

基于视觉动力形式的康护辅具轻量化设计研究

吴俭涛¹, 覃忠志¹, 孙利¹, 张硕¹, 袁思琪¹, 王巧玲¹, 程永胜²

(1.燕山大学, 河北 秦皇岛 066000; 2.厦门大学嘉庚学院, 福建 漳州 363105)

摘要: **目的** 为了减轻和缓解用户物理负担和心理负担, 对康护辅具进行轻量化设计, 探索一种产品形态轻量化与结构轻量化并行的综合设计方法。**方法** 以保护靴为例, 将轻量化意象作为形态设计目标, 采用语义差法和主成分分析得到轻量化意象及其典型代表样本; 采用视觉动力形式分析建立产品形态轻量化意象的映射关系, 并在此关系上通过曲线控制法进行初始形态方案设计; 利用 SolidWorks 软件进行拓扑优化, 判断材料冗余部分, 为结构减重提供指导; 再次结合映射关系对初始形态进行形态优化设计, 得到最终设计方案。**结论** 对保护靴设计方案进行评估, 仿真结果显示方案重量降低近 40%, 评价结果显示轻量化意象评价良好, 表明了该方法的可行性, 为康护辅具的轻量化设计提供了新思路与方法。

关键词: 产品设计; 视觉动力形式; 拓扑优化; 轻量化; 康护辅具

中图分类号: TB472 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2023)04-0123-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.04.015

Lightweight Design of Health Care Assistive Devices Based on Visual Dynamic Form

WU Jian-tao¹, QIN Zhong-zhi¹, SUN Li¹, ZHANG Shuo¹, YUAN Si-qi¹,
WANG Qiao-ling¹, CHENG Yong-sheng²

(1. Yanshan University, Hebei Qinhuangdao 066000, China;

2. Kah Kee College, Xiamen University, Fujian Zhangzhou 363105, China)

ABSTRACT: The work aims to conduct lightweight design of health care assistive devices and explore a comprehensive design method of product form lightweight and structure lightweight to reduce and alleviate the physical and psychological burdens of users. With protective boots as an example, firstly, the lightweight imagery was taken as the form design target, and the semantic difference method and principal component analysis were used to obtain the lightweight imagery and its typical representative samples; secondly, the visual dynamic form analysis was used to establish the mapping relationship of the lightweight imagery of the product form, and the initial form scheme was designed by the curve control method based on this relationship; then SolidWorks software was used to optimize the topology, determine the redundant part of material and provide guidance for structure weight reduction; finally, the mapping relationship was combined again to optimize the initial form design and obtain the final design scheme. The protective boot design scheme is evaluated. The simulation results show that the weight of the scheme is reduced by nearly 40%. The evaluation results show that the lightweight imagery is well evaluated, which shows the feasibility of the method and provides a new idea and method for the lightweight design of health care assistive devices.

KEY WORDS: product design; visual power form; topology optimization; lightweight; health care assistive devices

随着体育事业在全国范围的快速发展以及全民运动健身的提倡, 运动损伤变得愈发普遍, 康护辅具

作为一种重要的运动康护产品, 其市场也随着体育行业的发展在不断扩大。目前, 康护辅具技术与功能趋

收稿日期: 2022-09-29

基金项目: 河北省社会科学基金年度项目 (HB20YS003); 福建省社会科学规划项目 (FJ2021CO98); 国家社会科学基金艺术学一般项目 (2022BG2082); 国家社会科学基金年度项目艺术学单列学科 (2021BG02536)

作者简介: 吴俭涛 (1976—) 女, 博士, 教授, 主要从事工业产品智能设计方法创新研究。

通信作者: 孙利 (1973—), 男, 博士, 教授, 主要从事机械装备产品智能定制设计理论与方法、康养辅具创新设计研究。

于同质,如何为用户提供更好的使用体验成为设计关键,使康护辅具的轻量化设计逐渐成为热点。当前轻量化研究主要通过拓扑优化实现产品结构优化^[1-3],从而减轻用户肢体上的物理负担,伍赛等^[4]运用拓扑优化技术对全新产品机械结构进行设计,降低了产品重量并优化了产品结构和性能。冯桢等^[5]将拓扑优化运用在工业机器人形态设计中,通过改变约束条件生成多个设计样本,验证了拓扑优化方法在产品应用中的可行性。梁健等^[6]应用拓扑优化方法,达到了下肢康复外骨骼结构轻量化的目的。张芳兰等^[7]通过拓扑优化生成裸足矫形器轻量化设计方案。相比之下,形态轻量化的重要性往往被忽略。形态轻量化意味着对产品形态视觉认知的减重,通过视觉感知给予用户轻松舒缓的心理感受^[8-10],减轻用户的心理负担,从而给予用户积极的康复影响和引导。因此,以保护靴为例,从视觉动力形式角度进行设计分析,在康护辅具产品设计中采用视觉动力形式理论和拓扑优化方法来进行方案设计以及优化,尝试探索出一种产品形态轻量化与结构轻量化并行的设计方法。

