



纬编针织物真实感建模与仿真进展

宋明明¹, 常辰玉¹, 孙雅欣¹, 刘 锋¹, 李小燕², 卢致文^{1,2}

(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: 为了促进针织物模拟仿真领域的进一步研究和发展, 全面梳理了纬编针织物真实感模拟与仿真技术的发展历史和研究现状。从外观真实感模拟和物理真实感模拟两个角度分析了国内外学者研究和探索的历程, 阐述了纬编针织物真实感模拟与仿真技术从早期基于二维线圈模型的方法, 到基于三维物理模型方法的转变和多样化发展过程。在总结各种模拟方法及其应用特点的基础上, 分析得出纬编针织物真实感模拟与仿真技术将会向模拟效果精细化、模拟实时交互化、织物类型多样化和应用领域多元化的方向发展。

关键词: 纬编针织物; 动态模拟; 物理模型; 发展趋势

中图分类号: TS184

文献标志码: A

文章编号: 1009-265X(2023)06-0255-12

纬编针织物作为一种重要的织物类型, 具有柔软、弹性好、透气性好等特点, 不仅应用于服装、家居纺织品等领域, 也应用于汽车、航空、医疗等多个领域。纬编针织物的真实感建模与仿真是一个多学科交叉的研究领域, 涉及材料科学、计算机科学、数学等, 可以应用在如针织物生产设计、服装设计、虚拟试衣、游戏和动画制作等多个方向。对纬编针织物进行真实感建模与仿真研究, 不仅有助于加快产品开发速度, 还可以减少试错次数, 缩减开发成本。

近年来, 随着电子商务、虚拟试衣等行业的发展, 对纬编针织物建模与仿真技术的需求越来越大, 其复杂的织物结构和物理特性使得仿真模拟的真实感成为研究重点。早期的研究主要集中在二维的织物表面纹理和颜色等外观特征的模拟, 随着计算机硬件和算法的不断发展, 纬编针织物的三维真实感模拟逐渐成为研究热点^[1]。三维真实感模拟初期主要采用二维纹理映射或图像处理

技术来实现织物外观的模拟, 计算机图形学和物理模拟技术的发展使得三维真实感模拟越来越多地使用基于物理模型的方法, 以更加真实地模拟出纬编针织物的织物结构和外观细节^[2]。随着计算机技术和数据处理技术的不断发展, 纬编针织物真实感建模与仿真技术将会得到更加广泛的应用。

本文将分别对外观真实感模拟方法和物理真实感模拟方法进行详细的介绍说明, 总结各种模拟方法的应用原理及特点, 并通过对已有方法和技术的梳理与分析, 展示纬编针织物模拟与仿真的现有研究成果和应用场景。在此基础上, 从模拟效果精细化、模拟实时交互化、织物类型多样化和应用领域多元化等角度, 分析纬编针织物真实感模拟与仿真技术的发展趋势。

1 纬编针织物外观真实感模拟

纬编针织物的外观真实感模拟是指利用计算

收稿日期: 2023-05-30 网络出版日期: 2023-06-26

基金项目: 山西省回国留学人员科研资助项目(2022-090)

作者简介: 宋明明(1997—), 女, 山东济宁人, 硕士研究生, 主要从事纺织服装智能化与数字化设计方面的研究。

通信作者: 卢致文, E-mail: luzhiwen@tyut.edu.cn

机图形学和计算机模拟技术,对纬编针织物的外观进行数字化建模和仿真,以实现逼真的纬编针织物外观呈现。外观模拟注重对纹理、图案、颜色和光照等视觉特征的逼真呈现,使得虚拟的针织物在视觉呈现效果上与真实的针织物相似。外观真实感模拟可以为纬编针织物的设计和制造提供更为精细的展示和模拟,加快设计和生产的速度,为消费者提供更加真实的购物体验,提高消费者的满意度和忠诚度。早期的纬编针织物外观真实感模拟多为二维模拟,随着计算机技术的发展及市场需求的增长,三维外观真实感模拟技术越来越受到关注并取得长足的发展。

1.1 二维外观真实感模拟

二维外观真实感模拟是指利用计算机技术对二维图像进行处理和增强,使得生成的图像具有更高的真实感和可信度。其主要方法包括光照模拟、纹理映射、投影和透视变换、图像去噪、边缘增强、颜色校正等技术。

汪育桑等^[3]在建立线圈几何模型的基础上根据织物结构确定线圈的形状和位置,再根据位置关系对线圈进行消隐处理,实现了对基本纬编提花组织的二维模拟,模拟效果图如图 1 所示。为提高羊毛衫 CAD 系统的仿真速度,汪秀琛等^[4]建立了由 5 个弧线组成的线圈模型,根据纱线粗细、织物密度和光照效果对线圈形态的影响,再将不同线圈按照特定规则进行组合,得到不同的花型效果,模拟速度快但模拟效果不够逼真。

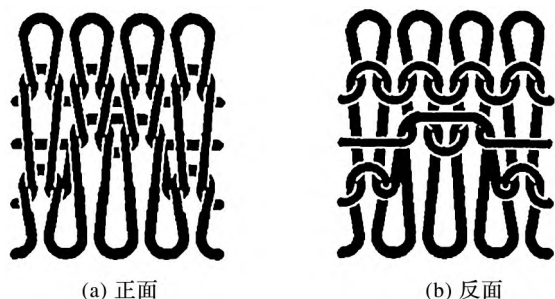


图 1 单面纬编提花织物正反面模拟效果

Fig. 1 Simulation effect of the obverse and reverse sides of a single-sided warp-knitted jacquard fabric

