纺织学报 Vol.45, No.1

Journal of Textile Research Jan., 2024

DOI: 10. 13475/j.fzxb.20221002201

基于交织点改进弹簧-质点模型的 纬编针织物动态变形模拟

常辰玉¹,王雨薇¹,原旭阳¹,刘 锋¹,卢致文¹²

(1.太原理工大学 轻纺工程学院, 山西 晋中 030600;

2.安徽省天助纺织科技集团股份有限公司,安徽阜阳 236000)

摘 要 为了对不同线圈单元组成的纬编针织物进行动态变形模拟 从而预设织物结构形态和加速面料设计流程。首先通过建立三维结构模型 获得了线圈中心线型值点和交织点之间的关系 并基于交织点改进传统弹簧-质点模型 得到了与纬编针织物适配度更高的变形模型 然后以交织点为桥梁关联结构模型和变形模型 通过 NURBS 曲线反算原理绘制线圈中心线路径 采用力学求解方法不断更新织物形态变化 使用计算机工具展现了关联模型的动态模拟过程 并举例展示了不同织物组织的变形模拟效果。模拟效果表明 建立的三维结构模型具有合理性与真实性 改进的弹簧-质点模型具有极高的适配性 基于交织点关联两者为后续模拟提供了支撑 采用 NURBS 曲线并通过力学求解等方法实现纬编针织物的三维动态模拟具有可行性。

关键词 交织点;线圈结构模型;弹簧-质点模型;NURBS曲线;动态变形模拟;动力学求解;纬编针织物中图分类号:TS 184 文献标志码:A

纬编针织物是由一个个的线圈单元组成的,线圈单元的类型除成圈外还有集圈、浮线和移圈等,因为线圈单元组合的多样性,以及不同线圈之间的穿套关系和牵拉作用导致纬编针织物的结构变形,从而实现了丰富的织物外观。为建立合理的纬编针织物及其变形模型,并且实现动态模拟,可以做到对织物整体结构的控制以及对线圈结构细节的描述,从而预设织物形态、降低生产成本和提高生产质量。

对针织物进行建模的方法主要有基于几何的方法和基于物理的方法:基于几何的方法常用于均匀规则的织物,可以使用线圈单元的组合与排列进行模型的构造;而对于变形织物,由于会产生力的作用,使用基于物理的方法可以很好地描述织物的形变^[1]。弹簧-质点模型具有描述直观、实现简单和计算速度快等优点,是出现较早且应用较广泛的物理模型^[2]:刘瑶^[3]使用弹簧-质点网格模型和二维网格模型作为分析羊毛衫线圈变形的方法,通过测量相关偏移量获得变形方程,但研究缺少对织物的受力分析;雷惠^[4]以线圈根部所在位置将线圈设置

为一个质点,建立质点模型而简化弹簧-质点模型,并进行二维仿真;沙莎^[5]提出立体化的弹簧-质点模型模拟组织结构较复杂的纬编针织物,模型复杂、运算量大、变形模拟时间长;汝欣^[6]提出对应织物弹簧-质点模型初始状态的确定方法,并建立了质点-控制点关联式,实现密度非均匀分布的纬编针织物变形模拟,但缺少对不同线圈结构的变形模拟。目前关于纬编针织物形态的变形模型大都与能够表示纱线路径的结构模型相分离,造成了模型庞大、数据冗余的情况,因此必须探寻变形模型和结构模型之间的关联,从而为纬编针织物及其变形建立简单通用的模型,为实现动态模拟提供支撑。

本文通过建立线圈和纬编针织物组织的三维结构模型 探索线圈中心线的型值点和交织点之间的关系 旅据交织点对弹簧-质点模型进行改进 使其更加适用于纬编针织物的变形 ,并基于结构模型和变形模型建立关联模型 ,用 NURBS 曲线对线圈中心线进行绘制 ,对质点位置进行受力分析求解出织物变形过程 ,最后使用计算机工具展示关联模型的动态模拟效果。

收稿日期: 2022-10-12 修回日期: 2023-02-09

基金项目: 山西省青年科技研究基金项目(201901D211094); 山西省回国留学人员科研资助项目(2022-090)

