

DOI:10.13475/j.fzxb.20200809508

六角形编织物的微观结构模拟

杨鑫^{1,2}, 邵慧奇^{1,3}, 蒋金华^{1,2}, 陈南梁^{1,2}

(1. 东华大学 产业用纺织品教育部工程研究中心, 上海 201620; 2. 东华大学 纺织学院, 上海 210620; 3. 东华大学 纺织科创中心, 上海 210620)

摘要 为研究第 2 代六角形编织物的复杂结构并预测其性能, 利用 MatLab 软件设计出一套可直接模拟六角形编织物微观结构的算法, 得到了可很好地反映编织结构的模型。根据第 2 代六角形编织角轮和转换装置的运动规律, 推演携纱器的运行路径, 编写出模拟携纱器行走路线的代码程序。通过编织轴向的路程计算, 获得纱线运动的空间路径, 并利用 B 样条法对空间路径进行优化, 最后运用 Solidtube 函数进行实体化模拟, 实现了微观结构的可视化。本文算法基于最基本的角轮与转换装置的关系编写, 对于六角形编织物结构模拟具有普适性; 同时进行了不同六角形预制件的编织实验发现, 实验成品与模拟编织结构吻合度高, 验证了算法的准确性。

关键词 六角形编织; 角轮; 微观结构模型; 编织算法; 复合材料预型件

中图分类号: TB 332 文献标志码: A

Meso-structure simulation of hexagonal braiding preforms

YANG Xin^{1,2}, SHAO Huiqi^{1,3}, JIANG Jinhua^{1,2}, CHEN Nanliang^{1,2}

(1. *Engineering Research Center of Technical Textile, Ministry of Education, Donghua University, Shanghai 201620, China*; 2. *College of Textiles, Donghua University, Shanghai 210620, China*; 3. *Innovation Center for Textile Science and Technology, Donghua University, Shanghai 201620, China*)

Abstract In order to study the complex structure of second generation of hexagonal braiding fabrics and predict its performance, an algorithm for simulating meso-structure was created for simulation using MatLab, which led to the establishment of models reflecting clearly the meso-structure. On the basis of the motion pattern of the second generation machine's horn gear, motion path of carriers was deduced which was used for coding. The trajectory of the yarn carrier were optimized through the use of B-spline, and Solidtube functions were used to carry out the simulation, leading to the visualization of the micro-structure. The algorithm in this text was designed on the basis of the most fundamental relation between horn gears and switch, thus it is universal to simulate hexagonal braiding structure, and the structure created by the algorithm to simulate also provided a better tool for unit cell division in finite element method. The braiding experiments of different hexagonal preforms were carried out. The results show that appearance of the simulated braiding structure resembles the experimental products, which verifies the accuracy of the algorithm.

Keywords hexagonal braiding; horn gear; meso-structure model; braiding algorithm; composite preform

三维编织复合材料具有不分层、质轻、比强度高、比模量高、抗冲击、耐烧蚀、强度高等优点^[1], 可通过单胞划分对其进行力学性能有限元模拟^[2], 但

其编织形状单一, 根据产品性能进行编织的能力还有待提高^[3]。对此, schreiber 等^[4]提出了一种全新的三维编织方式——六角形编织。

收稿日期: 2020-08-26 修回日期: 2021-01-15

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2016YFB0303300); 国家自然科学基金项目 (11472077); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (2232020A-05, 2232020G-06)

第一作者: 杨鑫 (1995—), 男, 硕士生。主要研究方向为三维编织复合材料。

通信作者: 蒋金华 (1978—), 男, 教授, 博士。主要研究方向为产业用纺织品、特种编织织造技术与复合材料的开发。E-mail: jiangjinhua@dhu.edu.cn。

六角形编织是一种新型的旋转编织技术,可应用于精细化产品编织,特别适合编织各种复杂形状,可设计性很高。新近开发的第 2 代六角形编织设备,其编织物的结构更加稳定,在航天与军工领域有巨大发展前景^[5]。编织材料的微观结构模拟是预测其性能的重要手段,传统三维编织微观结构的相关研究文献很多,但对于六角形编织的研究却相对较少。在六角形编织结构模型仿真方面,国内学者进行了一些尝试工作。其中:高彦涛等^[5]提出基于 Labview 提供的矩阵数据模拟第 1 代编织模型;李政宁^[6]基于 MatLab 强大的矩阵计算功能对第 1 代六角形编织机器的纱线路径直接进行计算模拟;Mei 等^[7]研究了第 2 代六角形编织机的编织规律,得到不同编织结构的仿真模拟,为探索潜在织物结构的开发提供了可行性。

