

文章编号 1004-924X(2014)06-1677-09

基于模糊层次分析的足楦匹配算法 在鞋楦定制中的应用

任怀艺, 王伯雄*, 罗秀芝

(清华大学精密仪器系精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084)

摘要:针对现有的鞋楦定制技术没有完善的足楦匹配算法及衡量指标等问题,提出了基于模糊层次分析法(FAHP)的足楦匹配算法,通过计算鞋楦数据库中的鞋楦与足部的匹配值来决定技术路径。首先,提取 8 个足楦特征参数作为 FAHP 的准则来衡量足楦匹配情况,采用三角模糊数计算足楦特征参数的匹配值;根据各特征参数对成鞋舒适性的影响以及变形设计难易程度建立成对比较阵。然后,通过求解最大特征值的特征向量得到各参数对足楦匹配度值的权重。最后,计算出足楦匹配度值并选择技术路径。给出了足楦匹配度值计算实例,求解得到其值为 0.69。结合阈值 0.50、鞋楦定制标准 0.80,说明该鞋楦与足部不完全匹配,但可作为变形修改设计的基础母楦。该方法可将基于鞋楦数据库的鞋楦定制与直接基于足部 3D 形貌的无实体楦造型等方法结合到一个系统中,提高量足制鞋的效率,降低定制成本。

关键词:模糊层次分析法;足楦匹配算法;鞋楦定制;三角模糊数

中图分类号:TP391.7;TS943.2 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142206.1677

Application of FAHP-based foot-last matching algorithm to customized shoe-last

REN Huai-yi, WANG Bo-xiong*, LUO Xiu-zhi

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

* Corresponding author, E-mail: wangbx@tsinghua.edu.cn

Abstract: As existing customized shoe-last technologies are lack of perfect foot-last matching algorithm and measurement indexes, this paper proposes a foot-last matching algorithm based on Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP). The technological paths were selected through calculating the Matching Degree (MD) value between the customers' feet and the shoe-lasts from the database. First, eight foot-last characteristic parameters were extracted as the criterion layer of the FAHP to measure the matching of shoe lasts and the triangular fuzzy numbers were employed to calculate the MD value of the parameters between foot and shoe-last. Then, according to the effect of these characteristic parameters on shoe's comfort and the difficulty of meeting these parameters in the deformation design process, two pairs of comparison matrices were established. The weights of these eight parameters were obtained by solving the corresponding eigenvectors of the maximum eigenvalue of the two matri-

收稿日期:2013-08-28;修订日期:2013-10-16.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11274199)

ces. Finally, the MD value was calculated and the best path was decided. With this method, a case was presented with a calculated MD value equal to 0.69. Compared to the threshold value 0.50 and the customized shoe-last standard value of 0.80, it points out that this shoe-last is not the customized one but a mother shoe-last that can be deformed for better fit and comfort. This method can join the customized shoe-last technological path based on shoe-last database and the direct path based on 3D foot data to increase the efficiency for customizing shoe-lasts and to reduce the cost.

Key words: Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP); foot-last matching algorithm; shoe-last customizing; triangular fuzzy number

1 引 言

鞋楦是制鞋过程中的特殊模具,对成鞋的外观性与舒适性起着决定性作用。研究发现,不合脚的鞋会引起足部不适,疼痛甚至疾病,如胼胝、鸡眼、拇趾外翻、足溃疡以及足压疮等^[1]。随着 CAD/CAM 技术的发展,采用人机交互智能设计方式进行个性化鞋楦定制的技术日趋成熟完善,也使得量足制鞋更加快捷方便。量足制鞋的发展对足部疾病的治疗与康复、糖尿病足预防与缓解具有重要意义,也使得特殊人群(如足部畸形人士、运动员等)的定制鞋需求得到满足。越来越多的普通消费者开始倾向于购买款式新颖、完全合脚的鞋子,这也极大推动了个性化鞋楦定制及量足制鞋技术的发展^[2]。

目前,国内外许多学者对鞋楦定制进行了研究。José Antonio Bernabéu^[3]针对糖尿病足患者进行鞋楦定制,从鞋楦数据库中挑选出合适的鞋楦,再通过调整曲面控制点进行楦面变形,并给出了围线修改、鞋跟调节以及鞋底曲面修改 3 种变形操作算法。Nibedita Rout^[1]通过 3D 足部扫描提取出足部关键参数,并据此从鞋楦数据库挑选最匹配鞋楦。Ning Shi^[4]依据足部特征对基础鞋楦进行变形,使得在满足足部特征要求的情况下尽量保持鞋楦的款式不变。Bita Ture Savadkoohi^[5]采用加权主成分分析法(Weighted Principle Component Analysis)将扫描的 3D 鞋楦对齐,然后将鞋楦进行切割分析,之后,从鞋楦数据库中挑出最合适的鞋楦进行变形定制。史辉^[6]通过从标准鞋楦数据库中挑选鞋楦进行分段自适应修改来进行鞋楦定制。J. Leng^[7]基于 3D 点云数据,采用改进的距离地图法(Distant Map Method)和交互的局部变形法(Local Deformation Method)

