

圆形截面编织物建模与三维仿真

杨宁 蒋高明 刘海桑 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: 基于对二维圆形和三维二步法圆形编织工艺与编织运动规律的分析, 探讨圆形截面编织结构的共同特点, 建立圆形截面编织结构数学模型, 模拟编织结构中单根股线中心线的轨迹及空间位置。在 Visual Studio 2019 平台上利用 WebGL 技术和三维图形引擎库 Three.js, 快速有效地呈现三维股线编织结构, 大幅提高三维仿真效率。结果显示: 基于广义玫瑰线数学模型对圆形截面编织结构进行三维仿真实切实可行且效果良好, 能较好地反映编织结构股线相互穿插的交织规律和外观特征。研究可为产业用编织绳索的建模与结构可视化奠定基础。

关键词: 圆形截面编织物; 编织物股线模型; 建模; 三维仿真

中图分类号: TB 332

文献标志码: A

文章编号: 1004-7093(2024)08-0036-09

Modeling and 3D simulation of circular section braided fabrics

Yang Ning, Jiang Gaoming, Liu Haisang, Li Bingxian

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

Abstract: Based on the analysis of 2D circular and 3D two-step circular braiding process and braiding motion law, the common characteristics of the circular section braiding structures were discussed, and the mathematical models of circular section braiding structures were established to simulate the trajectory and spatial position of the single strand center line in braiding structures. Using WebGL technology and 3D graphics engine library Three.js on Visual Studio 2019 platform, the 3D strand braiding structures were presented quickly and effectively, and the 3D simulation efficiency was greatly improved. The results showed that the 3D simulation of the circular braided structures based on the generalized rose curve mathematical models was feasible and effective, which could better reflect the interweaving law and appearance characteristics of the strands of braided structures. The research can lay a foundation for modeling and structural visualization of the braided rope for industrial use.

Keywords: circular section braided fabric; braided strand model; modeling; 3D simulation

基金项目: 江苏省自然科学基金项目(BK20221094); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX24_2573); 无锡市“太湖之光”科技攻关(基础研究)项目(K20221007)

收稿日期: 2024-05-16

作者简介: 杨宁, 女, 1997年生, 在读博士研究生, 主要研究方向为数字化仿真技术

通信作者: 蒋高明, 教授, 博士, 研究方向为纺织数字技术与纺织结构材料, jgm@jiangnan.edu.cn

圆形截面编织物的编织纱相互交错,其预成型件具有设计灵活、近净尺寸成型、结构整体性强等显著优点^[1]。其中,三维(3D)二步法圆形编织物较二维(2D)圆形编织物具有更高的纤维体积分数^[2],其轴向纤维束能够显著增强织物的轴向强度,是轴向承力复合材料的首选增强体材料。三维二步法工艺常用于制备管状结构增强体及具有复杂截面形态的复合材料,产品应用于起重吊装、输送运输、船舶系泊等领域。二维圆形编织物可通过添加芯轴,制成双编绳、编捻绳等,广泛应用于渔业捕捞、电力施工等工程领域,还可作为航天器轻量化的关键部件,应用于网状可展开天线等可展开结构中。

随着计算机技术的快速发展,计算机辅助设计(CAD)被广泛应用于编织物的三维仿真。CAD 技术能够快速、直观地展示编织物的结构形态,对提高编织物的结构可视化具有重要意义。章宇界等^[3]运用 Matlab 与 CATIA 软件进行建模,借助 B 均匀样条曲线模拟圆形截面编织物的空间纱线轨迹,并进行预制件仿真,进而改善了编织型复合材料中纱线的穿插效果。张小萍等^[4]分析了纱线的运动规律,并通过虚拟现实建模语言(VRML)实现了参数化的编织物纱线模拟,进而建立了圆形截面编织物的模型,并通过动画仿真完成了对编织过程的探究。肖来元等^[5]针对圆形截面编织工艺特点,采用固定网格法对其进行分步模拟,再运用展开截面法完成编织算法与三维仿真。Liao 等^[6]为简化带芯圆管的编织工艺并实现更复杂形状的编织,对纱线的结构特点和纤维有限尺寸的 CAD 模型进行分析,并对三维圆形截面编织物外部和内部的几何形状进行了描述和表征。对于复杂的圆形截面编织结构,计算机仿真仍较困难,且现有的结构模型均存在一定的缺陷,其大多借助 3DMax、Solidworks 及 Matlab 等软件^[7]解析编织轨迹,同时借助样条曲线,采用描点法实现编织物空间拓扑结构的表征,但都未获得具体的数学模型。

本文针对圆形截面编织结构,对其数学模型进行探讨,提出基于 WebGL 技术的圆形截面编织物仿真方法,建立基于广义玫瑰线的编织股线中心线轨迹方程,以提升圆形截面编织结构的三维仿真与设计效率。

1 圆形截面编织物的结构

在圆形截面编织物中,二维圆形编织物的厚度小于等于编织纱直径的 3 倍,且仅有 1 个编织纱系统,而三维二步法圆形编织物的厚度大于编织纱直径的 3 倍,并具有编织纱和轴纱 2 个纱线系统。上述 2 种圆形截面编织物的编织结构均能够赋予织物高强度^[8-9],但因维度和结构的不同,2 种圆形编织物在外观和质感上存在差异,三维二步法圆形编织物通常在视觉上更具立体感和层次感,并且结构更稳定^[10]。

