

文章编号:1000-6893(2009)02-0343-05

复合材料缠绕后置处理方法研究

富宏亚, 王显峰, 韩振宇, 路华

(哈尔滨工业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

Research on Post Disposal of Composite Winding

Fu Hongya, Wang Xianfeng, Han Zhenyu, Lu Hua

(School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

摘要: 利用芯模表面的离散落纱点, 依据空间几何和微分几何理论, 针对纤维缠绕过程提出纤维缠绕出纱点轨迹的网格后置处理方法。该方法首先通过纤维缠绕轨迹的落纱点, 以及缠绕过程中等悬纱长约束条件来求取出纱点, 然后通过计算相邻出纱点的各坐标差得到机床运动轨迹, 最后分别通过对三通管和组合回转体的缠绕成型实验, 来验证该网格后置处理方法在处理非回转体和回转体缠绕出纱点轨迹的可行性和准确性。

关键词: 网格后置处理; 三通管; 组合回转体; 缠绕; 异型件

中图分类号: V261 **文献标识码:** A

Abstract: According to the theories of differential geometry and space geometry, this article proposes a mesh post disposal method of the winding trajectory by applying the doffing points on the mould surface aiming in the fiber winding process. First, the spit points are obtained by the same distance between the spit point and its corresponding doffing point, and then, the machine trajectory can be worked out depending on the coordinate difference between the neighboring spit points. Finally, to validate the feasibility of the mesh post disposal method in disposing the trajectories of both gyration mould and non-gyration mould, two fiber winding experiments on tee shape and combination shape are carried out. Both winding trajectories are realized well by the NC code programmed according to the mesh post disposal.

Key words: mesh post disposal; tee shape; combination gyration shape; winding; abnormal form mould

纤维缠绕出纱点轨迹的后置处理是纤维缠绕的重要环节, 传统的后置处理方法都是建立在芯模方程基础上的, 通过出纱点轨迹方程的坐标变换来求取机床运动轨迹。比如文献[1-4]中弯管的缠绕设计及后置处理就是建立在弯管方程的基础之上, 文献[5-9]中压力容器封头的缠绕线形的后置处理以封头方程为基础。随着科技和生产力的发展, 非回转体的缠绕成型已经成为亟待解决的问题, 但是传统的后置处理方法不能完成非回转体异形构件缠绕轨迹的后置处理, 本文依据芯模表面离散的落纱点提出了网格后置处理方法, 利用落纱点轨迹来求取机床运动轨迹。

1 网格后置处理基本原理

传统后置处理方法是在已知芯模方程的基础上, 运用缠绕理论求取纤维缠绕的落纱点, 然后依据落纱点, 通过坐标变换求取动坐标系下的纤维

轨迹在当前落纱点处的切线方程, 进而根据给定的条件来得到出纱点的方法。其中给定的条件可以是悬纱等长、出纱点始终在同一水平面上、出纱点在同一竖直面上等。该方法能够精确得到出纱点坐标, 适用于各种回转体芯模的缠绕加工, 但是该方法不能对非回转体缠绕轨迹进行后置处理, 并且对于方程复杂的回转体, 后置处理的工作量也相当大。

网格后置处理方法是适用于各种回转体和非回转体缠绕轨迹的后置处理方法, 另外对于不同的构件其难易程度是一样的, 只是在计算量方面与落纱点的多少成正比, 采用该方法易于实现计算机自动化处理和提高工作效率。网格后置处理原理如图1所示。

图1中: P_1, P_2 为相邻2个落纱点; P'_1, P'_2 为对应的2个出纱点; ΔC 为主轴单步回转角; ΔA 为每步摆头摆角, α 为悬纱单位向量; l 为水平移动轴 X 的方向向量; a 为出纱嘴的摆头向量。机床运动轨迹包括3个平动轴和2个转动轴的联动轨迹, 下面首先从缠绕主轴的转动坐标 C 开始求