进行鞋楦定制。Shuping Xiong^[8]采用对母楦进行全局级放和局部变形相结合的方法进行个性化鞋楦定制。Jin Wang^[9]采用分段重建的方法进行鞋楦变形,提出了多层参数定义(Multi-Layer Parametric Definition)的概念,建立了鞋楦拓扑结构。该方法在共点约束、共面约束、尺寸约束、方向约束以及联动约束等 5 种约束下,采用交互的草图驱动变形(Draft-Driven Deformation)进行曲面变形,生成满足要求的鞋楦;且给出了鞋楦上曲面顶点的编码方式,以及相互借用鞋楦头的方法。Tae Jin Hwang^[10]与 Seung-Yob Kim^[11]研究了依据鞋楦相似性和尺寸进行分类的算法,提取出不同类型的鞋楦模板进行鞋楦定制。Sikyung Kim^[12-13]提出采用保形映射法(Conformal Mapping Approach)或统一足部压力自由变形法(Uniform Foot Pressure Free Form Deformation)进行鞋楦的设计制作。Hongzheng Liu^[14]采用产品定义参数驱动的参数变形法(Parametric Deformation Method)进行鞋楦的变形设计,并基于能量最小准则将变形问题等价成约束优化问题进行处理。Yifan Zhang^[15]重点研究了鞋楦定制中修改特征曲线参数进行鞋楦款式定制的方法。Ameersing Luximon^[16]详细给出了鞋楦制作中的各个参数,可作为无实体楦条件下定制鞋楦的参考。浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室在无实体楦造型方面进行了一些研究:徐从富^[17]通过足楦关键参数转换模块得到鞋楦的主要参数,从而进行定制鞋楦造型;陆国栋^[18]根据足部三维扫描数据建立起足部特征模型,确定鞋楦特征模板顶点和相应的拓扑关系,组合建立鞋楦轮廓曲线,之后进行曲面细分造型得到定制的鞋楦。本文作者^[2]曾通过足部特征曲线的自适应变形生成相应的鞋楦特征曲线来进行个性化鞋楦定制。

通过上述调研可知,目前的鞋楦定制技术路

径大致分为三类:一是基于鞋楦数据库的鞋楦定制,即采用特定算法从数据库中挑选出与足部参数特征最匹配的鞋楦,然后采用某种算法对鞋楦进行小幅变形设计;二是基于母楦的鞋楦定制,即对母楦进行级放操作使其基本满足足部参数要求,然后采用局部自由变形等方法对鞋楦进行修改;三是无实体楦基础的鞋楦定制,即基于足部3D扫描数据,提取出关键信息和鞋楦特征规律后直接进行鞋楦定制。由目前的文献可知,路径一高效快捷,适合相应款式已具备系列鞋楦的情况;路径二将母楦级放后即可同路径一合并,适合相应款式鞋楦已存在但并不成系列的情况;路径三难度大,设计繁琐,应用于全新款式鞋楦的设计。然而,3条技术路径中,对于足楦匹配算法及衡量指标均没有详细明确的研究。对路径一,数据库中最匹配鞋楦如何挑选?同款式系列鞋楦分布的最低界定标准是多少?对路径二,母楦级放时足部哪些参数为优先变形目标?对路径三,如何衡量设计出的全新款式定制鞋楦是否符合足部特征参数要求?这些问题均需采用科学明确的足楦匹配度值计算。

针对上述分析,本文提出了一种基于模糊层次分析法(Fuzzy Analytic Hierarchy Process, FAHP)的足楦匹配算法,通过定量计算足楦匹配度值来衡量足楦的匹配程度。根据得到的匹配度值和设定的阈值,可科学地选择最合适的鞋楦定制技术路径;并挑选出数据库中最匹配的鞋楦;也可决定是否需要基于母楦级放或进行无实体楦造型设计。

2 个性化量足制鞋整体解决方案

依托清华大学精密测试技术及仪器国家重点实验室自主研发的足楦3D形貌自动测量平台^[19](如图1所示),提出个性化量足制鞋的整体解决方案,如图2所示。

图2表示了个性化鞋楦定制过程中3种方法的选择条件和实施路径。其流程表述如下(与图2中编号一致):

STEP 1:流程开始;

STEP 2:顾客指定希望定制的款式;

STEP 3:顾客进行双足3D形貌测量;