1.1 二维圆形编织物

二维圆形编织物通常有菱形结构、常规结构、赫格利斯结构、方形结构等。菱形结构又称 1×1 编织结构,这种编织结构中相反方向的纱线每隔一束交叉一次。常规结构、赫格利斯结构、方形结构又分别称为 2×2 编织结构、3×3 编织结构、4×4 编织结构。携纱器、角导轮、传动轴和牵拉装置等共同构成编织机的整体,编织机含有 2 组运动方向相反的携纱器,每个携纱器的运动轨迹近似“8”字形,如图 1 所示。在携纱器带动下,纱线在空间内规律交错排列,形成编织物^[11-12]。

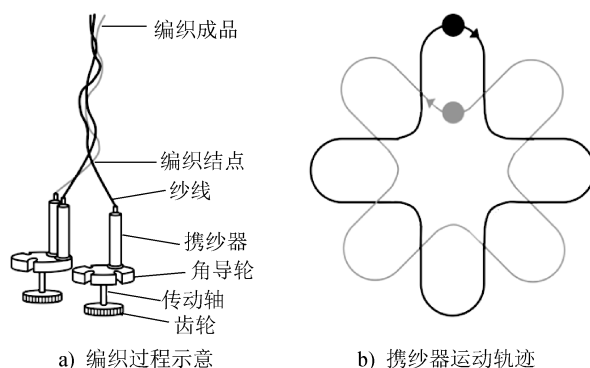


图 1 二维圆形编织物的编织过程

Fig. 1 Braiding process of 2D circular braided fabrics

1.2 三维二步法圆形编织物

三维二步法圆形编织结构遵循与方形编织中对角线交织类似的方式,但在圆形编织物编织过程中,对角线上的点被转换为内外层不同圆环上的点。通过施加适当的偏转角度,实现类似对角线的交织。三维二步法圆形编织具有编织纱和固定不动的轴纱 2 个纱线系统,其编织路径如图 2 所示。

沿半径分布的轴纱数记为 m ,即具有 m 层圆环。

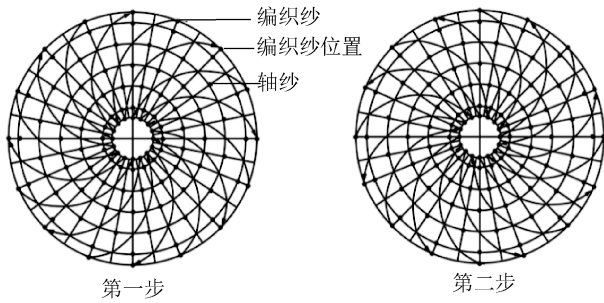


图2 三维二步法圆形编织物的编织路径

Fig. 2 Braiding path of 3D two-step circular braided fabrics

沿圆周分布的轴纱数记为 $n^{[13]}$ 。编织纱间隔分布在圆环的内外两侧,每层圆环上具有相同数量的轴纱,且相邻2层轴纱交错排列。这种结构的预制件被称为二步法 $m \times n$ 圆形三维编织预制件^[14]。

2 圆形截面编织物的数学模型建立

2.1 广义玫瑰线与圆形截面编织物的关系

广义玫瑰线的极坐标方程如式(1)所示。

$$r = A + B \cos\left(\frac{u}{v}\theta\right) \quad (1)$$

式中: r 为玫瑰线上点的极径; A 为玫瑰线中心圆的半径; B 为玫瑰线偏离中心圆的程度; u 为玫瑰线的花瓣数目, v 为花瓣的密度, u 和 v 均为大于0的整数,且 u/v 为既约分数; θ 为玫瑰线上点的极角。

式(1)描述了一条以原点为中心的类似于玫瑰花的曲线,并在极坐标平面上呈现出对称性^[13],将其转化为直角坐标系下的方程,如式(2)所示。

$$\begin{cases} x = \left[A + B \sin\left(\frac{u}{v}t\right) \right] \cos t \\ y = \left[A + B \sin\left(\frac{u}{v}t\right) \right] \sin t \end{cases} \quad (2)$$

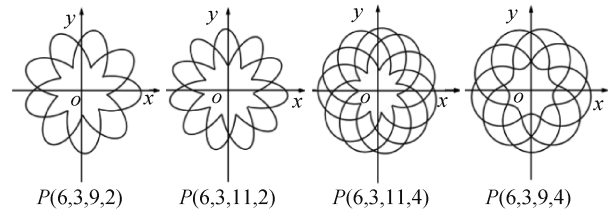
式中: t 为位置变量。

由式(2)可得,广义玫瑰线被表述为 $P(A, B, u, v)$ 。图3a)所示为部分不同参数的广义玫瑰线^[15]。

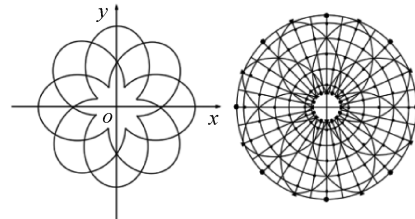
根据 $\sin\left(\frac{u}{v}t\right)$ 在广义玫瑰线方程中的周期性,可知广义玫瑰线也呈现出周期重复性,其规律为参数 A 控制花瓣的中心位置及花瓣的宽度;参数 B 控制花瓣的长度;参数 u 控制花瓣的个数和宽度,花瓣的个数等于 u ,且 u 值越大,花瓣宽度越小;参数 v 控制花瓣与花瓣的间隔,且花瓣自身对称时,花瓣两侧交点个数为 $v-1$ 个,花瓣交点呈分层结构时,