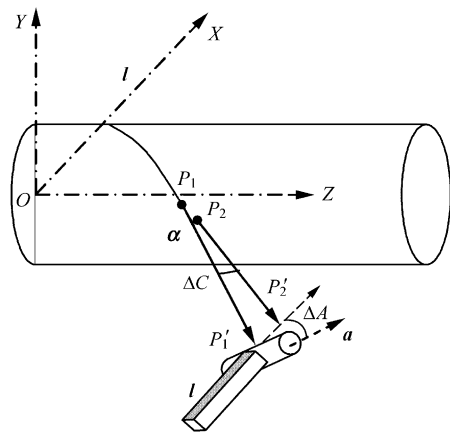


图1 网格后置处理原理图

Fig.1 Theory of mesh post disposal

取机床运动轨迹。以 C_1, C_2 分别代表第 1、第 2 出纱点在静坐标系中的 XOY 面内对应的中心角, 可以通过出纱点 P'_1, P'_2 的坐标得到。然后依次记录下每次相邻出纱点之间的中心角差, 累加求得 $\sum_{i=1}^n \Delta C$, 那么 $\sum_{i=1}^n \Delta C$ 即为主轴的总转角。悬纱单位向量 α 可以通过落纱点求出, 若芯模网格化的比较密时, 可以把缠绕轨迹上的第 1、第 2 落纱点的连线向量作为纤维轨迹在第 2 落纱点处的切向量; 否则, 可以考虑把第 1、第 3 落纱点的连线向量作为纤维轨迹在第 2 落纱点处的悬纱切向量^[10]。然后根据 $\sum_{i=1}^n \Delta C$, 把切向量在 XOY 平面内逆时针旋转 $\sum_{i=1}^n \Delta C$, 即可得到动坐标系下的悬纱单位向量 α 。根据 $a = \alpha \times l$ 可以得到出纱坐标 A 的方向向量, 其中转动值 A 为 a 与 Z 轴的夹角。最后, 设定悬纱长度为 L , 通过 $\overrightarrow{OP'} = \overrightarrow{OP} + L\alpha$, 可以根据落纱点、出纱向量以及悬纱长度 L 得到静坐标系下的出纱点坐标。然后根据 $\sum_{i=1}^n \Delta C$, 把原点到出纱点的向量在 XOY 平面内逆时针旋转 $\sum_{i=1}^n \Delta C$ 即可得到动坐标系下的出纱点坐标。至此, 从芯模缠绕轨迹的第 1 个出纱点运动到第 2 个出纱点缠绕机床各轴所需的运动量可以通过式(1)求得。

$$\left. \begin{aligned} \Delta X &= X_2 - X_1 \\ \Delta Y &= Y_2 - Y_1 \\ \Delta Z &= Z_2 - Z_1 \\ \Delta C &= C_2 - C_1 \\ \Delta A &= A_2 - A_1 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

该网格后置处理的程序实现流程见图 2。首

先要将先生成的落纱点缠绕轨迹导入程序, 并且确定纤维缠绕时的出纱方式; 从而可以推导出所有落纱点处的切向量以及各个落纱点对应的悬纱长度; 进而求得出纱点和出纱向量在静坐标系下的坐标。然后根据出纱方式, 求出出纱点在静坐标系 XOY 平面内对应的中心角 C_1 和 C_2 , 并计算 ΔC ; 根据 $\sum_{i=1}^n \Delta C$ 角对出纱点进行坐标变换, 转换成动坐标系下的坐标以及摆头坐标; 最后将所有相邻出纱点的坐标对应相减, 见式(1), 即可得到缠绕控制的增量代码。