第一作者: 常辰玉(1997—) 女 硕士生。主要研究方向为纺织服装智能化与数字化设计。

通信作者: 卢致文(1983—),女,副教授,博士。主要研究方向为纺织服装智能化与数字化设计。E-mail: luzhiwen@ tyut.edu.cn。

1 线圈结构模型

成圈是一种标准且典型的线圈结构,其它线圈结构都可以在成圈结构的基础上通过变形得到。建立成圈的三维结构模型是丰富线圈结构模型的前提,同时为纬编针织物建立三维结构模型奠定了基础。

1.1 基于交织点的线圈三维结构模型

线圈三维结构模型如图 1 所示,使用实线线条表示线圈的表面轮廓,使用虚线线条表示线圈的中心位置,其中每个子图中由左到右分别是相应模型的左视图和主视图,依据这 2 个视图中的交织点位置和型值点位置可以建立相应模型的多角度视图。

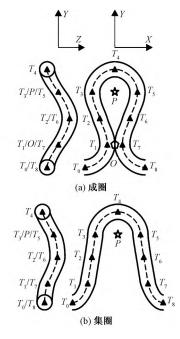


图 1 线圈三维结构模型

Fig.1 Loop 3-D structure model. (a) Loop; (b) Tuck

线圈主要由圈弧和圈柱构成,圈弧根据所在位置和弯曲形态不同又分为针编弧和沉降弧,线圈顶部向上凸出的圈弧称为针编弧,线圈底部向下凹陷的圈弧称为沉降弧,而处于线圈中间位置的圈柱则上下连接针编弧和沉降弧。

根据成圈线圈对称的几何结构特点,使用数学几何图形建立其三维结构模型如图 1(a) 所示。由于成圈线圈的针编弧与上一行线圈中的沉降弧穿套,成圈线圈的沉降弧与下一行线圈中的针编弧穿套,且圈弧位置受穿套影响较大,圈柱位置取决于圈弧。因此为精准表达线圈所在位置,在线圈相互穿套的中心处放置交织点[7]。表示针编弧位置的上交织点如图中星形 P 所示。表示沉降弧位置的下交织点

如图中五边形 O 所示。由于成圈线圈左右对称,且成圈线圈的左右部分又分别中心对称,因此为了准确表示线圈结构形态,在线圈几何路径的关键处放置型值点,如图中用三角点表示型值点位置,对称点 T_2 和 T_6 标识左右圈柱中心处,同时也是线圈厚度方向最凸处,对称点 T_1 和 T_7 标识圈柱与沉降弧连接处,同时也是线圈宽度方向最凹处,对称点 T_3 和 T_5 标识圈柱与针编弧连接处,同时也是线圈宽度方向最凸处,对称点 T_0 和 T_8 分别标识该线圈与左右相邻线圈连接处,同时也是线圈高度方向和沉降弧最低处, T_4 标识线圈左右部分连接处,同时也是线圈高度方向和针编弧最高处,而 T_4 分别与 T_0 和 T_8 关于 T_2 和 T_6 中心对称。

为获得其它类型线圈单元的三维结构模型,可以根据其对应的结构特点,对建立的成圈三维结构模型进行调整。例如集圈是一个因下半部分没有穿套行为而未封闭的悬弧,因此其下交织点不存在,可以得到如图 1(b) 所示的集圈三维结构模型。

1.2 纬平针织物组织三维结构模型

纬平针织物组织全部由成圈线圈整齐排列形成,外观平整均匀,对其进行观察分析并合理简化,设定纬平针织物在静态放置时线圈之间不存在挤压变形和拉伸变形,线圈之间为均匀规则的贴合相连。将成圈的三维结构模型进行连续和穿套,形成纬平针织物的三维结构模型,如图 2 所示。设线圈半径为r; 线圈高度 D 由两侧各 4r 的沉降弧宽度组成,即4r+4r=8r; 线圈高度 H 由 4r 的针编弧高度、4r 的沉降弧高度和中间的圈柱高度组成,圈柱高度为上下2 个交织点之间的距离,这个距离包含上一行线圈的沉降弧高度和下一行线圈的针编弧高度,由于二者在高度上存在 1r 的重叠,因此 2 个交织点之间的高度为3r+r+3r,从而线圈高度 1r 为1r+10 以为 1r0 以