分层数为 $v-1^{[16-17]}$ 。

广义玫瑰线与三维二步法圆形编织结构的单根股线具有相对应的运动规律,如图3b)所示。



a) 广义玫瑰线



b) 广义玫瑰线与三维二步法圆形编织结构的对应关系

图3 广义玫瑰线及其与三维二步法圆形编织结构的对应关系

Fig. 3 Generalized rose cruves and their corresponding relationships with 3D two-step circular braided structures

参数 u 对应整个编织周期中,锭子在“圆周外侧-圆周内侧-圆周外侧”往复运动经历的步数。一个周期中经历的步数越多,在圆周上的交织越密集。轴纱的层数由交点层的层数决定,若交点层数为 a ,则轴纱层数最多为 $2a+1$ 层。参数 v 对应一次完整的三维二步法圆形编织过程结束后,回到原位经过的编织次数。参数 u, v 的上述对应关系也适用于二维圆形编织物。同时,广义玫瑰线也是二维圆形编织物、三维二步法圆形编织物股线结构的投影。

2.2 编织股线的数学建模

基于广义玫瑰线与三维二步法圆形编织路径的对应关系,进行二维圆形和三维二步法圆形编织物的数学建模。编织股线运动轨迹包含 x, y, z 轴3个方向的分运动,在三维二步法圆形编织过程中,参数 m 为沿半径分布的轴纱数,参数 n 为沿圆周分布的轴纱数,与广义玫瑰线参数存在 $u=n, v=m+1$ 的关系,则圆形截面编织结构股线中心线的轨迹方程为

$$\begin{cases} x = \left[A + B \sin\left(\frac{n}{m+1}t\right) \right] \cos(\lambda t) \\ y = \left[A + B \sin\left(\frac{n}{m+1}t\right) \right] \sin(\lambda t) \\ z = pt \end{cases} \quad (3)$$

式中: A 为编织结构中心圆的半径; B 为股线波动幅度, 即股线从内外两侧转移到半径方向上的投影长度; λ 为编织股线方向, $\lambda > 0$ 表示逆时针方向, $\lambda < 0$ 表示顺时针方向; t 为位置变量; p 为相邻位置在 z 轴方向的增量。根据式(3), 可以绘制二维圆形和三维二步法圆形编织结构单根股线的空间位置。

在圆形截面编织物的三维仿真过程中, 参数 A 和参数 B 对花瓣的形状有影响。

(1) 当 $A < B$ 时, 由方程 $x = \left[A + B \sin\left(\frac{n}{m+1}t\right) \right] \cos(\lambda t)$ 得, x 有可能小于 0, 最小值为 $A - B$, 此时, 玫瑰线的花瓣呈现出中心对称性的扩展, 产生的小花瓣长度为 $B - A$, 外接于直径为 $B - A$ 的圆。当 $n/(m+1)$ 为奇数时, 大花瓣环绕着小花瓣; 当 $n/(m+1)$ 为偶数时, 大花瓣和小花瓣交替分布, 如图 4 所示。此形态的圆形截面编织物目前尚未投入产业应用, 不适用于产业用圆形截面编织物的结构建模。

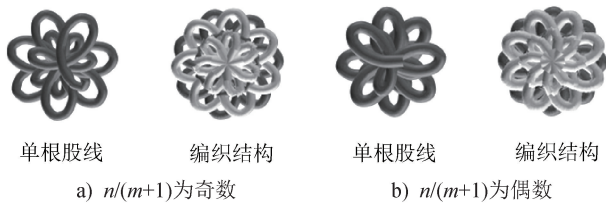


图 4 圆形截面编织结构 ($A < B$)
Fig. 4 Braided structures with circular section ($A < B$)

(2) 当 $A = B$ 时, 由方程 $x = \left[A + B \sin\left(\frac{n}{m+1}t\right) \right] \cos(\lambda t)$ 得, 每个花瓣都是从中心出发向外延伸的, 外接于直径为 $A + B$ 的圆, 曲线不存在内接圆。绘制的编织物结构图如图 5 所示, 每根纱线的轨迹都重叠于中心点。理论上绘制的编织物股线轨迹在中心处重合, 但圆形截面编织物的内部纱线具有特定的粗细等尺寸参数, 不应互相重合, 因此, 其也不适用于模拟圆形截面编织物的结构形态。



图 5 圆形截面编织结构 ($A = B$)
Fig. 5 Braided structures with circular section ($A = B$)

(3) 当 $A > B$ 时, 花瓣的数量保持为 n 不变, 且每片花瓣都遵循特定的规律, 在中心圆上波动, 每片花瓣的内接圆和外接圆半径分别为 $A - B$ 和 $A + B$, 且 2 个圆为同心圆。即 $A > B$ 是构建圆形截面编织物数学模型的必要条件, 其编织结构如图 6 所示。

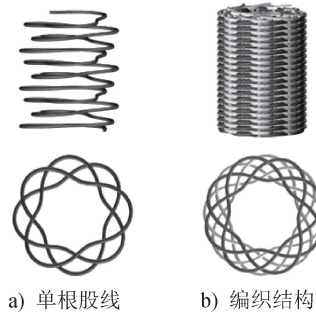


图 6 圆形截面编织结构 ($A > B$)
Fig. 6 Braided structures with circular section ($A > B$)

