

纬编毛圈织物的设计与三维仿真

穆秀萍, 蒋高明*, 陈钰珊, 关松松, 李炳贤

(江南大学 针织技术教育部工程研究中心, 江苏 无锡 214122)

摘要:为简化纬编毛圈织物的工艺设计流程,实现纬编毛圈织物的设计与三维仿真,在深入研究各种类型纬编毛圈织物编织原理的基础上,总结其仿真结构特点,设计纬编毛圈织物最小组织循环,并展开得到工艺编织图矩阵;在此基础上,建立原料和穿纱数学模型,将编织信息以数组的形式存入计算机。构建纬编毛圈织物中常用的线圈几何模型并计算线圈拉长系数,通过对部分型值点的平移和随机旋转,使模型更加接近实际形态。运用上述理论和模型进行程序设计,采用 WebGL技术和三维图形引擎库 Three.js 绘制线圈三维结构,实现不同类型毛圈织物的设计与三维仿真,为纬编毛圈织物的仿真提供一种新方法。

关键词: 纬编毛圈;线圈模型;旋转矩阵;三维仿真

中图分类号: TS 186.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-1928(2025)02-0133-07

Design and Three-Dimensional Simulation of Weft-Knitted Terry Fabrics

MU Xiuping, JIAN Gaoming*, CHEN Yushan, GUANG Songsong, LI Bingxian

(Engineering Research Center for Knitting Technology, Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: To simplify the process design of weft-knitted terry fabrics and achieve their design and three-dimensional simulation, we conducted in-depth research on the knitting principles of various weft-knitted terry fabrics. We summarized their structural simulation characteristics and designed the minimum organizational cycle for weft-knitted terry fabrics. This was expanded into a process knitting diagram matrix. Based on this framework, we established mathematical models for raw materials and yarn threading, storing the knitting information as arrays in computers. We constructed geometric loop models commonly used in weft-knitted terry fabrics and calculated loop elongation coefficients. The models were optimized to approximate actual forms through translational adjustments and random rotations of specific geometric control points. By implementing these theories and models in programming, we employed WebGL technology and the Three.js 3D graphics engine library to render three-dimensional loop structures. This methodology achieves design and three-dimensional simulation of various terry fabric types, providing an effective approach for simulating weft-knitted terry fabrics.

Key words: weft-knitted terry, loop model, rotation matrix, three-dimensional simulation

近年来,随着绒感面料在家居和服装等领域的广泛应用,纬编毛圈织物凭借其柔软厚实的质地和丰富多样的绒面效果,深受消费者的喜爱,市场需

求量不断增加。为了使纬编生产过程中的设计环节更加高效、便捷^[1],纬编毛圈织物计算机辅助设计平台的研究和开发成为趋势。王雪芳等^[2]根据

收稿日期:2024-10-13; 修订日期:2024-12-31。

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金项目(JUSRP123005)。

作者简介:穆秀萍(2000—),女,硕士研究生。

* 通信作者:蒋高明(1962—),男,教授,博士生导师。主要研究方向为新型针织工艺、纺织数字化技术与纺织结构材料。

Email: jgm@jiangnan.edu.cn

经编毛巾织物的表面特性,提出了毛圈模型填充的仿真方法。丛洪莲等^[3]研究了经编毛巾织物的设计与三维仿真,根据经编织物结构特点构建了理想毛圈模型并进行三维仿真。代振兴等^[4]、韩冲等^[5]通过分析单个绒圈的空间结构并在 3DS MAX 中采用 NURBS 曲线建模,实现了多圈高簇绒地毯外观三维模拟。目前,纬编针织物的设计与三维仿真^[6]多数聚焦于纬编平纹、罗纹以及基本提花组织,对纬编毛圈织物的设计与仿真的研究较少。瞿畅等^[7]以 Pierce 模型为基础,用三次样条曲线模拟纱线轨迹从而实现纬编针织物的三维模拟。郭晨等^[8]利用二维数组建立花型意匠信息与编织信息的转化算法,提出了一种纬编提花毛圈织物的设计方法,但是并未提及纬编毛圈织物的三维仿真。王薇^[9]分析了毛圈织物在线圈结构上的串套关系,但是仿真过程中并未考虑到纬编毛圈实际形态的变化。