STEP 4:提取足部特征参数;



图1 足楦3D形貌自动测量平台

Fig. 1 Automatic measurement platform of 3D surface topography for foot or shoe-last

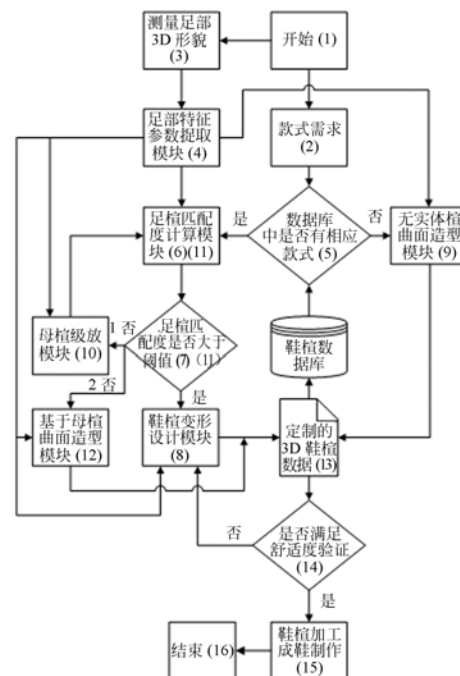


图2 个性化量足制鞋的整体解决方案

Fig. 2 Integrated solution of customized shoe making

STEP 5:检索鞋楦数据库 Last Database,查看是否有相同款式;若无指定款式鞋楦,则跳转到STEP 9;若有,则继续STEP 6;

STEP 6:基于提取的足部特征参数,对数据库中对对应款式鞋楦进行足楦匹配度计算;

STEP 7:设定对应款式足楦匹配度最大值为 MD_{\max} ,阈值为 MD_0 ;若 $MD_{\max} > MD_0$,继续STEP 8;否则,跳转到STEP 10;

STEP 8:基于提取的足部特征参数对鞋楦进行变形设计,之后跳转到STEP 13;

STEP 9:基于提取的足部特征参数,采用无

实体楦曲面造型设计操作进行鞋楦定制;之后跳转到 STEP 13;

STEP 10:基于提取的足部特征参数进行母楦级放;

STEP 11:对级放后的鞋楦再次进行足楦匹配度计算,值为 MD_{\max}^i ;若 $MD_{\max}^i > MD_0$,跳转到 STEP 8;否则,继续 STEP 12;

STEP 12:基于级放后的鞋楦(母楦)及足部特征参数进行曲面造型;

STEP 13:将定制的新 3D 鞋楦数据加入数据库中;

STEP 14:验证定制鞋楦是否满足舒适度要求;若满足,则继续 STEP 15;否则跳转到 STEP 8;

STEP 15:鞋楦加工和成鞋制作;

STEP 16:流程结束。

根据上述流程,可知 3 条路径分别为:

路径一:1→2→3→4→5→6→7→8→13→14→...→15→16

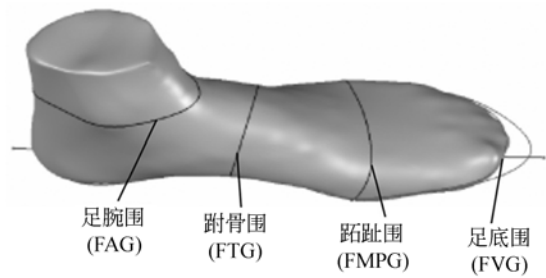
路径二:1→2→3→4→5→6→7→10→11→8/12→13→14→...→15→16

路径三:1→2→3→4→5→9→13→14→...→15→16

对比路径差别可知,足楦匹配度值是路径选择的重要决定因素,因此本文的重点是讨论数据库中鞋楦与顾客双足的足楦匹配度值的计算方法。

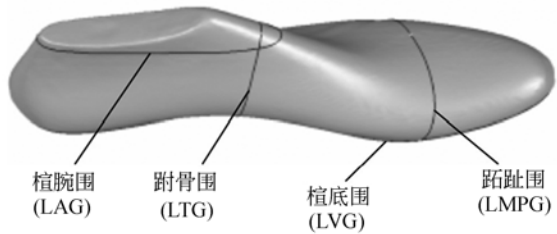
3 足楦特征参数匹配

关于足楦的特征参数,不同研究人员给出了不同的衡量标准。José Antonio Bernabéu^[3]用 12 个特征点、3 个自定义坐标轴、13 个特征直线长度、5 个特征围长以及 3 个特征角度来全面评判足楦匹配情况。Nibedita Rout^[1]用 6 个特征长度、4 个特征宽度、8 个特征高度以及 3 个特征围长来决定足部建模。Ning Shi^[4]与 Shuping Xiong^[8]用 5 个长度、4 个宽度、3 个高度以及 6 个围长共 18 个特征参数来定义足楦模型。理论上,特征参数越多,对足楦模型的表达越充分,但同时计算成本越高,效率越低。足楦匹配度值计算的目的是尽快确定定制路径,并从鞋楦数据库中挑选出最匹配鞋楦,因此,需在保证准确度前提下尽



