

DOI: 10.13475/j.fzxb.20171002706

纬编针织物几何建模及其算法

汝欣¹, 彭来湖¹, 吕明来², 史伟民¹, 胡旭东¹

(1. 浙江理工大学 浙江省现代纺织装备技术重点实验室, 浙江 杭州 310018;

2. 杭州旭仁纺织机械有限公司, 浙江 杭州 310018)

摘要 为更真实地模拟纬编针织物几何形态, 丰富细节特征, 采用三层纤维螺旋的加捻纱线模型刻画针织物中纱线形态。将最小旋转标架作为计算加捻纱线中各纤维位置的局部坐标, 通过几何变换、坐标变换等方法, 构建任意曲线为中心线的加捻纱线模型。根据成圈、集圈、浮线3种典型纬编针织物线圈结构, 通过反算法求取3次非均匀有理B样条曲线控制点, 进而构建线圈纱线中心线模型。在此基础上, 提出根据结构意图构建加捻纱线针织物几何模型的算法, 并给出相应算例。结果表明: 本文算法所建立的加捻纱线针织物几何模型保留了纱线加捻的细节特征, 外观更加贴近真实织物。

关键词 纬编针织物; 加捻纱线模型; 几何模型; 纬编线圈结构

中图分类号: TS 186.2 文献标志码: A

Modelling and algorithm of weft knitted fabric

RU Xin¹, PENG Laihu¹, LÜ Minglai², SHI Weimin¹, HU Xudong¹

(1. Key Laboratory of Modern Textile Machinery & Technology of Zhejiang Province, Zhejiang Sci-Tech University,

Hangzhou, Zhejiang 310018, China; 2. Hangzhou Xuren Textile Machinery Co., Ltd.,

Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

Abstract For more real simulated effect and enrichment of details of weft knitted fabric geometry, this paper models the fabric at the scale of fibers. A three-layer spiral fiber structure of twisted yarn model was established for yarn geometry of weft knitted fabric. Rotation minimizing frames were regarded as local coordinates for calculating fibers positions. A yarn model was established based on the methods of geometric and coordinate transformation, which had arbitrary curved center line. According to three basic knitted fabric structures of knit, tuck and float, three typical structure units of weft knitted fabric were constructed with non-uniform rational B-Splines, which were obtained with calculated control points. Finally, an algorithm for building a geometric model of weft knitted fabric using twisted yarns based on the structural notation was proposed. A sample using the algorithm was shown. The geometric model of weft knitted fabric with twisted yarn established according to the algorithm in this paper has remained details of yarn twisting, which looks closer to the real fabric.

Keywords weft knitted fabric; model of twisted yarn; geometric model; weft-knitted structure

随着纬编技术的发展, 纬编针织物在各行各业中的应用逐渐增多, 从传统的服袜发展到鞋类、医疗用品、复合材料等领域。由于针织物结构、纱线配置变化复杂多样, 纬编针织物的成型、性能研究一直是针织领域研究的热点问题。建立合理的纬编针织物

几何模型是对纬编针织物进行深入研究的基础。

目前针织物建模中采用最多的纱线模型为圆柱体模型。然而由于纱线一般为粗糙表面, 并且具有一定的捻度和弹性, 若用光滑的圆柱面代替, 诸如纱线视觉、力学特性如光泽、摩擦、弹性等无法真实再

收稿日期: 2017-10-10 修回日期: 2018-06-12

基金项目: 国家自然科学基金联合基金重点项目(U1609205)

第一作者简介: 汝欣(1989—), 女, 讲师, 博士。主要研究方向为纺织机械CAD、智能纺织装备技术。

通信作者: 史伟民, E-mail: swm@zstu.edu.cn。

现。如何使织物模型更贴近真实,很多学者对此进行了研究。有研究使用特殊截面旋转模拟纱线加捻效果,如对纱线截面增加凹凸扰动^[1],采用锯齿形截面^[2],使用多纱线截面形成股线效果^[3]。为追求真实的视觉效果,一些学者通过渲染方法如设置织物材料、光照来模拟纱线^[4-5]。