1 视觉动力形式

1.1 视觉动力形式概述

视觉动力形式源于格式塔心理学,是阿恩海姆在考夫卡动力论的基础上提出的,并将视觉力分为三种力:即力、张力、动力^[11-13]。阿恩海姆认为“动力”是指在观察静止对象中视觉认知到的有方向性的矢量张力,且任何一个物象自身都存在动力形式。产品形态蕴含着丰富的视觉动力形式,在创造丰富视觉效果的同时给予认知主体不同的心理感受。当前视觉动力形式被广泛运用于产品形态设计中,候士江等^[14]通过语义差分法和视觉动力分析建立了目标意象与叉车动力形式之间的关联,满足了用户的意象需求并提升了叉车外观形态。花雨张等^[15]运用视觉动力形式分析机械臂外观形态设计元素并完成了产品语义的量化描述,成功构建了产品外观形态与产品语义通用性的关系。荣歆等^[16]从视觉动力角度分析了V形符号在机车车头形态中的张力特点与联系并进行了相应的概念设计。尚会超等^[17]运用视觉动力形式解析了减速机视觉动力类型,建立了减速机形态视觉动力体系,为减速机形态设计提供了解决方案。洪碧云^[18]采用视觉动力形式分析和数量化I类,研究传统紫砂壶的视觉形态要素与视觉意象的相关性,为传统紫砂壶的创新设计提供了新方案。康护辅具作为一种可穿戴产品,其形态设计中同样蕴含着丰富的视觉动力形式,通过视觉感知上“力”的运用,能够有效减轻产品视觉认知重量,减轻用户的心理负担从而促进用户康复。

1.2 产品形态中视觉动力形式类型

在产品设计中视知觉动力形式的方法主要有倾斜、形变、重复、对称四类^[19-20]。倾斜是指物体在空间中垂直和水平方向所产生强烈的偏离感,通过视觉感知产生知觉性偏离而形成一种由偏离位置向正常位置的有方向的倾向性张力,倾斜角度与张力强度呈正相关关系,倾斜角越大,张力越大。形变是指物体在外力作用下其形状及尺寸变化而产生的一种反作用力的趋势,形变量越大,对应产生的反作用力越大,在形态设计往往运用S形曲线以获得反作用力。重复是指物体在某一方向的连续出现,而在位移方向上的连续出现可被看成是运动,可使人们通过视觉感受在知觉上感知到一个方向性的推动力。对称指物体或图形在一定变换条件下,其相同部分在水平方向或垂直方向有规律重复的现象,这使其往往形成相对的视觉动力,两者互相抵消,形成静止感。四者相互融合变化产生丰富的视觉动力形式进而影响主体的心理感受变化,既包含抗争的、对立的,又包含和谐的、趋同的。

2 基于视觉动力形式的康护辅具轻量化设计研究流程

基于视觉动力形式的康护辅具轻量化设计研究强调在人的视觉规律下,既包含满足轻量化视觉前提下的形态设计,又包含满足功能实现和产品安全前提下的结构拓扑优化设计,两者内外结合。本文提出了基于视觉动力理论的保护靴轻量化设计研究流程,其具体步骤如下:建立代表样本库和意象词库,通过语义差法和主成分分析确定轻量化意象及其典型代表样本;对轻量化意象的典型代表样本进行视觉动力形式分析,建立保护靴轻量化形态意象的映射关系;基于映射关系进行产品初始形态方案设计;利用SolidWorks软件在初始形态方案基础上进行拓扑优化,判断冗余材料部分;再次结合映射关系对初始形态冗余部分进行形态优化设计以得到最终设计方案;通过语义差法和仿真分析对最终方案进行评价筛选。具体流程如图1所示。

3 保护靴轻量化设计

3.1 构建轻量化形态意象映射关系

3.1.1 获取保护靴代表样本

从杂志期刊、在线商城等渠道搜集国内外保护靴样本,初步筛选获取35个样本,经由小组讨论和专家评价,根据保护靴形态特征差异性进行分类和筛选,最终确定得到10个保护靴代表样本,如图2所示。

3.1.2 保护靴轻量化目标意象获取

通过网络问卷和在线商城评论等渠道搜集到 32

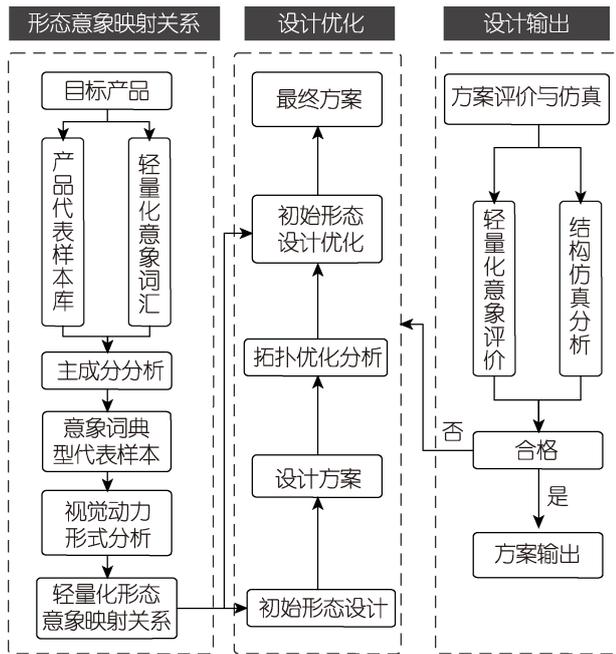


图 1 产品轻量化设计研究流程

Fig.1 Research process of product lightweight design

个保护靴相关的意象词汇, 为剔除相似词汇以及与“轻量化”语义差较大的词汇, 降低后期数据的处理难度, 邀请 4 名从事感性工学研究方向的老师与学生以及 4 名长期从事康养辅具设计的企业设计人员组成专家小组, 采用线上会议形式经过多轮讨论与投票, 最终得到 8 个保护靴轻量化意象词汇。结合前文 10 个保护靴代表样本制成 7 级语义差异量表“非常符合”“很符合”“一般”“不符合”“很不符合”“非常不符合”, 分别记为 3、2、1、0、-1、-2、-3