文中对纬编普通毛圈织物结构和形态特点进行了分析与研究,借助 JavaScript 和 C# 计算机程序设计语言^[10],提出了一种基于 WebGL 的纬编毛圈织物的三维仿真方法,以期减少实际生产中试样试错成本,提高产品开发效率。

1 纬编毛圈织物的结构特点

纬编毛圈组织(plush stitch)一般由 2 根(或 3 根)纱线编织而成,1 根编织地组织,另外 1 根(或 2 根)编织毛圈组织,是由带有拉长沉降弧的毛圈线圈与地组织线圈组合形成。

纬编毛圈组织主要分为普通毛圈和花式毛圈组织^[11-12]。普通毛圈组织每一个地组织上都有一个毛圈组织,并且毛圈的高度、纱线颜色都是一致的,也称作满地毛圈组织,包含正包毛圈、反包毛圈、正反包毛圈、双面毛圈和多针道变换毛圈组织。花式毛圈组织指通过毛圈形成花纹效应的毛圈组织,可分为浮雕花纹毛圈组织、高低毛圈组织和色织提花毛圈组织。

纬编毛圈织物编织过程与添纱织物相似,它需要两个导纱孔的导纱器喂入纱线^[13]。其中毛圈纱垫入位置较高,地纱垫入位置较低。在沉降片片颚上弯纱的地纱形成平针线圈,在沉降片片鼻上弯纱的毛圈纱沉降弧被拉长形成毛圈,垫纱与弯纱的过程如图 1 所示。片鼻上沿至片颚上沿的垂直距离 L 为片鼻的高度。若要改变毛圈的高度,则需要更换不同高度片鼻的沉降片,普通毛圈机一般可织出

1~4 mm 高度毛圈,其中 2.2~3.8 mm 属于标准高度,文中仿真模型均以标准高度为例。

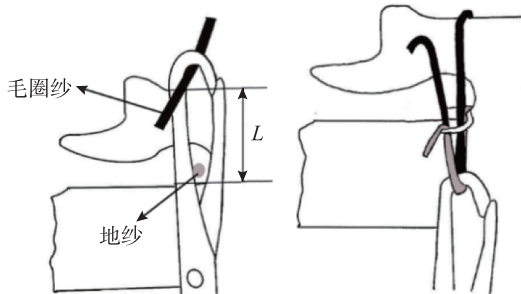


图 1 垫纱与弯纱过程

Fig. 1 Laying-in and sinking processes

2 纬编毛圈织物数学模型建立

2.1 工艺编织图设计模型

织物的编织图对应整片织物,对于多针道纬编毛圈织物可以将其分解成相同的组织小块,先绘制出重复的最小单元称为组织图 K_1 ,假设组织图高度为 h ,宽度为 w ,定义二维矩阵 $K_1 = (k_{i,j})_{h,w}$ 。组织图按照由下往上依次编织,矩阵排列进行倒序,由上往下分别为织物的第 1 路、第 2 路……

$$K_1 = \begin{bmatrix} k_{1,1} & \cdots & k_{1,w} \\ \vdots & k_{i,j} & \vdots \\ k_{h,1} & \cdots & k_{h,w} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $i=1,2,\dots,h$; $j=1,2,\dots,w$; i 对应组织图中的行数, j 对应组织图中的列数, $k_{i,j}$ 表示第 i 行第 j 列的编织信息。

完成组织图后,根据编织图大小将 K_1 按照织物高度和宽度组合成织物编织图矩阵 $K = (k_{I,J})_{H,W}$,假设编织图宽度为 W ,高度为 H 。一般情况下 $h \leq H$; $w \leq W$,且 W 要小于普通毛圈机总针数,因此编织图要获得除 h, w 以外的编织信息 k_{IJ} ,通过对 I, J 进行 MOD 函数处理得到对应编织动作信息后,计算得到 $k_{I,J}$ 。

将织物按照编织动作建立相关色码,采用不同数字表示色码填充矩阵 K_1 。色码 0 表示不编织,色码 1 表示针筒织针成圈编织,色码 4 表示针筒织针集圈编织,色码 9 表示针筒织针浮线编织,色码 21 表示单面毛圈编织动作包含一根地纱和一根毛圈纱,色码 22 表示双面毛圈编织动作包含一根地纱和两根毛圈纱。成圈、集圈和浮线交替编织的组织图及其对应编织图矩阵如图 2 所示,其中 $h=4, w=2, H=8, W=12$ 。