(a)足部特征围长示意图

(a)Schematic diagram of characteristic girths of foot

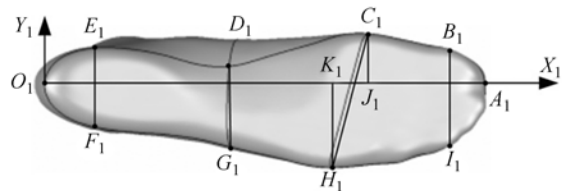


(b)鞋楦特征围长示意图

(b)Schematic diagram of characteristic girths of shoe-last

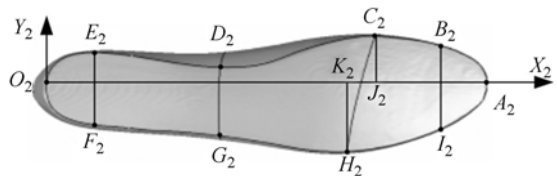
图 3 足部和鞋楦特征围长示意图

Fig. 3 Schematic diagram of characteristic girths of foot and shoe-last



(a)足底特征参数示意图

(a)Schematic diagram of characteristic parameters of foot vola



(b)楦底特征参数示意图

(b)Schematic diagram of characteristic parameters of shoe-last vola

图 4 足楦底特征参数示意图

Fig. 4 Schematic diagram of characteristic parameters of foot vola and shoe-last vola

可能减少特征参数,以提高匹配效率。根据对刻楦师的问卷调查,选取对鞋楦定制效果影响最大的 8 个特征参数计算足楦匹配度值,分别是跖趾围、跗骨围及腕围等 3 个特征围度,以及足楦底面的足楦长、足楦宽、腰窝宽、后跟宽、趾宽等 6 个特征尺寸。详情见图 3、图 4 及表 1。

表 1 足楦特征参数

Tab. 1 Characteristic parameters of foot and shoe-last

特征参数	足部	鞋楦
跖趾围	FMPG	LMPG
跗骨围	FTG	LTG
腕 围	FAG	LAG
足楦长	O ₁ A ₁	O ₂ A ₂
足楦宽	C ₁ J ₁ + H ₁ K ₁	C ₂ J ₂ + H ₂ K ₂
腰窝宽	D ₁ G ₁	D ₂ G ₂
后跟宽	E ₁ F ₁	E ₂ F ₂
趾 宽	B ₁ I ₁	B ₂ I ₂

4 足楦匹配算法

4.1 FAHP

AHP 是美国运筹学家 T. L. Saaty 提出的一种简单灵活而且实用的多目标决策方法^[20],本文引入模糊数将其改进成 FAHP。如何通过模糊分析确定出的 8 个足楦匹配参数从数据库挑选出最合适的鞋楦是一种基于模糊理论的多目标决策。其数学模型如图 5 所示。

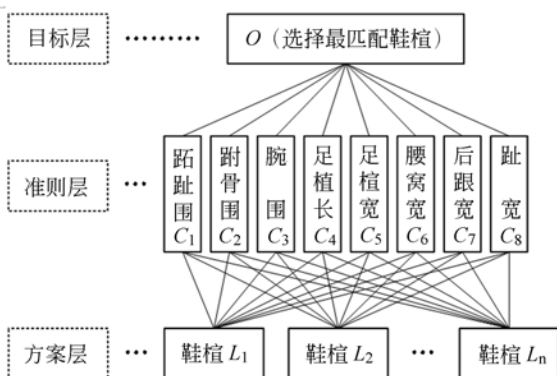


图 5 基于 FAHP 的足楦匹配算法模型

Fig. 5 Foot-last matching algorithm based on FAHP

采用模糊分析法计算各鞋楦方案中准则层 8 个足楦匹配参数值 MP_{ij} ($i=1, 2, \dots, 8; j=1, 2, \dots, n$); 采用成对比较阵确定准则层中各准则对目标的权重 ω_i ($i=1, 2, \dots, 8$), 其满足归一化条件:

$$\sum_{i=1}^8 \omega_i = 1. \quad (1)$$

则鞋楦 L_j ($j=1, 2, \dots, n$) 的足楦匹配度值为:

$$MD_j = \sum_{i=1}^8 \omega_i \cdot MP_{ij}, \quad (2)$$

从而得到数据库中最佳匹配鞋楦为:

$$L_{\text{optimal}} = \{L_k \mid MD_k = \max\{MD_j\}, j=1, 2, \dots, n\}.$$

4.2 模糊分析法确定足楦匹配参数值

由于人的足部存在感差阈值 (Sense Threshold, ST), 所以准则层中的足楦 8 个参数绝对数值并非完全相等, 而是存在一定的差值。例如, 图 3 图 4 中足部的跖趾围长 L_{FMPG} 为 254.35 mm, 根据制楦经验和测试结果, 相应的感差阈值 ST 应为 6 mm, 则最匹配鞋楦跖趾围长为:

$$L_{\text{LMPG}}^{\text{optimal}} = L_{\text{FMPG}} - \text{ST} = 248.35 \text{ mm}.$$

