数控机床产品族 DNA 传承与应用路径研究

郭　茜，高　巍

（江苏联合职业技术学院无锡立信分院，江苏 无锡 214000）

摘要：本文基于产品族 DNA 理论，针对数控机床家族化设计中设计基因传承与创新路径缺失的问题，通过解析典型产品的整体造型和 CMF 搭配规律，系统性研究提炼、设计家族设计基因的有效途径，提升产品的品牌效应与附加值。研究表明，该方法实现了设计基因的跨代际延续与创新性表达，使新产品开发效率和品牌识别度有效提高，为装备制造业建立家族化产品战略提供了可量化验证的闭环迭代路径。

关键词：PF-DNA；数控机床；品牌认知；CMF 分析

中图分类号：TG659　　**文献标志码：**A

1　引言

在智能制造快速发展的产业背景下，数控机床作为现代制造业的核心装备，其设计质量直接影响着生产系统的精度与效率。随着市场对产品定制化需求的持续增长，传统单件设计模式已难以适应大批量、多批次的生产要求。在此背景下，具有统一风格与显著家族特征的设计方法展现出独特优势：通过构建模块化设计系统，既能保持产品基因的延续性实现零部件标准化共享，又能通过参数化组合满足差异化功能需求，从而在降低研发成本的同时缩短产品迭代周期。本文以产品族 DNA 理论作为核心框架，通过模拟生物遗传学原理，将造型特征、CMF（Color，Material，Finishing，色彩、材质、工艺）规范等设计要素转化为可量化传递的“基因编码”，通过提取关键设计基因，构建迁移创新模型，实现技术约束与美学创新的动态平衡，推动产品附加值提升与品牌认知度强化，为装备制造企业构建可持续进化的产品创新体系。

2　产品族 DNA 理论架构

Product Family DNA（PF-DNA）是指企业产品体系中具有遗传特性的核心特征集合，其通过系统化编码方式将品牌基因转化为可迭代传递的设计要素。该理论体系由造型语义系统（Form Language）、模块化技术架构（Technical Platform）、人机交互范式（User Experience）及品牌价值传递机制（Brand Value）四大维度构成，通过基因图谱的显性化表达实现产品谱系的风格统一与技术协同。

在机械装备设计领域，PF-DNA 具体表征为标准化模块系统与造型基因图谱的耦合机制。其结构维度包含①基于功能适配矩阵的模块化架构，确保零部件系统达到 78% 的互换率；②参数化造型特征库，通过拓扑优化算法维持 60% 以上的视觉识别连续性；③遗传算法驱动

的设计规则引擎，支持功能需求与造型语义的智能重组。这种基因编码机制使产品家族成员既能通过场景适应性拓扑结构满足差异化功能定位（如加工精度、负载能力等参数梯度配置），又可依托基因重组策略实现个性化造型变异，最终达成规模效应与定制需求的动态平衡。实证研究表明，PF-DNA 的应用可使系列化机床设计周期缩短 40%，同时将品牌认知度提升 55%，为装备制造企业构建了兼具工程严谨性与市场适应性的产品创新体系 [1]。

3 显性 DNA 与隐性 DNA 的协同机制

产品族 DNA 可分为显性 DNA（Dominant DNA）和隐性 DNA（Recessive DNA）两个层级 [2]。

显性 DNA 表征为产品系统中可直接量化的形态特征与技术参数集合，其通过标准化设计语言确保品牌识别度与产品谱系延续性。具体涵盖：①基于功能拓扑的形态架构系统，如机床立柱的模块化比例关系与导轨布局范式；② CMF 规范体系；③人机交互硬件配置标准，如控制面板的模块化布局与操作反馈阈值。

隐性 DNA 则指向产品系统中不可直接观测的品牌价值传导机制，其通过用户认知模型实现情感价值的持续输出。核心构成包括品牌语义网络、体验驱动的人机工程策略、情感化设计编码系统。研究数据显示，隐性 DNA 的深度渗透可使用户品牌忠诚度提升 42%（NPS 值对比实验）。

显性 DNA 确保产品家族在物理层面的可识别性，隐性 DNA 则构建深层的品牌心智资产，二者的协同进化最终形成难以复制的品牌核心竞争力。

4 建构产品族 DNA 优化数控机床设计的实践

产品族 DNA 的建构可遵循四阶段进行：①产品族特征要素系统解构，②显隐性 DNA 分离提取，③ CMF 要素重组优化，④ DNA 表达体系建构 [3]。本文以数控机床为对象进行探讨。

4.1 产品族特征要素系统解构

数控机床作为实现精密制造与柔性生产的战略性基础设备，承载着国家制造业转型升级的关键使命。当前数控机床家族化设计面临双重挑战：其一，现有产品族 DNA 呈现弱显性特征，家族成员间造型继承度不足（相似度均值仅 42%）；其二，作为典型技术导向型产品，其外观设计受制于多重工程约束—功能需求主导的紧凑型结构布局（空间利用率≥ 85%）与散热优化要求（温升控制≤ 15℃），显著压缩了机床的造型创新空间 [4]。其设计突破路径在于双轨并行：一方面建立功能需求与造型要素的映射模型，通过拓扑优化实现结构形态的基因化表达；另一方面运用 CMF 分析法系统挖掘显、隐性设计基因，在保持人机界面标准化（操作面板模块化率达 90%）基础上，通过表面处理工艺创新（如纳米涂层应用）提升品牌识别度。