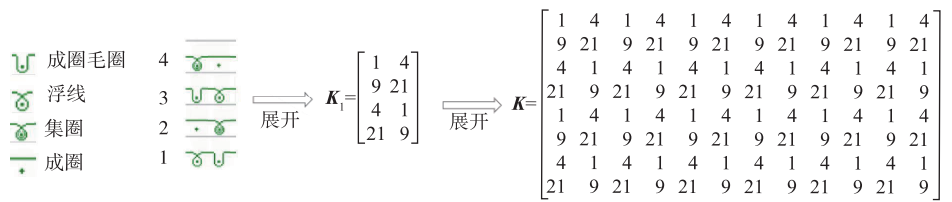


图 2 展开编织图矩阵过程

Fig. 2 Process of expanded knitting diagram matrix

2.2 原料与穿纱设计模型

织物原料对仿真影响较大,因此可以用原料各项参数(如原料名称、粗细、颜色、纱线密度等)建立原料编辑数学模型 S 。

$$S = \begin{bmatrix} s_{1,1} & \cdots & s_{1,f} \\ \vdots & & \vdots \\ s_{e,1} & \cdots & s_{e,f} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: e 为行数, $f=1,2,\cdots,7$ 为列数分别代表原料代号、细度、 F 数、原料比、颜色、纱线密度、粗细倍数, $s_{i,j}$ 表示第 i 个原料对应第 j 个参数的值。

在 2.1 中得到组织图 K_1 ,展开得到编织图矩阵 K ,根据 K 构建穿纱编辑数学模型,将穿纱参数信息以数组的方式储存。

$$E = (a, b, c) \quad (3)$$

式中: E 代表穿纱数组; a 代表织物行数,即花型行,花型行可以确定每根纱线对应线圈处于第几行,如:“ $a_1, b_1, c_1; a_1, b_2, c_2$ ”表示同一个花型行即同一行包含两根纱线信息,若包含多根毛圈纱可以以此类推; b 代表每一行上纱线根数即工艺行,工艺行可以根据展开后编织图得到高度,以正包毛圈为例:“ $b_1 = 1.1, b_2 = 1.2, \cdots$ ”; $c = 1, 2, \cdots, 9$ 代表除工艺行和花型行以外的列数,分别表示编织、穿纱、颜色、送纱(纱长)、单位、段数、面数、仿真和扭转范围。其中参数“仿真”可以确定不同工艺行仿真 z 方向的前后位置,用于确定正包、反包和正反包毛圈,“扭转范围”可以根据实际织物形态确定仿真时的扭转角度。

穿纱参数设置时,对既含有地纱又含有毛圈纱的部分需要在相同的行上再添加一组毛圈纱的数组信息,数组个数与织物编织图高度以及毛圈纱根数相关,可以根据编织图中的每一行色码类型计算毛圈纱个数。

3 纬编毛圈织物几何模型建立

3.1 线圈几何模型建立

纬编普通毛圈织物主要由地组织和毛圈两部

分组成,包括成圈、集圈、浮线、正面毛圈和反面毛圈 5 种线圈类型。在建立线圈模型时,为了使线圈连接更加自然,浮线模型不添加型值点,主要对其他 4 种线圈类型分别建立线圈型值点模型。

纬编针织物在编织过程中沿纬向顺序弯曲,几何形态成三维弯曲的空间曲线,主要由圈干和沉降弧组成。测量、分析成圈线圈在实际织物中的形态及比例,建立理想状态下普通平针线圈模型,不考虑纱线捻度、张力、变形等因素,参考二维 Peirce 线圈模型,在线圈不同位置分别添加型值点(控制点),建立纬编 8 点线圈网格模型,具体如图 3 所示。图 3 中,网格宽度为 g_w ,网格高度为 g_h ,网格侧面宽度为 g_r 。集圈线圈模型则是在平针线圈 8 点模型上去掉 P_1, P_2, P_7, P_8 4 点,构建 4 点集圈线圈模型。