式(3)中, 参数 $n/(m+1)$ 为既约分数, 其中 n 和 $m+1$ 均为正整数。 n 决定了玫瑰线中的花瓣数, $m+1$ 影响生成的玫瑰线相邻花瓣间的交织点数。

(1) 随着 $m+1$ 值的增大, 玫瑰线花瓣逐渐变宽, 花瓣间交织点数增多, 当 $n/(m+1) > 1$ 时, 图形为花朵形; 当 $n/(m+1) < 1$ 时, 图形为球状物。因此, $n/(m+1) > 1$ 的条件适用于圆形截面编织物的数学建模。

(2) 当 n 或 $m+1$ 为偶数 [由于 $n/(m+1)$ 为既约分数, 二者不同为偶数] 时, 闭合周期为 $(m+1)\pi$ 。当 n 或 $m+1$ 为偶数, 且 t 的取值大于等于 $2\pi(m+1)$ 时, 玫瑰线为闭合图形, 生成花瓣数为 $2n$ 的图形。

3 圆形截面编织物的三维仿真

基于对二维圆形编织物、三维二步法圆形编织物编织形态及其仿真技术的研究与分析, 本文在 Visual Studio 2019 开发平台中使用 C# 与 JavaScript 语言编写网页前台程序。借助 Matlab R2022a 软件进行圆形截面编织物的三维仿真。首先, 建立软件的体系架构; 然后, 确定软件的界面功能; 最后, 完成参数层 (原料、穿纱等)、视图层 (穿纱、仿真等) 与功能层 (渲染、三维仿真等) 的开发。

圆形截面编织结构股线中心线的空间轨迹方程能够较为准确地表征编织结构的形态, 且不同

的圆形截面编织物对应不同的参数。基于圆形截面编织结构股线中心线的轨迹方程(3),建立参数 B 、 p 、 t 和参数 m 、 n 、 j 、 k 间的数学关系,构建不同编织结构的圆形截面编织物参数方程。参数 j 为遍历取值从 0 依次递增至小于 m 的整数的循环变量;参数 k 为遍历取值从 0 依次递增至小于 n 的整数的循环变量。

基于圆形截面编织结构股线中心线的空间轨迹方程,借助 CAD 可以实现二维圆形、三维二步法圆形、多股并排,以及三轴系编织结构的三维仿真。

利用 WebGL 技术中三维图形引擎库 Three.js 封装的管道几何 TubeGeometry 函数,依次沿着编织股线上的坐标点拉伸出 1 条三维样条曲线模拟纱线弯曲路径,渲染管状几何体。首先,管道几何体 TubeGeometry 的顶点位置坐标在三维空间笛卡尔坐标系中需要 X 、 Y 、 Z 这 3 个分量,使用引擎库中自带的 SplineCurve3 函数将型值点依次相连,创建 1 条平滑的曲线。这个过程形成的曲线直径只有 1 个像素点,不能模拟具有一定细度的纱线。其次,通过 TubeGeometry 函数赋予曲线半径、横截面分段数、曲线段数等参数信息,使曲线更好地模拟编织股线形态。最后,通过引擎库 Three.js 中封装的 OrbitControl 函数,控制模型的旋转、缩放及平移,从而在计算机平台上清晰地显示圆形截面编织物的结构形态。

3.1 三维二步法圆形编织结构

在三维二步法圆形编织物的三维仿真中,应注意编织物最外层轴纱应被最外层编织纱完全包围,且最外层轴纱位于最外层编织纱的内侧,以防编织物最外层的编织纱与最外层的轴纱位置交叉相撞。通过将表征偏离幅度的参数值 B 减去 0.35 进行纱线位置的微调修正,可呈现出外层编织纱更好地包围外层轴纱的三维仿真效果。将 $B=(m+1)/2$, $t=\pi j/n$, $p=n/[2\pi(m+1)]$, $\lambda=1$ 代入式(3),并增加相位变化 $-(m+1)\pi/(2n)$ 、 $2\pi k/n$ 可得式(4),将 $B=(m+1)/2$, $t=\pi j/n$, $p=n(j+m+1)/[2\pi j(m+1)]$, $\lambda=-1$ 代入式(3),并增加相位变化 $(m+1)\pi/(2n)$ 、 $(2\pi k+2\pi)/n$ 可得式(5)。根据式(4)和式(5)可分别绘制由下而上进行顺时针、逆时针方向旋转的编织纱。

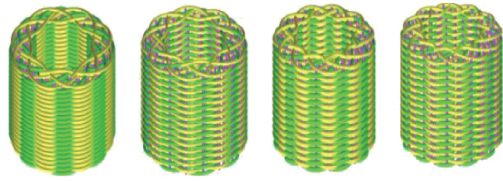
$$\begin{cases} x = \left[A + \frac{m+1}{2} \sin\left(\frac{\pi j}{m+1} - \frac{(m+1)\pi}{2n}\right) \right] \cdot \cos\left(\frac{\pi j + 2\pi k}{n}\right) \\ y = \left[A + \frac{m+1}{2} \sin\left(\frac{\pi j}{m+1} - \frac{(m+1)\pi}{2n}\right) \right] \cdot \sin\left(\frac{\pi j + 2\pi k}{n}\right) \\ z = \frac{j}{2(m+1)} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} x = \left[A + \frac{m+1}{2} \sin\left(\frac{\pi j}{m+1} + \frac{(m+1)\pi}{2n}\right) \right] \cdot \cos\left(-\frac{\pi j + 2\pi k + 2\pi}{n}\right) \\ y = \left[A + \frac{m+1}{2} \sin\left(\frac{\pi j}{m+1} + \frac{(m+1)\pi}{2n}\right) \right] \cdot \sin\left(-\frac{\pi j + 2\pi k + 2\pi}{n}\right) \\ z = \frac{j+m+1}{2(m+1)} \end{cases} \quad (5)$$