分值。同时为避免色彩、材质等因素的干扰, 将 12 个代表样本图片进行灰度处理。最后, 为保证意象评价结果的代表性和可靠性, 从不同年龄层次的设计者和用户角度出发, 分别邀请 2 位工业设计专业老师、3 名工业设计学生, 2 名青少年用户、4 名青中年用户以及 4 名老年用户等, 共计 15 名具有保护靴使用经历的受访者, 要求上述 15 名受访者在浏览样本图片后对各样本进行语义打分, 其得分集为 $C\{C_{ij1}, C_{ij2}, C_{ij3}, C_{ijk}\}$ (i 代表第 i 个样本, j 代表第 j 个意向词, k 代表第 k 个测者)。由此可得到第 i 个样本在第 j 个意向词的语义得分均值记为 C_{ij} , 根据式 (1) — (2) 计算第 i 个样本在第 j 个意象词的均值和标准差, 均值能够有效地反映每一个样本各意向词的总体得分水平, 标准差则反映每一个样本各意向词得分的离散程度, 离散程度越低, 说明受访者的评价越统一, 可信程度越高。同时为了保证问卷数据的可靠性和有效性, 提升数据准确性, 依据莱依达准则 (3σ) 即式 (3) 剔除粗大误差值。对剔除粗大误差后的数据进行整理, 如表 1 所示。

$$C_{ij} = \frac{1}{k} \sum_{k=1}^k C_{ijk} \quad (1)$$

$$\sigma = \sqrt{\sum_{k=1}^k [(C_{ij} - C_{ijk})^2 \div (k-1)]} \quad (2)$$

$$v_i = |C_{ij} - C_{ijk}| > 3\sigma \quad (3)$$

此外, 为进一步降低用户意象认知维度, 将评价均值导入 SPSS 分析软件进行因子分析和主成分分析以实现意象词数据的降维处理, 获得方差解释图和主成分矩阵, 如表 2 和表 3 所示。



图 2 代表样本图

Fig.2 Diagram of representative samples

表1 样本意象评分均值
Tab.1 Mean value of sample imagery score

样本	轻量化意象词汇								样本	轻量化意象词汇							
	修长	轻薄	圆润	亲切	运动	简洁	流线	多元		修长	轻薄	圆润	亲切	运动	简洁	流线	多元
1	0.8	0.13	1.07	-0.33	0.6	1.2	0.2	0.67	6	-0.73	-0.27	0.93	0.13	-0.47	0.4	-0.13	-0.47
2	-0.27	-1.07	-0.47	0.67	-0.73	-0.53	0.67	0.33	7	2.27	2.07	-0.2	0.47	0.47	1.2	0.73	-0.27
3	0.2	-1	0.93	0.8	0.13	0.6	0.87	0.4	8	1.67	1	-0.13	0.67	0.53	1	0.8	0.13
4	1.67	0.73	0.6	0.13	0	0.13	0.27	1	9	-0.8	0.53	0.73	0.4	-0.33	0.53	0.6	-0.6
5	0.67	-0.8	0.33	0.13	-0.07	1.07	-0.2	0.33	10	-1.33	-0.53	0.67	0.33	0.2	0.6	0.6	0.27

表2 因子分析载荷矩阵机方差贡献率
Tab.2 Variance contribution rate of factor analysis load matrix machine

成分	总计	初始特征值 方差百分比	累积/%	总计	提取载荷平方和 方差百分比	累积/%	总计	旋转载荷平方和 方差百分比	累积/%
1	2.518	31.478	31.478	2.518	31.478	31.478	2.431	30.387	30.387
2	2.294	28.672	60.150	2.294	28.672	60.150	2.037	25.469	55.856
3	1.333	16.666	78.816	1.333	16.666	76.816	1.396	17.452	73.308
4	1.005	12.567	89.383	1.005	12.567	89.383	1.286	16.075	89.383
5	0.551	6.890	96.273						
6	0.193	2.417	98.690						
7	0.080	0.997	99.687						
8	0.025	0.313	100.000						

表3 因子主成分分析矩阵
Tab.3 Analysis matrix of factor principal components

意象词汇	成分			
	1	2	3	4
修长-短小	0.858	0.268	-0.409	-0.095
轻薄-厚实	0.817	0.520	0.243	-0.231
圆润-锋利	-0.140	0.100	0.514	0.627
亲切-冰冷	0.230	-0.909	-0.046	0.142
运动-静止	0.436	-0.667	0.575	0.002
简洁-复杂	0.685	0.254	-0.176	0.476
流线-几何	0.484	-0.723	0.076	0.456
多元-单一	0.011	0.288	-0.688	0.307