卢致文等^[5-6]与 Jiang 等^[7]提出了一种基于线圈几何模型的算法将纱线的纹理映射到线圈上,建立基于普通纱线到线圈的变化过程的纹理变化

模型,并根据光照变化使线圈看起来具有三维感,使用该模型可快速模拟出真实感较高的平针、罗纹等类型的织物。在此基础上,将机织物交织点的概念引入到纬编针织物,提出基于交织点的线圈中心曲线模型,并使用 3 次贝塞尔曲线拟合线圈的中心曲线,用于进行纹理映射、纹理插值和亮度处理,模拟出结构清晰的循环变形,图 2 为交织点及模拟效果。Pierce 线圈模型是一种在纬编针织物仿真模拟中常用的经典模型,张继东等^[8]通过将处理后的混色纱线图像映射到 Pierce 线圈模型上,再根据不同线圈的位置关系和线圈形态模拟出纬编基本组织的色彩及纹理。由于色纺纱及云纹纱的布面效果难以预测,吴义伦等^[9-10]对真实纱线图像进行处理后将其映射到线圈几何模型上,通过计算线圈拼接时的偏移量解决了拼接错位问题,模拟出真实感较高的云纹纱针织物,达到预测色纺纱及云纹纱针织物外观的目的。

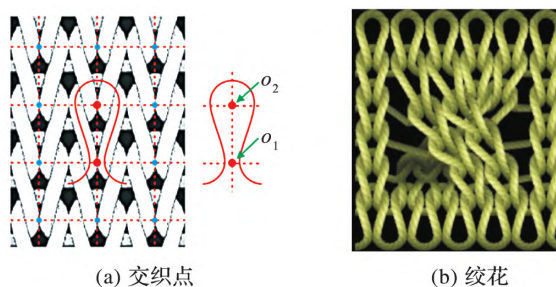


图 2 交织点及绞花组织模拟效果

Fig. 2 Binding point and cable stitch simulation effect

二维外观真实感模拟是一种快速高效的方法,可以模拟出纬编针织物的纹理特征以及在光照条件下的纱线色彩变化,并且在光影效果的基础上实现更真实的模拟效果。然而,对于纬编针织物的细节,如不同纱线材质和复杂花式结构等,常常在二维模拟中简化或省略。

1.2 三维外观真实感模拟

纬编针织物的三维外观真实感模拟是在三维空间中模拟纬编针织物的织物结构和外观细节,可以提供更加真实的视觉效果。在进行三维模拟时,需要考虑纱线材质和纹理、织物结构和织物形变等因素,以获得更真实的模拟效果。

Zhong 等^[11]通过对纬编针织物纱线的微观结构及其线圈间的相互作用进行建模,然后将创建

的纱线纹理贴图在针织物模型的表面,可以快速地渲染出真实感较好的织物结构细节及纱线表面毛羽,并允许用户对纱线蓬松度和线圈位置进行直观控制,图3所示为毛线帽模拟效果。考虑到仿真中纱线之间在接触时由于接触力的存在而引起纱线在局部的变形行为,Kyosev等^[12]提出两种纬平针组织结构的三维建模方法,一是假设纱线横截面在高曲率区域被压成椭圆状,二是基于线圈的离散粒子模型,设定纱线的一般非线性压缩行为对纱线接触点处进行迭代计算获取实际纱线几何形状,模拟出纬平针织物的微观结构形态。Kurbak等^[13-15]提出一种可以模拟纬平针织物横向卷边性的几何模型;对于纬平针织物由于纱线捻度产生的线圈歪斜现象,分析线圈的三维性质得出线圈两侧纱线捻向处于相反方向,通过将线圈的上半部分和下半部分转换为参数化椭圆曲线调整线圈形状,模拟出线圈歪斜状态的纬平针织物;此外,还在平针组织几何模型的基础上模拟出双反面组织织物。



图3 毛线帽模拟效果

Fig.3 Simulation effect of a knitted hat

刘夙等^[16]基于Pierce二维线圈模型建立了由参数方程表示的三维几何线圈模型,使用OpenGL库函数来实现纬平针织物的三维可视化,并通过调整颜色、光照等参数来提高模拟的真实性和逼真度。在刘夙等研究的基础上,吴周镜等^[17]在三维Pierce线圈模型中引入B样条曲线和椭圆曲线对线圈进行模拟,获得真实感更强的模拟效果,但模拟的织物类型不够丰富。张哲等^[18]首先将织物网格模型划分区域,并在两步纹理映射算法的基础上,提出了一种利用曲面包围盒作为中介面获

取纹理坐标的方法,利用图像分割技术平滑处理区域纹理的接缝处,实现了纹理的无缝拼接,但模型还不够完善。于斌成等^[19]采用极坐标方程来表示纱线的模型,并使用近似正态分布函数计算毛羽控制点的位置,通过调节参数改变织物表面微结构的方向、毛羽数量和纱线捻度等参数,模拟出的纱线毛羽在细节上更为逼真,并能更好地展现毛羽的形态结构特点,模拟的纬编针织物外观与真实织物外观相似度较高。金兰名等^[20]基于曲面模型,通过采集三维织物的曲面数据以及统一坐标数据,实现了三维模型和纹理数据的建立和导入,接着提出了一种针对复杂提花织物的3个因素模拟算法以控制织物模型的效果,基于以上研究结合三维引擎Unity3D平台,实现了三维模型数据与二维空间数据和三维虚拟模拟的集成,与基于线圈模型的模拟相比,这个基于实际织物数据的方法对于预测和模拟三维纬编提花织物的效率和真实感都更好,图4所示为提花绗缝织物模拟效果。

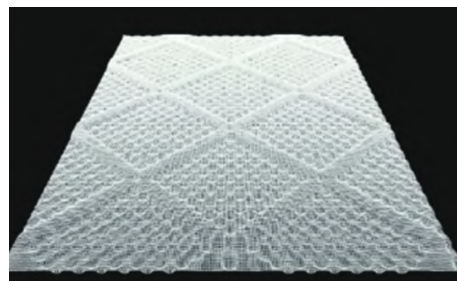


图4 三维纬编提花绗缝织物效果图

Fig.4 Effect images of a 3-D jacquard weft-knitted fabric

Wu等^[21]通过建立纤维模型并根据真实纱线创建一组纱线贴图,再使用基于物理的模拟器来模拟织物的变形行为,并应用预处理的纱线贴图来呈现布料的外观,以及使用一种基于分层深度剪裁的加速方法提高渲染速度,在实时性和视觉效果方面取得了良好的表现,图5所示为模拟效果及细节展示。Huo等^[22]将有色纺织物图像在预处理后将其转换为灰度图像,再使用双树复小波变换对灰度图像进行分解,提取出纹理特征信息,通过对纹理特征信息进行调整和组合,生成有色纺织物的模拟图像,该方法能够有效地模拟有色纺织物的颜色和纹理特征,但对于多色纤维混合的纱线仿真真实度还需要进一步提高。