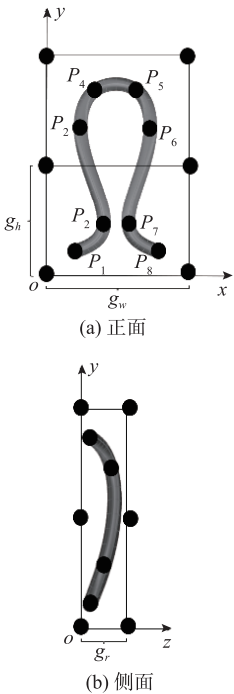


图 3 基本线圈网格模型

Fig. 3 Basic loop mesh model

根据毛圈形成原理可以构建理想状态下的毛圈线圈模型,在成圈线圈的基础上改变 P_1, P_8 点 z 方向的位置,使其朝 z 的负方向移动,凸出于线圈表

面,若是双面毛圈则在单面毛圈的基础上,在正面再添加一根正面毛圈纱,同样改变 P_1, P_8 点 z 方向位置,使其朝 z 的正方向移动。毛圈线圈模型如图 4 所示。

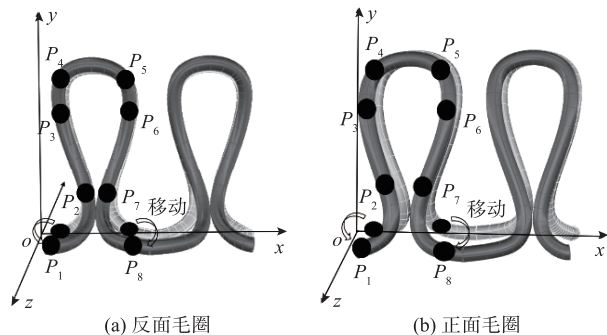


图 4 毛圈线圈模型
Fig. 4 Terry loop model

3.2 线圈拉长模型计算

3.1 中构建了线圈网格型值点模型,其中网格高度、宽度与织物实际行数相等,将不同类型线圈模型按照编织图以及穿纱信息填入网格中,同一编织行的线圈与线圈之间首尾相连形成沿纬向弯曲成圈的纬编织物行。在此过程中可将线圈型值点坐标作为数组存入织物编织图中,以便保存与调用仿真。

在设计纬编多针道毛圈组织时,需要考虑地组织变化,如带有集圈和浮线的纬编满地毛圈织物,仿真时要考虑地组织线圈拉长问题,在之前研究中一般根据线圈拉长高度采用新的线圈模型,但这种方法费时费力,可以通过线圈网格坐标点移动的方法改变 P_3, P_4, P_5, P_6 型值点位置。根据编织图色码不同判断线圈是否拉长,设当前线圈为 $K_{i,j}$, $K_{i,j}$ 是否拉长取决于 $K_{i,j}$ 的下一个工艺行色码是否为具有成圈编织的色码 1, 21 或 22。如果是则需要判断该成圈编织的工艺行是否与原 $K_{i,j}$ 处于同一个花型行,是则判断再下一个成圈工艺行是否为同一个花型行,直至找到不在同一个花型行的成圈线圈,计算该线圈所处的花型行位置,因此可以给出当 $K_{i,j}$ 的下一花型行是集圈色码 4 或浮线色码 9 则线圈拉长,如果有一个集圈式浮线色码,则 $n = 1$, 两个则 $n = 2$, 以此类推不同的编织状态可以得到不同数值的 n , 然后在对应 4 个型值点坐标中 y 方向加上 $n \times g_h$ 则可以得到拉长的线圈坐标。集圈线圈的拉长也同样满足以上计算,若一个循环以集圈或浮线结束,则需要对 n 进行判断,这种情况下为 $n = v - u - 1$, 其中 v 为花型行总高度, u 为 $K_{i,j}$ 所处花型行高