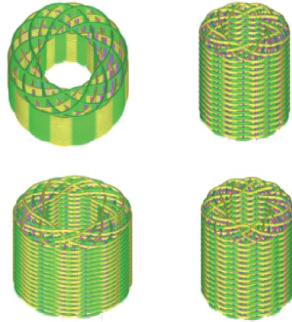
将 $m=5$, $A=10$, $n=16$ 参数值分别代入式(4)和式(5),并运用 if 条件语句分别绘制顺时针、逆时针方向旋转的编织纱。将 $m=5$ 时式(4)和式(5)中 $(m+1)\pi/(2n)$ 的相位替换为 $(m+3)\pi/(2n)$,可得 $m=7$ 时的参数方程。同理运用 if 条件语句分别绘制顺时针、逆时针方向旋转的编织纱,再运用 for 循环语句绘制同一圆周上具有不同初始位置但屈曲形态相同的编织纱体系。将编织纱体系与轴纱体系结合,分别得到半径方向轴纱数为 5 和 7 的三维二步法圆形编织物,如图 7 所示。顺时针、逆时针旋转纱线的建模方法相同,2 个方向的纱线在同一圆周位置上,波动相位相反,相互配合。

3.2 二维圆形编织结构

二维圆形编织物建模与三维二步法圆形编织物股线模型相似,其三维仿真绘制是在半径方向轴纱数为 5 的三维二步法圆形编织物参数方程[式(4)和式(5)]的基础上,令参数 $m=1$,同时对控制编织物高度的 Z 坐标方向进行相应调整,以均匀顺时针、逆时针方向旋转的编织纱的排列,得到 1×1 二维圆形编织物的三维仿真图。 1×1 二维圆形编织物的数学模型是在三维二步法圆形编织物数学模型的基础上去掉轴纱系统,并改变参数值使内、外



a) 轴纱层数为5



b) 轴纱层数为7

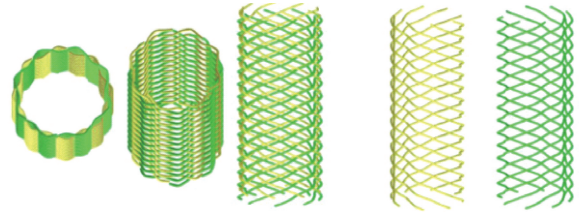
图 7 不同轴纱层数的三维二步法圆形编织结构
Fig. 7 3D two-step circular braided structures with different number of axial yarn layers

层编织纱之间存在一定的纱线间隔得到的。当 $m=1$ 时,将参数 $B=(m+1)/2=1, t=\pi j/n, p=n/\pi, \lambda=1$ 代入式(3),并增加相位变化 $-\pi/n, 2\pi k/n$ 可得式(6),将 $B=(m+1)/2=1, t=\pi j/n, p=(nj+5n)/(2\pi j), \lambda=-1$ 代入式(3),并增加相位变化 $\pi/n, (2\pi k+2\pi)/n$ 可得式(7)。根据式(6)和式(7)可绘制具有不同编织纱根数的 1×1 二维圆形编织物,如图 8 所示。

$$\begin{cases} x = \left[A + \sin\left(\frac{\pi j}{2} - \frac{\pi}{n}\right) \right] \cos\left(\frac{\pi j + 2\pi k}{n}\right) \\ y = \left[A + \sin\left(\frac{\pi j}{2} - \frac{\pi}{n}\right) \right] \sin\left(\frac{\pi j + 2\pi k}{n}\right) \\ z = j \end{cases} \quad (6)$$

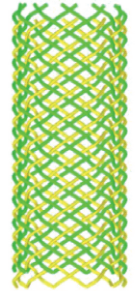
$$\begin{cases} x = \left[A + \sin\left(\frac{\pi j}{2} + \frac{\pi}{n}\right) \right] \cos\left(-\frac{\pi j + 2\pi k + 2\pi}{n}\right) \\ y = \left[A + \sin\left(\frac{\pi j}{2} + \frac{\pi}{n}\right) \right] \sin\left(-\frac{\pi j + 2\pi k + 2\pi}{n}\right) \\ z = \frac{j+5}{2} \end{cases} \quad (7)$$

2×2 二维圆形编织物中,纱线跨越幅度为 2 根相反方向的纱线。 2×2 二维圆形编织物与 1×1 二维圆形编织物具有相同的形态结构,但 2×2 编织结构的 2 根纱线分享了 1×1 编织结构中 1 根纱线的位置。



顺时针编织纱 逆时针编织纱

a) 16 根编织纱



b) 20 根编织纱



c) 24 根编织纱

图 8 不同编织纱根数的 1×1 二维圆形编织结构
Fig. 8 1×1 2D circular braided structures with different number of braiding yarns