图 5 基于纤维层次实时渲染布料的实例

Fig. 5 Examples of rendering fiber-level cloth at real-time frame rates

纬编针织物的三维外观真实感模拟技术在纺织行业具有重要的研究意义和广阔的应用前景。通过模拟纬编针织物的织物结构和外观细节,包括纱线材质和纹理、织物结构和织物形变等因素,以实现更真实的模拟效果。

2 纬编针织物物理真实感模拟

纬编针织物物理真实感模拟旨在通过计算机模拟纬编针织物的物理行为,以实现对其力学性能的预测以及高度逼真的视觉效果。物理模拟注重针织物中纱线的相互作用、纱线内部的运动以及针织物的力学性能,以在模拟中对真实世界针织物的物理行为进行再现。通过物理模拟,设计师和研发人员可以对纬编针织物的力学性能进行预测和分析,了解纱线和针织物在不同力学条件下的行为,如拉伸时的变形程度、弯曲时的柔韧性等。因此物理真实感模拟的研究对于增强针织物的仿真效果、提升产品设计水平具有重要意义。其中,用于物理真实感模拟的模型主要有弹簧-质点模型、网格模型、纱线层次模型和有限元模型。

2.1 基于弹簧-质点模型

弹簧-质点模型是一种基于物理学的模型,它将物理系统看作是由弹簧和质点组成的弹性体系。鉴于机织物的非弹性性质,Provot^[23]改进了弹性可变形模型,将机织物近似成一组质点和弹簧构成的可变形表面,其运动通过数值积分基本动力学定律来评估,弹簧-质点模型结构如图 6 所示。针织物和机织物都是纺织品,具有相似的物理属

性,因此对弹簧-质点模型的应用也可以相互参考。但针织物和机织物之间存在构造方式和织物结构不同的区别,针织物结构较为松散,弹性更大,更容易变形。因此,为了将弹簧-质点模型应用于针织物模拟中,常需要对模型进行调整和改进,使其能够准确地模拟针织物的特点。

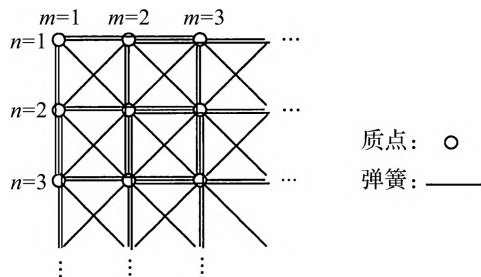


图 6 弹簧-质点模型

Fig. 6 Mass-spring model

为实现针织面料在物理层面准确的仿真,Meißner 等^[24]引入弹簧-质点模型用于计算针织物线圈结构的动态行为并展示了其更高效的可视化。由于几何模型的局限性,Kyosev 等^[25]使用弹簧-质点模型用于描述织物的力学行为,包括受力、变形等,但是模拟时间较长,不太适合在生产中使用。为模拟流体对针织物的动态行为和形态行为产生的影响,Güdükbay 等^[26]通过弹簧-质点模型对针织物进行建模,采用了三层质点并通过保持体积约束模拟出织物的厚度,模拟效果真实感较高,但对于织物线圈结构的受力行为研究不够。沙莎等^[27]在改进弹簧-质点模型的基础上,通过对线圈进行结构建模来使得针织物具有更真实的力学效果和体积感,并采用非均匀有理 B 样条曲线来拟合线圈曲线,通过旋转圆柱来模拟股线捻度效果,从而获得真实感较好的纬编织物仿真效果。考虑到单面纬编针织物和双面纬编针织物之间的差异,为模拟针织物的垂坠行为,Mozafary 等^[28]研究了在单面针织物中引起边缘卷曲的弯曲和扭矩力矩,并表明这些力矩在双面针织物中会被抵消,因此导致了非卷曲结构;使用质点弹簧模型来模拟针织物纬向和经向的卷曲形状,模拟结果显示与实际针织物垂坠形状存在良好的一致性。对于密度非均匀分布的纬平针织物,汝欣等^[29]提出相对应的织物弹簧-质点模型的初始状态的确定方法,基于弹簧-质点模型和二维 Peirce 线圈模型建立质

点-控制点关联式,获得与实际样品变形趋势较为一致的模拟效果,但模拟的织物类型不够多样,且计算效率实时性不够,图7所示为模拟效果图。

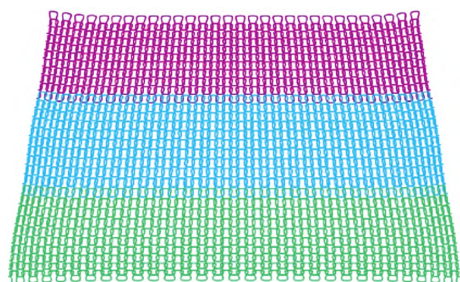


图7 密度非均匀纬平针织物仿真

Fig. 7 Simulation diagram of a non-uniform weft knitted fabric

弹簧-质点模型实现相对较简单,计算速度较快,并且可以进行实时交互式模拟,在纬编针织物的模拟中被广泛使用,可以模拟不同的织物结构和力学特性,但对于织物的非线性特性和纱线间的摩擦效应等模拟难度较大。

2.2 基于网格模型

基于网格模型的纬编针织物物理仿真是一种通过对纬编针织物建立三维网格模型,将物理特性转化为网格节点之间的力和约束关系来模拟针织物外观和物理特性的方法。

基于NURBS(非均匀有理B样条)曲线^[30]和Leaf-Graskin的改进模型^[31],以及通过网格控制法和OpenGL建模技术,刘瑶等^[32]建立了非线性纬编线圈单元模型和组织结构模型模拟羊毛衫组织的变形机理,方法计算简便但三维模拟效果不够真实。Yuksel等^[33]首次提出“针织网格”的概念,将针织服装通过一个多边形模型进行网格划分,接着使用交互式建模工具生成一个更精细的网格用以表示织物不同的线圈结构,通过操作针织网格生成表示纱线的曲线模型,然后在保持全局形状的同时,局部松弛纱线以获得真实形状,从而产生适合于动态模拟的有效纱线几何形状,模拟效果真实感较强,但计算量大导致模拟速度较慢,图8所示为绞花结构真实织物与其网格模型。为了确保模拟出的针织物可以在真实世界进行生产,Wu等^[34]提出了可编织针织结构的概念,并引入自动化的流程,从输入的多边形网格

