

### 5.1.2 性能导向的差异化设计原则

小型交通工具的使用场景与性能需求呈现多样化态势，需围绕性能目标对气动外形优化实施差异化设计，面对追求高速行进的小型电动赛车，宜先考虑降低空气阻力及优化升力系数，选用低风阻系数的水滴形外观轮廓，配合底部扩散器跟后扰流板的负升力设计，可于提升行驶速度之时增强轮胎抓地力，就以城市通勤为主的小型电动车而言，舒适性 with 能耗经济性显得尤为关键，此刻应重点对气动噪声加以控制，降低风阻<sup>[3]</sup>。

### 5.1.3 工程可制造性与成本约束原则

气动外形优化需与实际制造工艺及成本限制相契合，复杂曲面造型虽能赋予更好的气动性能，但说不定会增加模具制造的难度与生产成本，因过度渴望光滑曲面而采用自由曲面设计，或许会让冲压成型工艺难以达成，也会使3D打印等特种制造工艺的成本大幅攀升。在优化进程里要结合冲压、注塑等传统制造工艺的成型特色，实施曲面结构的简化，可借助模块化设计的理念，把复杂曲面切割成多个简单曲面的搭配，在维持气动性能有效发挥的基础之上，让制造难度与成本降低，还得综合思索材料特性，抉择兼具轻量化及气动性能的材料，诸如碳纤维复合材料和高强度铝合金之类，兼顾性能提升与成本控制的关系。

## 5.2 优化方法

### 5.2.1 多学科耦合的理论分析与数值模拟

依托计算流体动力学（CFD）理论，综合考虑小型交通工具的实际外形特点，搭建三维流场数学模型，采用雷诺平均 Navier-Stokes（RANS）方程描绘湍流的流动过程，借助选取恰当的湍流模型，精准捕捉边界层流动与涡流的属性。采用气动声学理论，采用 Lighthill 声类比方程与 FW-H 方程中的一个，对气流脉动所产生的噪声源及其传播特点展开模拟，把曲面曲率当作关键变量纳入模型，采用改变曲率参数手段，解析其对压力分布、速度流线、涡量场等流场参数形成的影响，搭建曲率 - 空气动力学参数的量化纽带。

小型交通工具气动性能优化一般会关联多物理场耦合问题，除了空气动力学范畴外，传热、结构力学等因素也需纳入考量，处于高速行进状态之际，气动加热会引起车身表面温度分布的变化，于是引发材料力学性能变动；车身结构因气动载荷出现应力且产生变形。需采用多物理场耦合的仿真技术，把 CFD 模型与有限元分析（FEA）模型、传热模型组合在一起，基于数据交互与迭代推演，系统评估曲面曲率变化对气动性能、结构强度及热管理形成的影响，实现多目标的同步优化，优化电动小客车前脸进气格栅的曲率之际，需考量其对冷却气流的引导效能，还需评价由此引发的

气动阻力的变动，以及此操作对电池热管理系统的影响<sup>[4]</sup>。

### 5.2.2 试验验证与迭代优化流程

在数值模拟基础上，制作 1: 进行 1 抑或缩比模型的风洞试验，依靠六分量测力天平测量模型承受的气动力，依靠压力传感器阵列获取车身表面压力的分布，采用粒子图像测速（PIV）技术开展流场结构的观测，以声学麦克风阵列对气动噪声进行采集，道路试验能在实际行车工况的环境里，测定交通工具能耗、速度稳定性等性能参数，补齐风洞试验难以仿真的真实环境因素，像路面粗糙度、自然风的干扰。

把数值模拟结果与试验数据相结合，依靠响应面法（RSM）建立起空气动力学参数和曲面曲率的近似数学模型，依靠拉丁超立方试验设计选定样本点，建立起二次多项式响应面方程，迅速预测不同曲率组合情形里的气动性能，基于这一基础，采用像遗传算法（GA）、粒子群优化算法（PSO）的智能优化算法，在响应面模型空间里搜索最佳的解，找出曲面曲率的最优组合，历经多轮“模拟 - 试验 - 优化”循环迭代，慢慢向满足性能指标要求的气动外形设计方案靠拢，推动小型交通工具气动性能持续提升。