同时, 若知鞋楦跖趾围长为 245 ~ 252 mm 时, 其定制的鞋楦满足要求。则 $L_{\text{LMPG}}^{\text{tight}} = 245 \text{ mm}$,

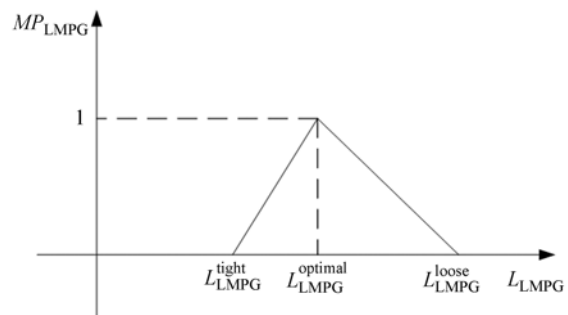


图 6 跖趾围隶属度函数

Fig. 6 Membership function of metatarsophalangeal girth

$L_{\text{LMPG}}^{\text{loose}} = 252 \text{ mm}$, 从而得到跖趾围的三角模糊数 (如图 6 所示) M_{LMPG} 为:

$$M_{\text{LMPG}} = (L_{\text{LMPG}}^{\text{tight}}, L_{\text{LMPG}}^{\text{optimal}}, L_{\text{LMPG}}^{\text{loose}}). \quad (3)$$

根据模糊理论^[20-21], 用隶属度函数值 μ_M (L_{LMPG}) 作为足楦跖趾围参数匹配值 MP_{LMPG} , 其满足条件 $0 \leq MP_{\text{LMPG}} \leq 1$, 且值为:

$$MP_{\text{LMPG}} = \mu_M(L_{\text{LMPG}}) = \begin{cases} \frac{L_{\text{LMPG}} - L_{\text{LMPG}}^{\text{tight}}}{L_{\text{LMPG}}^{\text{optimal}} - L_{\text{LMPG}}^{\text{tight}}}, & L_{\text{LMPG}} \in [L_{\text{LMPG}}^{\text{tight}}, L_{\text{LMPG}}^{\text{optimal}}] \\ \frac{L_{\text{LMPG}}^{\text{loose}} - L_{\text{LMPG}}}{L_{\text{LMPG}}^{\text{loose}} - L_{\text{LMPG}}^{\text{optimal}}}, & L_{\text{LMPG}} \in [L_{\text{LMPG}}^{\text{optimal}}, L_{\text{LMPG}}^{\text{loose}}] \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (4)$$

4.3 成对比较阵法确定权重

采用成对比较阵法确定权重即分析成对比较准则层中各准则 C_1, C_2, \dots, C_8 对目标层 O 的重要性。假定 C_i 与 C_j 相比同等重要或更重要, 令 $a_{ij} = C_i : C_j$, 采用调查问卷法获得 a_{ij} 的值, 参考标准如图 7 所示:

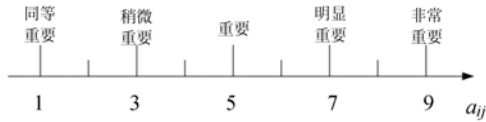


图 7 C_j, C_i 重要程度的比值与 a_{ij} 值对应关系图

Fig. 7 Corresponding relationship between a_{ij} and importance degree of C_i comparing to C_j

各准则成对比较后, 即可得到成对比较阵 A , 如式(5)所示:

$$A = (a_{ij})_{8 \times 8}. \quad (5)$$

求解矩阵 A 的最大特征值 λ_{\max} , 得到其对应的特征向量为 w , 将 w 进行归一化处理, 即可得到各准则 C_i 对应的权重值 w_i^0 。矩阵 A 经过一致性检验后得到的 w_i^0 即为有效权重值。

4.4 一致性检验

在成对比较阵确定之后, 可能会出现不一致的情况, 如 $a_{ik} \neq a_{ij} \cdot a_{jk}$ 。这时需要经过一致性检验确认通过矩阵 A 得到的权重值是否有效。