开始便自动生成针织物网格模型,以达到更快速的模拟。

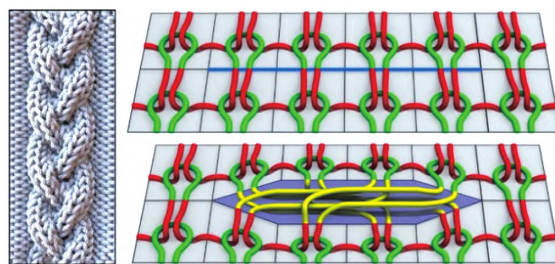
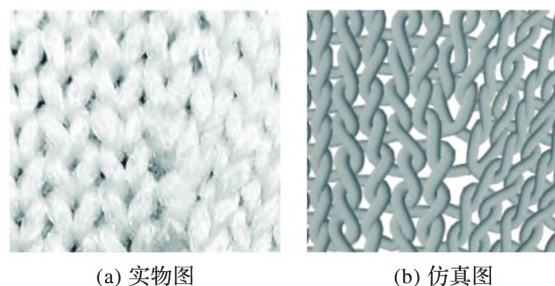


图8 样品及其网格模型

Fig. 8 Sample and stitch mesh model

杨恩惠等^[35]使用了六边形网格结构理论和NURBS曲线相结合的技术来进行针织物线圈的真实感模拟并进行了导热分析,该方法简便易行但对于织物的受力行为未进行研究。胡新荣等^[36]在建立网格模型与纱线模型之间对应关系的基础上,分别对网格模型与纱线模型进行仿真并采用自适应网格划分技术加快网格仿真速度,模拟真实感较好同时速度较快,但模拟的织物类型较为单一。赖安琪等^[37]通过建立线圈几何模型和网格模型,并利用矩阵运算得到花式结构线圈的坐标,实现了从实际织物到三维线圈结构的快速转换,能够快速准确地模拟全成形毛衫花式结构,图9所示为暗加针工艺的全成形织物的实物图和仿真图。



(a) 实物图

(b) 仿真图

图9 暗加针工艺仿真效果

Fig. 9 Simulation effect of invisible needling process

基于网格模型的方法可以准确地模拟针织物的外观和物理特性,具有较高的真实感和可靠性,同时网格模型的计算方法比较简单,容易实现。但对于复杂的织物结构和大规模的仿真系统,网格模型的计算量通常较大而导致速度变

慢,并且可能存在网格变形的问题,需要采用适当的网格划分和变形技术来保持模拟的准确性和稳定性。

2.3 基于纱线层次模型

纱线层次模型的核心思想是将纱线视为物理实体,通过对纱线内部结构和力学特性的建模,来模拟纬编针织物的物理行为和变形效果。

考虑到纬编针织物的非线性行为及其纱线之间的接触和相互作用,Kaldor 等^[38]首次系统提出基于纱线层次建立模型对织物进行模拟。每根纱线都被建模为一个不可伸长但可变形的 B 样条管,纱线之间的摩擦通过刚体速度滤波器近似计算,相互作用通过硬约束力调节,模拟出织物的非线性特性和力学行为,但该模型计算量庞大,模拟时间较长,图 10 所示为模拟效果图。为了降低计算成本,Kaldor 等^[39]采用罚函数法近似纱线之间的接触力,并用旋转线性力模型进行近似计算,使得模拟速度提高 4~5 倍。

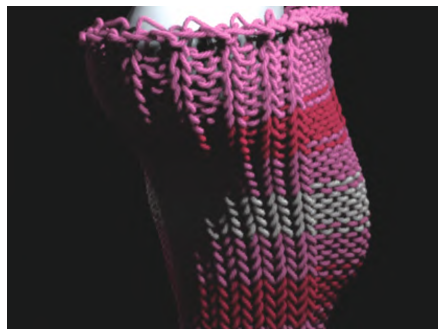


图 10 纱线层次模拟的织物非线性拉伸效果

Fig. 10 Nonlinear stretching effect of fabric simulated by yarn level

Cirio 等^[40]假设织物中的纱线之间是永久接触但可以滑动的状态,通过完全避免接触检测大幅减少了计算量,模拟速度比先前的技术提高了一个数量级。为实现交互式的纱线层次模拟,Leaf 等^[41]提出结合两种方法来加快模拟速度,首先是基于纱线层次的周期边界条件,利用织物结构在基本方向上的空间重复性,只需对小的周期区域进行模拟计算;其次是高度并行化的 GPU 求解器,利用 GPU 的并行计算能力来快速计算小的周期区域的纱线层次模拟。这两个方法的结合实现了对纱线层次针织物的实时模拟和调整,仿真效果真

实感较强。基于纱线层次模型的模拟方法由于数据量庞大和计算复杂度高,往往模拟时间较长,为提高模拟速度,往往会采用数据驱动的思想,通过大量的数据来学习和模拟纬编针织物的特性。在此基础上,Sperl 等^[42]通过数值均匀化的方法实现了纱线层次的纬编针织物动态模拟效果,使用大量的纱线层次模拟数据来建立针织物的势能密度模型,用能量密度函数在薄壳模拟器中计算织物的力学行为,模拟出针织物的高度变形性和各向异性。同时,此方法完全基于模拟,不需要任何真实世界的实验及数据,不过对于织物的撕裂及抽丝等行为无法模拟,其与直接进行纱线层次仿真的效果的比较如图 11 所示。为了预测不同针织物的物理特性,Sperl 等^[43]通过逆向建模的方法将真实世界中针织物的力学行为转化为纱线层次的仿真模型。首先建立了涵盖各种类型针织物的物理特性,如刚度、非线性和各向异性的数据库,然后开发了可以将真实织物数据转换为纱线层次模拟的系统,并且将织物数据进行降维处理,以快速生成近似的纱线层次模拟结果,但此方法是基于纯棉和涤纶等纤维制成的针织物数据集进行训练和评估的,因此对于其他纤维的应用需要重新评估和调整。