度。 n 的计算流程如图 5 所示。

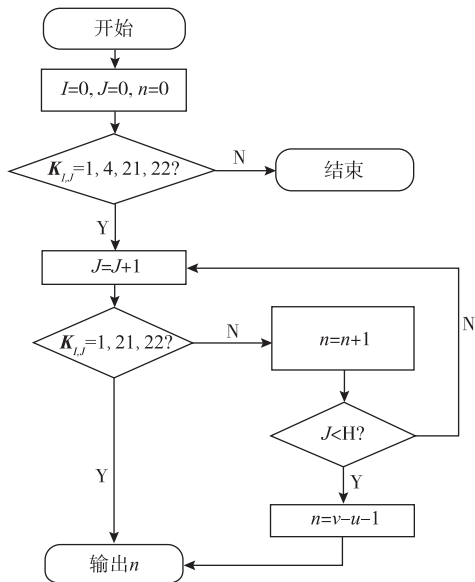


图 5 n 计算流程
Fig. 5 Calculation process of n

图 2 编织图矩阵表示的多针道毛圈织物的三维结构仿真效果如图 6 所示,设计时可以将其用编织图的方式输入系统,仿真时先识别线圈色码值,然后计算对应 n 的值,根据 n 的计算流程,可以得到当 $K = 1$ 时, $n = 2$, 线圈向上拉长两个网格高度; $K = 4$ 和 $K = 21$ 时, $n = 0$, 线圈不拉长; $K = 9$ 时, 不参与 n 的计算。

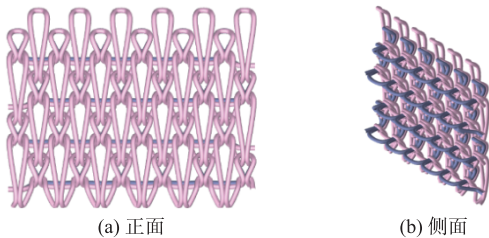


图 6 纬编多针道毛圈结构仿真图
Fig. 6 Simulation of weft-knitted multi-track terry structure

但图 6 为线圈理论结构仿真图,适用于展示无捻度毛圈纱的工艺串套结构,对于有捻度的短纤纱毛圈织物还需要考虑毛圈的扭转才能改善毛圈组织的仿真效果。

3.3 基于毛圈扭转的模型建立

毛圈织物在下机后,因为纱线具有捻度,所以一般情况下,毛圈根据圈高、纱线种类与捻度(以 S 捻为例)会产生不同的扭转角度,类似于纱线的捻回。根据实际观察测试得到圈高在 $2.2 \sim 3.5$ mm 的毛圈标准形态,具体如图 7 所示。但是受纱线捻度和自身张力的影响,部分毛圈会在标准状态下向纱线捻度的反方向即逆时针方向旋转一定角度,且

一般不超过 90° ,部分向顺时针方向旋转一定角度,且一般不超过 30° ,具体旋转方向与纱线捻向有关。设 θ 为绕旋转轴顺时针旋转的角度 ($-90^\circ < \theta < 30^\circ$),对 θ 使用随机函数来模仿毛圈的随机扭转。

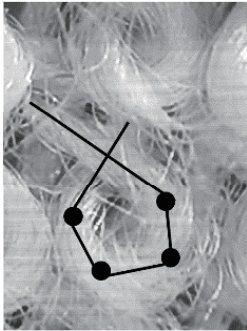


图 7 毛圈形态实物图

Fig. 7 Physical sample of terry loop morphology

为使仿真效果更好,可以在 3.1 毛圈线圈的基础上根据毛圈织物真实的毛圈形态构建新的毛圈线圈模型。为了更加贴合实际扭转形态,在 8 点模型的基础上再添加 4 个点,构建 12 点模型,具体如图 8 所示。

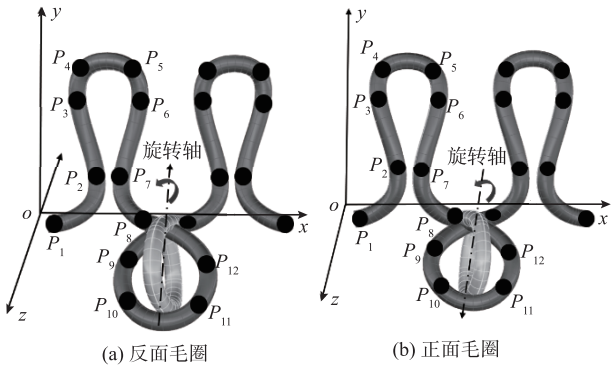


图 8 毛圈扭转模型

Fig. 8 Twisted terry loop model

毛圈在自然状态下具有随机扭转性,仿真时为了实现每一个毛圈都以各自平行于 z 轴的旋转轴旋转,对毛圈上的型值点先使用平移矩阵将毛圈部分的型值点随着各自的旋转轴平移至 z 轴,再对型值点采用旋转矩阵使其绕着 z 轴旋转随机角度 θ ,最后再将旋转后的点平移回各自的底部线圈处,形成具有随机扭转效果的毛圈线圈。