定义矩阵 A 的一致性指标 (Consistency Index, CI) 为:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}, \quad (6)$$

式中: n 为准则层中的准则数, 本文中 $n=8$ 。当 n 固定时, CI 越大, 矩阵 A 的不一致性越严重。为了去除 n 的影响, 引入平均随机一致性指标 RI , 通过随机模拟得到的 α_{ij} 形成 A , 从而得到相应的 CI 值, T. L. Saaty^[20] 的计算结果是 $RI_{n=8} = 1.41$, 则一致性比率为:

$$CR_{n=8} = \frac{CI_{n=8}}{RI_{n=8}}. \quad (7)$$

当 $CR_{n=8} < 0.1$ 时, 满足一致性检验, 其得到的权重值有效^[20]。如不满足一致性检验, 则需重新进行问卷调查获取成对比较矩阵, 直至通过一致性检验为止。

5 实例研究及分析

以图 3、图 4 所示足楦作为分析对象, 采用基于 FAHP 的足楦匹配算法求解其匹配度值。利用足楦 3D 形貌自动测量平台获得足楦的 3D 数据。根据足部压力测试^[22] 或查阅文献^[23] 获取感差阈值、最紧值、最松值等数据, 不同款式鞋楦的值需分别进行测试获取。得到足楦特征参数值, 如表 2 所示。

表 2 足部和鞋楦特征参数值

Tab. 2 Characteristic parameters of foot and shoe-last

特征参数	足部 L_F/mm	鞋楦 L_L/mm	感差阈值(参考) ST/mm	最佳值 $L_L^{\text{optimal}}/\text{mm}$	最紧值 $L_L^{\text{tight}}/\text{mm}$	最松值 $L_L^{\text{loose}}/\text{mm}$	匹配参数值 MP_L
跖趾围	254.35	249.65	6.00	248.35	245.00	252.00	0.644
跗骨围	249.30	258.17	-8.00	257.30	250.00	261.00	0.765
腕围	303.05	339.98	-30.00	333.05	315.00	345.00	0.420
足楦长	344.69	359.11	-15.00	359.69	347.00	368.00	0.954
足楦宽	100.44	97.66	2.00	98.44	96.00	100.00	0.680
腰窝宽	61.75	65.65	-5.00	66.75	62.00	70.00	0.768
后跟宽	63.40	66.21	-2.00	65.40	64.00	68.00	0.688
趾宽	73.22	69.47	3.00	70.22	68.00	74.00	0.662

图 5 准则层中的 8 个足楦匹配参数对目标层的重要性由两部分构成: 一是各参数对成鞋舒适性的影响, 二是各参数变形修改的难易程度。通

过有经验的刻楦师的分析, 结合软件实现不同参数变形要求的算法复杂度, 得到如下 A_1, A_2 两个成对比较阵。鞋楦的款式不同, A_1 与 A_2 的值也

不同。因此,可针对不同款式鞋楦,对刻楦师进行问卷调查,并结合变形算法的复杂度,制成相应款式的特征参数权重表,在进行足楦匹配度值计算时,查表即可。

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 9 & 5 & 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1/3 & 1 & 3 & 2 & 1/3 & 1/2 & 1/2 & 1/3 \\ 1/9 & 1/3 & 1 & 1/2 & 1/8 & 1/5 & 1/7 & 1/9 \\ 1/5 & 1/2 & 2 & 1 & 1/4 & 1/3 & 1/4 & 1/5 \\ 1 & 3 & 8 & 4 & 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1/2 & 2 & 5 & 3 & 1/2 & 1 & 1 & 1/2 \\ 1 & 2 & 7 & 4 & 1 & 1 & 1 & 2 \\ 1 & 3 & 9 & 5 & 1 & 2 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 2 & 2 & 3 & 2 & 9 \\ 1 & 1 & 1 & 2 & 2 & 3 & 2 & 9 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 2 & 2 & 7 \\ 1/2 & 1/2 & 1 & 1 & 1 & 2 & 1 & 5 \\ 1/2 & 1/2 & 1 & 1 & 1 & 2 & 2 & 6 \\ 1/3 & 1/3 & 1/2 & 1/2 & 1/2 & 1 & 1 & 3 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 & 1 & 1/2 & 1 & 1 & 4 \\ 1/9 & 1/9 & 1/7 & 1/5 & 1/6 & 1/3 & 1/4 & 1 \end{bmatrix}$$