目前,仍没有统一的方法有效地模拟第 2 代编织物微观结构。传统对于六角形编织结构的有效模拟,是将底盘上所有携纱器按比例坐标放入矩阵对应位置,运用矩阵计算来模拟底盘上角轮的转动,获得每时刻底盘上所有携纱器的位置坐标。这样虽然可记录下每时刻携纱器到达的位置终点,但不能表达每时刻中携纱器的运动过程,在模拟第 2 代编织路径时会造成最外层携纱器处纱线侵入,而对底盘整体化的运算也使得对单一纱线部分点的优化难度增大。本文针对六角形编织机的运动规律,基于 MatLab 软件开发了一套编织算法,对每根纱线路径单独模拟,成功获得第 2 代六角形编织纱线空间路径,模拟出编织物的微观结构。

1 六角形编织工艺介绍

六角形编织是一种依靠底盘上六角形角轮转动,带动携纱器运动来实现纱线交织的编织方式。这种特殊的底盘构造和走纱路径,可编织出各种形状编织件。图 1 示出六角形编织机实物图。六角形的角轮设计是最紧密化的携纱器排列(六角形编织机角轮设计图见图 2),大大减少了编织区域,由此有效降低纱线间的张力不匀,得以实现对较细(强力低)纱线的编织,获得各种精细化产品^[8-9]。为解决第 1 代六角形编织机存在携纱量不足,相邻角轮不能同时运动,编织结构不紧密等问题,Frank 教授开发出了第 2 代编织机。

相比于第 1 代六角形编织系统,第 2 代在第 1 代的 2 个角轮之间装上 1 枚转换装置。在第 2 代设备中,转换装置的引入将原来 2 个角轮之间放置 1 个携纱器变成 2 个,让相同编织区域内纱线含量

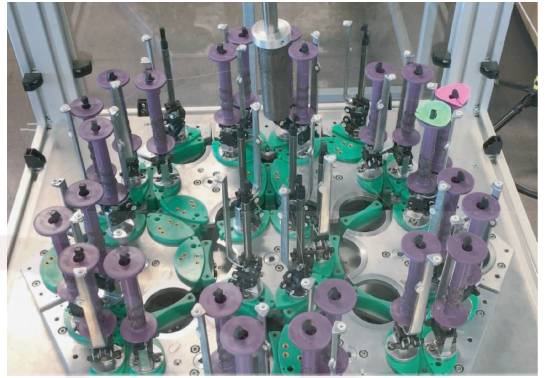


图 1 第 2 代六角形编织机

Fig. 1 Second generation hexagonal braiding machine

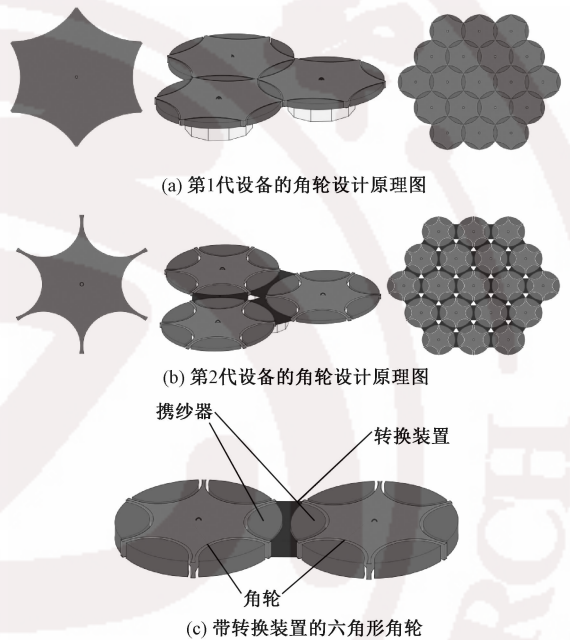


图 2 第 1 代角轮与第 2 代角轮对比图

Fig. 2 Comparison between first and second generation horn gears. (a) First generation horn gears's schematic design; (b) Second generation horn gears's schematic design; (c) Horn gears with swithes device

大幅提升,接近原来的 2 倍。增加转换装置让相邻的 2 个角轮可同时运动,丰富了编织物结构的种类,也让角轮运动状态具有更多的可选择性。

图 3 示出第 2 代角轮上携纱器的运动原理图。在角轮底座上任意选取 3 个角轮 1、2、3,每次分别以顺时针 60°、顺时针 60°、逆时针 60°转动;转换装置每次转动 180°,且角轮与转换装置交替运动。可以观察携纱器从 A 处到达 A₅ 处在各角轮之间的转移路径:首先角轮 1 顺时针转动 60°,携纱器纱线从 A 移动到 A₁;此时,转换装置转动 180°,纱线到达 A₂;角轮 2 顺时针转动 60°,纱线到达 A₃;转换装置转动 180°,纱线到达 A₄;此时角轮 3 逆时针转动 60°,纱线到达 A₅。正是通过这种角轮和转换装置的交互运动,携纱器携带纱线转移,达到纱线交织目的。