设毛圈部分型值点为 $A(x,y,z)$,采用平移矩阵 $T_{(-P)}$ 计算得到随着旋转轴平移后的坐标,坐标平移完成后建立旋转矩阵 $T_{(z)}$,将平移后的型值点绕 z 轴旋转,旋转后的坐标再利用平移矩阵 $T_{(P)}$ 将毛圈型值点平移回各自底部线圈处,最后得到具有随机扭转的毛圈坐标点 A_1 。计算过程为

$$A_1 = AT_{(-P)}T_{(z)}T_{(P)} \circ \tag{4}$$

式中:
平移矩阵

$$T_{(-P)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -R_1 & -R_2 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

旋转矩阵

$$T_{(z)} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

平移矩阵

$$T_{(P)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ R_1 & R_2 & 0 & 1 \end{bmatrix} \circ$$

计算过程中将坐标原点设置在网格左下角,网格宽度方向个数为 W_1 ,网格高度方向个数为 H_1 ,因此将每个轴移动到 $(0,0,z)$ 处, x 方向移动距离为 $R_1 = g_w \times (j+1)$ 且 $R_1 \leq W_1 \times g_w$, y 方向移动的距离为 $R_2 = g_h \times i$ 且 $R_2 \leq H_1 \times g_h$ 。

4 设计和仿真系统实现

设计过程中先用相应的色码填充组织图,展开后得到编织图矩阵,编辑原料存入系统中,根据织物类型设计穿纱编辑。在计算机编程中,同一花型行设置工艺行“1.1,2.1……”对应平针线圈,工艺行“1.2,2.2……”对应反面毛圈线圈,工艺行“1.3,2.3……”对应正面毛圈线圈,单面正包毛圈织物部分穿纱编辑如图 9 所示。设置“仿真”参数为 m , m 可作为系数与对应工艺行的线圈型值点 z 坐标相加,得到新的坐标

$$z_1 = z + m \times r \circ \tag{5}$$

式中, r 为线圈直径与原料相关,因此当 m 的值为正值时对应工艺行线圈向 z 的正方向移动,反之为负方向移动,通过设置“仿真”参数可以实现同一花型行线圈前后相对位置,从而实现正包、反包和正反包毛圈织物的仿真。

工艺行	花型行	编织	穿纱	颜色	送纱(纱长)	单位	段数	面数	仿真	随机范围
1.1	1	成圈	A		10	cm/25针	48	8	0	-90,30
1.2	1	成圈	B		22	cm/25针	48	8	0	-90,30
2.1	2	成圈	A		10	cm/25针	48	8	0	-90,30
2.2	2	成圈	B		22	cm/25针	48	8	0	-90,30

图 9 穿纱编辑输入框

Fig. 9 Yarn threading editor input box

仿真过程中基于纬编毛圈织物的编织图、原料、穿纱以及线圈型值点模型,在 Visual Studio 平台中,首先采用 C#编程语言将上述参数和模型以字符串 points 的形式储存到 text 文本中,以此减少程序运行过程中后台向前台传输的时间。再用 Java Script编程语言编写代码在前台调用对应 text 文本中的内容,通过三维图形引擎库 Three.js 中的 THREE.TubeBufferGeometry 函数构建 3D 管道几何体,管道路径、半径和弧线段数由 points 参数指定,一个几何体路径包含织物一个工艺行里一根纱线的全部线圈,再根据 THREE.Mesh 函数,将多个几何体合并为一个网格对象,即形成织物三维线圈串套。通过在系统里输入不同参数,可以调整纱线半径、颜色和织物大小等,最后完成纬编毛圈织物的三维仿真。为了进一步模仿线圈的股线效果,可以对生成的织物采用 PBR 纹理映射的方式。一款单面正包全涤纬编毛圈布工艺反面实物与仿真效果比较如图 10 所示,其地组织是普通单面平针织物。正包、反包和正反包毛圈仿真效果如图 11 所示。