发现存在4个特征值大于1的因子，旋转后的方

差累计贡献率为89.383%，大于85%，说明该4个因子可以解释全部的意象词汇，故将8个意象词归纳为4个维度并选取每个维度中载荷系数值最大的意象词汇来代表该维度，由此确定保护靴视觉轻量化意象词汇 $Q=\{\text{修长、轻薄、运动、简洁}\}$ 。

3.1.3 获取轻量化意象典型代表样本

根据已确定的代表意象词汇，结合已获取的意象评价结果（见表4），对比分析获取意象典型代表样本。

表4中数据根据式（1）—（2）计算可知，离散程度均低于1，表明数据具有可信度，故直接选择各意象评价均值前3的作为该意象词的典型代表样本，得到各意象与典型代表样本的对应关系，如图3所示。

表4 样本意象评价价值
Tab.4 Evaluation value of sample imagery

意象词汇	样本									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
修长	0.8	-0.27	0.2	1.67	0.67	-0.73	2.27	1.67	-0.8	-1.33
轻薄	0.13	-1.07	-1	0.53	-0.8	-0.27	2.07	1	0.73	-0.53
运动	0.47	1.07	0.13	0	-0.73	-0.47	0.6	0.53	-0.33	0.2
简洁	1.2	-0.53	0.6	0.13	1	0.86	1.2	0.53	0.53	0.6



图 3 意象代表样本
Fig.3 Representative samples of imagery

3.1.4 建立轻量化形态意象映射关系

结合前文产品形态设计中的视觉动力形式类型, 分析保护靴侧面形态中的视觉动力形式。通过分析轻量化意象词典型代表样本的视觉动力形式, 建立轻量化形态意象映射关系, 为方案设计提供指导。

1) 对符合“修长”意象的典型代表样本 7、8、4 的视觉动力形式分析如下图 4 所示。在水平方向产生相对的两个力, 使保护靴两侧的曲线产生形变 W , W 值越大, 左右距离越小; 在垂直方向产生相离的两个力, 使顶部和底部曲线产生形变 H , H 值越大, 上下距离越大; 两个方向的力共同作用, 最终使产品整体在垂直方向获得无限拉长, 从而产生“修长”的视觉意象。对比三者水平形变 W 与垂直形变 H 的大小, 可以发现在水平形变 W 上, $W_7 \approx W_8 > W_4$; 垂直方向形变 H 上, $H_7 > H_8 > H_4$ 。计算三者的形变比 H/W , 可以得到样本 7 > 样本 8 > 样本 4, 时结合表 4 中“修长”



图 4 “修长”视觉动力形式分析图
Fig.4 Analysis on "slender" visual dynamic forms

意象评价可知, 样本 7 的评价均值最大, 样本 4 评价均值最小, 两者综合分析对比可以得到垂直方向与水平方向形变比值与修长感呈正相关, 形变比越大则修长感越强。

2) 对符合“轻薄”意象的典型代表样本 7、8、9 的视觉动力形式分析如下图 5 所示。样本 7 和 8 主要受到水平方向和垂直方向的力, 产生水平形变 W 和垂直形变 H ; 样本 9 则主要受到水平方向的力, 产生水平形变 W , 且水平方向上 $W_7 > W_8 > W_9$, 垂直方向上 $H_7 \approx H_8 > H_9$ 结合表 4 中“轻薄”感评价可知, 样本 7 和 8 的评价均值均大于样本 9, 可以得出, 垂直方向形变 H 越大, 水平方向形变 W 越大, 则营造的“轻薄”视觉意象越强。进一步对样本 7、8 进行分析, 两者垂直形变 H 接近, 且水平方向相对的力均集中于腿部和足部, 腿部和足部均受相对和相离两对力的作用而产生腿部形变 W_T 和足部形变 W_Z , 两者足部均受相离的力且足部形变量 W_Z 相近, 但是 $W_{T7} > W_{T8}$, 分别计算 W_T/W_Z 可以得到样本 7 > 样本 8, 结合表 4 中轻薄感评价可知, 样本 7 的评价均值大于样本 8 的评价均值。综合分析对比可以得到水平的腿部形变与足部形变比值与轻薄感呈正相关, 腿部形变与足部形变比值越大, 运动感越强。



图 5 “轻薄”视觉动力形式分析图
Fig.5 Analysis on "light" visual dynamic forms

3) 对符合“运动”意象的典型代表样本 2、8、7 的动力形式分析如图 6 所示。三者主要在水平方向都受到相离的两个力, 分别是位于脚踝处水平向右的力 F_1 和位于腿部处水平向左的力 F_2 , 两者作用下造成左侧轮廓线产生向右弯曲的形变 W_L , 故形成垂直方向向左的倾斜角度 S , 进而产生水平向左前进的力, 营造出“运动”的视觉意象。进一步对比分析三者轮廓的左侧形变 W_L , 可以发现 $W_{L2} > W_{L8} > W_{L7}$, 样本 2 中左侧形变最大, 对应产生的垂直方向与水平方向的倾斜角度 S_2 最大, 样本 8 次之, 而样本 7 左侧形变最小, 对应产生的倾斜角度 S_7 最小, 得到 $S_2 > S_8 > S_7$ 。



