物质功能要求的前提下，合理有效地进行造型的优化与设计，因此在设计中会受到物质性因素的诸多制约。

在功能结构上，其主要功能是实现自动投饵、施药、巡航及转塘。船体采用双浮体结构，通过两侧的明轮驱动实现前进、后退和转向运动。载重能力需400 kg左右。投饵部分料仓为斗型，装载120 kg饵料，底部饵料通过绞龙输送至后侧抛盘上方落下，通过高速旋转的抛盘向后方抛出，轨迹呈扇环型分布。此外在船仓背面需设有检修窗，方便维修。施药部分利用斗型料仓前部空隙构成原液仓，在水泵的作用下通过调节阀与水混合后经喷头喷出。药仓出口处采用软管连接，水泵等部件固定在船体上。转塘部分通过在明轮电机轴上加装齿轮，在船体底部加装可拆卸滚轮，借助池塘间堤埂上的轨道和齿条实现转塘作业。

在材料与工艺上，船体与船仓采用共聚PP工程塑料，其具有良好的抗酸碱腐蚀性、抗溶解性、抗冲击强度，同时共聚PP工程塑料的表面刚度强、抗划痕好，不会因为环境应力而导致划破开裂。明轮与转轴表面做防水处理，转轴采用高硬度不锈钢304材质。

在智能投饵船的总体空间布局上，需要根据其功能结构进行布局，由于人机尺寸与环境也会对布局产

生影响，因此在布局时还需要根据实际情况进行调整，最后得出合理的布局方案以及尺寸范围如图4所示。

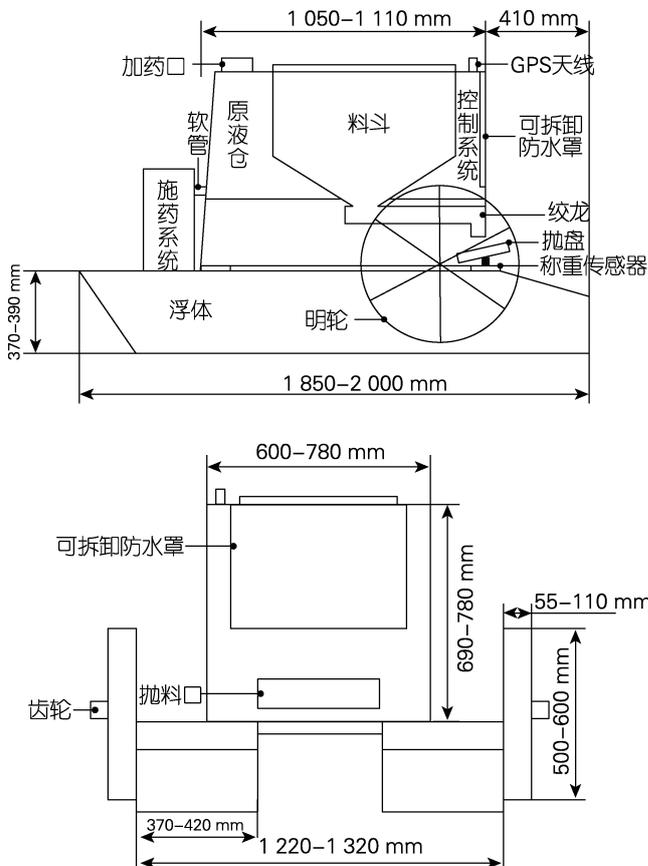


图4 总体空间布局图
Fig.4 Overall space layout

3 形态提取与推演

3.1 智能投饵船典型特征提取

为了确定智能投饵船的典型造型特征，邀请8名工业设计师与7名工程设计人员共计15人进行判断。结果如图5所示，可知船体与船仓的造型更为重要，占比大于其他造型特征，所以将船体与船仓作为典型造型特征。

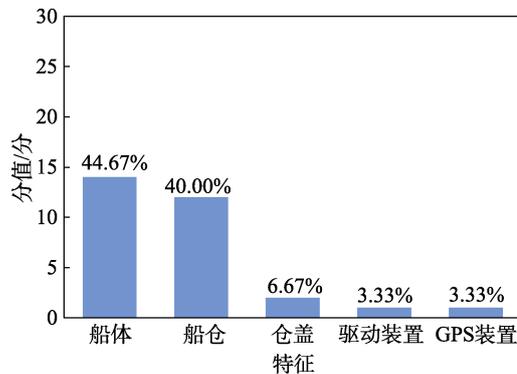


图5 智能投饵船典型特征分析柱状图
Fig.5 Histogram of typical characteristics of intelligent baiting ship