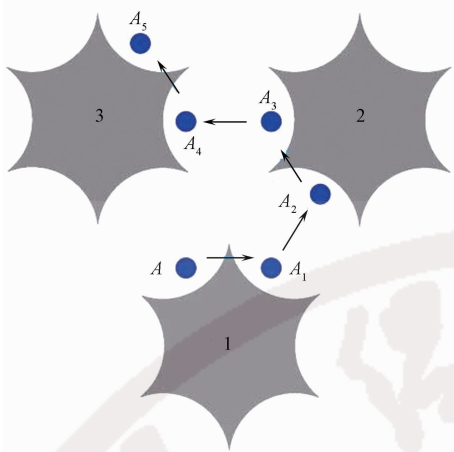


图 3 第 2 代角轮上携纱器的运动原理
Fig. 3 Principle of carriers' motion of second generation horn gears

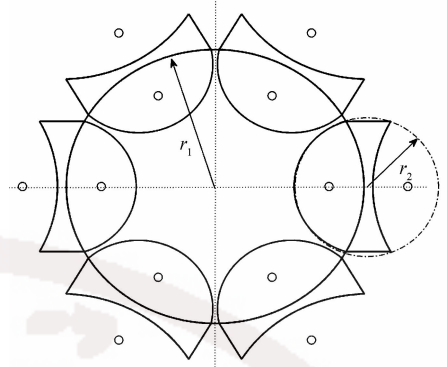


图 4 角轮与转换器示意图
Fig. 4 Diagram of horn gear and switches

2 模型建立

2.1 携纱器运动路径

首先将整个底盘坐标化,来获取各部件的位置信息,利用角轮的中心坐标表示角轮位置,利用转换装置的中心坐标表示转换装置的位置,利用携纱器的中心坐标表示携纱器位置,并将携纱器的中心坐标存在坐标集 X 中。由于纱锭固定在携纱器上,在编织过程中,纱线的运动路径可使用携纱器的位置代替。当角轮或转换装置完成 1 次运动后,每个携纱器都有 1 个固定的位置,只要计算出携纱器在整个编织过程中的所有位置坐标,就能获得对应在该携纱器上的纱线运动路径,再计算出所有携纱器的位置,便可获得编织件中所有纱线的运动路径坐标。

图 4 示出角轮与转换器示意图。可知,角轮和转换装置虽然是 2 种不同的设备,但二者在运动时皆围绕各自中心转动,因此,携纱器被角轮驱动,表现为绕角轮中心做半径为 r_1 的圆周运动,携纱器被转换装置驱动,表现为绕携纱器中心做半径为 r_2 的圆周运动。

角轮与转换装置驱动携纱器皆做圆周运动,为统一变量。将转换装置当作一个具有 2 个开口的角轮称为二角轮,而原来的为有 6 个开口的角轮称为六角轮。再建立 1 个矩阵存储 2 种角轮的坐标,每行存储 1 个角轮信息,依次存入角轮坐标、圆周运动的半径(用来判定是六切口角轮还是二切口角轮)以及运动信息。使用数字串表示运动信息,由于二角轮的转动角度为 180° 及其倍数,而六角轮为 60° 及其倍数,为统一运动信息的输入,使用正整数 n 表示顺时针转动 n 乘以最小转动角度(六角轮为 $n \times 60^\circ$,二角轮为 $n \times 180^\circ$),则“ $-n$ ”表示逆时针转动相

应角度,“0”表示静止。例如六角轮的运动信息数字串为“1,-1,0,2”,表示该六角轮在连续 4 步运动中为依次顺时针 60° 、逆时针 60° 、静止、顺时针 120° 转动,之后的运动再按此运动信息每 4 步为 1 个循环。

底盘上的任意携纱器与角轮(包含转换装置)的接触情况只有 2 种可能:携纱器在最外层,其只有 1 个面接触角轮,此时只有 1 个角轮能够驱动携纱器;携纱器在内层,其有 2 个面与角轮接触,则必须判断哪个角轮对携纱器进行驱动。假设每个时间间隔 t 内角轮完成 1 次运动,若想获取时间 t 为 $[0, Nt]$ (N 个时间间隔,为正整数)内的携纱器路径,可执行以下操作:首先,在携纱器坐标集 X 中选取第 1 个元素(存入的第 1 个携纱器的中心坐标),描述该元素代表的携纱器的运动轨迹。对于任意给定的底盘,携纱器的初始坐标与所有角轮的中心坐标的位置是相对固定的,所以由第 1 个元素的坐标可计算出与携纱器接触的角轮的位置坐标。根据角轮的位置坐标,可获取角轮的运动信息,再根据运动信息计算出转动后携纱器的位置坐标并将其存储,此时判定驱动角轮是否变化,若变化,使用变化后角轮驱动,否则按原角轮驱动。重复这样的计算直到时间到达 Nt ,此时存储的坐标会形成 1 个坐标集,则依次连接坐标集中的坐标构成第 1 个携纱器的运动路径图。然后,将携纱器坐标集 X 中的第 1 个坐标去除,从剩下的坐标中挑选出第 1 个坐标再重复上述操作,获取第 2 个携纱器的运动路径图,如此重复直到携纱器坐标集变为空集,则获取所有携纱器的运动路径图。携纱器的路径计算流程框图如图 5 所示。基于 MatLab 工具和方法^[10],根据以上算法编写代码^[11],获取携纱器路径坐标集合。