图 6 “运动”视觉动力形式分析图
Fig.6 Analysis of "sport" visual dynamic forms

结合表4中运动感评价可知,样本2的评价均值最大,样本7评价均值最小。综合分析对比可以得到运动感与垂直方向向左的倾斜角度大小正相关,倾斜角度越大则运动感越强。

4)对符合“简洁”意象的典型代表样本7、5、6的动力形式分析如图6所示。通过分析三者侧面轮廓中的图形元素数量可以发现,图形元素数量的多少直接对应着动力数量的多少,且不同的图形元素所产生的视觉动力方向各不相同,但当图形元素为规则矩形和圆形,且处于水平和或垂直状态时,该图形元素不具有视觉动力。同时进一步研究图形元素动力形式之间的关系,由于不同图形元素所产生的视觉动力方向不同,进而导致视觉动力之间发生冲突,图形元素种类越多,对应产生的视觉动力越多,动力之间的冲突也越大。通过图6可知,样本7中视觉动力最少,样本5较少,样本6最多。结合表4中简洁评价可知,样本7的评价均值最大,样本6的评价均值最小。综合对比分析可以得到,侧面轮廓内视觉动力数量与简洁感呈负相关;视觉动力数量越多则动力间力的方向冲突越多,简洁感越低。



图7 “简洁”视觉动力形式分析图
Fig.7 Analysis of "concise" visual dynamic forms

通过以上对比分析,建立轻量化形态意象映射关系如下:修长感与垂直方向和水平方向形变呈正相关,应通过提高垂直形变 H 与水平形变 W 之间的比值,以营造“修长”感;轻薄感与水平方向腿部形变与足部形变呈正相关,应通过提高腿部形变 W_T 与足部形变 W_Z 之间的比值,以营造“轻薄”感;运动感与垂直方向向左的倾斜角度大小呈正相关,应通过加大保护靴侧面轮廓左侧曲形变 W_L ,从而提高垂直方向的倾斜角度 S ,以营造“运动”感;简洁与视觉动力数量呈负相关,应减少保护靴侧面轮廓中图形元素数量或采用不具有视觉动力的规则矩形和圆形,以营造“简洁”感。

3.2 初始形态方案设计

由前文可知样本7各意象值均在前列,故选取样本7作为参考样本,采用NURBS曲线对样本7的侧面轮廓进行提取并作为参考曲线,选取曲线中转角处为控制点,分别得到点 A 、 B 、 C 、 D 、 E 、 F 、 G 、 H 、 I 。同时为保证贴合度与舒适度,基于人体工学提取人体腿部曲线作为约束曲线并选取曲线中转角处为控制点,分别得到点 A_1 、 B_1 、 C_1 、 D_1 、 E_1 、 F_1 、

G_1 、 H_1 、 I_1 。通过曲线控制法,记录初始曲线点位移坐标和约束曲线位移坐标,计算两者各控制点相对位移差,采用形态均化法和二分点法,得到均化轮廓及控制点 A' 、 B' 、 D' 、 E' 、 F' 、 G' 、 H' 、 I' ,如图8所示。

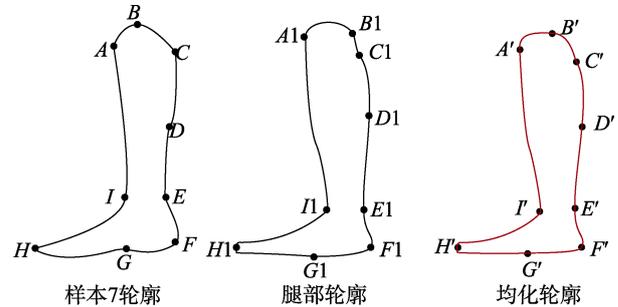


图8 均化轮廓曲线
Fig.8 Homogenization profile curve

根据映射关系要求,逐次改变初始位移的控制点坐标来控制曲线弯曲变形程度,从而达到水平形变比大和倾斜角度大的设计目标,通过改变点 A' 、 B' 、 C' 的水平位移来控制水平的形变量和倾斜感,改变点 D' 、 E' 的垂直位移来控制形变比率,改变点 F' 、 G' 、 H' 的垂直位移来控制垂直形变,逐次改变初始位移的控制点坐标来控制曲线弯曲变形程度,从而达到水平形变比大和倾斜角度大,以满足修长、轻薄、运动的意象,最终获得设计曲线,如图9所示。

在此基础上,采用Rhino三维软件进行建模,形成了两个保护靴形态轻量化的初始形态设计方案,如图10所示。

3.3 拓扑优化分析

3.3.1 临界条件和载荷确立

将用户在穿戴保护靴下的身体姿态作为临界条件,以计算得到其边界约束和载荷条件。由于保护靴是将整个小腿和足部全部固定包裹,整体受膝关节控制且要避免摆动,故只考虑相对静止状态。同时根据与用户的实地观察交流,得出用户在穿戴保护靴下的两类基本运动状况:

1)在躺卧状态下,为了保持脚踝和跟腱处于松弛状态,保护靴在穿戴情况下保持水平状态,需要考虑用户小腿自身重量对保护靴侧面所施加的重力。

2)在静坐状态下,为了保持脚踝和跟腱处于松弛状态,保护靴足部和小腿部保持垂直固定,保护靴足底接触地面需要与地面接触,所以在受力分析时,需要考虑用户小腿自身重量对保护靴足底施加的重力。因此,最危险的状态可等同于穿戴保护靴下,用户在躺卧和静坐过程中,保护靴不同位置结构承受最大力的时刻。以180 cm/83 kg的成年人为例,根据人机工程和引力公式计算以上两种工况下的最大受力,可以得到状态1下和状态2下保护靴侧面和足底所受压力均为57 N,因此选择两处受力同时最大的时刻进行分析。