根据感性约束在外观造型上的意象定位, 收集和筛选可参考的投饵船同族产品构建集合。由于水质监测船在使用环境、外观风格上与投饵船极为相似, 因此选择水质监测船作为参考产品构建异族产品集合。

利用构建的同、异族产品集合提取可用于推演的形态元素, 提取的形态主要包括投饵船船仓侧视、正视、俯视的轮廓与表面细节特征, 船体侧视、正视的轮廓与表面细节特。征提取过程如图 6 所示。

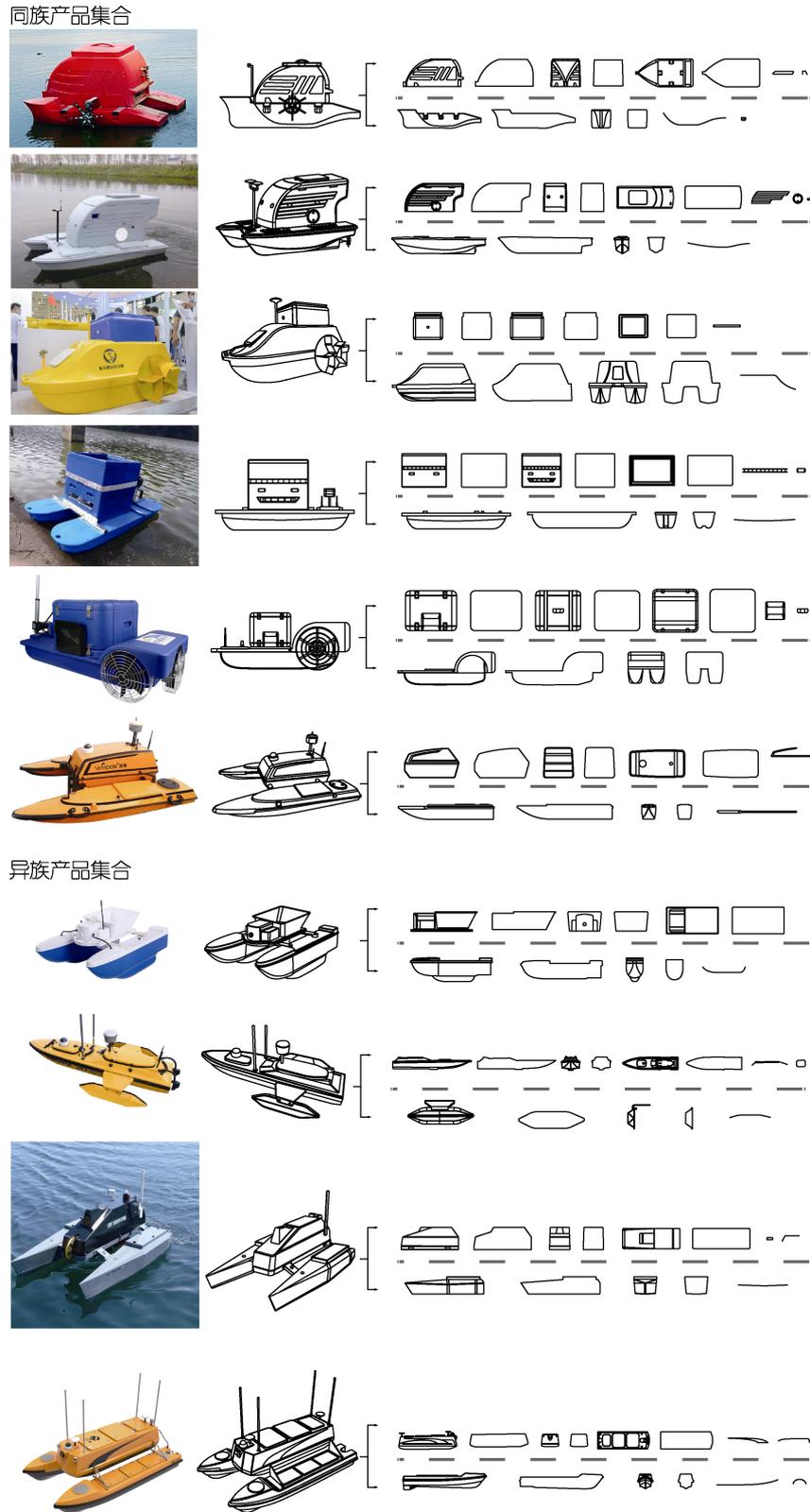


图 6 形态分析与提取
Fig.6 Morphological analysis and extraction

形态提取完成后，以问卷的形式邀请 15 名被测者，利用设计形态分析法 (DFA)，根据样本与特征一一对照进行判断，以强 2 分、弱 1 分、无 0 分作为评价标准，根据评分高低得出用作推演的初始形状。评价结果如表 5 所示。

3.2 初始形状参数化描述

参数化形状文法是在形状文法的基础上，通过对坐标点数值的描述将所有的形状参数化^[10]，因此这些原本定性的形状通过量化后便可以用精确的数值呈现出来。

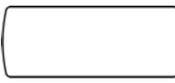
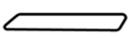
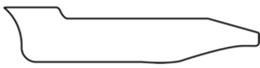
在引入参数化后，可以利用贝塞尔曲线的计算公式描述所有的形状，不同的形状具有不同数量的节点