目前国内外对针织物建立几何模型主要有分段函数模型、样条曲线模型2种。分段函数模型中,早期比较有代表性的是 Peirce 提出的用分段函数表示线圈模型^[6]。Pierce 线圈模型是比较经典的几何模型,该模型使用半圆环表示针编弧、沉降弧,使用圆柱表示圈柱。虽然 Pierce 模型过于理想化,模型形态与实际织物有一定差距,但仍为后来的研究提供了理论基础。为更好地描述线圈结构,很多学者在 Peirce 基础上提出了改进模型^[7-10]。Leaf 和 Glaskin 模型由4个互相对称的空间圆弧连接而成^[11],考虑了弯纱成圈时纱线的扭曲情况,该模型更贴近真实的线圈。Kurbak 建立了如双反面、集圈、提花、间隔等众多纬编针织物模型^[12-14],所建立的模型更加精细,更贴近真实织物形态。分段函数法建立的模型比较直观,但是为了贴近织物真实形态,分段函数往往比较复杂,而且变形控制比较复杂,不能很好地适应织物变形的需求。利用非均匀有理 B 样条(NURBS)建立针织物模型的方法主要是根据织物的控制点或型值点构建曲线方程^[15-16]。样条曲线法建立的模型比较精准灵活,更易贴近织物实际形态,特别是样条曲线的形式更适于曲线形态控制。随着计算技术的发展,曾经计算复杂的 NURBS 曲线已摆脱计算机性能的限制,在越来越多的研究中得到应用。目前样条曲线法建模多采用测量实际织物获取型值点的方法,所建立的织物几何模型已经比较贴近真实织物形态。然而纬编针织物多采用加捻纱线编织,目前建模过程中多采用圆柱体或特殊表面柱体的纱线模型,没有从纱线根本结构进行建模,无法满足进一步研究的需求。

本文提出一种采用加捻纱线的纬编针织物几何模型,从加捻纱线模型、纱线中心线几何形态2个维度描述纬编针织物几何形态,并提出相应建模算法,以期对针织物的仿真、性能分析的进一步研究建立基础。

1 纱线模型

1.1 加捻纱线几何模型

纱线的结构是决定纱线内在性质和外观特征的主要因素^[17]。加捻是使纱线具有一定的强伸性和

稳定外观形态的必要手段。加捻纱线的形态主要由纱线中纤维类别、纱线捻度、纱线号数、纱线捻向等因素决定。图1示出圆型截面纤维在纱线中的排列状态。纱线中圆型纤维分层排列,由1根纤维构成第1层,6根纤维构成第2层,12根纤维构成第3层^[18]。图中 P_2 为第2层纤维起始点, α_2 为 P_2 与原点连线与 x 轴的夹角。该模型可根据各纱线实际情况模拟多层纤维加捻的情形,则每层纤维数

$$n_i = \frac{\pi}{\arcsin(2(i-1))}$$

式中: i 为纤维从内至外的层数; n_i 为第 i 层纤维根数。纱线中纤维加捻的螺旋结构及其展开图如图2所示。建立右手坐标系, z 轴与纱线中心线重合,外面2层纱线围绕中心线螺旋, θ_i 为第 i 层的捻回角, rad。则具有 i 层纤维的加捻纱线半径

$$r_{yi} = (2i - 1)r$$

式中: r 纤维半径, mm。第 i 层纤维围绕中心线螺旋的螺旋半径为

$$r_i = 2r(i - 1)$$

式中: $i \geq 2$ 。

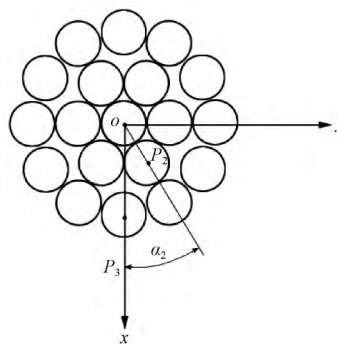


图1 纱线截面

Fig. 1 Cross section of twisted yarn

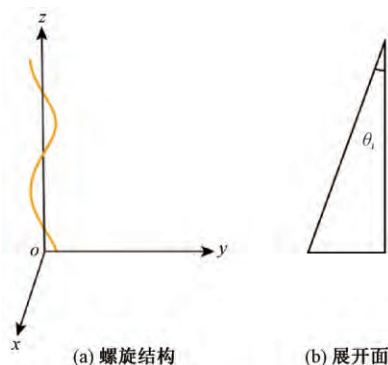


图2 纱线中的纤维的螺旋结构和展开面
Fig. 2 Helical-structure (a) and unfolded surface (b) of fiber in twisted yarn