2 弹簧-质点模型

在传统弹簧-质点模型的基础上,根据纬编针织物组织独特的结构,基于交织点进行改进,从而形成更加适应于纬编针织物的弹簧-质点模型。

2.1 传统弹簧-质点模型

弹簧-质点模型将纬编针织物排列有序的线圈 假设为有质量的点,即质点;各个质点之间由弹簧相 连接,用于表现线圈之间的相互作用。如图 3 所示,

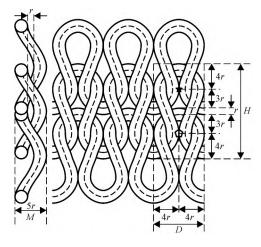


图 2 纬平针织物三维结构模型

Fig.2 3-D structure model of weft plain knitted fabric

传统的弹簧-质点模型质点分布均匀,弹簧连接规律 结构弹簧连接经纬方向相邻的2个质点 維持控制线圈经纬方向的受力,剪切弹簧连接斜向方向相邻的2个质点,维持控制线圈斜向方向上的受力,弯曲弹簧连接经纬方向间隔的2个质点,维持控制线圈弯曲时的受力^[8]。

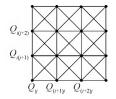


图 3 传统模型

Fig.3 Conven model

当针织物结构规则且均匀 如纬平针织物 ,可以使用传统模型表达,但当线圈结构存在变化 不同的线圈单元按照一定规律或无规律的状态进行组合时造成纬编针织物种类丰富多变,传统模型无法体现,因此需要在传统模型的基础上进行改进以适应纬编针织物的多元化。

2.2 基于交织点的改进弹簧-质点模型

在模拟纬编针织物线圈结构丰富变化时,传统的弹簧-质点模型不能改变质点之间的弹簧关系,因此,在传统模型基础上将线圈的交织点作为质点,将线圈与线圈之间的联系作为弹簧,规则的模型即可成为可调节的模型。改进后模型的基本单元是单一的线圈结构,交织点即质点,同一线圈上下质点之间连接弹簧,称为经向弹簧,用于表示线圈在经向的受力与走向,的头为单向,相邻线圈下方质点之间连接弹簧,称为纬向弹簧,用于表示线圈在纬向的受力与走向,箭头为单向,如图4所示。

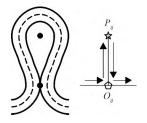


图 4 改进模型单元

Fig.4 Improved model unit

线圈与线圈相互穿套 不考虑上下边缘线圈 线圈的 P 点都与上方线圈的 O 点重合 2 个质点联动,位置统一,由此得到纬平针组织的改进弹簧-质点模型如图 5 所示。改进模型的经纬弹簧本质为传统模型中的结构弹簧,由于经纬弹簧可以间接体现剪切弹簧的受力,且本文不讨论织物弯曲时的状态,故舍去剪切弹簧和弯曲弹簧。

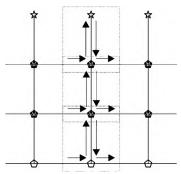


图 5 改进模型

Fig.5 Improved model

当针织物组织中线圈类型发生改变时,交织点的位置和状态同时改变,质点与弹簧也因此产生变化。如图 6 所示的集圈改进模型,当成圈变为集圈时 线圈的下交织点 O_{i} 消失,只保留上交织点 P_{ij} 原本的经向弹簧和纬向弹簧结合后由 P_{ij} 与 $O_{(i-1)j}$ 和 $O_{(i+1)j}$ 确定,同时,下一行线圈的上交织点 $P_{i(j-1)}$ 上移到上交织点 P_{ij} 的位置,导致线圈被拉长。同理 进行其它类型的线圈变化时,可以根据其几何结构和纱线连接关系,得到相应的改进弹簧 – 质点模型。

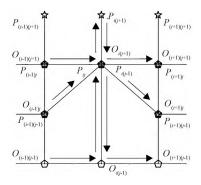


图 6 集圈的改进模型

Fig.6 Improved model of tuck

3 动态变形模拟的实现

在结构模型和变形模型以及交织点的基础上建立关联模型 线圈中心线由 NURBS 曲线拟合,对质点进行受力分析求解更新位置数据,动态表达织物结构的变形过程。

3.1 关联模型

设置线圈半径、行列数和类型获得织物大小和结构,从而得到每个交织点的状态和位置; 然后以交织点作为参照得出线圈型值点,用于拟合线圈中心线,并根据交织点即质点的原则放置经纬弹簧,建立织物的弹簧-质点系统,进而关联结构模型和变形模型。

3.2 NURBS 曲线

NURBS 曲线可以由分段有理多项式矢函数来描述:

$$C(u) = \frac{\sum_{i=0}^{n} N_{i,k}(u) w_{i}A_{i}}{\sum_{i=0}^{n} N_{i,k}(u) w_{i}}$$