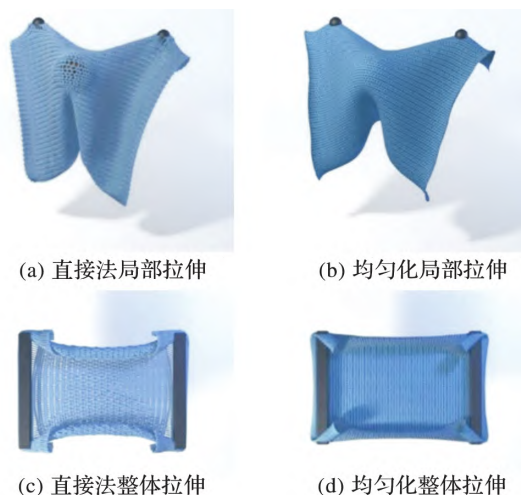


图 11 直接纱线层次仿真与均匀化连续模型仿真比较

Fig. 11 Comparison of direct yarn-level simulation to simulation with homogenized continuum models

纱线层次模型是一种基于物理学原理的模拟方法,能够模拟纬编针织物的组织构成和微观结构对其宏观性质的影响。这种模型能够更准确地

预测织物的力学行为,在纺织工业、服装设计和计算机图形学等领域具有广泛的应用前景。纱线层次模型的建立和求解过程相对复杂,这导致该模型的计算量通常较大,模拟时间较长,尤其对于大规模、复杂结构的织物系统来说,计算成本较高。此外,纱线层次模型对于某些织物行为,如撕裂和抽丝等,可能无法进行准确模拟。

2.4 基于有限元模型

基于有限元模型的纬编针织物物理仿真方法可以将织物抽象为一系列的网格单元,并基于有限元方法建立针织物的物理模型,包括纱线弯曲、张力和接触力等。有限元分析是一种数值分析方法,通过将复杂的结构划分成许多小的有限元,对每个有限元进行计算和分析,然后将这些小的有限元组合起来,得到整个结构的计算结果。

由于解析方法较难模拟出纬编针织物的复杂结构和各向异性,Vassiliadis等^[44]将织物表示为由多个圆柱体组成的三维网格模型,每个圆柱体代表一根纱线,通过将材料参数、几何参数、力学参数等输入到有限元模型中,图12所示为有限元模型网格,模拟出织物在不同加载条件下的应力应变行为,但模拟的假设条件过于理想,且织物类型较为单一。

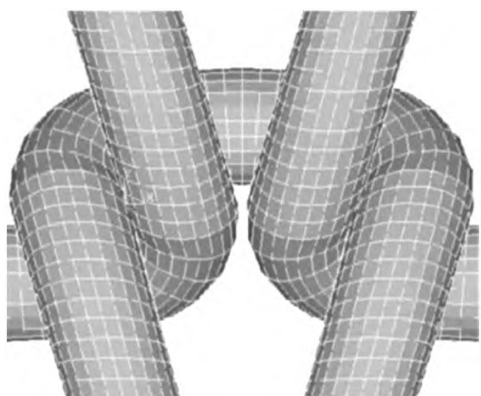


图12 单元网格划分

Fig. 12 Meshed unit cell

为了模拟具有负泊松比的网状经编纬编混合织物的变形行为,Wang等^[45]通过计算机扫描获取了织物外层结构的精确几何形状用以生成几何模型进行网格划分,然后建立有限元模型对织物在经向和纬向拉伸的变形行为进行模拟,获得与真

实织物较为一致的仿真结果。McKee等^[46]通过建立单面纬编针织物的有限元模型,模拟布料在弹道载荷下的应变、应力和变形等力学响应,以加强对单面针织物的物理性能和防护能力的了解。为预测针织紧身服压力,Ghorbani等^[47]使用有限元模型来模拟含有弹性纬线的双面纬编针织物的拉伸性能,并评估沿经向的应力分布,模拟结果较为准确可靠。Wadekar等^[48]提出一种使用有限元模型对纱线层次几何模型进行分析和模拟的方法,可以模拟出不同的平针针织物结构及其物理性能,但是无法模拟其他的织物类型。针对纬编针织物形变规律问题,郝志远等^[49]通过均匀化理论建立宏-细观线弹性数学模型,使用有限元模型计算两种不同的纬平针织物在双向拉伸下的变形行为,可快速获得较准确的模拟效果,但模拟的织物类型较单一。孙亚博等^[50]通过三维建模软件建立纬平针单位线圈模型和筒状针织物模型,利用有限元软件ABAQUS进行模拟,分析筒状针织物在纵向拉伸时的力学性能,可准确模拟出纬平针织物拉伸时的变形行为,图13所示为筒状针织物拉伸时模拟效果。



图13 筒状针织物拉伸时模拟效果

Fig. 13 Simulation effect of the tubular knitted fabric during stretching

在研究纬编针织物时,有限元模型可以对纱线、线圈和织物之间的相互作用进行分析,提供高精度的模拟效果,可以帮助研究者更好地了解针织物在应力下的形变和应变情况,为设计优化提供依据。建立精确的有限元模型需要大量的计算资源和时间,需要对织物的细节进行详细建模,建模具有一定的难度和计算复杂性。

3 发展趋势

随着消费者对品质和个性化需求的增加,纺织行业需要开发新织物类型以应对消费流行趋势。纬编针织物真实感模拟技术能帮助设计师、工艺师和生产商更好地理解、预测织物的结构和性能,优化设计和生产流程,满足市场需求。除纺织行业外,该技术在时尚、家居装饰、汽车、航空航天等相关行业也具有潜力。因此,对纺织行业及相关行业而言,纬编针织物真实感模拟技术需要更深入的研究以促进行业创新和发展。

3.1 模拟效果精细化

模拟效果精细化是指更准确地模拟纬编针织物的纹理、质感、弯曲性、拉伸行为以及其他外观效果和物理特性,实现对纬编针织物纹理、结构和光照等方面的精确建模和渲染,而非仅限于外观的简单模拟。模拟效果精细化对纬编针织物仿真技术应用具有重要意义,不仅增加了纬编针织物仿真的真实性和可信度,还使得设计师和制造商能够更精确地预测和调整纬编针织物的物理性能,优化产品设计和生产流程,从而提升其在应用领域的可行性和效果。因此,模拟效果精细化是纬编针织物真实感模拟与仿真技术的重要发展趋势。