设纱线中心线为用参数表示的空间曲线,纱线中心线方程为

$$Q(u) = x(u)i + y(u)j + z(u)k$$

式中: i, j, k 为坐标向量。其中纤维层数 $i = 1$ 时,

$$\begin{cases} x(u) = 0 \\ y(u) = 0 \\ z(u) = ul \end{cases}$$

式中: $u \in [0, l]$ l 为中心线长度, mm。

当 $i > 1$ 时, 第 i 层第 j 根纤维的中心线方程为:

$$\begin{cases} x(\varphi) = r_i \cos(\alpha_i + (j-1)\frac{2\pi}{n_i} + p\varphi) \\ y(\varphi) = r_i \sin(\alpha_i + (j-1)\frac{2\pi}{n_i} + p\varphi) \\ z(\varphi) = \frac{\varphi r_i}{\tan\theta_i} \end{cases}$$

式中: j 为第 i 层的起始纤维开始逆时针计数的纤维序号; φ 为螺旋角 $\varphi \in [0, \frac{l}{h_i}]$ rad, 其中螺距 $h_i = 2\pi r_i / \tan\theta_i$, mm; α_i 为第 i 层的起始纤维中心点与原点连线 OP_i 与 x 轴的夹角, rad; 当纱线加捻为 S 捻(右手旋)时 p 为 1, 当纱线加捻为 Z 捻(左手旋)时 p 为 -1。

1.2 中心线为任意曲线的加捻纱线几何模型

由于纱线在针织物中弯曲成圈, 线圈互相串套连接, 不同针织物组织中纱线弯曲形态各异, 因此要建立中心线为任意曲线的加捻纱线模型。由于模型最终在世界坐标系中进行表达, 而在世界坐标系中直接给出任意曲线加捻纱线的公式比较困难, 本文通过纱线的几何变换、坐标系变换构建世界坐标系下的纱线模型。

建立世界坐标系 $oxyz$, 设 $Q(u)$ 共取 n 个采样点, 采样点的参数 $u_k = kl/n$ $k = 0, 1, \dots, n-1$ 。则在曲线上任一采样点 $Q(u_k)$ 处所建立局部坐标系为 $o'_k x'_k y'_k z'_k$, 示意图如图 3 所示。

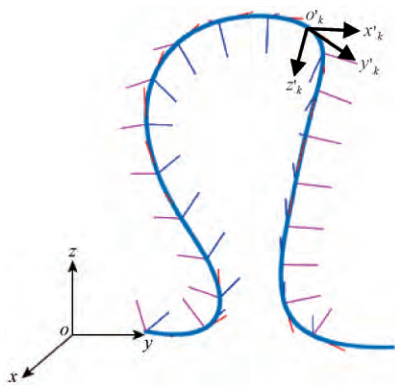


图 3 加捻纱线模型坐标系

Fig. 3 Coordinate system of twisted yarn

为保证各采样点处所建立的一系列局部坐标平滑变化, 本文采取最小旋转标架作为采样点的局部

坐标系, 该标架不随曲线的瞬时切线方向变化而旋转。记 $U(u)$ 为样条曲线 $Q(u)$ 的最小旋转标架。

$$U(u) = (r(u) \ s(u) \ t(u))$$

式中: $r(u), s(u), t(u)$ 为最小旋转标架向量。设单参数族单元向量 $f(u)$ 与 $t(u)$ 垂直, 对于 $f(u)$ 存在 1 个 $\theta(u)$, 使得以下方程有解。若以下方程有解则称存在最小旋转及最小旋转向量。

$$\begin{cases} f'(u) - \theta(u)t(u) = 0 \\ f(u)t(u) = 0 \end{cases}$$

$f(u) = (f_1(u) \ f_2(u) \ f_3(u))^T$, 第 1 个等式约束 $f(u)$ 的变化向量与切向量平型, 第 2 个等式约束 2 个向量正交。本文采用双射法求最小旋转坐标^[19]。