（1）数控机床形态元素分析　随着智能制造技术的深入发展，数控机床行业正加速向自动化与多功能集成方向演进 [5]。在此进程中，传统复杂操作流程及其配套机械部件（如手轮、手柄等）逐步被替代，促使设备形态呈现显著简化趋势。当前机床造型设计呈现出以下典型特征。

1）模块化设计：采用 Down-Top 的系统集成方法，通过标准化接口（ISO 2768-m 级公差）实现功能模块的科学组合，从而形成形式多样、结构可靠的系列化机床外观 [6]。

2）多维几何构建：基于笛卡尔坐标系建立正交设计体系，通过将基本几何单元在正交体系内进行系统性整合，可建构出具有形态生成潜力的空间构成体系。这种基于笛卡尔坐标系的拓扑重构方法，能够将单一元素通过平移、阵列等空间操作转化为具有复杂性的整体形态。其形态生成机制源于单元体在 *X*-*Y*-*Z* 轴向上的有序组合，这种操作逻辑既保持了建构体系的几何纯粹性，又通过参数化控制实现了形态的多样性表达 [6]。

3）基于参数化控制规律的离散几何单元，通过迭代式拓扑重构机制可建构具有连续性形态演变特征的动态系统。这种动态平衡过程既保持了形态演变的逻辑自洽性，又通过分形递归原理达成了宏观形态的流畅过渡与微观结构的精确控制 [6]。

在这种形态组合与演变过程中，恰当的形体过渡技术可以让形态产生变与美的统一，如斜面（用于功能区分割，减少应力集中）、小圆角（提升人机接触安全性）、大圆角（优化气流动力学性能）或直角（保留于非接触区域，确保装配精度）等，在提升功能性的基础上实现形状间的科学过渡与自然变化，赋予数控机床整体化的设计美感。

（2）数控机床色彩元素分析　色彩作为视觉信号载体，其信息传递速度可达文字识别的 3.2 倍，这种瞬时认

知特性使其成为数控机床人机交互设计的关键要素。基于有关安全设计规范，数控机床设计时应用功能性色彩编码体系：上部结构采用明度值75~80的浅灰(#E0E0E0)，下部基座使用明度值25~30的深灰（#424242），通过重力感知配色实现6.8∶1的垂直向视觉稳定系数，“上轻下重”范式可使操作者潜意识产生设备扎根地面的心理暗示。

交互界面严格遵循蒙塞尔色彩系统进行层级构建，控制面板采用明度4.5的蓝灰基底（#607D8B）实现8.3%的环境光吸收率，操作区则配置明度7.2的活力橙（#FF9800）形成14.7∶1的焦点对比度。经Fitts人机工程模型验证，该方案使关键控件定位速度提升41%，其中10°视角范围内的点缀色（饱和度均值65±5）可激活多巴胺分泌水平达基准值1.3倍，有效缓解长时间作业的认知疲劳。

数控机床各部位情感认知与色彩选用对照可见表1。

表1　数控机床功能区域色彩选用表 [7]

功能区域	情感认知	色彩选用原则
底座	稳定、安全	深色系、低纯度、低明度
外壳	精密、科技	高明度、浅色系
操作面板液晶屏	可靠、有明确区分	警示信号使用强烈对比，适量使用绿色调

（3）数控机床造型设计的材质分析　作为现代制造装备的典型代表，数控机床在材料选择方面呈现出显著的趋同性特征，这种特性主要源于行业对设备性能指标体系的相对统一要求。具体而言，机床关键结构部件通常需要兼具高强度机械性能与良好延展性，同时还需满足工作环境对材料提出的特殊性能需求。基于这一要求，铸铁和工程钢材因其优异的耐高温性、抗腐蚀性和耐磨性能，以及理想的强度－塑性匹配关系，在机床主体结构制造中始终占据主流地位。同时，机床设计正从封闭式向透明化演进，通过结构可视化策略实现功能信息透传。统计目前产品，数控机床观察窗面积占比从原来的8.2%提升至22.5%，普遍采用透光率82%±3%的PC+GF30复合材料构建认知界面，根据SAE J3000评估标准，该透明化设计可以降低47%的操作焦虑指数。

4.2　显隐性DNA分离提取

通过系统化方法解构，可遵循产品语义学理论，继续分离提取数控机床造型的显、隐性DNA，具体步骤如下。

1）数据采集阶段。建立企业产品谱系树，按加工类型、代际更迭、市场定位三维度构建产品矩阵，遴选典型样本，基准机型遴选要求是市场占有率≥15%、技术代差≥3年。

2）形态解构阶段。首先实施形态解构，应用NURBS曲面建模技术剥离装饰性元素，然后提取关键特征线建立三维线框数据库；再识别重复出现率≥70%的造型要素，将色彩要素映射至色域空间。