根据 A_1 、 A_2 得到如表 3 所示结果:

$$\lambda_{1,max} = 8.141, CI_1 = 0.020, CR_1 = 0.014 < 0.1;$$

$$\lambda_{2,max} = 8.096, CI_2 = 0.014, CR_2 = 0.010 < 0.1;$$

表 3 足楦特征参数权重值结果

Tab. 3 Weights of characteristic parameters for foot and shoe-last

特征参数	$w_{1,i}$	$w_{1,i}^0$	$w_{2,i}$	$w_{2,i}^0$	w_i^0
跖趾围	0.486	0.196	0.522	0.205	0.201
跗骨围	0.169	0.068	0.522	0.204	0.136
腕 围	0.055	0.022	0.407	0.160	0.091
足楦长	0.100	0.040	0.301	0.118	0.079
足楦宽	0.467	0.188	0.336	0.132	0.160
腰窝宽	0.291	0.117	0.179	0.070	0.094
后跟宽	0.459	0.185	0.226	0.088	0.137
趾 宽	0.457	0.184	0.057	0.023	0.104

参考文献:

[1] ROUT N, KHANDUAL A, ZHANG Y F, et al..

据上述实验可知, $CR_1 = 0.014 < 0.1$, $CR_2 = 0.010 < 0.1$, 即成对矩阵 A_1 、 A_2 满足一致性检验, 得到的特征向量(权重值)有效。由此得到图 3、图 4 所示足楦的匹配度值为:

$$MD = MP_L^T \cdot w^0 = 0.69.$$

文中设定阈值 $MD_0^1 = 0.50$, $MD_0^2 = 0.80$, 即 (1) $0.80 \leq MD \leq 1.00$ 时, 该鞋楦满足定制鞋楦初步要求; (2) $0.50 \leq MD < 0.80$ 时, 该鞋楦可作为变形修改备选鞋楦; (3) $MD < 0.50$ 时, 该鞋楦与足部匹配度太低, 需进行母楦级放或无实体楦造型设计。因此, 实例中的鞋楦可作为变形修改的备用鞋楦, 即可用于图 2 中的 STEP8。鞋楦定制中, 针对不同款式的鞋楦定制需求及鞋楦数据库的丰富情况, 可对阈值进行相应调整。阈值 MD_0^1 越大, 挑选出的鞋楦与足部的匹配性越高, 适用于数据库中鞋楦数量较多情形; 若阈值 MD_0^2 越大, 则鞋楦定制精度要求越高, 成鞋的舒适性越好。

6 结 论

本文提出了一种基于 FAHP 的足楦匹配算法, 该算法计算的足楦匹配度值决定了鞋楦定制中具体采用的技术路径和实施细节。本文选取了 8 个足楦匹配参数作为 FAHP 中的准则, 应用模糊分析理论中的三角模糊数求取 8 个足楦参数的匹配值, 以此来衡量足楦匹配情况。根据不同足楦参数对成鞋舒适性的影响情况以及鞋楦变形过程中满足不同参数要求的难易程度, 建立出两个成对比较阵, 之后求取其最大特征值及对应的特征向量, 并对满足一致性检验后的特征向量进行归一化处理, 得到不同参数的权重值。最后, 给出足楦匹配度值计算实例, 采用本文算法求得其匹配度值为 0.69, 说明该鞋楦不满足定制鞋楦的要求, 但可以作为鞋楦变形设计的备用鞋楦, 即基于该鞋楦进行变形修改后, 可满足定制要求。该方法可行性高, 可将基于鞋楦数据库的鞋楦定制与直接基于足部 3D 形貌的无实体楦造型等方法结合起来, 极大提高量足制鞋的效率, 降低定制成本。

3D foot scan to custom shoe last [J]. *Special Issue of IJCCT*, 2010, 1(2,3,4):14-18.