置。根据编织结构中纱线跨越根数为 2,参数方程中函数周期变为原来的 2 倍,因此应先将式(3)中的 $n/(m+1)$ 乘以 $1/2$,再将参数 $m=1, B=(m+1)/2=1, t=\pi j/n, p=n/\pi, \lambda=1$ 代入式(3),再增加相位变化 $\pi k/2, \pi k/12$ 可得式(8),先将式(3)中的 $n/(m+1)$ 乘以 $1/2$,再将参数 $m=1, B=(m+1)/2=1, t=\pi j/n, p=n(j+2)/\pi j, \lambda=-1$ 代入式(3),再增加相位变化 $\pi k/2, \pi k/12$ 可得式(9)。根据参数方程式(8)和式(9)可绘制 2×2 二维圆形编织物。进一步地,根据编织结构中纱线跨越幅度对应的参数方程中的周期变化,将式(8)和式(9)中的 $\pi j/4$ 替换为 $\pi j/6$,可绘制 3×3 二维圆形编织物,如图 9 所示。

$$\begin{cases} x = \left[A + \sin\left(\frac{\pi j}{4} + \frac{\pi k}{2}\right) \right] \cos\left(\frac{\pi j}{n} + \frac{\pi k}{12}\right) \\ y = \left[A + \sin\left(\frac{\pi j}{4} + \frac{\pi k}{2}\right) \right] \sin\left(\frac{\pi j}{n} + \frac{\pi k}{12}\right) \\ z = j \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} x = \left[A + \sin\left(\frac{\pi j}{4} + \frac{\pi k}{2}\right) \right] \cos\left[-\left(\frac{\pi j}{n} + \frac{\pi k}{12}\right)\right] \\ y = \left[A + \sin\left(\frac{\pi j}{4} + \frac{\pi k}{2}\right) \right] \sin\left[-\left(\frac{\pi j}{n} + \frac{\pi k}{12}\right)\right] \\ z = j + 2 \end{cases} \quad (9)$$

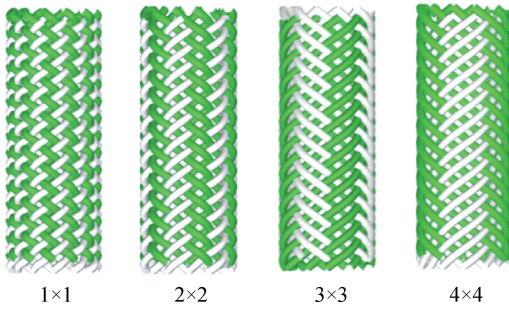


图9 二维圆形编织结构
Fig. 9 2D circular braided structures

3.3 多股并排编织结构

多股并排编织结构由2股及2股以上的纱线置于同一纱锭上按照二维圆形编织结构的方式进行编织得到,在纱线分布上其与二维圆形编织结构相似,多根纱线平均分享1×1编织结构中1根纱线的空间。以顺、逆时针编织纱根数均为24的二股并排编织结构为例,将 $n = 24, m = 1, B = (m + 1)/2 = 1, t = \pi j/n = \pi j/24, p = 24/\pi, \lambda = 1$ 代入式(3),再增加相位变化 $-\pi/24, \pi k/24$ 可得式(10),将式(10)中的相位 $\pi k/24$ 变为 $(\pi k + 48)/24$ 可得式(11),将 $n = 24, m = 1, B = (m + 1)/2 = 1, t = \pi j/n = \pi j/24, p = 24/\pi, \lambda = -1$ 代入式(3),再增加相位变化 $\pi/24, (\pi k + 2\pi)/24$ 可得式(12),将式(12)中的相位 $(\pi k + 2\pi)/24$ 变为 $(\pi k + 2\pi + 48)/24$ 可得式(13)。通过多个if条件语句结合参数方程式(10)和式(11)绘制顺时针旋转2股并排编织纱线,通过多个if条件语句结合参数方程式(12)和式(13)绘制逆时针旋转2股并排编织纱线,再将不同旋转方向的2股并排编织结构结合,即得多股并排编织结构,如图10所示。

$$\begin{cases} x = \left[A + \sin\left(\frac{\pi j}{2} - \frac{\pi}{24}\right) \right] \cos\left(\frac{\pi j + \pi k}{24}\right) \\ y = \left[A + \sin\left(\frac{\pi j}{2} - \frac{\pi}{24}\right) \right] \sin\left(\frac{\pi j + \pi k}{24}\right) \\ z = j \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} x = \left[A + \sin\left(\frac{\pi j}{2} - \frac{\pi}{24}\right) \right] \cos\left(\frac{\pi j}{24} + \frac{\pi k}{24} + 2\right) \\ y = \left[A + \sin\left(\frac{\pi j}{2} - \frac{\pi}{24}\right) \right] \sin\left(\frac{\pi j}{24} + \frac{\pi k}{24} + 2\right) \\ z = j \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} x = \left[A + \sin\left(\frac{\pi j}{2} + \frac{\pi}{24}\right) \right] \cos\left[-\left(\frac{\pi j}{24} + \frac{\pi k}{24} + \frac{\pi}{12}\right)\right] \\ y = \left[A + \sin\left(\frac{\pi j}{2} + \frac{\pi}{24}\right) \right] \sin\left[-\left(\frac{\pi j}{24} + \frac{\pi k}{24} + \frac{\pi}{12}\right)\right] \\ z = j + 2.5 \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} x = \left[A + \sin\left(\frac{\pi j}{2} + \frac{\pi}{24}\right) \right] \cos\left[-\left(\frac{\pi j}{24} + \frac{\pi k}{24} + \frac{\pi}{12} + 2\right)\right] \\ y = \left[A + \sin\left(\frac{\pi j}{2} + \frac{\pi}{24}\right) \right] \sin\left[-\left(\frac{\pi j}{24} + \frac{\pi k}{24} + \frac{\pi}{12} + 2\right)\right] \\ z = j + 2.5 \end{cases} \quad (13)$$