则根据任意中心线计算加捻纱线模型的算法如下。

输入: 任意曲线中心线。

输出: 任意曲线的加捻纱线模型。

步骤 1: 建立绝对坐标系。

步骤 2: 确立任意曲线的采样的点数。

步骤 3: 确立任意曲线的各采样点。

步骤 4: 确立一采样点处的局部坐标系

步骤 5: 计算与曲线采样点处弧长相同的原直线纱线模型界面上各纤维中心线对应点坐标。

步骤 6: 将直线模型中各纤维中心线对应点变换到局部坐标系中。

步骤 7: 将局部坐标系中各点坐标变换到绝对坐标系中。

步骤 8: 重复步骤 4~7, 直至所有采样点的变换都完成。

步骤 9: 返回任意曲线的加捻纱线模型。

2 基于 NURBS 的结构单元模型

2.1 纱线中心线几何形态数学描述

纬编针织物是由纱线沿纬向垫放在织针上与相邻横列纱线互相嵌套形成线圈, 因此可将纬编针织物中纱线几何形态看作一种空间曲线。

NURBS 是一种广泛应用于曲线设计与造型的参数曲线, 提供了包括 Bezier、有理 Bezier、均匀 B 样条等多种曲线的统一表达式, 并且能够精确表达圆锥曲线。曲线形态由控制点控制, 权因子可调整控制点对曲线的控制作用, 灵活简便, 拟合准确。

一条 k 次 NURBS 曲线可表示为一段有理多项式矢函数, 如下式所示

$$Q(u) = \frac{\sum_{i=0}^n \omega_i P_i N_{i,k}(u)}{\sum_{i=0}^n \omega_i N_{i,k}(u)}$$

式中: ω_i 是权因子, P_i 为控制顶点, $N_{i,k}(u)$ 是由节点矢量 $U = [u_0, u_1, \dots, u_{n+k+1}]$ 决定的 k 次规范 B 样条基函数。

由于构建 NURBS 曲线必须知道曲线的控制点, 根据上述结构单元曲线上的型值点 Q_k 反算出曲线的控制顶点 $P_i (i = 0, 1, \dots, n+k-1)$ 。再由控制顶点构造非均匀有理 B 样条曲线。通过确定节点矢量, 控制顶点权因子, 控制顶点和补充的相应边界条件, 建立线圈单元模型。

本文线圈模型采用三次 NURBS 曲线, 节点向量首末取 4 重重节点, 采取累积弦长参数化法^[21] 求解节点, 该方法可反映数据点按弦长的分布情况, 则节点矢量 U 为:

$$\begin{cases} u_0 = u_1 = u_2 = u_4 = 0 \\ u_{i+3} = u_{i+2} + |\Delta p_i| \end{cases}$$

式中: $i = 1, 2, \dots, 8; \Delta p_i = p_{i-1} - p_i$ 。对数据点作规范化处理, 并将规范化后的参数序列与其相对应的矢量数据点带入三次 NURBS 的数学函数, 同时满足插值数据点与样条曲线首末端点与型值点重合的条件, 联合各方程, 即可求出样条曲线控制点。

2.2 线圈结构单元中心线几何模型

虽然纬编针织物花色种类繁多, 但无论什么种类或多么复杂的织物都始终遵循纱线横向垫纱、互相串套的基本工艺特征。纬编针织物 3 种基本结构为成圈、集圈、浮线^[20]。复杂织物大多都是在这些基本结构上变化、组合而成。

成圈结构对应的结构单元为线圈。线圈是组成针织物的基本结构单元, 其几何形态呈三维弯曲。集圈过程由于编织中织针退圈不足形成悬弧。由于针织物的互相嵌套关系, 集圈工艺最终呈现的结构为线圈和悬弧单元的组合。浮线过程由于织针未参加编织, 针钩上的旧线圈需要到下一次参加编织时才能成圈, 当前针呈现出纱线水平浮线。要对纬编针织物进行建模, 首先要对这线圈、悬弧、浮线 3 类结构单元进行建模。

由于针织物受到编织设备、编织工艺、纱线性质等诸多因素影响, 同一种组织结构在不同织物中呈现的形状也略有不同。文本采取 NURBS 曲线对针织物结构单元几何形态进行描述, 对结构单元的特征点进行取样, 以此特征点作为曲线型值点, 反算 NURBS 曲线控制点, 构造曲线方程。对于不同织物中结构单元形态的差异, 可以通过调整型值点的位

