

平纹织物结构的三维仿真

张卓¹, 严玉蓉², 杨声强³, 任忠海^{1,*}

(1. 广州海关技术中心, 广东 广州, 510623;

2. 华南理工大学材料科学与工程学院, 广东 广州, 510641;

3. 美国 UL(深圳)安全试验所, 广东 深圳, 518047)

摘要:随着计算机图形学的发展, 织物结构的数字仿真是新出现的交叉学科及研究热点。在纺织服装检测领域, 研究织物结构仿真模型对预测纺织品的力学性能、表现物理性能(起毛起球、光泽等)都具有重要的现实意义和理论意义, 仿真模型逐渐成为理解复杂的织物检测试验现象的有力工具。在 Peirce 改进的椭圆纱线截面模型的基础上, 基于织物的实际空间形态, 采用微分几何分析织物的几何特征, 推导出了织物表面各点坐标计算公式; 编程采用 Matlab 软件, 建立平纹织物结构的宏观模型, 并对参数实现了程序控制; 对模型进行了颜色插值和光照等外观效果处理。

关键词:平纹织物; 结构; 三维; 仿真

中图分类号: TS105.1

文献标识码: A

文章编号: 1673-0356(2020)04-0021-04

0 前言

Matlab 是 Mathworks 公司于 20 世纪 80 年代推出的数值计算软件, 运用以矩阵运算为基础的程序语言, 它有非常强大的数值计算能力, 数域可扩展到复数^[1]。快速且精确地绘制各种复杂的三维、不规则公式曲线或曲面是 Matlab 的长项, 面向分析运算是其广泛应用于工程技术的主要原因。Matlab 把所有点的坐标数据储存在二维或三维矩阵中, 因此绘制图形时很容易就能控制图形的精度, 而且这些坐标数据经过处理后还可移植、扩充到其他绘图软件中。

在建立复杂不规则三维模型时, AutoCAD 绘制方法繁琐且误差很大^[2]; OpenGL 因为自身缺乏复杂三维形体函数而必须提取其他绘图软件建好的三维模型数据才能进行进一步图形处理^[3]; 3dMax 则是通过修改堆栈命令加工得到目标模型, 是一款偏向商业影视娱乐、多媒体制作的软件。因此, 选择了 Matlab 为织物结构的三维建模软件。

织物结构的仿真模型研究始于 20 世纪 20 年代, 逐步从二维平面建模过渡到三维空间建模及质感模拟, 目前国内外对织物结构仿真依据的理论主要分为 Pierce 模型法、分段函数法和样条曲线法^[4]。

马维^[5]使用 OpenGL 结合 VC++ 语言建立了平纹、斜纹等梭织物的三维模型, 纱线截面假定为椭圆; 谷大鹏等^[6]用 Matlab 建立了平纹织物的三维模型, 但纱线截面假设为圆形; 朱生群等^[4]使用 TexGen 建立了筒状纬编针织物的结构模型, 假设纱线截面为圆形, 使用 B 样条拟合理论建立模型。这些研究文献将织物中的纱线横截面假设为圆形显然有悖于真实的织物形态; 另外, 文献在建模时对纱线和织物的数学特征没有必要的假设条件, 而且仅对纱线进行曲线拟合, 缺乏对纱线曲面成型的理论推导。

1 平纹织物三维仿真模型的建立

图 1 是本文建立的平纹织物三维仿真模型, 图例显示从 2 个不同方向观察同一模型。

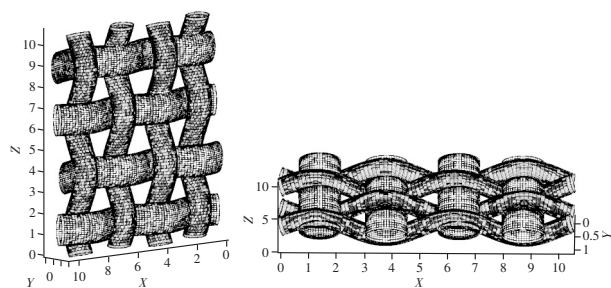


图 1 平纹织物结构三维仿真效果

1.1 建立坐标系

按右手法则建立各坐标系:

(1) 以纱线长度方向的中心轴线方向为 Z_l 轴, 横截面为 $X_lO_lY_l$ 面, 建立纱线局部坐标系(下标 l 表示

收稿日期: 2020-01-16

基金项目: 广州海关科研项目(2017GDK30)

作者简介: 张卓(1974-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事纺织品检测技术和功能性纺织材料性能研究和开发。

* 通信作者: 任忠海(1963-), 教授级高级工程师, E-mail: 1784033452@qq.com。

局部坐标系,下同);

(2) 以织物厚度方向为 Z 轴, 织物交织平面为 XOY 面, 建立全局坐标系。

1.2 模型建立

1.2.1 假设条件^[7-8]

在 Peirce 改进的梭织物模型中, 假定纱线的横截面均为椭圆形, 纱线既无伸长也无压缩变形, 经纬纱交织附近相互包覆屈曲的地方为圆弧状, 其余部分为直线段。

对于大多数织物, 纱线由于挤压产生形变或有部分重叠现象出现不易进行仿真, 但对于平纹类织物经大量切片实验研究得知, 纱线的形态走势类似于正弦曲线, 且不存在重叠现象, 故以纱线屈曲形态为空间正弦或余弦曲线为例进行织物结构三维仿真^[9]。

- (1) 纱线的横截面为椭圆形;
- (2) 纤维在纱线中排列紧密、均匀;
- (3) 纱线中所有弧线为三阶连续可微曲线, 参数增加的方向为曲线的正向;
- (4) 纱线中所有弧线为正则曲线;
- (5) 纱线之间彼此密实接触, 即纱线间无空隙;
- (6) 纱线表面光滑、平整, 均没有变形;
- (7) 忽略经纱与纬纱交织点处的作用力, 如摩擦、挤压或弯曲;
- (8) 单层织物中, 经纬纱所在的上下 2 个平面互相平行;
- (9) 单层织物中, 所有经纱或纬纱均分别排列在同一直线上。

1.2.2 纱线表面各点的坐标值计算

根据纱线几何体的形成原理, 纱线长度方向中心线上任意一点的法平面与纱线曲面的交线都是一个椭圆。假设该椭圆的长短轴分别为 a、b, 如图 2 所示, 纱线局部坐标系为 $X_i O_i Y_i$, 椭圆中心是 O_i 。

全局坐标系下的纱线空间模型如图 3 所示。观察方向与椭圆所在平面垂直, 即与法线 \vec{n} 的方向相反但平行。

图 3 中, Γ 是纱线长度方向的中心线, 为一 C^3 类空间曲线。 \vec{T} 、 \vec{N} 、 \vec{B} 分别是该曲线上任意一点的切向量、主法向量和副法向量。向量 \vec{n} 是椭圆 O_i 所在平面的法线, 且与 3 个坐标轴的欧拉角在 $[0, \pi]$ 内变化。

局部坐标系下 Γ 应满足下列方程:

$$\vec{P}(t)_i = \{x(t)_i, y(t)_i, z(t)_i\}, t \in [\delta 1, \delta 2] \quad (1)$$

其中 t 为曲线 Γ 的参数, δ 是取值区间。点 O_i 的单位主法向量 $\vec{\beta}(t)$ 为^[10]:

$$\vec{\beta}(t) = \frac{\ddot{\vec{P}}(t)_i}{|\ddot{\vec{P}}(t)_i|} \quad (2)$$

点 O_i 的单位副法向量 $\vec{\gamma}(t)$ 为:

$$\vec{\gamma}(t) = \frac{\dot{\vec{P}}(t)_i \times \ddot{\vec{P}}(t)_i}{|\dot{\vec{P}}(t)_i \times \ddot{\vec{P}}(t)_i|} \quad (3)$$