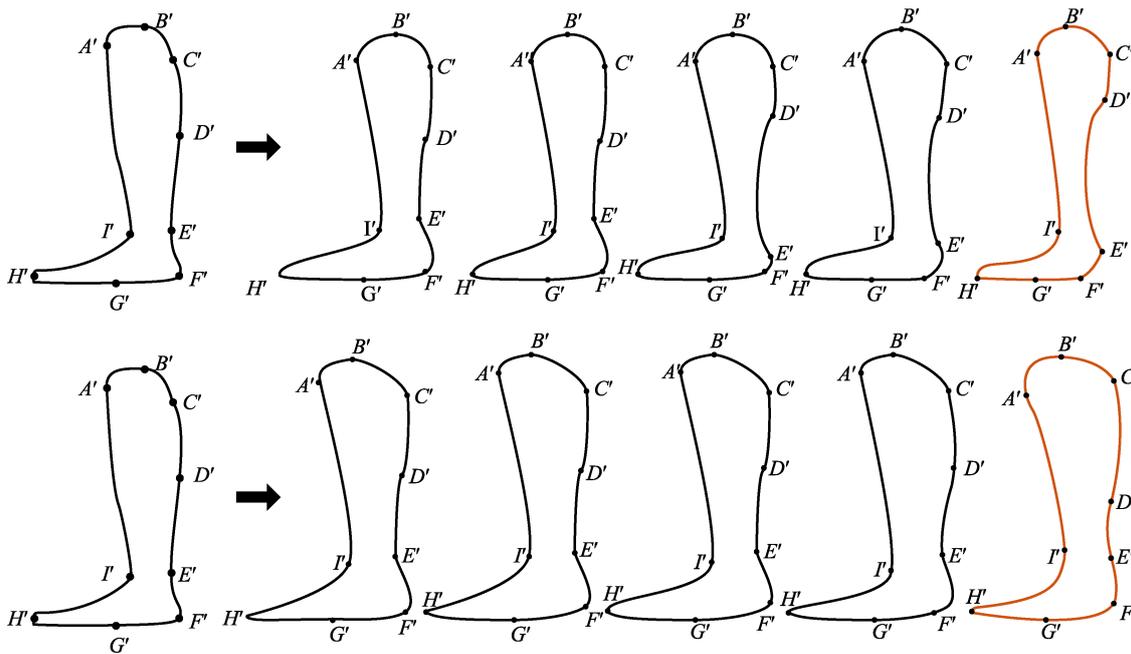


图 9 曲线演化过程
Fig.9 Curve evolution process



图 10 初始设计方案
Fig.10 Initial design plan

力 $4.5 \times 10^7 \text{ N/m}^2$; 最大位移分别为 1.683 mm、1.328 mm, 两者均在安全范围内, 表明设计方案符合安全要求。

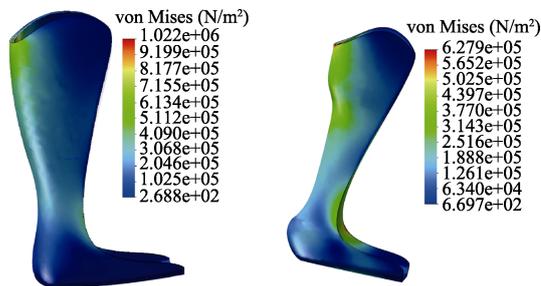


图 11 保护靴静应力分析图例
Fig.11 Example of static stress analysis of protective boots

3.3.2 静力分析

根据前文两类工况分析结果, 将保护靴初始形态方案的 Rhino 三维模型导入 SolidWorks 中, 通过 simulation 插件进行静受力分析。按照设计要求选择设计方案材料, 所使用材料为保护靴常用材质 PP 共聚物, 其材料力学性能如表 5 所示。

表 5 PP 材料力学性能
Tab.5 Mechanical properties of PP materials

材料	密度/ (kg/m^3)	弹性模量/ (N/m^2)	张力强度/ (N/m^2)	屈服强度/ (N/m^2)
PP 共聚物	1 200	3×10^8	7.3×10^7	4.5×10^7

此外对设计方案添加临界条件下对应的受力载荷, 在足掌底部添加固定几何体约束, 进而生成网格, 分别计算得到保护靴应力云图, 如图 11 所示。结果表明, 保护靴的最大应力值分别为 $1.022 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ 、 $6.279 \times 10^5 \text{ N/m}^2$, 低于工程塑料 PP 共聚物材质的屈服

通过设计洞察模块经验度分析得到保护靴材料分布状况, 将静应力图和设计洞察图进行对比分析, 如图 12 所示。可发现静应力越大, 材料保留程度越大, 越趋于实体化, 属于材料保留部分; 静应力越小, 材料保留程度越小, 越趋近于透明, 属于材料冗余部分。因此可以对冗余部位进行镂空处理以达到减重目的, 从而完成拓扑优化设计。