## 6 结论

本研究针对小型交通工具曲面曲率分布对空气动力学特性的影响机制做了系统探讨，气流流动状态受曲面曲率分布所影响，对阻力、升力及气动噪声等空气动力学性能产生重大影响，不合理的曲面曲率分布会引发边界层分离以及涡流的产生，继而增大阻力、破坏了升力的平衡状态并产生气动噪声；恰当的曲面曲率设计可实现空气流动的优化，减小阻力、达成升力平衡并降低气动噪声。给出基于曲面曲率分布的小型交通工具气动外形优化思路方案，涵盖设计准则与优化举措，随着计算技术、试验手段的稳步进阶，对小型交通工具曲面曲率分布和空气动力学特性之间联系的研究将更精深入微，为小型交通工具创新设计给予更坚实支撑。

## 参考文献

- [1] 交通工具创意及多场耦合性能优化科技创新团队[J].吉林大学学报(工学版),2024,54(04):1175.
- [2] 陈金池,黄研昕.基于非定常曲面涡格法的气动灵敏度和线性化分析[J].气体物理,2023,8(06):55-64.DOI:10.19527/j.cnki.2096-1642.1060.
- [3] 王宁,陈友兴,杨凌,等.基于自适应多项式拟合的涡流测量校正方法[J].中国测试,2022,48(03):21-26.
- [4] 王琛,张乐平.基于UG软件的交通工具曲面建模应用研究[J].林业机械与木工设备,2021,49(08):71-74.DOI:10.13279/j.cnki.fmwe.2021.0106.

# Research on the aesthetic mechanism and criterion of surface transition based on curvature continuity and modeling rhythm

Jinheng Zhang

Tianjin Zhongke Technology Development Co., LTD, Tianjin, 300072, China

## Abstract

This study focuses on the aesthetic construction of surface transitions in industrial design, conducting interdisciplinary research centered on curvature continuity and form rhythm. By analyzing the intrinsic relationship between differential geometric parameters and visual perception, the study reveals the aesthetic mechanisms of surface transitions: curvature continuity enhances visual smoothness through geometric smoothing, while form rhythm constructs perceptual levels through rhythmic variations. The study constructs a theoretical framework that integrates geometric analysis and visual psychology, proposing a continuous quantification method based on curvature comb and a formal composition logic for form rhythm. Ultimately, it forms design principles that balance engineering precision with artistic expression, providing systematic guidance from theory to practice for the design of surface transitions in industrial products.

## Keywords

surface transition; curvature continuity; modeling rhythm; aesthetic mechanism; design criteria

# 基于曲率连续性与造型韵律的曲面过渡美学机理与准则研究

张津珩

天津众科科技发展有限公司, 中国·天津 300072

## 摘要

本研究聚焦工业设计中曲面过渡的美学构建,以曲率连续性与造型韵律为核心展开跨学科研究。通过剖析微分几何参数与视觉感知的内在关联,揭示曲面过渡的美学机理:曲率连续性通过几何平滑性影响视觉流畅度,造型韵律则借助节奏性变化构建感知层次。研究构建融合几何分析与视觉心理的理论框架,提出基于曲率梳的连续性量化方法与造型韵律的形式构成逻辑,最终形成兼顾工程精确性与艺术表现力的设计准则,为工业产品曲面过渡设计提供从理论到实践的系统性指导。