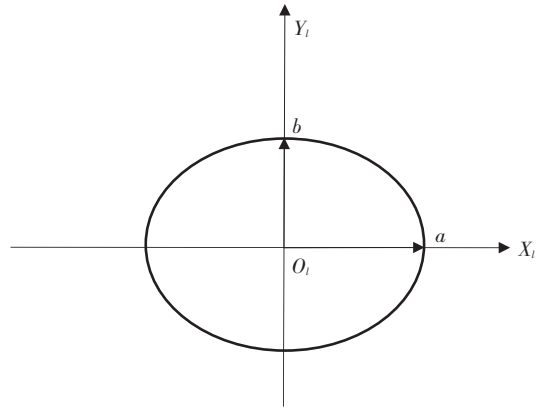


图 2 局部坐标系下的纱线横截面模型

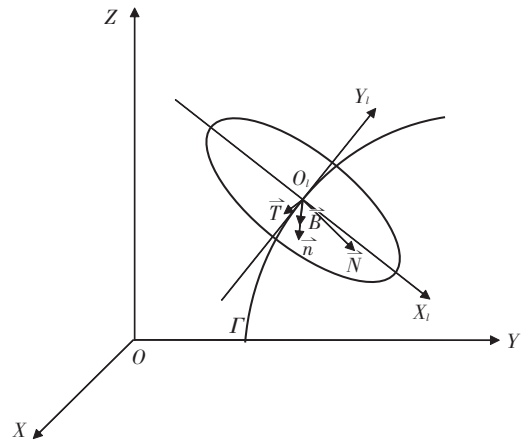


图 3 全局坐标系下的纱线空间模型

另一方面, 纱线可以看作由离散点构成的空间曲面, 则椭圆 O_i 上的点就是这些离散点的一个子集。令椭圆 O_i 在局部坐标系 $X_i O_i Y_i$ 的方程为:

$$\vec{r}(\varphi)_i = \{g(\varphi)_i, h(\varphi)_i, k(\varphi)_i\}, \varphi \in [0, 2\pi] \quad (4)$$

φ 是椭圆上任意一点逆时针方向与 X_i 轴的夹角。

局部坐标系下将曲线 Γ 和椭圆 $\vec{r}(\varphi)_i$ 进行运动 A 的变换就能得到全局坐标系下的曲线公式^[11]:

$$\vec{P}(t) = (\vec{P}(t)_i + \vec{r}(\varphi)_i) \cdot A + \epsilon \quad (5)$$

其中, A 是方向余弦矩阵, ϵ 是一空间向量, 且 $\epsilon \in R^3$ 。

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \quad (6)$$

由空间参数曲线的几何不变性原理, 经过坐标系的复合运动后, 曲线的各阶导矢是不变量。所以曲线 $\vec{P}(t)_i$ 与椭圆 $\vec{r}(\varphi)_i$ 经过位置变换后只存在坐标变化的差别。

假定椭圆 O_i 的法向量 \vec{n} 的方向向上为正, 结合式(6), \vec{n} 的方向余弦 ω, δ, ϵ 可按式计算:

$$\omega = \cos(\theta_x) = \cos(\arctan(a_{32}, a_{33})) \quad (7)$$

$$\delta = \cos(\theta_y) = \cos(\arctan(-a_{31}, \sqrt{a_{32}^2 + a_{33}^2})) \quad (8)$$

$$\epsilon = \cos(\theta_z) = \cos(\arctan(a_{21}, r_{11})) \quad (9)$$

其中, $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ 为法向量 \vec{n} 的欧拉角。

综合式(1) ~ 式(9), 得到全局坐标系 XYZ 下的纱线表面任意点的坐标值:

$$\begin{cases} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{cases} = \begin{pmatrix} \vec{\beta}(\varphi) \\ \vec{\gamma}(\varphi) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega \\ \delta \\ \epsilon \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^{-1} \quad (10)$$

$$(\vec{P}(t)_i + \vec{r}(\varphi)_i) \quad (10)$$

或简化后得到:

$$\begin{pmatrix} x_y \\ y_y \\ z_y \end{pmatrix} = T \cdot (\vec{P}(t)_i + \vec{r}(\varphi)_i) \quad (11)$$