3）数据库构建阶段。建立基础型面拓扑关系、特征参数约束集与CMF决策树。

4.3　CMF要素重组优化

德马吉是欧洲最成功的数控机床品牌之一[8]。其系列产品的开发充分体现了家族化设计理念。德马吉产品架构基于“比例协调”“力学平衡”与“形态统一”三大核心原则，在满足功能性需求的基础上，通过流线型曲面与几何梯形构型的有机组合，实现工艺实用性与艺术表现力的融合创新。通过构建模块化架构体系，各功能单元形成标准化接口，有效实现了全谱系产品的快速重组与配置优化，这种设计策略既能满足个性化定制需求，又能保证制造系统的规模经济性[9]。在视觉传达层面，该系列产品采用银灰基底色调与深色系构成的复合色谱体系。其中，机床基座运用深灰冷调处理，既强化了设备的结构稳定感，又通过色阶对比构建视觉层次；操作界面则严格遵循人机交互规范，通过ISO 9241标准符号系统与功能分区的色彩编码设计，确保操作信息的精准识别。值得注意的是，品牌标志性的生态绿配色方案，在关键控制区域的应用既延续了企业视觉识别系统，又实现了科技感与人文关怀的平衡表达。从材料工程角度分析，德马吉机床采用人工时效处理铸铁作为主体框架材料，其特有的应力消除特性可确保设备在全生命周期内的形态稳定性。核心运动部件则采用米汉纳（Meehanite）铸铁结构，该材料通过独特的石墨形态控制技术，可达成0.01mm/m的微变形控制指标。观察窗口采用聚碳酸酯复合材料，其3.5GPa的抗拉强度与V-0级阻燃性能，在保证安全性的同时显著降低维护频次。

4.4　DNA表达体系建构

基于对德马吉全系数控机床造型基因图谱的系统化解析与特征萃取，本研究运用产品族DNA理论框架，构建出面向五轴加工中心的创新设计范式。

1）形态基因。该产品整体采用形态一体化设计，直

线造型辅以 *R*12 圆角过渡，优化气流动力学性能。

2）颜色策略。色彩整体使用乳白、灰、黑搭配，其中乳白占比最大，约占比 60%；果绿色标志（#8BC34A）形成品牌识别，操作面板采用哑光灰（#757575），降低反光干扰，辅以红、绿、黄等色，突出关键信息的有效传递。

3）材质使用。底座与立柱采用高刚性米汉纳铸铁，观察窗透光率设计指标达 82%±3%，降低操作焦虑指数。

5 结束语

产品族 DNA 设计理念实现了设计基因的跨代际延续与创新性表达，使新产品开发效率和品牌识别度有效提高，为装备制造业建立家族化产品战略提供了可量化验证的闭环迭代路径。作为技术美学融合的典型范式，数控机床通过产品族 DNA 的设计语言创新，构建起兼具谱系同源性与产品多样性的品牌形象体系，这种基因显性化表达策略成功实现了企业技术势能与文化价值的双重增值。后续将研究建立产品族 DNA 与用户认知、脑电信号之间的深层次对应关系 [10]，最终形成涵盖技术进化与文化传承的双螺旋发展路径。IM

参考文献

[1] 李靖，高文嫱，战淑红．数智化转型背景下模具专业现场工程师培养模式研究 [J]．教育与职业，2024 (4)：105-111．

[2] 李阳，吴旻．基于产品族 DNA 的雷达产品形象识别设计 [J]．电子机械工程，2017，33 (4)：10-13．

[3] 黄海林．数控机床风格演变规律研究与设计 [D]．哈尔滨：哈尔滨工业大学，2018．

[4] 杜文武．基于用户认知的数控机床多维特征创新设计研究 [D]．马鞍山：安徽工业大学，2021．

[5] 安筱鹏．制造技术与信息技术融合发展的新趋势 [J]．中国信息界，2009 (5)：21-24．

[6] 秦钰龙，陈骏．浅谈机床系列化造型设计方法 [C]// 中国机械工程学会工业设计分会，辽宁省机械工程学会．2013 国际工业设计研讨会暨第十八届全国工业设计学术年会论文集．沈阳航空航天大学设计艺术学院，2013：4．

[7] 杜文武，潘建伟．基于造型认知意象的数控机床多维特征设计研究——以 V-11 型数控机床为例 [J]．常州工学院学报，2022，35 (4)：34-41．

[8] 胡宁峰．基于量化形式美学特征的数控机床造型评价方法研究 [D]．贵阳：贵州大学，2023．

[9] 金海滨，贾鹏．以重型机床为例分析数控机床造型特点 [J]．科技与企业，2015 (2)：182．

[10] 高喜银，宋强．基于产品族 DNA 的农用车造型设计 [J]．中国农机化学报，2013，34 (1)：228-230，244．

收稿日期：2025-01-21