2.2 纱线路径的获取

第 2 代编织机相比于第 1 代的优势为相邻的 2 个角轮可同时转动,明显提高了编织效率,但转换

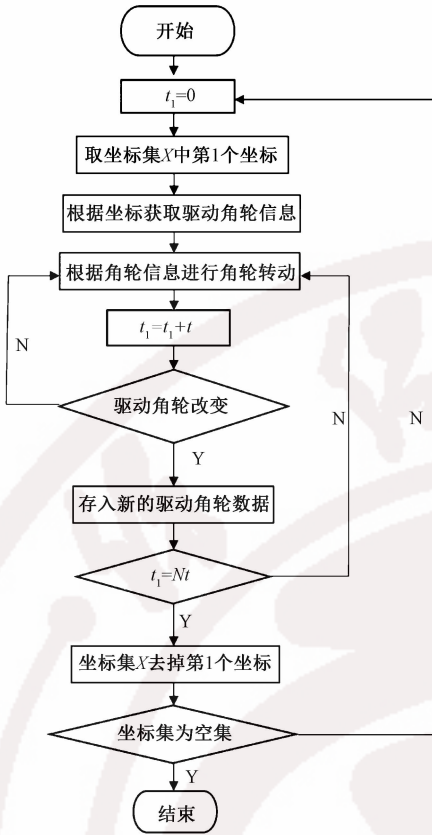


图 5 携纱器运动轨迹流程图

Fig. 5 Flow chart of motion trail of carrier

装置与角轮不能同时转动,角轮转动过程中必须要停下等待转换装置的转动。所以本文假设转换装置与角轮设置在 1 个运动周期内,即角轮运动后转换装置运动 1 次为 1 个时间段。由于转换装置是往复运动,如果直接以携纱器每次运动终点作为纱线路径的坐标,携纱器从 a 运动到 b , b 运动到 c ,若采用终点坐标 c 再运动到 b ,二者运动曲线在平面上重合(见图 6(a)),空间上会造成在转换装置处纱线的侵入,这也是矩阵计算很难处理的一个问题,因为矩阵只能给出每个锭子的终点坐标,无法描述运动过程状态。所以必须考虑转换装置处携纱器运动过程,在计算时添加相应过程坐标 b_1 和 c_1 (见图 6(b))。

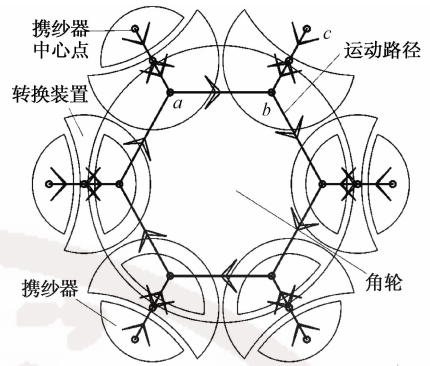
纱线缠绕在纱锭上,而纱锭由携纱器驱动,因此,构建纱线空间路径时,仅需构建出携纱器每运动一步时,编织件的卷取总路程。假设编织机的卷曲速度为 $v(t)$,当 $t=T$ 时,携纱器的坐标为 $(x(T), y(T))$,则可计算

$$z(T) = \int_0^T v(t) dt \quad (1)$$

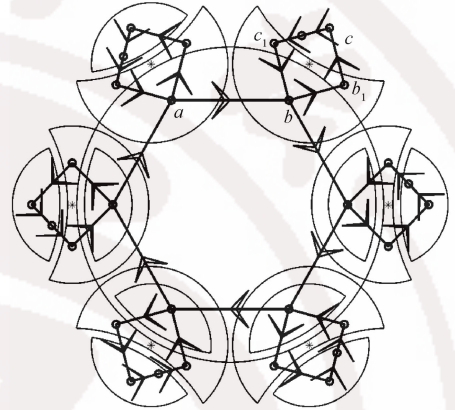
因此,可获取纱线的实时坐标 $(x(T), y(T), z(T))$,绘出纱线的空间路径图(如图 6(a)所示)。

2.3 纱线路径拟合

绘出纱线的空间路径是棱角分明的折线(见



(a) 单角轮携纱器的运动轨迹



(b) 考虑转换装置运动过程后运动轨迹

图 6 携纱器运动轨迹

Fig. 6 Motion trail of carriers. (a) Motion trail of carriers on single horn gear; (b) Motion trail of carriers after considering process of switches' motion