3.2 模拟实时交互化

模拟实时交互化涉及两个关键方面:实时化和交互化。首先,实时化是指模拟和渲染纬编针织物的过程能够在实时性要求下进行,模拟系统需要具备高效的计算能力和优化的算法,能够快速生成和更新纬编针织物的模拟结果。其次,交互化是指用户与模拟系统之间的互动和反馈。通过交互化的设计,用户可以通过控制参数、调整纬编针织物的属性或进行虚拟试穿等操作,与模拟系统进行交互。最后,将实时化与交互化相结合实现模拟实时交互化,可以为纬编针织物的设计、生产和应用带来许多优势,比如实时预览和修改纬编针织物的外观效果,实时交互操作优化生产方案和工艺参数等。模拟实时交互化能够为纬编针织物的设计、生产和应用领域提供更强大的工具和方法,推动纬编针织物仿真技术的广泛应用和发展。

3.3 织物类型多样化

针织物的种类和结构形式越来越多样化,这也要求纬编针织物真实感模拟与仿真技术能够适应不同类型的针织物,包括但不限于不同的针织结构、纱线材质、纱线密度等。例如,不同的针织结构对纱线的力学性质和形变特性有不同的影响,因此需要针对不同的针织结构进行不同的纬编针织物真实感模拟与仿真技术研究,以准确地模拟其外观和物理行为。同时,行业发展也需要纬编针织物真实感模拟与仿真技术能够快速适应新的织物类型,从而更好地满足现实生产需求,推动纬编针织物的创新和应用。

3.4 应用领域多元化

纬编针织物在各个领域得到广泛应用,每个领域对纬编针织物的要求和需求各不相同,因此模拟与仿真技术需要适应并满足不同应用领域的特定需求。纬编针织物真实感模拟与仿真技术的应用不仅局限于纬编针织物相关领域,还可以为虚拟角色模拟和渲染服装的外观和动态效果,增添游戏环境的真实感和细腻度,此外还可以展示织物在建筑材料和室内装饰中的应用效果,该技术在游戏开发、建筑设计等领域的应用展现出其广泛的适用性和潜力。随着技术的不断发展和创新,纬编针织物真实感模拟与仿真技术将继续在更多领域中发挥重要作用。

4 结 语

纬编针织物真实感模拟与仿真技术可以为纬编针织物的设计、生产和应用提供关键的支持和指导,提高纺织品的品质和生产效率。通过对纬编针织物真实感模拟与仿真技术进行了全面的论述和分析,详细讨论了纬编针织物真实感模拟与仿真技术中外观模拟和物理模拟两个重要方面。在外观模拟方面,探讨了二维和三维技术对纬编针织物颜色、纹理、光照效果和立体效果的准确再现;在物理模拟方面,介绍了基于弹簧-质点模型、网格模型、纱线层次模型或有限元模型等方法对纬编针织物的弹性、变形和流体行为的模拟。纬编针织物真实感模拟与仿真技术应朝着更高精度、更实时交互、更多样化的织物类型以及更广泛的应用领域的方向发展。

参考文献:

- [1] 李英琳, 张灵霞, 谷力伟, 等. 纬编针织物组织三维仿真系统的设计与实现[J]. 针织工业, 2015(12): 1-5.
LI Yinglin, ZHANG Lingxia, GU Liwei, et al. Design and implementation of 3D simulation system of weft knitted fabric structures[J]. Knitting Industries, 2015(12): 1-5.
- [2] SHA S, GENG A, GAO Y, et al. Review on the 3-D simulation for weft knitted fabric[J]. Journal of Engineered Fibers and Fabrics, 2021, 16: 155892502110125.
- [3] 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, 26(6): 66-71.
WANG Yusang, FENG Xunwei. CAD of weft knitted jacquard fabrics based on geometrical model[J]. Journal of China Textile University, 2000, 25(6): 66-71.
- [4] 汪秀琛. 基于线圈模型的羊毛衫花型仿真模拟[J]. 毛纺科技, 2009, 37(12): 51-54.
WANG Xiuchen. Pattern simulation of sweater based on loop model[J]. Wool Textile Journal, 2009, 37(12): 51-54.
- [5] 卢致文, 蒋高明. 基于纱线纹理的横编线圈快速仿真与计算机实现[J]. 纺织学报, 2016, 37(2): 119-124.
LU Zhiwen, JIANG Gaoming. Rapid simulation and computer implementation of flat knitting loops based on yarn texture[J]. Journal of Textile Research, 2016, 37(2): 119-124.
- [6] LU Z, JIANG G. Rapid simulation of flat knitting loops based on the yarn texture and loop geometrical model[J]. Autex Research Journal, 2017, 17(2): 103-110.
- [7] JIANG G, LU Z, CONG H, et al. Flat knitting loop deformation simulation based on interlacing point model[J]. Autex Research Journal, 2017, 17(4): 361-369.
- [8] 张继东, 薛元, 张杰, 等. 应用混色纱纹理信息的纬编针织物模拟[J]. 纺织学报, 2017, 38(7): 148-154.
ZHANG Jidong, XUE Yuan, ZHANG Jie, et al. Weft knitted fabric simulation using mixed color yarn texture information[J]. Journal of Textile Research, 2017, 38(7): 148-154.
- [9] 吴义伦, 李忠健, 潘如如, 等. 应用色纺纱图像的纬编针织物外观模拟[J]. 纺织学报, 2019, 40(6): 112-117.
WU Yilun, LI Zhongjian, PAN Ruru, et al. Weft knitted fabric appearance simulation using colored spun yarn image[J]. Journal of Textile Research, 2019, 40(6): 112-117.
- [10] 吴义伦, 潘如如, 高卫东. 云纹纱纬编针织物外观模拟[J]. 丝绸, 2019, 56(2): 37-42.
WU Yilun, PAN Ruru, GAO Weidong. Appearance simulation of weft knitted fabric with cloud yarn[J]. Journal of Silk, 2019, 56(2): 37-42.
- [11] ZHONG H, XU Y, GUO B, et al. Realistic and efficient rendering of free-form knitwear[J]. The Journal of Visualization and Computer Animation, 2001, 12(1): 13-22.
- [12] KYOSEV Y, ANGELOVA Y, KOVAR R. 3D modeling of plain weft knitted structures of compressible yarn[J]. Research Journal of Textile and Apparel, 2005, 9(1): 88-97.
- [13] KURBAK A, EKMEN O. Basic studies for modeling complex weft knitted fabric structures part I: A geometrical model for widthwise curlings of plain knitted fabrics[J]. Textile Research Journal, 2008, 78(3): 198-208.
- [14] KURBAK A, KAYACAN O. Basic studies for modeling complex weft knitted fabric structures part II: A geometrical model for plain knitted fabric spirality[J]. Textile Research Journal, 2008, 78(4): 279-288.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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 Zhoujin, SONG Hui, LI Baiyan, et al. 3D simulation of weft knitted fabric in computer[J]. Journal of Donghua University (Natural Science), 2011, 37(2): 210-214.
- [18] 张哲, 李柏岩, 刘晓强, 等. 纬编针织物外观模拟纹理映射技术研究[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2011, 37(6): 745-749.
ZHANG Zhe, LI Baiyan, LIU Xiaoqiang, et al. Research on texture mapping in weft-knitted fabric simulation[J]. Journal of Donghua University (Natural Science), 2011, 37(6): 745-749.