与曲率控制点，通过文法推演规则的应用，改变这些点的坐标参数即可改变形状。以投饵船船仓的侧视图为例，除去不相关圆角，基于 Grasshopper 对形状进行参数化描述如图 7 所示。其中 H1-H6 均为节点，C1-C2 均为控制点，其余初始形状皆可进行如此描述。

完成描述后，综合目标产品的物质性约束，得到投饵船形状推演所应用的修改性规则为：平移 (R1)、缩放 (R2)、复制 (R3)、镜像 (R4)、错切 (R5)、贝塞尔变换 (R6)。生成性规则为：增删 (R7)。

在推演时须遵守的原则有：满足空间位置关系及尺寸；遵循最小化设计原则，降低成本，减少空间占据；遵循形式美法则，形态之间需统一和谐。

表 5 初始形状
Tab.5 Initial shape

	船仓侧视	船仓正视	船仓俯视	船体细节特征
典型特征				
	船体侧视	船体正视	船体细节特征	
典型特征				

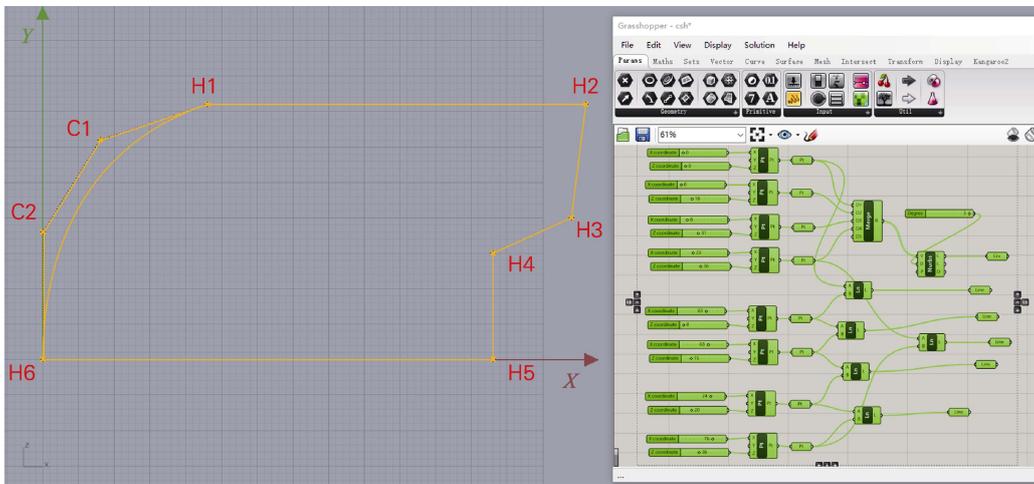


图 7 船仓特征线的硬点和控制点描述

Fig.7 Description of hard point and control point of ship's cabin characteristic line

3.3 执行推演

综合上述的推演规则、原则与约束规则，对完成参数化描述的初始形状进行推演。图 8 是推演过程的部分示意图，以船仓侧视形态为例，S 表示为初始形态，运用缩放 (R2)、平移 (R1)、贝塞尔变换 (R6)、错切、复制 (R5+R3) 生成新图形 S1，再次运用规则可得到新图形 S2、S3，依此类推最终完成其余的形态推演。