[2] 任怀艺, 王伯雄, 刘辉, 等. 鞋楦定制中非均匀有理

- B 样条特征曲线的自适应变形[J]. *光学 精密工程*, 2013, 21(1): 181-188.
- REN H Y, WANG B X, LIU H, *et al.*. Adaptive deformation of characteristic NURBS curves for customized shoe-last [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(1): 181-188. (in Chinese)
- [3] BERNABEU J A, GERMANI M, MANDOLINI M, *et al.*. CAD tools for designing shoe lasts for people with diabetes [J]. *Computer-Aided Design*, 2013, 45(6): 977-990.
- [4] SHI N, XIONG S P, YI S P, *et al.*. A CAD system for shoe last customization [C]. *Proceedings of the 2009 International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization*, Sanya, P. R. China: CSO, 2009: 957-960.
- [5] SAVADKOOHI B T, AMICIS R D. A CAD system for evaluating footwear fit [J]. *Multimedia, Computer Graphics and Broadcasting*, 2009, 60: 1-7.
- [6] 史辉, 王伯雄, 贾倩倩, 等. 定制鞋楦的分段自适应修改[J]. *光学 精密工程*, 2009, 17(4): 880-885.
- SHI H, WANG B X, JIA Q Q, *et al.*. Segment-based adaptive modification for customized shoe last [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(4): 880-885. (in Chinese)
- [7] LENG J, DU R. A CAD approach for designing customized shoe last [J]. *Computer-Aided Design & Applications*, 2006, 3(1-4): 377-384.
- [8] XIONG S P, ZHAO J H, JIANG Z H, *et al.*. A computer-aided design system for foot-feature-based shoe last customization [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, 46(1-4): 11-19.
- [9] WANG J, ZHANG H N, LU G D, *et al.*. Rapid parametric design methods for shoe-last customization [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, 54(1-4): 173-186.
- [10] HWANG T J, LEE K, OH H Y, *et al.*. Derivation of template shoe-lasts for efficient fabrication of custom-ordered shoe-lasts [J]. *Computer-Aided Design*, 2005, 37(12): 1241-1250.
- [11] KIM S Y, LEE K, HWANG T J. A grouping algorithm for custom-tailored products [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 130-131: 618-625.
- [12] KIM S, MAZUMDER M M G, PARK S J. A conformal mapping approach for shoe last design [C]. *Proceedings of Frontiers in the Convergence of Bioscience and Information Technologies, Jeju, South Korea: FBIT*, 2007: 512-518.
- [13] KIM S, MAZUMDER M M G, PARK S J. A last design with uniform foot pressure free form deformation [C]. *11th International Conference on Intelligent Engineering Systems, Budapest, Hungary: INES*, 2007: 89-92.
- [14] LIU H Z, CHEN L, YE X Z, *et al.*. Parameterized freeform shape design and deformation [C]. *Proceedings of Multimedia and Ubiquitous Engineering, Seoul, South Korea: MUE*, 2007: 626-632.
- [15] ZHANG Y F, LUXIMON A, PATTANAYAK A K, *et al.*. Shoe-last design exploration and customization [J]. *The Journal of the Textile Institute*, 2012, 103(5): 541-548.
- [16] LUXIMON A, LUXIMON Y. Shoe-last design innovation for better shoe fitting [J]. *Computers in Industry*, 2009, 60(8): 621-628.
- [17] 徐从富, 刘勇, 蒋云良. 个性化鞋楦 CAD 系统的设计与实现[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2004, 16(10): 1437-1441.
- XU C F, LIU Y, JIANG Y L. Design and realization of customized shoe last CAD system [J]. *Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics*, 2004, 16(10): 1437-1441. (in Chinese)
- [18] 陆国栋, 顾铭秋, 王剑, 等. 基于脚部三维扫描的鞋楦建模方法研究[J]. *设计与研究*, 2005, 32(4): 13-15.
- LU G D, GU M Q, WANG J, *et al.*. Research of shoe-last modeling algorithm based on feet range scans [J]. *Design and Research*, 2005, 32(4): 13-15. (in Chinese)
- [19] 贾倩倩, 王伯雄, 罗秀芝. 光切法形貌测量中光条中心的亚像素提取 [J]. *光学 精密工程*, 2010, 18(2): 390-396.

- JIA Q Q, WANG B X, LUO X Z. Extraction of central positions of light stripe in sub-pixel in 3D surface measurement based on light sectioning method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(2): 390-396. (in Chinese)
- [20] SAATY T L. *The Analytic Hierarchy Process* [M]. New York: McGraw-Hill, 1980.
- [21] WANG C S. An analysis and evaluation of fitness for shoe lasts and human feet[J]. *Computer in industry*, 2010, 61(6): 532-540.
- [22] 蔡绍,周国鹏. 用于袜模的新型封装服装压力传感器组[J]. *针织工业*, 2010, 1: 60-61.
- CAI SH, ZHOU G P. A new type of packaged clothing-pressure sensor group used in socks model [J]. *Knitting Industries*, 2010, 1: 60-61. (in Chinese)
- [23] 丘理,樊康杰,金轶,等. 鞋楦设计与制作[M]. 北京: 中国纺织出版社, 2006.
- QIU L, FAN K J, JIN Y, *et al.*. *Last Design and Production*[M]. Beijing: China Textile & Apparel Press, 2006. (in Chinese)

作者简介:



任怀艺(1986—),男,河南林州人,博士研究生,2009年于清华大学获得学士学位,主要从事精密测量及逆向工程等方面的研究工作。E-mail: rhy05@mails. tsinghua. edu. cn

导师简介:



王伯雄(1947—),男,江苏海门人,教授,博士生导师,1970年于清华大学获得学士学位,1982年于清华大学获得硕士学位,主要从事精密仪器与测试技术, MEMS 技术, 光学测量技术, 生物医学技术方面的研究。E-mail: wangbx@tsinghua. edu. cn

(版权所有 未经许可 不得转载)