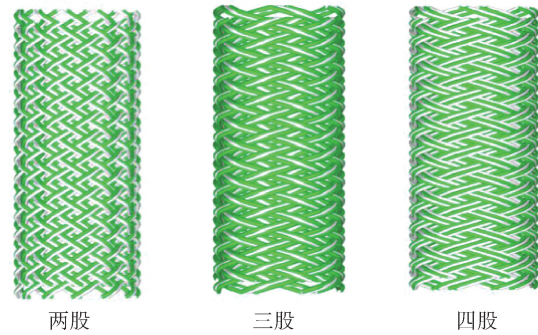


图10 多股并排编织结构
Fig. 10 Multi-strand braided structures

3.4 三轴系编织结构

运用编程语言,可在常规二维圆形编织结构模型的基础上,插入轴纱系统,形成不同结构的三轴系编织物,如图11所示。

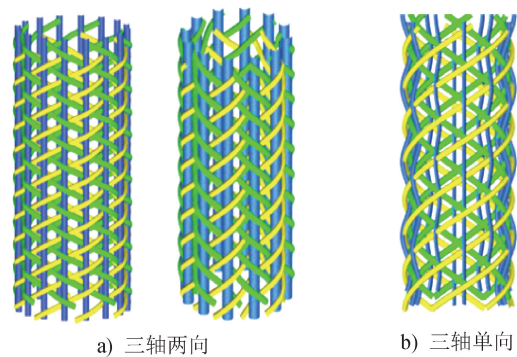


图11 三轴系编织结构
Fig. 11 Triaxial braided structures

3.5 编织绳结构

对编织绳的三维仿真流程如图12所示。根据编织绳的编织角、节距、交织方式、直径比等工艺参数信息,选择合适的工艺结构与纱线原料,利用C#

和 JavaScript 编程语言对产品进行工艺、原料参数读取,穿纱设置等,确定编织股线上各点的空间坐标,再运用 WebGL 技术对计算获得的坐标点进行管状几何体渲染,并利用 Three.Texture() 函数添加纱线纹理、颜色等细节,模拟编织绳三维结构,再添加交互事件以查看其三维仿真图。

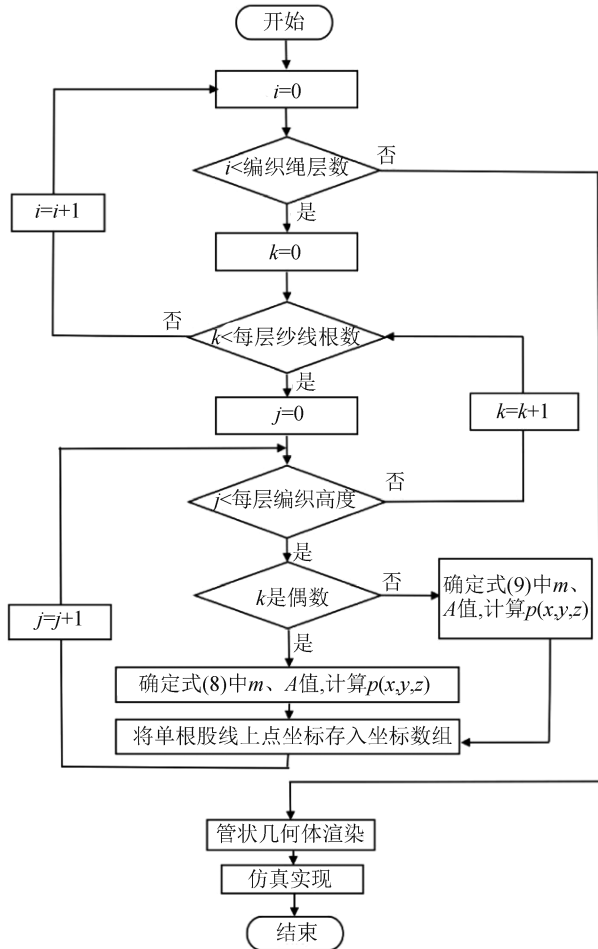


图 12 编织绳三维仿真流程图
Fig. 12 3D simulation flow chart of braided ropes

对超高相对分子质量聚乙烯 12 股编织绳和超高相对分子质量聚乙烯 3 层挂绳进行三维仿真并与实物进行对比,结果如图 13 所示。由图 13 可以看出,编织结构中股线相互穿插交织,具有清晰的编织效应且仿真效果良好,仿真图基本满足设计需求,具有一定的精确度和可视化效果,且仿真图可通过缩放、旋转等操作,方便对编织结构的仔细观察,以便于设计人员进行必要的调整。此外,借助 CAD 技术,结合编程语言设定编织纱线的面数、半径、截面段数等,还可模拟不同粗细和顺滑程度的仿真纱线,