图 7(a)),无法描述纱线交织时紧凑、平滑的真实状态,所以必须对纱线的路径进行优化。运用 B 样条法可获取优化后的纱线空间路径曲线。B 样条的定义^[12]为

$$P(t) = \sum_{i=0}^n P_i N_{i,k}(t) \quad (2)$$

式中: P_i 为控制多边形的顶点; $N_{i,k}$ 为 k 阶($k-1$ 次) B 样条基函数。设 t_i 为节点,满足 $0 \leq t_0 \leq \dots \leq t_{n+k-1} \leq 1$,则基函数可用式(3)、(4)表示:

$$N_{i,1}(t) = \begin{cases} 1, & t_i \leq x \leq t_{i+1} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

$$N_{i,k}(t) = \frac{t - t_i}{t_{i+k-1} - t_i} N_{i,k-1}(t) + \frac{t_{i+k} - t}{t_{i+k} - t_{i+1}} N_{i+1,k-1}(t) \quad (4)$$

由式(4)可知,要确定第 i 个基函数 $N_{i,k}$,需要额外定义 $k+1$ 个节点,而 $n+1$ 个控制点需要定义 $n+1$ 个 k 阶 B 样条基函数 $N_{i,k}$ 。根据以上定义,可推出 4 个控制点 P_0, P_1, P_2, P_3 ,就可以递推出三次 B 样条的基函数(如式(5)所示),则三次 B 样条的表达式如(6)所示。

$$N_{i,4}(t) = \frac{1}{6} [t^3, t^2, t] \begin{bmatrix} -1 & 3 & 3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 0 & 3 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$Q(t) = \frac{1}{6} [t^3, t^2, t] \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 0 & 3 & 0 \\ 1 & 4 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

设纱线坐标个数为 numyarn, 编写拟合程序^[13], 依次选择第 1 个坐标到第 (numyarn-3) 个坐标中的 1 个坐标 i , 将其与其后面的 3 个坐标 $i+1, i+2, i+3$ 分别赋值给 P_0, P_1, P_2, P_3 , 设置 t 的分度为 0.1 后, 即可计算出拟合函数。得到插值后的纱线路径, 较插值前变得更加平滑, 如图 7(b) 所示。

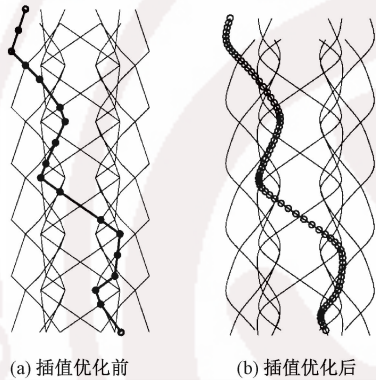


图 7 插值优化前后纱线空间路径
Fig. 7 Spatial path of yarns before (a) and after (b) interpolation

3 结果与讨论

3.1 实体模型构建

经过插值之后可得到平滑曲线, 但这些曲线无法表现出纱线的真实形态。所以本文使用 Solidtube

函数^[6]将其实体化, 实体化之前必须做如下假设^[13]: 所有纱线横截面为理想圆形, 且沿纱线轴向是均匀的; 纱线的直径是相同的; 编织过程中挤压不改变纱线形状。

由此作出编织纱线实体效果图如图 8(a) 所示。可以看出纱线平滑且有序交缠。但纱线路径部分出现了偏折, 且在实际的编织中因为张力作用会将这些偏折拉直。所以需要模拟张力作用的优化, 采用改变内外层携纱器位置的方式, 来达到纱线之间的紧凑贴合, 此方法的优化效果较好^[12], 如图 8(b) 所示。

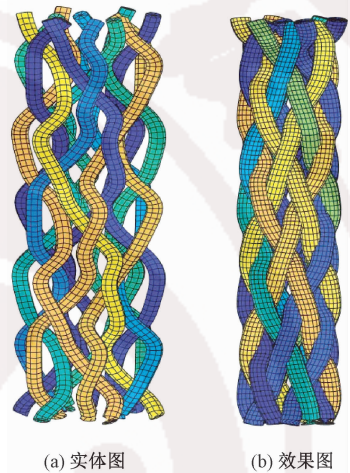


图 8 编织纱线实体图和效果图
Fig. 8 Solid drawing (a) and design sketch (b) of braiding fabric

3.2 算法检验与编织方案测试

为检验本文算法对于大型预制件的可行性, 设计了 1 个工字梁结构。在一个 10 层角轮的底盘上使用了 97 个角轮, 720 个携纱器携带 720 根纱线, 模拟工字梁结构。携纱器摆放位置如图 9(a) 中深色圆圈所示。其中角轮设定为顺时针 60° , 逆时针 60° 交替转动, 而转换装置设定为逆时针 180° 和顺时针 180° 交替转动。