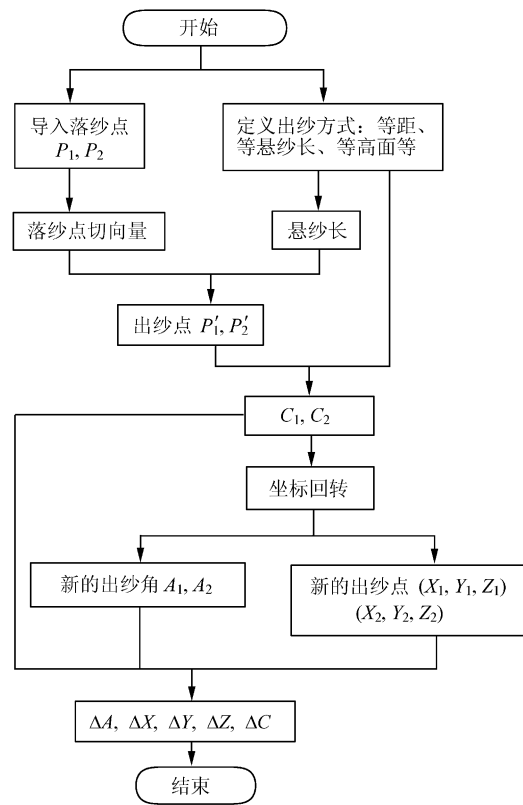


图2 后置处理流程图

Fig.2 Flow chart of post disposal

其他落纱点的机床运动轨迹可依据上述方法求取。但有些时候根据不同的芯模往往需要多条缠绕轨迹来实现布满, 这时候要分别进行网格后置处理, 比如三通管, 在求取其机床缠绕运动轨迹时, 需要首先设计多条缠绕轨迹对其实现布满缠绕, 然后利用网格后置处理求得多条机床运动轨迹, 最后利用后置处理将所有轨迹连接起来, 从而实现一次缠绕并布满。

2 实验

本文采用网格后置处理方法通过异型件三通

管和组合回转体的缠绕实验来验证该后置处理方法对于缠绕不同类型芯模的可行性。实验设备为哈尔滨工业大学自行研制的六轴联动数控缠绕机。

2.1 三通管后置处理

缠绕三通管的难点之一就是缠绕代码的后置处理,因为其外形的非对称性给后置处理带来了很大的困难^[11-12]。三通管过渡段是异型体,无法用方程精确表达,只能借助面片缠绕理论来解决其缠绕布满的问题^[13-14],因此其后置处理方法也不能采用传统的处理方法而是要借助网格后置处理方法。三通管的主管部分借助上述方法即可解决,但是一些关键部分还需要对上述网格后置处理方法加以灵活运用,比如支管段的线型缠绕、过渡部分的缠绕和主管根部的缠绕等。

(1) 支管根部的缠绕

由于机床出纱嘴没有支管长,在支管保持静止的情况下无法实现对支管根部的缠绕,但由于对根部缠绕时,支管的正反幅度不会太大,因此在这种情况下就要借助支管的正反回转来完成支管根部的缠绕,如图 3 所示。该支管根部缠绕线型的落纱点完全是根据三通管过渡部分的面片节点求得,三通管的过渡部分是不能用方程表达的异型体,因此缠绕这种结构时传统的后置处理方法无效,而网格后置处理可较好地解决这一问题。其程序处理流程见图 4,其中数组 `alldoffers` 记录的是所有落纱点坐标, (x, y, z) 代表落纱点的坐标值。

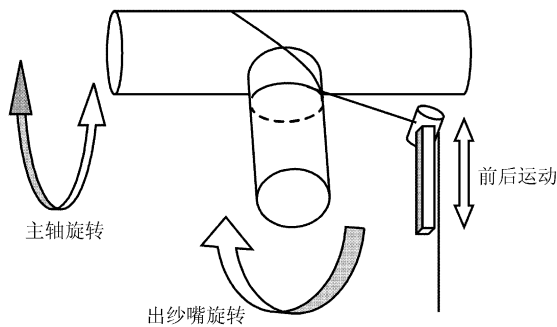


图 3 支管根部缠绕示意图

Fig. 3 Embranchment root winding chart

(2) 支管段的线型过渡

在缠绕支管时,按照上述网格理论, ΔC 有正有负,也就是说在缠绕过程中,机床主轴会有反转情况,由于过渡纤维大部分在支管端部缠绕,在缠绕时支管正反摆幅较大,容易发生碰撞和纤维松