## 关键词

曲面过渡;曲率连续性;造型韵律;美学机理;设计准则

## 1 引言

在工业设计领域,曲面形态的过渡处理,已从以功能需求为导向升级为美学表达的核心承载,伴随产品造型往有机化、情感化路径发展,曲面过渡所展现的美学价值愈发明显,它是塑造产品形态特征的关键途径之一,更是传达品牌语义的关键载体,可当前进行设计实践的时候,艺术层面的造型韵律表达与工程方面的几何连续性控制常相互分离:若过度依赖曲率参数,形态易呈现机械生硬之感,若只追求韵律效果,极有可能引发工程实现方面的矛盾。此现状凸显了构建科学美学机理及统一设计准则的紧迫形势,从理论的层面出发,曲面过渡美学牵涉到微分几何、视觉认知、工业设

计等多学科的交叉情况,作为几何造型技术指标的曲率连续性,该数学描述已处于相对成熟水平,但要把高斯曲率、法向量变化等几何参数转化为视觉美学的语言该怎么做,依旧没有系统性研究方面的进展;造型韵律是艺术设计中的抽象概念,在曲面过渡方面,其量化表达及控制方法是急需突破的理论瓶颈,本研究凭借跨学科整合开展,目标为构建“几何特征-感知机制-设计准则”的连贯理论链条,为曲面过渡设计给予兼具科学性与艺术性的方法路径。

## 2 曲面过渡美学的基础理论建构

### 2.1 曲率连续性的几何本质解析

曲率连续性乃是刻画曲面过渡平滑性的核心指标,可从参数连续性与几何连续性这两个维度对其内涵加以阐释,参数连续性要求曲面方程的各阶导数呈连续态势,而几何连续性更留意形态的视觉连续效果,就像较高阶的几何连续要

【作者简介】张津珩(1994-),男,中国辽宁海城人,本科,从事曲面造型设计研究。

求曲率值始终连续,也要求曲率变化的速率一致,如此让曲面过渡在视觉方面呈现无突变的平滑观感,就几何可视化角度而言,作为分析工具的曲率梳,用矢量场直观呈现曲率大小及方向上的变化情形,理想过渡曲面的曲率梳应当呈现出平滑渐变模样,杜绝出现尖峰以及方向的急剧突变,其本质对应着曲率函数具有高阶可导的属性。

从数学表达的实际情形看,借助混合函数可构建起曲面过渡的连续性,让相邻曲面片在衔接点处位置重合,切线方向达成一致,还达成了曲率值与曲率变化率的双重连贯,以此为视觉呈现的平滑性筑牢几何根基。例如,邹倩通过实例说明,如何用谱配点法求解椭圆型偏微分方程边值问题,构造所需的过渡曲面<sup>[1]</sup>。

## 2.2 造型韵律的视觉感知机制

视觉系统对形态要素规律性变动的认知处理,催生了造型韵律的美学感知,处于曲面过渡期间,韵律表现是曲率变化的节奏律动、曲面起伏的层级秩序以及光影流动的韵律感觉,格式塔心理学相似性原理宣称,人眼倾向把存在相似曲率特征的区域感知成一个整体,此感知组织机制构成了韵律构建心理上的基础,从视觉流程这个层面看,曲率平滑过渡带动视线自然流淌,有规律的曲率调整会形成类似音乐节拍的“视觉节奏”,主特征线曲率变化构成主导节奏,次特征线充当变奏补充成分,携手塑造出层次分明的韵律格局。

韵律感知也牵扯到视觉认知的的时间维度:当目光漫过曲面的片刻,大脑把曲率的序列性改变整合为带节奏感的整体,该感知并非只是几何参数的叠加,而是有着心理预期和模式识别的复杂活动,等间距的曲率波动易被感知作“机械韵律”,按黄金比例分布的曲率变动,更贴合视觉舒适原则。

## 2.3 几何与感知的跨学科关联

曲率连续性和造型韵律的融合是工程精确性与艺术表现力的平衡体现,若建立两者关联,需要引入视觉感知的量化模型,就如曲率感知的临界值、韵律强度的指数,来自心理物理学研究表明,人眼对曲面曲率变化的觉察存在阈值,若曲率变化率超出基准值的既定比例时,视觉可察觉到“转折”现象。通过语义差分法实施对曲面样本的主观评价分析,可挖掘出“流畅度”“节奏感”“精致度”等主要感知维度,各与曲率连续性指标、韵律变化频率、曲面光顺度存在着内在的关联。