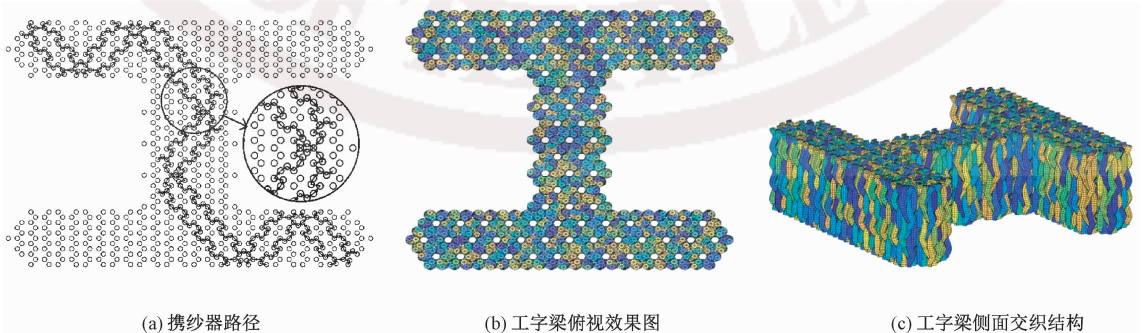


图 9 工字梁编织路径与结构效果图

Fig. 9 Braiding trail and structure of I beam. (a) Motion trail of carriers; (b) Top view of I beam; (c) Braiding structure of I beam side

图 9(a)中显示了 1 枚携纱器的运动路径,贯穿整个预制件。利用本文算法可得到工字梁效果图如图 9(b)、(c)所示。从模拟图中可以很清楚地看出,六角形编织实体模型的结构纱线接触紧凑、平滑。

3.3 仿真与实验验证比较

为检验模拟结构的准确性,分别进行最外层无转换装置和有转换装置的 2 组编织实验。首先使用 1 层角轮与 6 个转换装置的底盘,携纱器的运动信息统一设定为“0, -1, 0, 1”,通过改变角轮的运动信息获得不同的编织结构如图 10 所示。根据角轮与携纱器的运动信息,模拟出相应的编织结构图,通过结构对比可知,模拟结构中的纱线路径与真实结构吻合度高。

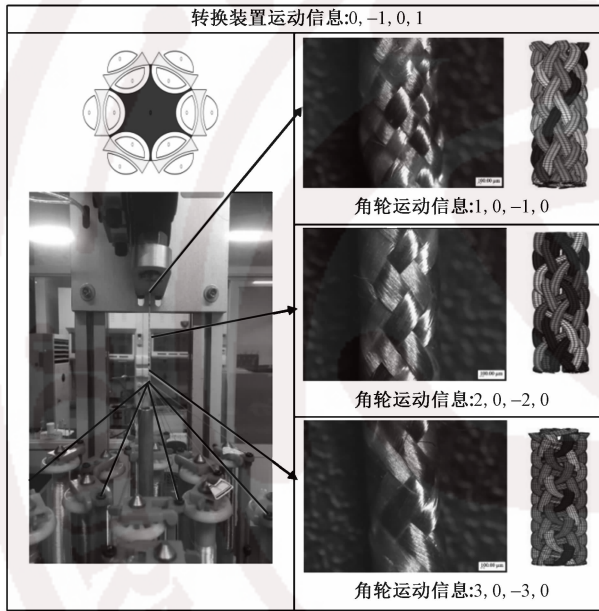


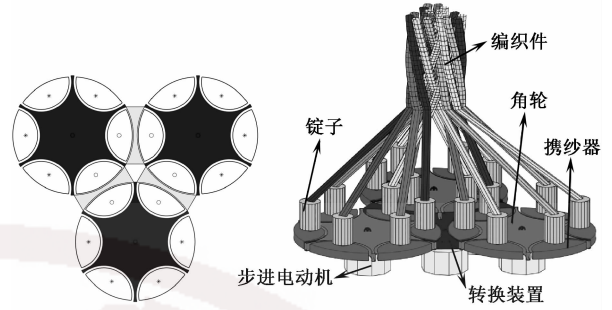
图 10 外层有转换装置的编织机的真实编织结构与模拟结构对比

Fig. 10 Comparison between real and simulative braiding structure braided on braider with outer switches

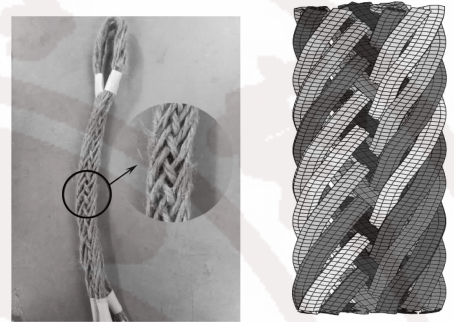
图 11(a)示出含有 3 个角轮和 3 个转换装置组合形成的编织机底盘。在该底盘上进行编织实验,设定角轮的运动信息为“1, 0”,转换装置为“0, -1”,且最外层转换装置静止,编织获得编织物如图 11(b)所示。可知,编织的绳织物纱线交织规律为一上一下,真实结构与模拟的结构很吻合。通过实验基本验证了本文提供的算法可很好地模拟真实编织结构的纱线路径与纱线之间的拓扑形态,但真实纱线编织由于挤压会产生变形,本文算法尚未能模拟出编织时挤压变形后的纱线形貌。

3.4 两代编织机编织结构比较

现存最大的第 2 代六角形编织机是 Ko 团队开



(a) 外层不带转换装置角轮组



(b) 真实编织结构

(c) 模拟编织结构

图 11 外层无转换装置编织机的真实编织结构与模拟结构对比

Fig. 11 Comparison between real and simulative braiding structure braided on braider without outer switches.