置来控制曲线形状。

线圈单元由于相邻线圈的嵌套作用, 沉降弧、针编弧成圆弧状, 圈柱向中间收拢, 线圈为对称图形, 线圈的基本形状如图 4 所示。根据线圈形状, 模型共选取 13 个型值点, 分为记为 $Q_i (x_i, y_i, z_i) (i = 0, 1, \dots, 12)$ 。各特征点如下: 线圈的起始和终点各选取 1 个特征点 (Q_0, Q_{12}), 即为沉降弧的端点; 沉降弧与圈柱连接处两侧分别选取 2 个特征点 (Q_1, Q_2, Q_{10}, Q_{11}); 两侧圈柱上选 1 个特征点 (Q_3, Q_9); 针编弧与圈柱连接处两侧分别选取 2 个特征点 (Q_4, Q_5, Q_7, Q_8); 针编弧最高点选取 1 个特征点 (Q_6)。

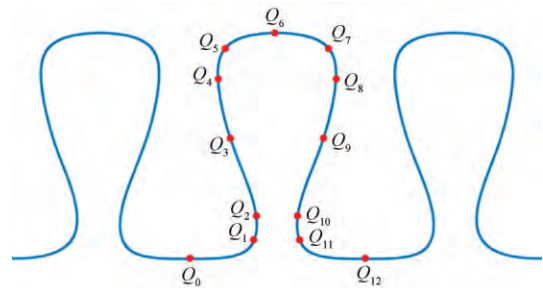


图 4 线圈单元示意图
Fig. 4 Knit unit diagram

悬弧单元由于没有上一线圈的约束, 圈柱向两侧扩张。悬弧单元的基本形状如图 5 所示。特征点的选取方式同线圈单元。建模时悬弧单元最高点略低于线圈最高点, 在厚度方向上, 拉长的线圈在前, 悬弧在后。

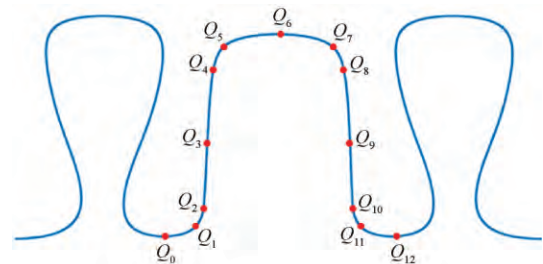


图 5 悬弧单元示意图
Fig. 5 Tuck unit diagram

浮线单元是以水平浮线状连接相邻的线圈。浮线单元示意图如图 6 所示。浮线单元只需选取起点、终点为特征点即可。浮线处于被拉长的线圈后面。

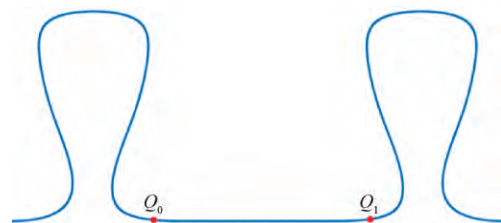


图 6 浮线单元示意图
Fig. 6 Float unit diagram

3 织物几何模型

建立纬编针织物模型,首先根据结构意匠图及结构单元模型建立织物中心线模型,再依据中心线及纱线模型构建最终模型,具体算法如下。

输入: 织物结构意匠图。

输出: 采用加捻纱线的纬编针织物模型。

步骤 1: 输入结构意匠图。

步骤 2: 根据结构意匠图分析各结构单元尺寸、位置。

步骤 3: 根据分析结果计算织物上各型值点坐标。

步骤 4: 根据累积弦长法反算 NURBS 曲线控制点。

步骤 5: 根据控制点计算 NURBS 方程。

步骤 6: 计算中心线各点坐标。

步骤 7: 计算加捻纱线织物各点坐标。

步骤 8: 输出采用加捻纱线的纬编针织物模型。

本文使用 MatLab 建立采用加捻纱线的纬编针织物几何模型,所使用的相关参数如表 1、2 所示。

表 1 纱线参数

Tab.1 Parameters of yarn

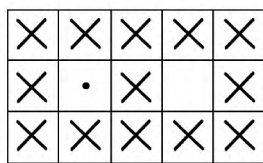
| 纤维参数 | | 起始角/(°) | | 捻回角/(°) | |
|-------|----|---------|-------|---------|-------|
| 半径/mm | 层数 | 第 2 层 | 第 3 层 | 第 2 层 | 第 3 层 |
| 0.011 | 3 | 0 | 30 | 15 | 30 |