:中:

$$\begin{cases} N_{i,0} = \begin{cases} 1 & u_i \leq u \leq u_{i+1} \\ 0 & 其它 \end{cases} \\ N_{i,k}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+k+1} - u} N_{i,k-1}(u) + \frac{u_{i+k} - u}{u_{i+k} - u_{i+1}} N_{i+1,k-1}(u) \end{cases}$$
规定 $\frac{0}{0} = 0$

其中 权因子 w_i 与控制点 A_i ——对应 , $N_{i,k}(u)$ 为 k 次规范 B 样条基函数 被节点矢量 $U = [u_0 \ \mu_1 \ , \cdots \ , u_{n+k+1}]$ 的计算结果所确定 [9] 。

在实际应用时,NURBS 曲线的获得分为 2 种情况: 正算是已知控制点,求解型值点并绘制曲线形状; 反算是已知型值点,求解相应的控制点来拟合通过型值点的曲线^[10]。在本文研究中,建立型值点与交织点的关系函数后,可以通过交织点的状态和位置计算得到相应型值点的位置,进而反算出控制点的位置,最后基于控制点数据拟合出线圈中心线。

3.3 受力分析与动力学求解

当纬编针织物中因不同类型线圈单元的存在而导致结构变形时,能够表示线圈位置的交织点(即质点)会发生相应的位移,由于交织点(即质点)之间经向弹簧和纬向弹簧的存在,交织点(即质点)受力产生速度和加速度,并获得新的位置,直到织物结构趋于稳定。纬编针织物的变形,主要是由于线圈穿套关系改变导致的内部牵拉作用引起的,因此仅对内力进行分析,忽略外力的影响,进而进行动力学

求解。

弹簧力 F_s 与阻尼力 F_a 相加之和约等于质点所受的内力。使用胡克定律可以获得弹簧力的关系式为

$$F_{s} = -K_{s}L$$

式中: L 为弹簧形变矢量 即弹簧伸缩前后的长度变化量 在本文研究中 ,等同于交织点(即质点)与所连接弹簧另一端交织点(即质点)之间的距离矢量变化量; K_s 为弹性系数。阻尼力的关系式表达为

$$F_{\rm d} = -K_{\rm d}V$$

式中: V 为质点的速度矢量 ,在本研究中 ,等同于交织点(即质点) 的速度矢量; K_a 为阻尼系数。质点受力与加速度之间的联系式由牛顿第二定律确定为

$$F = F_s + F_d = ma$$

式中: a 为质点的加速度; m 为质点的质量,可由针织物的总质量分配给交织点(即质点)得到。

在进行动力学求解时经常用到 2 个方法: 欧拉法和 Verlet 积分法,其中欧拉法又包括显式、隐式和半隐式 3 种方法。相比而言,欧拉法的实现过程较为简易,但误差不易控制,在计算精度和计算效率方面,Verlet 积分法则明显占优,所以动力学求解选择使用 Verlet 积分法:

$$X(t + \Delta t) = X(t) + V(t) \Delta t + \frac{1}{2}a(t) \Delta t^2$$

$$V(t + \Delta t) = V(t) + \frac{1}{2}(a(t) + a(t + \Delta t)) \Delta t$$

式中: X(t) 为 t 时刻质点的位置矢量 $\mathcal{N}(t)$ 为速度矢量 $\mathcal{A}(t)$ 为加速度矢量 $\mathcal{L}(t)$ 为加速度矢量 $\mathcal{L}(t)$ 为时间间隔。

4 结果与分析

图 7 示出运用 C++编程语言、CodeBlocks 集成 开发环境以及 OpenGL 函数库,实现仿真模拟程序的工作流程步骤。首先是依据结构模型和变形模型 所需的数据,对程序进行初始化设置; 然后在这些数据的基础上对交织点、型值点以及控制点进行计算; 之后对弹簧 – 质点模型和线圈中心线分别进行绘制; 最后对模型不断地进行受力分析和动力学求解更新质点(即交织点) 位置直至系统达到稳定状态。

在不考虑纱线立体粗细和表面纹理等实际因素的前提下,使用线圈中心线表示纱线路径,纬平针织物组织中几何结构模型和物理变形模型的关联模型模拟效果如图 8(a) 所示。图 8(b) 示出某线圈改成集圈结构但未进行受力分析前的关联模型模拟效果,然后。随着模型受力发生变化以及质点位置的移动,通过受力分析模拟出其动态变化,其过程如