(a) Horn gear group without outer switches; (b) Real braiding structure; (c) Simulative braiding structure

发的 2 层样机,如图 12(a)所示。其装配有 7 个角轮、36 个转换装置与 72 个携纱器,而同等规模的第 1 代 2 层样机装配的 7 个角轮却只能驱动 30 个携纱器。相比之下,第 2 代编织机的携纱器数量提高了 140%。

编织过程中,携纱器只有从 1 个角轮运动至另 1 个角轮或者转换装置上,且此相邻的角轮或转换装置转动方向相反才能发生纱线交织,因此,在第 1 代 2 层样机上满足交织条件的位置只有 6 个,而第 2 代 2 层样机却存在 42 个这样的位置,因此,具有更加丰富的交织可能性,对于复杂编织件设计具备更大的潜力,两代编织机编织效果如图 12(b)、(c)所示。

假设选取的纱线直径 r 相同,且编织过程中纱线不会被挤压变形,可以分别获取 2 种编织件编织截面切片的理论模型(圆形表示纱线截面,空白表示编织件的内部空隙),如图 13 所示。可知,2 种模型的内部可被等分成一个个单元,第 1 代编织物结构单元是三角形,中间包含纱线截面 $1/2$ 圆,第 2 代结构是四边形,中间包含纱线截面 $1/3$ 圆,因此,编织件内部的纤维体积率 V_f 为单元包含的纱线截面与单元面积之比。

通过计算可知,第 2 代编织机编织的纤维体积

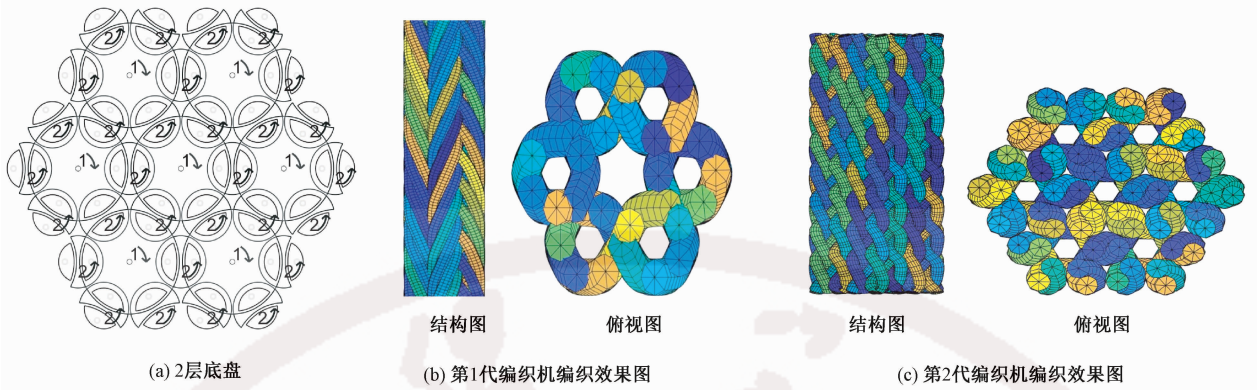


图 12 两代编织机编织结构比较

Fig. 12 Comparison of braiding structures between first and second generation braiding machines.

(a) Two-layer plate; (b) Braiding structures of first generation machine; (c) Braiding structures of second generation machine

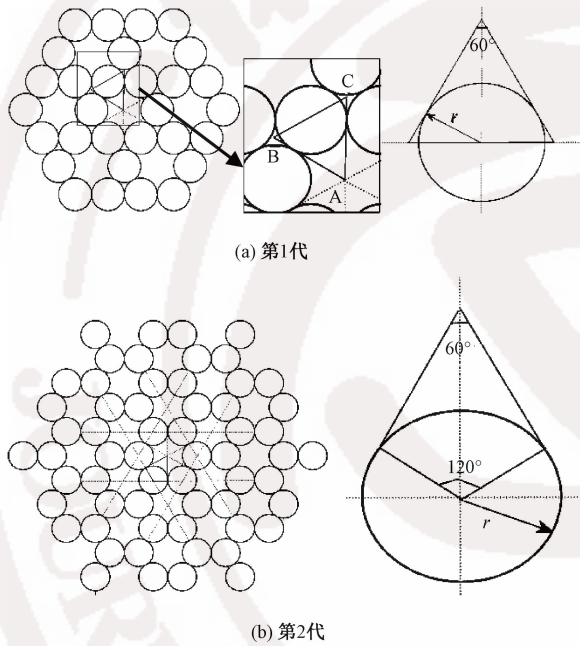


图 13 第 1 代和第 2 代编织结构截面模型

Fig. 13 Cross section model of first (a) and second (b) generation braided structure