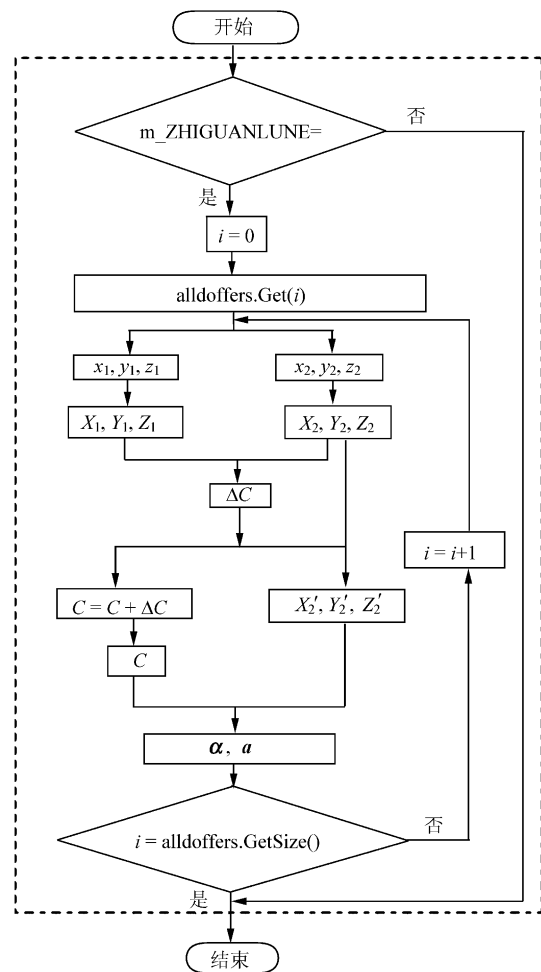


图 4 支管根部缠绕程序流程图

Fig. 4 Program frame of embranchment root winding

动的情况,对缠绕的安全性和产品的质量都不利。因此可以考虑在缠绕支管时,使支管水平静止不动,由出纱嘴绕支管的周向旋转缠绕来完成线型在支管上的缠绕过渡,即在缠绕支管时保持 ΔC 等于零,如图 5 所示。

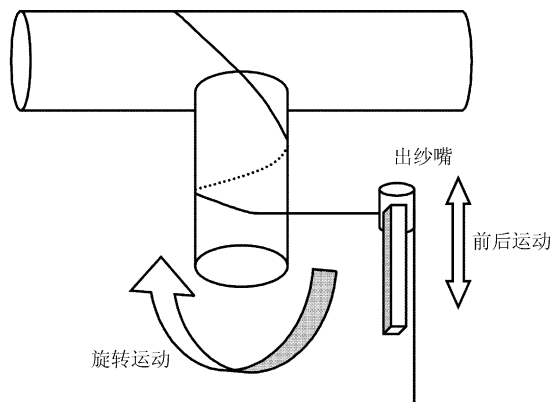


图 5 过渡缠绕示意图

Fig. 5 Transition winding chart

当纤维缠绕到支管时,支管这时处于水平位置,此后令每一步的 ΔC 都等于零,然后由坐标轴 X, Y 和 Z 来协调控制出纱嘴绕支管回转缠绕,由出纱坐标 A 来控制悬纱向量和实现纤维展纱。

(3) 主管根部的缠绕

在正常缠绕时,悬纱长度为 200 mm,而支管的长度为 236 mm,若不采取措施在缠绕主管根部时支管会与出纱嘴发生运动干涉,这里可以采取将悬纱长度调整到 250 mm,缠绕完主管根部再将悬纱长度调至 200 mm,可以有效避免碰撞又不影响线型。三通管的缠绕效果见图 6。