实现这种跨学科关联的搭建,必须解决几何参数的感知映射、韵律特征几何转换以及两者权重分配状况,将曲率梳的形态特征转化为视觉流畅度的相关评价,也能将韵律的节奏频率映射为曲率变化的空间周期,进而在工程参数和美学感知间构建起可追溯的逻辑联系。如于海涛等学者对喷嘴圆柱段起点处采用45°角过渡、圆形过渡和椭圆形过渡并进行数值计算,发现圆形曲面过渡的喷嘴产生的空化效果优于其他形状<sup>[2]</sup>。

# 3 曲面过渡美学的关键影响因素

## 3.1 曲率连续性的量化指标体系

搭建多维度连续性评价指标乃美学分析之基础,除常规的连续性分类以外,应当引入高阶导数指标,曲率变化率呈现出单位弧长内曲率的变化数值,曲面过渡愈发平滑;法向量连续性反映出的是曲面扭转程度,法向量变化率左右着视觉上的“扭曲感”;三维曲面过渡之际空间挠率的连续性,挠率的改变对曲面螺旋形态特征造成影响,依靠创建连续性的综合评价模型,可把各指标整合成一个统一的评价参数,展示不同指标在视觉感知中的重要性区分。

## 3.2 造型韵律的形式构成要素

借助以下形式原理达成曲面过渡造型韵律:①重复加渐变:相似曲率片段按周期出现且作规律性的变化,生成视觉层面的节奏;构建对比与层次效果:借助曲率的急剧变化形成视觉焦点,还构筑主从曲面的层级格局;比例设定与尺度把握:曲率变化幅度及其空间分布契合视觉舒适的比例标准,就如采用黄金分割标准。韵律的构建要兼顾曲面的空间维度与观察视角,需在动态视角下让汽车侧围的曲面过渡保持韵律一致,而家具曲面在静态观察之际,更聚焦于韵律层次情况,韵律的“视觉节拍”需跟曲面的功能属性相符合:运动型产品的韵律多呈现快速变化态势,家用产品的韵律选择舒缓节奏更为恰当。

## 3.3 几何与韵律的协同作用机制

几何连续性与造型韵律并非以独立形式存在,而是藉由光影交互、视觉认知等中介因素达成协同功能,曲率持续连贯的曲面为韵律构建奉上平滑基底,而韵律的介入避免了单纯连续曲面的单调体验,光影作为对曲面形态的视觉映射呈现,其变化规律能直接体现曲率分布,连续的曲率过渡会带来柔和的光影渐变,具备韵律的曲率变化让光影呈现规则性的明暗起伏态势,这种协同效能的平衡点为几何连续性为视觉赋予流畅效果,造型韵律赋予形态别样个性,两者协同形成了曲面过渡的美学支撑。

# 4 曲面过渡美学的设计准则构建

## 4.1 曲率连续性的控制准则

朱熹等学者提出一种基于曲面重构技术的叶根过渡区域加工轨迹的生成方法,生成的加工轨迹由已加工区域边界向叶根圆角边界渐变过渡,该加工轨迹与相邻区域的加工轨迹之间可实现精确搭接<sup>[3]</sup>。依托几何分析与感知方面的研究,确立分级控制相关准则,以功能为导向的基础层实现较低阶连续,适合对美学要求不怎么高的场景;通用设计的平衡层达成中阶连续效果,掌控曲率变化率的合理范围,契合多数消费类的货品;美学导向的高阶层实现高阶连续,同时对曲率变化导数的高阶部分优化,适配高端产品的设计范畴,从技术实施角度而言,推荐采用NURBS曲面建模方案,以调