表 2 织物参数

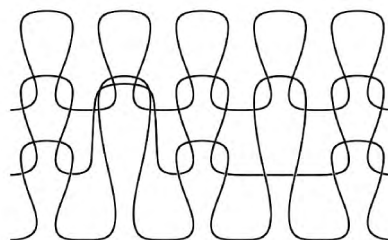
Tab.2 Parameters of fabric mm

| 纱线半径 | 线圈宽 | 线圈高 | 织物厚 |
|-------|-----|-----|------|
| 0.055 | 0.7 | 0.9 | 0.28 |

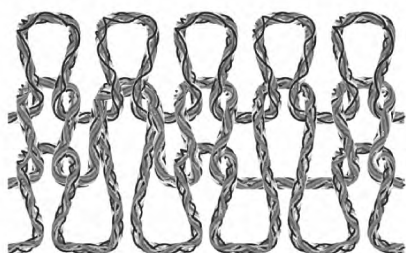
整个建模过程如图 7 所示。图中“×”表示成圈“•”表示集圈“□”表示浮线。



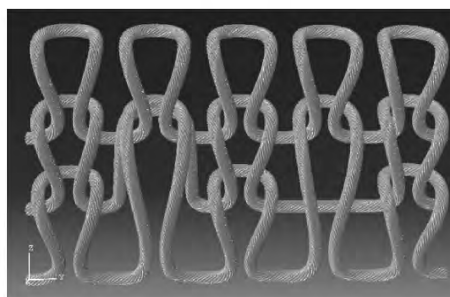
(a) 结构意匠图



(b) 中心线图



(c) 加捻纱线



(d) 渲染图

图 7 纬编针织物建模过程

Fig. 8 Modelling process of weft knitted fabric. (a) Structure notation; (b) Central line diagram; (c) Twisted yarn diagram; (d) Render diagram

4 结束语

本文采用 3 层纤维加捻纱线结构,使用 NURBS 曲线构建 3 种纬编针织物结构单元,结合织物结构意匠图,构建采用加捻纱线的纬编针织物几何结构模型。此模型可应用于纬编针织物仿真及性能研究。与现有模型相比,采用加捻纱线模型所构建的纬编针织物模型更加精细,外形上更加逼真,结构上

更加贴近实际真实织物。虽然采用多层纤维结构建模计算量较大,但是计算机性能不断进步,算法不断提高,该模型更适用于对针织物变形等的进一步研究。

FZXB

参考文献:

[1] 郑天勇,崔世忠. 用 B 样条曲面构建纱线三维模型的研究: I: 具有不同截面的三维纱线模型的构造[J]. 纺织学报, 2006, 27(2): 53-57.
ZHENG Tianyong, CUI Shizhong. Study on constructing