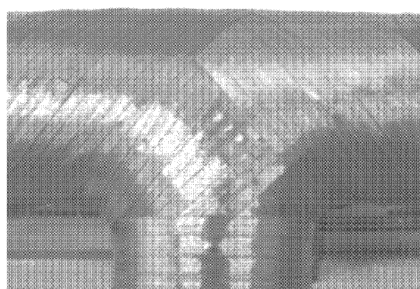


图 6 三通管缠绕

Fig. 6 Tee shape winding

2.2 组合回转体后置处理

组合回转体可以按照回转体的方程表达式推导出其缠绕轨迹和机床缠绕轨迹,但是当组合回转体外型比较复杂时,在推导机床轨迹时需要很大的计算量,容易出错。借助网格后置处理方法能够很好地解决组合回转体缠绕的后置处理问题^[15]。

通过上述分析,网格后置处理方法不必知道芯模的方程,根据其落纱点就可以得到机床运动轨迹,然后按照三通支管段过渡缠绕的后置处理方法求出纱点轨迹,依据摩擦理论确保不存在架空与滑线现象,就可以得到稳定的缠绕轨迹,当然可以在适当的范围内调节缠绕角来优化缠绕制品的受力情况。

对于组合回转体的后置处理,只需给出落纱点轨迹就可以根据设定好的参数利用软件自动生成所需的缠绕代码,便于操作。其缠绕效果见图 7。

3 误差分析

网格处理方法依据芯模落纱点来求取缠绕代码,它对芯模表面网格节点的依赖性比较大,网格节点的密度、均匀程度直接影响着芯模缠绕轨迹后置处理的质量。节点的密度越大,在采用网格

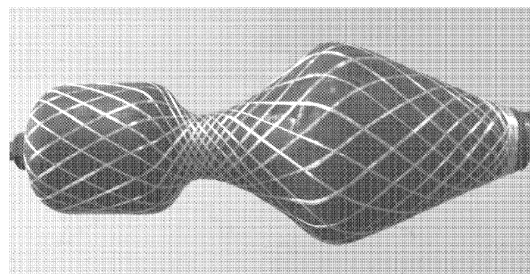


图 7 组合回转体缠绕实验

Fig. 7 Winding experiment of combination gyration shape

后置处理理论时,求得的出纱向量就越接近实际出纱向量;芯模的表面节点间距越均匀,得到的芯模落纱点处的切向量越精确。图 8 展示了芯模分别为 20 mm, 70 mm 和 450 mm 时,其缠绕误差随节点间距的增大而增大的情况。因此在芯模半径较小时应尽量采用较小的网格来进行网格后置处理,而当芯模半径大于 450 mm 时网格大小应不超过 2 mm。

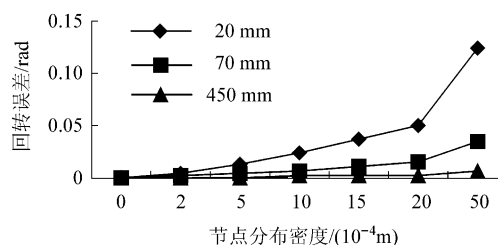


图 8 回转误差与网格大小的关系曲线

Fig. 8 Trend line between gyration error and mesh size

4 结论

提出了针对纤维缠绕轨迹的网格后置处理方法,避免了繁琐的方程推导;通过该方法可以有效解决回转体或非回转体缠绕成型的后置处理问题;最后针对三通管和组合回转体的具体情况进行分析,并进行了缠绕实验,验证了该方法的可行性。但是该方法对缠绕精度的控制依赖于芯模网格密度,若网格密度不够,会对缠绕精度有一定的影响,有待于进一步完善。

参考文献

- [1] 李先立. 90°弯管缠绕机的发展[J]. 玻璃钢/复合材料, 1994(3): 11-16.
Li Xianli. The development of 90° elbow winding machine [J]. Fiber Reinf Plast/Compos, 1994(3): 11-16. (in Chinese)
- [2] 李先立, 羊平虎. 测地线缠绕 90°弯管的运动方程[J]. 宇