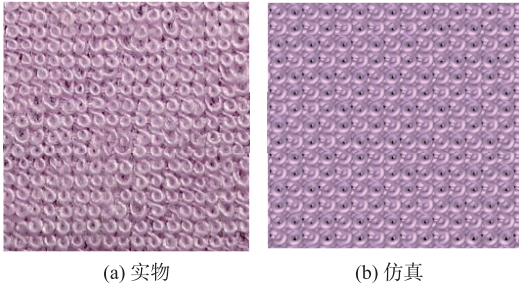


图 10 单面毛圈织物实物图与仿真比较
Fig. 10 Comparison between physical sample and simulation of single-sided terry fabric

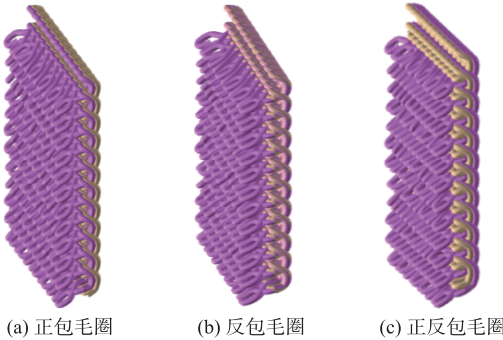


图 11 纬编毛圈织物三维仿真
Fig. 11 Three-dimensional simulation of weft-knitted terry fabric

纬编双面毛圈织物采用双沉降片技术,正、反两面都有毛圈,一个行有三路纱线,因此在穿纱设计中一个花型行对应 3 个工艺行,并设置对应“仿

真”参数,纬编双面毛圈组织工艺正面与反面的仿真效果如图 12 所示。

图 10 中通过仿真图与实际织物对比,可以看出在实际织物中毛圈的形态,仿真图清晰地模拟出毛圈在自然状态下的随机扭转;不同类型的毛圈织物会呈现不同的正反效果,正包毛圈织物工艺正面显示底纱颜色,反包毛圈织物显示毛圈纱的颜色,正反包毛圈织物显示地纱与毛圈交织的颜色;根据图 11 侧面的仿真图可以清楚看出底纱与毛圈纱的位置关系;由图 12 可以看出仿真结果可以较好地表示出双面毛圈织物正反面线圈形态以及正、反面毛圈纱与地纱的串套关系。文中在满足毛圈织物的设计与基本串套结构的基础上添加了根据毛圈实际形态的随机扭转和倒伏,使得仿真效果更加真实。

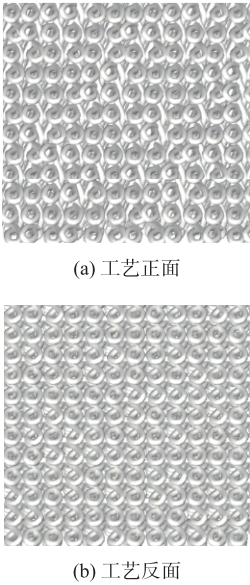


图 12 双面纬编毛圈织物仿真图
Fig. 12 Simulation of double-sided weft-knitted terry fabric

5 结 语

文中根据纬编毛圈织物的结构特点,分析并总结了不同毛圈类型的仿真规律,建立了纬编毛圈织物的数学模型与线圈几何模型,提出了一种有效的设计和三维仿真方法。

1)建立了工艺编织图的设计数学模型,通过设计组织图展开得到编织图矩阵;构建了原料与穿纱数学模型,进一步完成不同类型毛圈织物的设计。

2)基于不同线圈种类分别建立不同类型的线圈几何模型,并分析线圈拉长情况,提出一种线圈自动拉长计算方法。

3)根据毛圈真实的形态,采用随机函数、平移

与旋转矩阵对毛圈部分型值点进行随机旋转,使仿真效果更加符合实际形态。

参考文献:

[1] 郑培晓,蒋高明,丛洪莲,等. 多色调线横条纹织物的设计与三维仿真[J]. 纺织学报,2023,44(6):85-90.
ZHENG Peixiao, JIANG Gaoming, CONG Honglian, et al. Design and three-dimensional simulation of multi-color striped fabrics[J]. Journal of Textile Research, 2023,44(6):85-90. (in Chinese)

[2] 王雪芳,丛洪莲,张爱军. 经编毛巾织物的计算机仿真[J]. 纺织学报,2013,34(5):140-145.
WANH Xuefang, CONG Honglian, ZHANG Aijun. Computer simulation for warp knitted towel fabric [J]. Journal of Textile Research, 2013,34(5):140-145. (in Chinese)

[3] 丛洪莲,李秀丽,张爱军. 经编提花毛巾织物的设计与三维仿真[J]. 纺织学报,2013,34(4):131-136.
CONG Honglian, LI Xiuli, ZHANG Aijun. Design and 3-D simulation of warp-knitted jacquard towel fabrics[J]. Journal of Textile Research, 2013,34(4):131-136. (in Chinese)

[4] 代振兴,陈广锋,陈革. 基于 Rhino-Python 的多圈高簇绒地毯三维仿真[J]. 纺织学报,2020,41(6):69-75.
DAI ZhenXing, CHEN Guangfeng, CHEN Ge. Three-dimensional simulation of multiple high-low loop tufting carpet based on Rhino-Python[J]. Journal of Textile Research, 2020,41(6):69-75. (in Chinese)

[5] 韩冲,孟焯,陈广锋,等. 多圈高簇绒地毯外观的三维仿真[J]. 纺织学报,2009,30(9):127-132.
HAN Chong, MENG Zhuo, CHEN Guangfeng, et al. Three-dimensional simulation of multiple high-low loop tufting carpet [J]. Journal of Textile Research, 2009,30(9):127-132. (in Chinese)

[6] 宋明明,常辰玉,孙雅欣,等. 纬编针织物真实感建模与仿真进展[J]. 现代纺织技术, 2023,31(6):255-266.

SONG Mingming, CHANG Chenyu, SUN Yaxin, et al. Progresson realistic modeling and simulation of weft knitted fabrics [J]. Advanced Textile Technology, 2023, 31 (6): 255-266. (in Chinese)

[7] 瞿畅,王君泽,李波. 纬编针织物基本组织的计算机三维模拟[J]. 纺织学报,2009,30(11):136-140.
QU Chang, WANG Junze, LI Bo, Computer 3-D simulation on basic structure of weft knitted fabrics[J]. Journal of Textile Research, 2009,30(11):136-140. (in Chinese)

[8] 郭晨,蒋高明. 纬编提花毛圈织物计算机辅助设计[J]. 纺织学报,2014,35(4):142-147.
GUO Cheng, JIANG Gaoming, Computer aided designing system of weft knitted jacquard plush fabrics [J]. Journal of Textile Research, 2014,35(4):142-147. (in Chinese)

[9] 王薇. 基于互联网的纬编 CAD 系统设计与仿真[D]. 无锡:江南大学,2018:58-61.

[10] 陈钰珊,蒋高明,李炳贤. 纬编绕经织物设计与三维仿真[J]. 纺织学报,2022,43(12):62-68.
CHEN Yushan, JIANG Gaoming, LI Bingxian, Design and 3-D simulation of weft knitted wrap fabric [J]. Journal of Textile Research, 2022,43(12):62-68. (in Chinese)

[11] 蒋高明,郑培晓. 全成形针织毛衫编织工艺与装备技术研究进展[J]. 服装学报, 2019, 4(1):40-48.
JIANG Gaoming, ZHENG Peixiao. Research progress on knitting and equipment technology of whole knitted garment[J]. Journal of Clothing Research, 2019, 4(1):40-48. (in Chinese)

[12] 蒋高明. 针织学[M]. 北京:中国纺织出版社,2012:95-98.

[13] 郑培晓,蒋高明. 基于 WebGL 的纬编提花织物三维仿真[J]. 纺织学报,2021,42(5):59-65.
ZHENG Peixiao, JIANG Gaoming. Three-dimensional simulation of weft-knitted jacquard fabric based on WebGL [J]. Journal of Textile Research, 2021,42(5):59-65. (in Chinese)

(责任编辑:卢杰)