T 是从局部坐标系到全局坐标系的变换矩阵, 矩阵元素下标 y 表示纱线。

至此, 已经建立了纱线的表面各点坐标方程。

1.3 平纹织物结构模型

平纹织物的宏观结构是多条具有正弦或余弦曲线特征的纱线互相交织而成。如果将纱线表面离散成 n 个空间内的点, 结合式(11), 则织物表面各点的坐标可表示成如下 $n \times (n + 1)$ 齐次矩阵:

$$[x_f \quad y_f \quad z_f \quad 1] = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & z_2 & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_n & y_n & z_n & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

式(12)就是织物表面的点的坐标值, 也即织物的

三维结构模型。矩阵元素下标 f 表示织物。

最后, 依据织物实际的规格, 输入纱线的直径、屈曲角度、纱线间隔距离、经纬密度等参数, 就能得到大小、形态可控的结构模型。

2 用 Matlab 实现平纹织物结构仿真

平纹织物仿真模型的编程流程如图 4 所示。

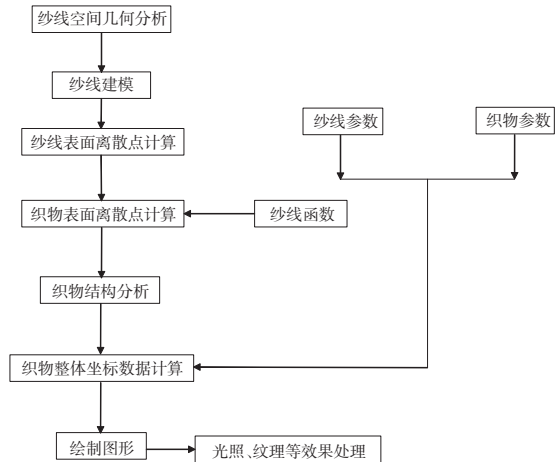
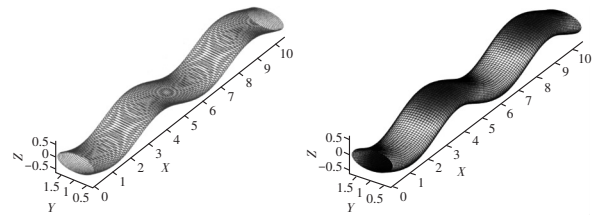
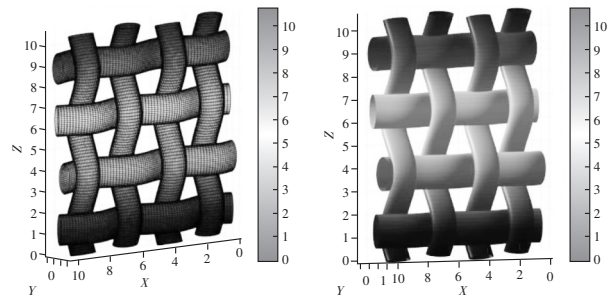


图 4 平纹织物三维仿真模型的流程

当得到织物表面所有离散点的坐标值后, 通过调用 Matlab 中的 mesh 或者 surf 函数, 绘制织物表面曲面, 即可实现织物的三维模型可视化, 如图 5 所示。



(a) 平纹织物结构纱线屈曲形态仿真



(b) 平纹织物结构
三维仿真

(c) 平纹织物结构三维
仿真光照图

图 5 纱线及织物三维仿真模型

其中图 5(a)是调用不同的函数绘制的纱线模型, 图 5(b)是平纹织物三维仿真模型, 图 5(c)是进行光照

处理后得到的模型。

3 结论

(1)平纹织物三维仿真模型真实反映了纱线的形状、大小和在织物结构中的相对位置,不仅是分析研究平纹织物结构的基础,而且也为研究平纹织物的力学过程、应力应变关系以及纱线间的相互作用机理打下了良好基础。