- the 3D yarn model by B-spline surface: part I: construction of the 3D yarn model with different cross sections [J]. *Journal of Textile Research*, 2006, 27(2): 53-57.
- [2] 李英琳. 纬编针织物三维仿真研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2013: 104.
LI Yinglin. Study on the 3D modeling and visual simulation of weft knitted fabric [D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University 2003: 104.
- [3] 沙莎 蒋高明 张爱军 等. 纬编针织物线圈建模与变形三维模拟[J]. *纺织学报*, 2017, 38(2): 177-183.
SHA Sha, JIANG Gaoming, ZHANG Aijun, et al. Three-dimensional modeling and deformation for weft knitted fabric loops [J]. *Journal of Textile Research*, 2017, 38(2): 177-183.
- [4] 吴周镜 宋晖 李柏岩 等. 纬编针织物在计算机中的三维仿真[J]. *东华大学学报(自然科学版)*, 2011, 37(2): 210-214.
WU Zhoujing, SONG Hui, LI Baiyan, et al. 3D Simulation of weft knitted fabric in computer [J]. *Journal of Donghua University(Natural Science Edition)*, 2011, 37(2): 177-183.
- [5] 王少俊 包晓敏. 基于 OpenGL 的纬编针织物三维仿真真实感的研究[J]. *浙江理工大学学报*, 2012, 29(3): 311-314.
WANG Shaojun, BAO Xiaomin. The research on the sense of reality in the 3D simulation of weft-knitted fabric based on OpenGL [J]. *Journal of Zhejiang Sci-Tech University*, 2012, 29(3): 311-314.
- [6] PEIRCE F T. Geometrical principles applicable to the design of functional fabrics [J]. *Textile Research Journal*, 1947, 17(3): 123-147.
- [7] 吴周镜. 无缝针织物的织物外观模拟技术的研究与实现[D]. 上海: 东华大学, 2011: 25.
WU Zhoujing. Research and implement of appearance simulation technology [D]. Shanghai: Donghua University 2011: 25.
- [8] 汪育桑 冯勋伟. 基于几何模型的纬编提花织物结构计算机辅助设计[J]. *中国纺织大学学报*, 2000(6): 66-70.
WANG Yusang, FENG Xunwei. CAD of weft knitted jacquard fabrics based on geometrical model [J]. *Journal of China textile university*, 2000(6): 66-70.
- [9] 刘夙 龙海如. 纬平针织物的计算机三维模拟[J]. *纺织学报*, 2007, 28(12): 41-44.
LIU Su, LONG Hairu. Three-dimensional computer simulation of plain weft knitted fabric [J]. *Journal of Textile Research*, 2007, 28(12): 41-44.
- [10] 史晓丽 耿兆丰. 针织三维效果仿真的研究及实现[J]. *东华大学学报(自然科学版)*, 2003(3): 47-50.
SHI Xiaoli, DI Zhaofeng. Study and realization of three-dimension simulation of knitting [J]. *Journal of Donghua University(Nature Science Edition)*, 2003(3): 47-50.
- [11] LEAF G A V, GLASKIN A. The geometry of a plain knitted loop [J]. *Journal of the Textile Institute*, 1955, 46(9): T587-T605.
- [12] KURBAK A, SOYDAN A S. Basic studies for modeling complex weft knitted fabric structures: part III: a geometrical model for 1 × 1 purl fabrics [J]. *Textile Research Journal*, 2008, 78(5): 377-381.
- [13] KURBAK A, KAYACAN O. Basic studies for modeling complex weft knitted fabric structures: part V: geometrical modeling of tuck stitches [J]. *Textile Research Journal*. 2008, 78(7): 577-582.
- [14] KURBAK A. Geometrical models for balanced rib knitted fabrics: part I: conventionally knitted 1 × 1 rib fabrics [J]. *Textile Research Journal*, 2009, 79(5): 418-435.
- [15] 瞿畅 王君泽 李波. 纬编针织物三维仿真系统的开发[J]. *纺织学报*, 2011, 32(4): 57-61.
QU Chang, WANG Junze, LI Bo. Development of 3-D simulation system of weft knitted fabric [J]. *Journal of Textile Research*, 2011, 32(4): 57-61.
- [16] 蒙冉菊 方园. NURBS 样条曲线纬编针织物线圈结构的建模分析[J]. *浙江理工大学学报*, 2007, 24(3): 219-224.
MENG Ranju, FANG Yuan. The modeling analysis of knitting fabric loop construction using NURBS curve [J]. *Journal of Zhejiang Sci-Tech University*, 2007, 24(3): 219-224.
- [17] 于伟东. *纺织物理* [M]. 第2版, 上海: 东华大学出版社, 2002: 281.
YU Weidong. *Textile Physics* [M]. 2nd ed. Shanghai: Donghua University Press, 2002: 281.
- [18] SCHWARZ E R. Certain aspects of yarn structure [J]. *Textile Research Journal*, 1951, 21(3): 125-136.
- [19] WANG W, ZHENG D, LIU Y. Computation of rotation minimizing frames [J]. *Acm Transactions on Graphics*, 2008, 27(1): 2.
- [20] 龙海如. *针织学* [M]. 北京: 中国纺织出版社, 2008: 29-36.
LONG Hairu. *Knitting Technology* [M]. Beijing: China Textile & Apparel Press, 2008: 29-36.
- [21] 施法中. 计算机辅助几何设计与非均匀有理 B 样条 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2001: 47.
SHI Fazhong. *CAGD & NURBS* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2001: 47.