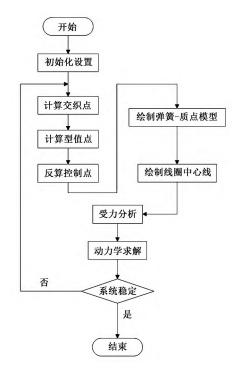


图 7 程序流程图

Fig.7 Program flow

图 8(c) 所示 最终到达模型的稳定状态 ,如图 8(d) 所示。

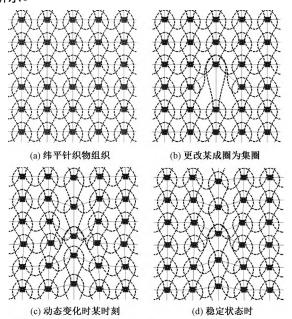


图 8 关联模型的动态模拟

Fig.8 Dynamic simulation of associated model.

- (a) Weft plain knitted fabric; (b) Change a loop to a tuck;
 - (c) Dynamic changing time; (d) Steady state time

图 9、10 分别示出包含多个集圈和多个浮线的 织物组织模拟效果。

通过分析图 8~10 中的模拟结果可以得出: 建立结构模型和改进变形模型的方法具有可靠性,提出的关联模型具有可行性,采用的模型绘制方法和

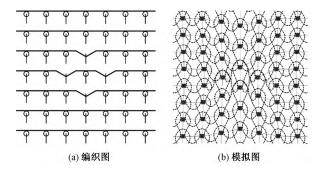


图 9 包含多个集圈的织物组织变形模拟

Fig.9 Simulation of fabric structure with multiple tucks.

(a) Knitting diagram; (b) Simulation diagram

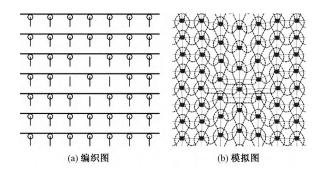


图 10 包含多个浮线的织物组织变形模拟

Fig. 10 Simulation of fabric structure with multiple misses.

(a) Knitting diagram; (b) Simulation diagram

计算方法对纬编针织物的动态变形模拟过程具有良好的支撑作用。

5 结 论

本文通过建立线圈和纬编针织物组织的三维结构模型,探索了线圈中心线上型值点和交织点之间的关系,为其它基本线圈结构单元和复合织物组织的三维结构模型提供了确立基础;为使变形模型更加符合纬编针织物,基于交织点改进了现有的弹簧-质点模型,并且提供了具有集圈变形织物的变形模型示例;在建立关联模型后依据型值点反算出控制点绘制线圈中心线,对质点位置和状态进行受力分析,求解出最终稳定状态,实现动态变形模拟;举例展示了纬平针织物组织中更换基本线圈单元前后、动态运动过程中和最后稳定状态时的关联模型模拟效果,并且举例展现了包含多个不同类型线圈的织物组织变形模拟效果。

参考文献:

[1] 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.
- [2] 刘凯,张纯,夏茵.新型三角形弹簧质点模型及弹簧 参数确定[J].计算机辅助设计与图形学学报,2014, 26(1):20-26.
 - LIU Kai , ZHANG Chun , XIA Yin. New mass–spring model with triangle meshes and identification of spring parameters [J]. Journal of Computer–Aided Design & Computer Graphics , 2014 , 26(1):20-26.
- [3] 刘瑶. 羊毛衫组织的变形分析及仿真实现[D]. 武汉: 武汉纺织大学, 2013: 25-38.

 LIU Yao. The deformation analysis and the simulation realization of woolen sweater [D]. Wuhan: Wuhan Textile University, 2013: 25-38.
- [4] 雷惠. 横编织物结构特征研究与外观真实感模拟[D]. 无锡: 江南大学 , 2014: 23-31.

 LEI Hui. The research of the structure and the realistic simulation of flat knitted fabric [D]. Wuxi: Jiangnan University , 2014: 23-31.
- [5] 沙莎. 基于弹簧—质点模型的纬编针织物三维模拟研究[D]. 无锡: 江南大学, 2017: 21-44. SHA Sha. Three dimensional simulation of weft knitted fabric based on mass-spring model [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2017: 21-44.
- [6] 汝欣,朱婉珍,史伟民,等.密度非均匀分布纬编针 织物的变形预测及仿真[J].纺织学报,2022, 43(6):63-69,78.