率要略低于第 1 代结构,此外,第 2 代编织机的造价与控制难度也要大于第 1 代,但整体比较第 2 代编织机在携纱量与交织性(结构设计能力)上仍拥有巨大优势。

4 结 论

本文构建了六角形编织路径的解析与纱线空间路径模型,得出了纱线的空间运动规律,提供的代码具有普适性,满足了编织设备编织结构的快速模拟和仿真,为编织物的设计和生产提供了一种新方法。得到如下主要结论。

1) 通过研究第 2 代六角形编织机编织工艺,分析了角轮和转换装置的运动规律,基于携纱器停驻

时的点来描述纱线路径,得到了纱线的空间运动规律模型。根据运动规律编写了模拟纱线路径的代码程序,该代码程序可通过角轮与转换装置的参数输入生成相应编织件的模拟图。

2) 对大预制件工字梁的结构进行模拟,获得的效果图中纱线路径清晰交缠紧密,验证了算法的普适性;并进行了设置转换装置的编织实验,实验成品与模拟编织结构相似度高,验证了算法的准确性。

3) 比较分析了 2 代六角形编织结构以及设备的优劣发现,第 2 代编织机虽然存在控制难、造价贵的问题,但编织出的织物更具有实用性,结构变化性更强,是今后研究的主要方向。

FZXB

参考文献:

[1] 何红闯,杨连贺,陈利. 矩形组合截面四步法二次三维编织及其空间模型可视化 [J]. 复合材料学报, 2010,27(4): 160-167.
 HE Hongchuang, YANG Lianhe, CHEN Li. 3D braiding technique complex rectangular cross-section using twice four-step and visualization of 3D braiding model [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2010,27(4): 160-167.

[2] DU G W, KO F K. Unit cell geometry of 3D-braided structures [J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 1993, 12: 752-768.

[3] BOGDANOVICH A, MUNGALOV D. Recent advancements in manufacturing 3-D braided preforms and composites [C]// BANDYOPADHYAY S. Proceedings of ACUN-4 Conference Composite Systems-Macrocomposites, Microcomposites, Nanocomposites. Sydney: University of New South Wales (UNSW), 2002:61-72.

[4] SCHREIBER F, KO F K, YANG H J, et al. Novel three dimensional braiding approach-hexagonal braiding concept [C]//Proceedings of the 17th International Conference on Composite Materials. London: Iom Communications, 2009:27-31.

- [5] 高彦涛, FRANK K, 胡红. 三维六角形编织结构的计算机模拟 [J]. 东华大学学报(自然科学版), 2013, 39(6): 785-789.
GAO Yantao, FRANK K, HU Hong. Computer smulation of 3D hexagonal braided structures [J]. Journal of Donghua University (Natural Science), 2013, 39(6): 785-789.
- [6] 李政宁. 六角形编织立体织物成形原理及其复合材料性能研究 [D]. 上海: 东华大学, 2019: 11-31.
LI Zhengning. Study on forming priciples 3D hexagonal braided fabric and its composite properties [D]. Shanghai: Donghua University, 2019: 11-31.
- [7] MEI Haiyang, HAN Zhenyu, LIANG Shuangqiang, et al. Process modelling of 3D hexagonal braids [J]. Composite Structures, 2020, 6: 1-19.
- [8] 高彦涛, KO F, YANG Heejae, 等. 一种新型六角形编织机器的构建与应用 [J]. 纺织导报, 2013(4): 84-88.
GAO Yantao, KO F, YANG Heejae, et al. The construction of computer-controlled hexagonal braiding machine based on labview software [J]. China Textile Leader, 2013(4): 84-88.
- [9] KYOSEV Y. Advances in braiding technology [M]. Cambridge: Woodhead Publishing, 2016: 79-88.
- [10] 胡晓冬, 董辰辉. MatLab 从入门到精通 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2018: 173-294.
HU Xiaodong, DONG Chenhui. Learning MatLab well [M]. Beijing: Posts & Telecommunications Press, 2018: 173-294.
- [11] KYOSEV Y. Braiding technology for textiles [M]. Cambridge: Woodhead Publishing, 2015: 358-375.
- [12] 吕海辰, 李政宁, 陈革, 等. 六角形三维编织物结构的 MatLab 仿真及优化 [J]. 东华大学学报(自然科学版), 2020, 46(1): 23-28.
LV Haichen, LI Zhengning, CHEN Ge, et al. Model simulation and optimization of hexagonal three-dimensional braiding fabric based on MatLab [J]. Journal of Donghua University (Natural Science), 2020, 46(1): 23-28.
- [13] 寇晓菲. 三维编织复合材料编织工艺过程仿真研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2012: 28-43.
KOU Xiaofei. Study on simulation of 3-D braided compsites weaving process [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012: 28-43.