(2)在 Matlab 环境下的可视化编程,具有很大的优越性。计算效率高,数据可视化简单,为将来扩展不同结构的织物性能预测和检验模型的正确性提供了数学保证,也为后续其他类型的织物宏观物理性能的仿真研究提供了可靠的示范。

(3)使用 Matlab 建立织物三维仿真模型涉及数学、物理、计算机图形学和向量几何等多学科知识,因此覆盖面广、解决途径复杂。也正因为此,每一位研究者使用的方法都不尽相同,所以最终得到的模型精度、可扩展性差异较大。

参考文献:

[1] 满晓宇,罗捷.战胜 MATLAB 必做练习 50 题[M].北

京:北京大学出版社,2001.

[2] 董玲,徐蔚,杨素君,等.基于 Matlab、Excel 和 AutoCAD 的零件三维建模技术[J].机械工程与自动化,2006,(1):102-104.

[3] 张丽红.OpenGL 环境下利用 Matlab 函数实现三维地形建模[J].计算机工程与应用,2003,(34):127-128.

[4] 朱生群,袁嫣红,李跃珍.基于 TexGen 的筒状纬编针织物的三维仿真[J].现代纺织技术,2019,(6):57-61.

[5] 马维.机织物几何模型与外观的计算机三维模拟[D].武汉:武汉纺织大学,2012.

[6] 谷大鹏,杨育林,范兵利,等.平纹机织物空间参数化模型及仿真[J].纺织学报,2012,(10):37-42.

[7] 王辉,方园,潘优华.纬编针织物线圈模型的分析与研究[J].浙江理工大学学报,2008,(5):521-525.

[8] 张卓.纬编双轴向多层衬纱织物增强复合材料面内力学性能研究[D].天津:天津工业大学,2003.

[9] 吕珍,祝双武.基于 Matlab 的机织物结构相三维仿真[J].纺织科技进展,2015,(2):19-22.

[10] 郑崇友.几何学引论(上册)[M].北京:高等教育出版社,2003.

[11] 虞言林.微分几何讲义[M].北京:高等教育出版社,1989.

3D Simulation of Plain Woven Structure

ZHANG Zhuo¹, YAN Yu-rong², YANG Sheng-qiang³, REN Zhong-hai^{1,*}

(1.Guangzhou Customs Technology Center, Guangzhou 510623, China;

2. School of Materials Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;

3. Underwriters Laboratories Inc.(Shenzhen), Shenzhen 518047, China)

Abstract: With the development of computer graphics, digital 3D simulation of fabric structure had been emerging to be one of new interdisciplinary subjects and central studying topics in recent years, which had important theoretical and practical significance in predicting the mechanical behavior and physical appearance properties (pilling, luster, etc.). Simulation model had become a useful tool to help understand complicated phenomena in textile tests. Based on the Pierce's improved elliptical yarn section model and the actual space shape of the fabric, spatial characteristics of yarns and fabric were analyzed by using differential geometry. The formula of all points on fabric surface were derived. Using Matlab software, the macro model of plain fabric structure was established and the parameters were controlled. The model appearance of woven fabric was processed, including color interpolation and lighting.

Key words: woven fabric; structure; 3D; simulation

纺织助剂小知识

四川益欣科技有限公司的特色产品无醛交联剂 ST220,可替代固色剂用于染色织物的后处理,不仅可提高织物的各项色牢度,更能解决固色剂降低防水整理效果的难题。也可单独用于涂料染色,或与涂料配套使用对染色织物进行色光修正,可用于涂料印花、涂料染色织物的后处理,以提高织物的摩擦牢度。产品经 Intertek 绿叶认证,不含 APEO、甲醛。