- [19] 于斌成,李柏岩,刘晓强,等.一种增强模拟纬编针织物外观真实感的方法[J].东华大学学报(自然科学版),2013,39(5):644-649.
YU Binchen, LI Baiyan, LIU Xiaoqiang, et al. A method to improve the sense of reality of simulated weft knitted fabric appearance [J]. Journal of Donghua University (Natural Science), 2013, 39(5): 644-649.
- [20] 金兰名,蒋高明,丛洪莲.三维纬编提花织物的计算机仿真及系统实现[J].纺织学报,2016,37(7):155-161.
JIN Lanming, JIANG Gaoming, CONG Honglian. Computer simulation and system realization of 3-D weft knitted jacquard fabric [J]. Journal of Textile Research, 2016, 37(7): 155-161.
- [21] WU K, YUKSEL C. Real-time cloth rendering with fiber-level detail [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2019, 25(2): 1297-1308.
- [22] HUO D, YUAN L, GU Q, et al. Computer simulation of colored spun knitted fabric based on Dual-Tree complex wavelet transform [J]. The Journal of the Textile Institute, 2023, 114(4): 682-691.
- [23] PROVOT X. Deformation constraints in a mass-spring model to describe rigid cloth behavior [C]. Proceedings of Graphics Interface. Canada: Canadian Human-Computer Communications Society, 1995: 47-54.
- [24] MEIBNER M, EBERHARDT B. The art of knitted fabrics, realistic & physically based modelling of knitted patterns [J]. Computer Graphics Forum, 1998, 17(3): 355-362.
- [25] KYOSEV Y, RENKENS W. Modelling and Visualization of Knitted Fabrics [M]. Modelling and Predicting Textile Behaviour. Amsterdam: Elsevier, 2010: 225-262.
- [26] GÜDÜKBAY U, BAYRAKTAR S, KOCA Ç, et al. Particle-based simulation of the interaction between fluid and knitwear [J]. Signal Image and Video Processing, 2014, 8(3): 415-422.
- [27] 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.
- [28] MOZAFARY V, PAYVANDY P. A novel method based on loop shape for simulating knitted fabric using mass spring model [J]. Fibers and Polymers, 2017, 18(3): 533-541.
- [29] 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.
RU Xin, ZHU Wanzhen, SHI Weimin, et al. Deformation prediction and simulation of weft knitted fabrics with non-uniform density distribution [J]. Journal of Textile Research, 2022, 43(6): 63-69.
- [30] 常辰玉,卢致文,刘锋,等. NURBS 曲线反算不同参数取值法在纬平针织物仿真中的比较[J].毛纺科技,2023,51(1):99-105.
CHANG Chenyu, LU Zhiwen, LIU Feng, et al. Comparison of NURBS curve inverse calculation with different parameter values in simulation of jersey fabric [J]. Wool Textile Journal, 2023, 51(1): 99-105.
- [31] LEAF G A V. MODELS OF THE PLAIN-KNITTED LOOP [J]. Journal of the Textile Institute Proceedings, 1960, 51(2): 49-58.
- [32] 刘瑶,邓中民.羊毛衫组织的变形分析及三维仿真新方法[J].针织工业,2012(2):21-23.
LIU Yao, DENG Zhongmin. A new method for deformation analysis and 3d simulation of wool sweater [J]. Knitting Industries, 2012(2): 21-23.
- [33] YUKSEL C, KALDOR J M, JAMES D L, et al. Stitch meshes for modeling knitted clothing with yarn-level detail [J]. ACM Transactions on Graphics, 2012, 31(4): 1-12.
- [34] WU K, SWAN H, YUKSEL C. Knittable stitch meshes [J]. ACM Transactions on Graphics, 2019, 38(1): 1-8.
- [35] 杨恩惠,邱华,代文杰.基于六边形网格结构的针织物三维建模[J].纺织学报,2019,40(11):69-74.
YANG Enhui, QIU Hua, DAI Wenjie. Three-dimensional modeling and analysis of knitted fabric based on hexagonal mesh structure [J]. Journal of Textile Research, 2019, 40(11): 69-74.
- [36] 胡新荣,汪卓,刘军平,等.基于自适应网格划分的针织物仿真[J].现代纺织技术,2022,30(5):21-30.
HU Xinrong, WANG Zhuo, LIU Junping, et al. Knitted fabric simulation based on adaptive remeshing [J]. Advanced Textile Technology, 2022, 30(5): 21-30.
- [37] 赖安琪,蒋高明,李炳贤.全成形毛衫花式结构三维仿真[J].纺织学报,2023,44(2):103-110.
LAI Anqi, JIANG Gaoming, LI Bingxian. Three-dimensional simulation of whole garment with fancy structures [J]. Journal of Textile Research, 2023, 44(2): 103-110.
- [38] KALDOR J M, JAMES D L, MARSCHNER S. Simulating knitted cloth at the yarn level [J]. ACM Transactions on