- RU Xin, ZHU Wanzhen, SHI Weimin, et al. Deformation prediction and simulation of west knitted fabrics with non-uniform density distribution [J]. Journal of Textile Research, 2022, 43(6):63-69, 78.
- [7] 卢致文. 横编针织物 CAD 系统研究与实现 [D]. 无锡: 江南大学, 2016: 51-52. LU Zhiwen. Investigation and realization of computer aided design system for flat-knitted fabric [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2016: 51-52.
- [8] 沙莎,蒋高明,马丕波,等.基于改进弹簧-质点模型的纬编织物三维模拟[J].纺织学报,2015,36(2):111-115.

 SHA Sha, JIANG Gaoming, MA Pibo, et al. 3-D simulation of weft knitted fabric based on improved mass-spring model [J]. Journal of Textile Research, 2015,36(2):111-115.
- [9] 彭小军. 曲线曲面的 NURBS 造型技术与数控仿真[D]. 西安: 长安大学, 2013: 11-12.
 PENG Xiaojun. Modeling technology of curve and surface on NURBS and numerical simulation [D].
 Xi'an: Chang'an University, 2013: 11-12.
- [10] 王少俊. 基于计算机视觉技术的纬编针织物三维仿真研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2012: 30-34. WANG Shaojun. Simulation research on three-dimensional fabric of weft knitted based on computer vision technology [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2012: 30-34.

Dynamic deformation simulation of weft knitted fabrics based on improved mass-spring model at interlacing points

CHANG Chenyu¹, WANG Yuwei¹, YUAN Xuyang¹, LIU Feng¹, LU Zhiwen¹²
(1.College of Textile Engineering, Taiyuan University of Technology, Jinzhong, Shanxi 030600, China;
2.Anhui Tianzhu Textile Science Technology Co., Ltd., Fuyang, Anhui 236000, China)

Abstract

Objective Because of the diversity of loop unit combination , the threading relationship and the pulling effect between different loops , weft knitted fabric structure are prone to deformation , thus achieving a rich fabric appearance. In order to dynamically simulate the deformation process of weft knitted fabric composed of different basic loop structure units , the overall structure of the fabric was controlled and the details of the loop structure were described , so as to further reduce production cost , speed up production efficiency and improve production quality.

Method Interlacing points in the fabrics were represented by a three-dimensional structure model of the loop, as an improvement to the traditional mass-spring model. In order to associate the loop structure model and the mass-spring model with the interlacing point as the link, Non-uniform rational B-splines (NURBS) curves were to simulate the loop centerline, and the mass position through internal force analysis and dynamic solution were constantly updated through. Finally, computer tools were adopted to show the dynamic simulation effect of the associated model.

Results The three-dimensional structure model of the loop and weft plain knitted fabric was established, involving the interlacing points and the type value points, as well as the loop distance, loop height and loop thickness. On this basis, the relationship between the type value points of the loop centerline and the interlacing points were obtained, and the three-dimensional structure model of other loops and composite fabrics through deformation were also achieved.

The mass-spring model unit more suitable for the loop structure unit was established, and the improved mass-spring model was formed. On this basis, the mass-spring model of the corresponding fabric was obtained by changing and adjusting the model unit according to the change of the loop type.

The connection between the loop structure model and the mass-spring model was established by using the interlacing point as the link, and the loop centerline used to describe the geometric path of the loop structure model was generated by fitting based on the principle of NURBS curve inverse calculation problem, as well as the mass positions in the mass-spring system were constantly updated through internal force analysis and dynamic solution.

The dynamic deformation simulation of weft knitted fabric was achieved by using computer tools. An example was given to show the simulation effect of the associated model. As well as an example, the simulation effects of fabric deformation including multiple different types of loops were shown.

Conclusion The loop structure model and mass-spring model of weft knitted fabric were established based on the interlacing point, and the relationship between them was created. The loop centerline simulated by NURBS curve was basically consistent with the geometric structure of the fabric. After reasonable internal force analysis and dynamic solution, the mass positions in the mass-spring model system were constantly updated. The dynamic simulation process of weft knitted fabric was realized.

Keywords interlacing point; loop structure model; mass-spring model; NURBS curve; force analysis; dynamic solution; weft knitted fabric