图 12 保护靴设计洞察图
Fig.12 Example of insight into design of protective boots

3.3.3 拓扑优化求解

基于 SolidWorks 中的拓扑算例模块对有限元模型进行拓扑优化。在 SolidWorks 中, 导入模型后进入相关参数设置: 首先进行夹具和载荷设置, 在足掌底部添加固定几何体约束; 其次在设置目标与约束模块中选取最佳强度质量比为目标, 质量减少 30%, 同时为保留设计方案的形态轮廓特征, 需在制造控制模块中添加保留区域, 保留区域为模型侧面轮廓线与足掌底板, 进而生成网格。通过运算求解, 计算得出保护靴, 如图 13 所示。

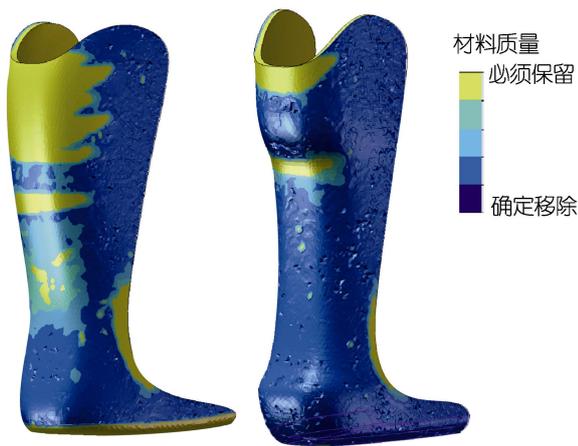


图 13 保护靴拓扑优化图例

Fig.13 Topology optimization diagram of protective boots

图 13 中紫蓝色区域为在保证结构刚强度的前提下可去除部分, 可以发现方案的两侧壁厚均有部分可移除。结合图 11—13 进行综合分析, 可通过减小保护靴两侧紫蓝色区域壁厚以及移除部分透明区域以实现保护靴结构轻量化。

3.4 设计方案优化

根据图 11—13 的分析结果, 基于前文轻量化形态意象的映射关系, 对原有产品形态进行规则切除和重塑, 采用形态趋于一致的圆形和矩形产生统一的视觉动力形式以营造简洁的意象, 同时采用重复的手法, 以不同尺寸去切除不同位置的冗余材料, 从而达到对移除部分形态优化的目的, 得到优化之后的方案如图 14 所示。



图 14 最终优化方案

Fig.14 Final optimization plan

4 方案评价与仿真验证

将上述最终优化方案与 6 个典型代表样本组合制成 7 级语义差异量表, 为降低用户认知差异对评价结果产生影响, 邀请前文 15 位受访者再次进行轻量化意象评价, 评价结果如表 7 所示。两个方案的所有意象均值都为正值且排名靠前, 说明方案形态轻量化效果良好。且方案 a 的均值和最大, 为最符合轻量化设计需求的保护靴形态设计方案, 如表 6 所示。

表 6 轻量化意象设计方案评价结果
Tab.6 Evaluation results of lightweight image design schemes

方案	修长的	轻薄的	运动的	简洁的	均值和
方案 a	1.06	0.82	1.32	0.52	3.72
方案 b	1.23	0.65	1.12	0.35	3.35
样本 7	1.54	0.36	1.16	-0.34	2.72
样本 9	0.62	-0.42	0.56	-0.24	0.52
样本 4	0.65	0	0.22	1	1.87
样本 1	0.14	0.64	1.08	0.64	2.5
样本 5	-0.7	-0.12	1.1	0.34	0.62
样本 6	-0.8	-0.54	0.54	-0.56	-1.36

再次对最终方案进行仿真分析以验证方案合理性, 如图 15 所示。通过优化前后的结果对比可知, 最终优化方案应力和位移优化前后的变化不大, 最大应力值由之前的 $1.022 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ 变为 $2.640 \times 10^6 \text{ N/m}^2$, $6.279 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ 变为 $8.192 \times 10^6 \text{ N/m}^2$, 最大位移值由之前的 1.683 mm 变为 1.023 mm, 1.328 mm 变为 9.250 mm, 两者均在安全范围内, 且优化后保护靴质量分别由 0.898 kg 变为 0.578 kg, 0.781 kg 变为 0.475 kg, 质量却减少了近 40%, 实现了结构质量轻量化的目的。通过评价结果和仿真分析结果可得, 产品在形态轻量化的同时实现了结构质量轻量化, 表明了该方法的可行性。

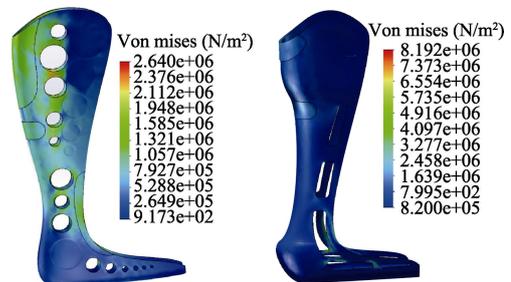


图 15 最终优化方案仿真分析

Fig.15 Simulation analysis of final optimization plan

5 结语

本文基于视觉动力形式理论和拓扑优化方法, 提出了一种形态轻量化与结构轻量化结合的综合设计

方法。以现有的保护靴作为研究对象,首先通过语义差异法和视觉动力形式理论建立视觉动力形式与轻量化意象之间的映射关系,并进行初始方案设计。其次对初始方案进行拓扑优化设计以判断结构的材料冗余部位,并结合映射关系进行优化设计,最后通过方案评价和仿真分析结果验证了该方法的可行性。该方法有助于避免单一追求产品结构轻量化而造成的形态失衡,结合形态审美以达到更为均衡的设计输出,达到用户心理层面和物理层面的双重缓解,希望能够为康护辅具和其他产品的轻量化设计提供新思路和方法。此外,材质、色彩等对产品的轻量化也有一定程度的影响,有待于进一步扩展研究。