- 航学报,1987,8(4):26-32.
- Li Xianli, Yang Pinghu. Kinematic equations of geodesic winding on a 90° elbow pipe[J]. Journal of Astronautics, 1987, 8(4):26-32. (in Chinese)
- [3] 刘荣梅,肖军. 弯管制造过程中三坐标缠绕机的运动分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2004, 36(4):520-523.
- Liu Rongmei, Xiao Jun. The trajectory analysis of three axis winding machine on winding 90° elbow[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 36(4):520-523. (in Chinese)
- [4] 韩振宇,富宏亚,王永章,等. 90°弯管的纤维缠绕线形设计[J]. 玻璃钢/复合材料,2004(4):31-33.
- Han Zhenyu, Fu Hongya, Wang Yongzhang, et al. The fiber winding trajectory design of 90° elbow[J]. Fiber Rein Plast/Compos, 2004(4):31-33. (in Chinese)
- [5] 张洁,杨学先,张福承. 封头缠绕技术改进新策略[J]. 纤维复合材料,2005(1):43-44.
- Zhang Jie, Yang Xuexian, Zhang Fucheng. Improvement on the dome winding of vessel[J]. Fiber Compos, 2005(1):43-44. (in Chinese)
- [6] 张福承. 纤维缠绕大型立式储罐[J]. 纤维复合材料, 1996(3):19-25.
- Zhang Fucheng. Fiber winding of the good-sized erect tank[J]. Fiber Compos, 1996(3):19-25. (in Chinese)
- [7] 郑宗光. 碳纤维缠绕复合材料在潜水外压力容器上的应用[J]. 材料开发与应用, 1996,11(5):25-32.
- Zheng Zongguang. The application of carbon fiber winding composite on diving outside pressure vessel[J]. Development and Application of Materials, 1996, 11(5):25-32. (in Chinese)
- [8] 阮崇智. 大型复合材料壳体的结构——工艺设计问题[J]. 固体火箭技术, 1995,18(2):1-9.
- Ruan Chongzhi. The structure of good-sized composite material shuck—the problem on technics design[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 1995, 18(2):1-9. (in Chinese)
- [9] Gudaitis C N. High pressure cryogenic composite tank qualification[C]// 32nd International SAMPE Technical Conference. 2000:342-351.
- [10] Wang X F, Fu H Y, Han Z Y. The validation of the feasibility of abnormal form patch winding[J]. Materials Science Forum, 2006,532-533:129-132.
- [11] 张建. 复合材料三通管纤维缠绕成型的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学机电工程学院, 2004.
- Zhang Jian. The research of filament-wound composite tee pipe fitting[D]. Harbin: School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, 2004. (in Chinese)
- [12] 韩振宇. 纤维缠绕复合材料构件 CAD/CAM 技术及其应用的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学机电工程学院, 2005.
- Han Zhenyu. Research on CAD/CAM technology for filament winding composite and its application[D]. Harbin: School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, 2005. (in Chinese)
- [13] Fu H Y, Wang X F, Han Z Y, et al. Abnormal shape mould winding [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2007,20(6):552-558.
- [14] 王显峰,韩振宇,张勇,等. 复合材料缠绕方法的对比研究[J]. 硅酸盐学报,2007(3):358-363.
- Wang Xianfeng, Han Zhenyu, Zhang Yong, et al. Contrast research on the composite winding methods [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2007(3):358-363. (in Chinese)
- [15] 申涛. 组合回转体缠绕运动控制程序开发[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学机电工程学院, 2007.
- Shen Tao. The program empolder on filament winding locomotion control of combined revolution supface[D]. Harbin: School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, 2007. (in Chinese)

作者简介:

富宏亚(1963—) 男,博士,教授。主要研究方向:数控技术与复合材料缠绕技术。

Tel:0451-86402852

E-mail:Hongyafu@hit.edu.cn

王显峰(1980—) 男,博士。主要研究方向:复合材料纤维缠绕技术。

Tel:0451-86402852

E-mail:wx2003_999@126.com

(责任编辑:蔡斐,杨冬)