- Graphics , 2008 , 27(3) : 1-9.
- [39] KALDOR J M , JAMES D L , MARSCHNER S. Efficient yarn-based cloth with adaptive contact linearization [J]. ACM Transactions on Graphics , 2010 , 29(4) : 105-119.
- [40] CIRIO G , LOPEZ-MORENO J , OTADUY M A. Yarn-level cloth simulation with sliding persistent contacts [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics , 2017 , 23(2) : 1152-1162.
- [41] LEAF J , WU R , SCHWEICKART E , et al. Interactive design of periodic yarn-level cloth patterns [J]. ACM Transactions on Graphics , 2018 , 37(6) : 1-15.
- [42] SPERL G , RAHUL N , CHRIS W. Homogenized yarn-level cloth [J]. ACM Transactions on Graphics , 2020 , 39(4) : 48:1-46.
- [43] SPERL G , SANCHEZ-BANDERAS R M , LI M , et al. Estimation of yarn-level simulation models for production fabrics [J]. ACM Transactions on Graphics , 2022 , 41(4) : 65:1-15.
- [44] VASSILIADIS S G , KALLIVRETAKI A E , PROVATIDIS C G. Mechanical simulation of the plain weft knitted fabrics [J]. International Journal of Clothing Science and Technology , 2007 , 19(2) : 109-130.
- [45] WANG Z , HU H. A finite element analysis of an auxetic warp-knitted spacer fabric structure [J]. Textile Research Journal , 2015 , 85(4) : 404-415.
- [46] MCKEE P J , SOKOLOW A C , YU J H , et al. Finite element simulation of ballistic impact on single jersey knit fabric [J]. Composite Structures , 2017 , 162: 98-107.
- [47] GHORBANI E , HASANI H , JAFARI NEDOUSHAN R. Finite element modelling the mechanical performance of pressure garments produced from elastic weft knitted fabrics [J]. The Journal of the Textile Institute , 2019 , 110(5) : 724-731.
- [48] WADEKAR P , PERUMAL V , DION G , et al. An optimized yarn-level geometric model for finite element analysis of weft-knitted fabrics [J]. Computer Aided Geometric Design , 2020 , 80: 101883.
- [49] 郝志远 , 陈慧敏 , 沈琼 , 等. 基于均匀化理论的针织物拉伸形变有限元模拟 [J]. 东华大学学报(自然科学版) , 2020 , 46(1) : 47-52.
- HAO Zhiyuan , CHEN Huimin , SHEN Qiong , et al. Tensile deformation finite element simulation of knitted fabric based on homogenization theory [J]. Journal of Donghua University (Natural Science) , 2020 , 46(1) : 47-52.
- [50] 孙亚博 , 李立军 , 马崇启 , 等. 基于 ABAQUS 的筒状纬编针织物拉伸力学性能模拟 [J]. 纺织学报 , 2021 , 42(2) : 107-112.
- SUN Yabo , LI Lijun , MA Chongqi , et al. Simulation on tensile properties of tubular weft knitted fabrics based on ABAQUS [J]. Journal of Textile Research , 2021 , 42(2) : 107-112.

Progression realistic modeling and simulation of weft knitted fabrics

SONG Mingming¹, CHANG Chenyu¹, SUN Yaxin¹, LIU Feng¹, LI Xiaoyan², LU Zhiwen^{1,2}

(1. College of Textile Engineering, Taiyuan University of Technology, Jinzhong 030600, China;

2. Anhui Tianzhu Textile Science Technology Co., Ltd., Fuyang 236000, China)

Abstract: Weft knitted fabrics, as an important type of textile, are widely applied in fashion garments, home textiles, automotive interiors, and other fields. However, traditional design and production methods suffer from inefficiency, resource waste, and discrepancies with the actual products. Conducting realistic modeling and simulation research on weft knitted fabrics not only helps accelerate product development speed but also reduces development costs and minimizes trial and error. Therefore, the development of realistic modeling and simulation techniques for weft knitted fabrics is of great significance.

The technology for simulating the visual realism of weft knitted fabrics encompasses two aspects: 2D and 3D. The 2D visual simulation technology primarily focuses on the simulation of surface texture and patterns of weft knitted fabrics, accurately representing their color, texture, and lighting effects. The 3D visual simulation technology further advances on the basis of 2D simulation, accurately simulating the three-dimensional effects of weft knitted fabrics. This technology can more realistically reproduce the details and structural characteristics of weft knitted fabrics, thereby enhancing the realism of visual simulation.

Another key research direction is the physical realism modeling and simulation technology of weft knitted fabrics. This technology simulates the physical characteristics of weft knitted fabrics, such as elasticity, deformation, and fluid behavior, by establishing models based on methods like spring-mass models, mesh models, yarn-level models, or finite element models. By simulating the interaction of weft yarns and the deformation of textile structures, the actual physical behavior of weft knitted fabrics can be predicted more accurately.

Due to the nonlinear and complex nature of deformation in weft knitted fabrics, although physics-based simulation methods are capable of capturing the fabric's real behavior, there are still challenges of high computational complexity and low simulation efficiency in complex scenarios. Therefore, it is a key issue in improving simulation speed to optimize simulation algorithms to reduce computational complexity while maintaining accuracy to the greatest extent possible.

Currently, the development of weft knitted fabrics' realism modeling and simulation technology is progressing in several aspects. Firstly, the simulation effects will become more detailed to accurately reproduce the intricate features of weft knitted fabrics, such as textures, textile structures, and fabric shading effects. Secondly, the technology will focus more on real-time interactivity, enabling designers and users to quickly adjust and preview the visual effects of weft knitted fabrics, thus enhancing the flexibility of design and purchasing decisions. Thirdly, the simulation technology will emphasize the diversification of weft knitted fabric types, including the simulation of various materials, textures, and knitting methods. This will provide a broader range of choices and applications for different fields. Finally, the application scope of weft knitted fabrics' realism modeling and simulation technology will further diversify, providing support for innovation and development in various industries.

Keywords: weft knitted fabrics; dynamic simulation; physical modeling; development trends