结合目标产品的空间位置约束，将推演后的图形进行组合并根据实际情况进行细微调整，得到如图 9

所示的三个方案。经过专家小组综合考虑可行性、技术条件、成本后，筛选得出方案三为最佳。

4 方案展示与评价

将方案三的形态特征进一步优化，在软件中完成三维建模，再一次根据设计需求、物质性约束进行调整，然后在 Keyshot 软件中完成渲染。投饵船效果图与转塘使用场景示意图见图 10。最终以此方案完成样机制作并调试。

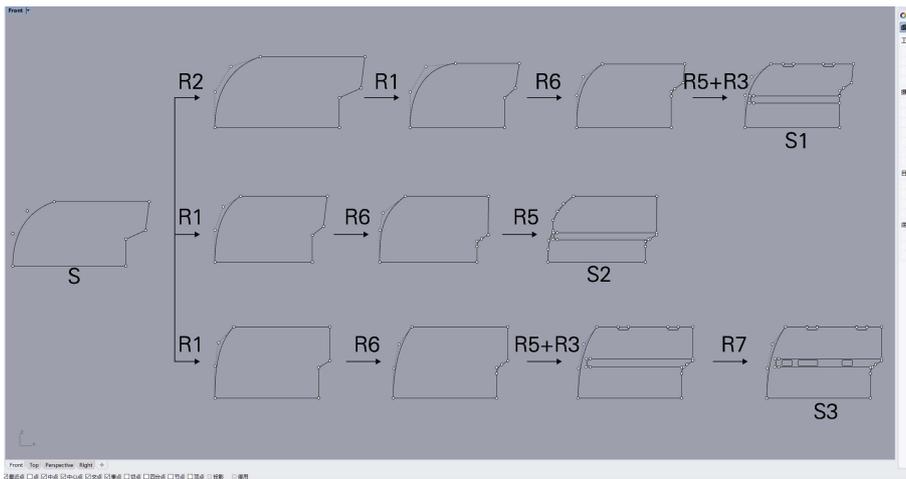


图 8 部分形态推演过程示意
Fig.8 A sketch of the process of partial morphological deduction

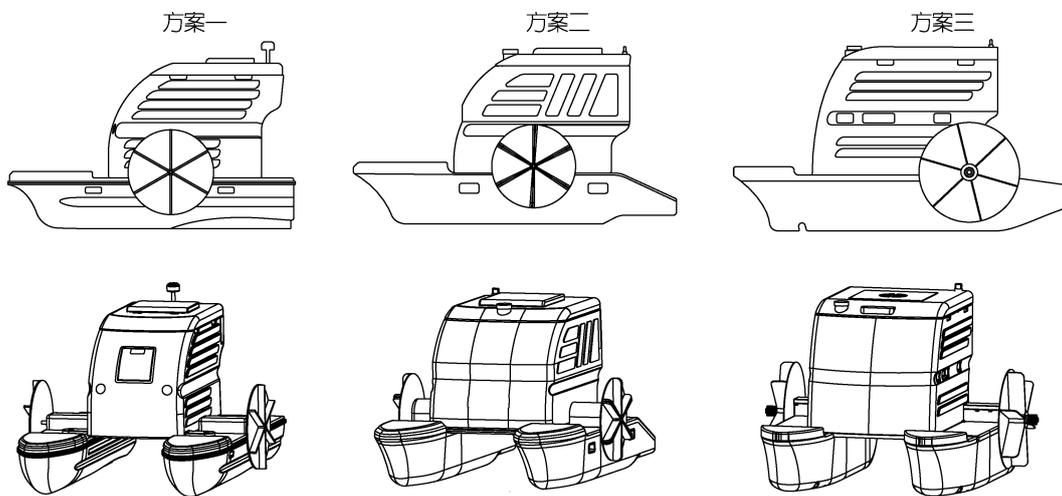


图 9 组合方案
Fig.9 Scheme combination



图 10 智能投饵船效果图展示
Fig.10 Intelligent baiting ship renderings show

对图 10 的效果图进行去色处理, 排除色彩因素的影响, 利用语义差异法对 15 名被测者进行访问调研, 从而验证产品方案与风格意象的匹配度。同时选取其中的 5 名养殖用户在使用过投饵船样机后, 对他们进行访谈。意象评分结果如表 6 所示, 语义差异词的平均值都大于 1, 因此可以说明该设计方案符合在外观上的定位。在产品功能方面, 5 名养殖户有 3 名认为此投饵船功能实用、操作简单、转塘方便, 投饵均匀且高效。有 2 名认为还可以继续改进。因此也说