实现具有多色花纹的编织绳索的三维仿真。



图 13 编织绳仿真效果图
Fig. 13 Simulation effect of braided ropes

采用 WebGL 图形编程接口实现编织物的最终渲染,结合纹理映射创建管状几何体,能够为编织股线真实感模拟节省大量的运行时间,实现编织结构美观性的快速预判。该方法在有效模拟圆形截面编织物的同时,还提高了三维仿真效率。

4 结论

本文分析了二维圆形编织物和三维二步法圆形编织物的编织工艺和编织运动规律。引入了广义玫瑰线,分析和确定了广义玫瑰线与二维圆形编织结构、三维二步法圆形编织结构的参数相关性,并建立了圆形截面编织物的股线数学模型,模拟二步法编织股线空间结构,结合数学建模、WebGL 技术,借助 JavaScript 和 C# 语言进行计算机编程,实现了三维二步法圆形编织物、二维圆形编织物、多股并排编织物、三轴系编织物的三维仿真。

通过对圆形截面编织物的建模和仿真,可清晰地观察编织结构中股线相互穿插的交织规律和外观特征。此外,还可基于对圆形截面编织物的建模和仿真,提前预判编织物上机可织性和色彩效应,从而

减少繁复的花纹编织设计、织物结构设计,以及小样生产工序与原料浪费问题。研究可为产业用编织绳索的设计创新及力学性能预测奠定基础 and 提供技术支持。



期刊采编平台



中国知网下载

参考文献

[1] 檀江涛. 圆形截面碳纤维编织复合材料管件力学性能研究[D]. 石家庄:河北科技大学, 2017.

[2] 谷元慧, 张典堂, 贾明皓, 等. 碳纤维增强编织复合材料圆管制备及其压缩性能[J]. 纺织学报, 2019, 40(7):71-77.

[3] 章宇界, 阎建华. 基于 Matlab 的三维四步编织仿真[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2016, 42(3): 363-369.

[4] 张小萍, 王君泽. 基于 Web 的三维编织物仿真系统研制[J]. 纺织学报, 2010, 31(2): 129-132.

[5] 肖来元, 汪博峰. 三维编织复合材料几何成型算法及仿真研究[J]. 计算机工程与科学, 2008(1): 82-85.

[6] LIAO T Y, ADANUR S. 3D structural simulation of tubular braided fabrics for net-shape composites [J]. Textile Research Journal, 2000, 70(4): 297-303.

[7] 邵国为, 孙志宏, 王振喜, 等. 三维突变截面预制件的编织工艺[J]. 东华大学学报(自然科学版),

2022, 48(1): 47-52.

[8] 陈波, 张昇雨, 杨兴林, 等. 基于细观结构的径向轴纱三维五向圆形编织复合材料的刚度预测[J]. 现代纺织技术, 2024, 32(2): 83-95.

[9] JIANG N, CHEN Y, HU H. Theoretical modeling on the deformation behavior of auxetic tubular braid made from modified circular braiding technique [J]. Physica Status Solidi B: Basic Solid State Physics, 2020, 257(10): 1321-1333.

[10] GUYADER G, GABOR A, HAMELIN P. Analysis of 2D and 3D circular braiding processes: modeling the interaction between the process parameters and the preform architecture [J]. Mechanism and Machine Theory, 2013, 690(8): 90-104.

[11] 裴会成. 双二步法三维管状编织机设计及关键技术研究[D]. 上海:东华大学, 2014.

[12] 柴雅凌. 矩形和圆形三维编织预制件中纱线的拓扑学结构[J]. 纤维复合材料, 1996(1): 23-30.

[13] 宁方刚, 于伟东. 三维二步法圆形织编结构的建模表达与结构仿真[J]. 玻璃钢/复合材料, 2016(1): 40-44.

[14] BILISIK K. Three-dimensional braiding for composites: a review[J]. Textile Research Journal, 2013, 83(13): 1414-1436.

[15] 耿星宇, 林永兴, 冉宇瑶. 基于广义玫瑰线的纺织品图案的自动生成[J]. 消费导刊, 2017(4): 6-7.

[16] 金义明, 张三元. 广义玫瑰线及其应用[J]. 计算机应用研究, 2004(3): 170-171.

[17] 潘陆益. 玫瑰线及其应用研究[J]. 计算机应用与软件, 2008, 25(10): 236-238.

(上接第 35 页)

[14] 张鑫, 刘晶元, 张健, 等. PET 产品羧基含量高产生原因及处理措施[J]. 聚酯工业, 2021, 34(4): 21-23.

[15] 李志武, 高娟, 刘希华, 等. PET 切片、增黏 PET 切片以及熔融纺丝的结晶行为研究[J]. 产业用纺织品, 2018, 36(10): 23-25.

[16] 瞿兴晨, 吴海波, 李昌稳, 等. 改性 PET 熔喷材料的制

备及其性能[J]. 产业用纺织品, 2022, 40(10): 18-22.

[17] 郝克倩, 王学利, 关留祥, 等. 再生聚酯长丝制备技术研究[J]. 山东纺织科技, 2022, 63(3): 12-16.

[18] 刘志阳. 废旧聚酯纺织品的再生 DMT 制备阻燃聚酯纤维的研究[D]. 杭州:浙江理工大学, 2023.