参考文献:

- [1] 刘树春,张敬佩,李初晔.机械产品设计的结构优化技术应用[J].机械设计与制造,2011(8):75-77.
LIU Shu-chun, ZHANG Jing-pei, LI Chu-ye. Application of Structure Optimization Techniques in Designing Mechanical Products[J]. Machinery Design & Manufacture, 2011(8): 75-77.
- [2] 邱林.下肢助力外骨骼轻量化与助力性能研究[D].青岛:山东科技大学,2018.
QIU Lin. Study on Lightweight and Load-carrying Augmentation Performance of Lower Extremities Exoskeleton[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2018.
- [3] 李纪雄,田英,谭健良,等.基于拓扑优化方法的赛车制动踏板轻量化设计[J].农业装备与车辆工程,2020,58(8):42-46.
LI Ji-xiong, TIAN Ying, TAN Jian-liang, et al. Lightweight Design of Racing Brake Pedal Based on Topology Optimization Method[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2020, 58(8): 42-46.
- [4] 伍赛,涂细凯,李佳璐,等.下肢康复外骨骼的造型与结构优化设计研究[J].机械科学与技术,2020,39(6):891-897.
WU Sai, TU Xi-kai, LI Jia-lu, et al. Research on Modeling and Structural Optimization Design of Lower Extremity Rehabilitation Exoskeleton[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2020, 39(6): 891-897.
- [5] 冯桢,于涛,曾齐福.拓扑优化方法在产品中的应用探索[J].机械设计与制造,2007(3):138-139.
FENG Zhen, YU Tao, ZENG Qi-fu. Application and Attempt of Topology Optimization in Design[J]. Machinery Design & Manufacture, 2007(3): 138-139.
- [6] 梁健,李晓杰,谢炯.拓扑优化在工业机器人造型设计中的应用[J].机械设计,2020,37(9):128-133.
LIANG Jian, LI Xiao-jie, XIE Jiong. Application of Topology Optimization in Industrial Robot Modeling Design[J]. Journal of Machine Design, 2020, 37(9): 128-133.
- [7] 张芳兰,刘龙吉,姚宛彤.面向关键用户需求的踝足矫形器定制化设计方法[J].图学学报,2021,42(5):841-848.
ZHANG Fang-lan, LIU Long-ji, YAO Wan-tong. Customized Design Method of Ankle-Foot Orthosis Oriented to the Needs of Key Users[J]. Journal of Graphics, 2021, 42(5): 841-848.
- [8] 赵玉婉,张丙辰,王艳群,等.基于视觉认知的自闭症儿童干预图卡角色造型设计研究[J].图学学报,2020,41(3):461-468.
ZHAO Yu-wan, ZHANG Bing-chen, WANG Yan-qun, et al. Research on Role Modeling Design of Intervention Card for Autistic Children Based on Visual Cognition[J]. Journal of Graphics, 2020, 41(3): 461-468.
- [9] 高森孟,周睿,李娟.我国地铁标志视觉认知及其文化体验研究[J].城市轨道交通研究,2021,24(8):26-30.
GAO Sen-meng, ZHOU Rui, LI Juan. Research on Visual Cognition and Cultural Experience of Metro Logos in China[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(8): 26-30.
- [10] 李天添,赵丹华,赵江洪.基于视觉认知的汽车内饰造型效果图评价体系构建[J].包装工程,2018,39(6):165-169.
LI Tian-tian, ZHAO Dan-hua, ZHAO Jiang-hong. Evaluation System Construction of Automotive Interior Rendering Based on Visual Perception[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(6): 165-169.
- [11] 宁海林.现代西方美学语境中的阿恩海姆视知觉形式动力理论[J].人文杂志,2012(3):97-102.
NING Hai-lin. Arnheim's Theory of Visual Perception in the Context of Modern Aesthetics[J]. The Journal of Humanities, 2012(3): 97-102.
- [12] ARNHEIM R. Visual Dynamics[J]. American Scientist, 1988, 76(6): 585-591.
- [13] 宁海林.阿恩海姆的视觉动力学述评[J].自然辩证法研究,2006,22(3):32-34,74.
NING Hai-lin. Review on Arnheim's Visual Dynamics[J]. Studies in Dialectics of Nature, 2006, 22(3): 32-34, 74.
- [14] 侯士江,王建暖,刘甲财,等.基于视觉动力理论的叉车意象仿生设计研究[J].包装工程,2021,42(22):108-114.
HOU Shi-jiang, WANG Jian-nuan, LIU Jia-cai, et al. Research on the Bionic Design of Forklift Image Based on Visual Dynamic Theory[J]. Packaging Engineering: 2021, 42(22): 108-114.
- [15] 花雨张,刘林.桌面机械臂产品语义通用性研究[J].包装工程,2021,42(2):123-128.
HUA Yu-zhang, LIU Lin. Semantic Universality of Desktop Robotic Arm[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(2): 123-128.