明此设计方案也基本符合在物质功能上的定位。

表 6 评分结果表
Tab.6 Scoring result table

意象词汇	总分	平均分
复杂的一简洁的	21	1.400
笨重的一轻巧的	16	1.067
凌乱的一和谐的	17	1.133

5 结语

本文以智能投饵船设计为例,探索了以形态设计中多约束为导向的形状文法研究在渔业机械设备造型设计上的运用。将感性约束与物质性约束这些设计变量的指标量化并用于方案推演及优化,最终验证结果表明该方法可以有效在设计初期把握造型实现的技术方向,避免产品造型与功能相脱节等问题。在后续的研究中,如何合理增加量化指标,结合参数化并融入智能算法进行三维形态的形状文法研究是其重点。

参考文献:

- [1] 孙月平, 赵德安, 洪剑青, 等. 河蟹养殖船载自动均匀投饵系统设计及效果试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(11): 31-39.
SUN Yue-ping, ZHAO De-an, HONG Jian-qing, et al. Design of Automatic and Uniform Feeding System Carried by Workboat and Effect Test for Raising River Crab[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(11): 31-39.
- [2] 胡庆松, 程文平, 李俊. 移动式虾塘投饵装置偏心抖料及抛饵系统优化与试验[J]. 上海海洋大学学报, 2016, 25(5): 794-800.
HU Qing-song, CHENG Wen-ping, LI Jun. Eccentric Shaking and Bait Throwing System Optimization and Experiment of the Mobile Shrimp Feeding Machine[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2016, 25(5): 794-800.
- [3] 纠手才. 海水养殖智能装备产业化推进过程中的关键问题研究——以长三角智能投饵船产业化为例[D]. 上海: 上海海洋大学, 2018.
JIU Shou-cai. To Explore the Key Question in the Industrialization Process of Mariculture Intelligent Equipment —Use the Yangtze River Delta Intelligent Feeding Boat as an Example[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2018.
- [4] STINY G. Introduction to Shape and Shape Grammars[J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 1980, 7(3): 343-351.
- [5] 伍琴, 吕健, 潘伟杰, 等. 基于案例的文化创意产品设计方法研究[J]. 工程设计学报, 2017, 24(2): 121-133.
WU Qin, LYU Jian, PAN Wei-jie, et al. Research on Cultural and Creative Product Design Method Based on Case[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2017, 24(2): 121-133.
- [6] JAAFAR R, MCKAY A, DE PENNINGTON A, et al. Interactions between Brand Identity and Shape Rules[M]//Design Computing and Cognition \u201910. Dordrecht: Springer Netherlands, 2011: 269-284.
- [7] NG K W, ANG M C, PHAM D. Combining the Bees Algorithm and Shape Grammar to Generate Branded Product Concepts[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture, 2013, 227(12): 1860-1873.
- [8] 彭国华, 刘凯雄. 唐代织锦中含鸾鸟纹的设计因子提取及应用研究[J]. 丝绸, 2020, 57(10): 111-118.
PENG Guo-hua, LIU Kai-xiong. Research on Design Factor Extraction and Application of Brocade Bird Pattern with Ribbon Holding in Mouth in Tang Dynasty[J]. Journal of Silk, 2020, 57(10): 111-118.
- [9] 王伟伟, 杨延璞, 杨晓燕, 等. 基于形状文法的产品形态创新设计研究与实践[J]. 图学学报, 2014, 35(1): 68-73.
WANG Wei-wei, YANG Yan-pu, YANG Xiao-yan, et al. Method of Product Form Design Based on Shape Grammar[J]. Journal of Graphics, 2014, 35(1): 68-73.
- [10] 陈满儒, 李阁, 王伟伟. 基于感性工学和形状文法的智能手表造型设计研究[J]. 机械设计与制造工程, 2016, 45(11): 82-85.
CHEN Man-ru, LI Ge, WANG Wei-wei. Modeling Design of Smart Watches Based on Kansei Engineering and Shape Grammar[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2016, 45(11): 82-85.

责任编辑: 马梦遥