

面向反射面铺丝成型的铺丝机 构型研究

Research on Automated Fiber Placement Machine Configuration for Manufacturing of Spherical-Crown Reflector

南京航空航天大学 张鹏 肖军 齐俊伟 王跃全



张鹏
博士研究生, 主要研究方向为复合材料自动化成型技术。

由于碳纤维复合材料具有高强度、高模量、低密度和低线膨胀系数等优点, 应用在空间光学镜面和雷达反射面可以大幅度减重和提高精度, 越来越受到重视^[1-2]。反射面为典型球冠面, 双曲率不可展, 典型的复合材料反射面成型方法多采用先裁剪预浸料成窄带, 再逐条铺叠, 效率低、精度差。应用自动铺丝技术可实现球冠面的高效、低成本制备, 尤其在大尺寸光学反射面的制备中更有优势。空间光学反射面要求有非常高

研究铺放过程中形位误差对铺放精度的影响包括各轴由于轴线同轴度误差、垂直度误差、安装误差等引起的铺放辊副法线方向偏移误差。比较这些误差对 ACA' 构型和 BAC 构型铺丝机铺放精度的影响, 为高精度铺丝机的构型选择提供依据。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.14.048

的面型精度, 首先需要保证较高的碳纤维预浸带铺放精度, 对铺丝机精度提出了更高的要求。

机床误差在所难免, 误差形式也多种多样, 且对成形精度的影响与机床构型、产品对象密切相关。机床零部件在制造过程中会产生形状误差、位置误差和尺寸误差等; 在装配过程中产生装配误差; 在运行过程中由于伺服系统和零部件变形等因素也会产生相应误差。国内外误差影响的研究有很多, 武跃^[3]详细描述了多种构型五轴机床运动学变换的方法; 李晓丽^[4]总结了各种单项误差的特征矩阵; 也有多人研究了五轴或六轴机床多种误差的误差模型^[5-6]; 霍彦波等^[7]分析了五轴机床的跟随误差引起的轮廓误差; 黄风光等^[8]

对线性插补过程中形成的误差进行了分析; 陈书涵等^[9]研究了主轴的角度旋转偏差和平移误差对加工齿轮的影响, 并找出主要影响因素。

本文以反射面球冠的经纬线铺放为对象, 研究两种特定构型的六轴联动铺丝机, 分别为 XYZACA' 构型和 XYZBAC 构型。主要研究铺放过程中形位误差对铺放精度的影响包括各轴由于轴线同轴度误差、垂直度误差、安装误差等引起的铺放辊副法线方向偏移误差。比较这些误差对 XYZACA' 构型和 XYZBAC 构型铺丝机铺放精度的影响, 为高精度铺丝机的构型选择提供依据。这两种构型的铺丝机在球冠面经纬线铺放时, 运动过程也不一样。因此, 动态响应性、后处理和铺放的便捷性也不一

样。通过比较找出更适合球冠面经纬线铺放的铺丝机构型。

误差分析

1 分析模型

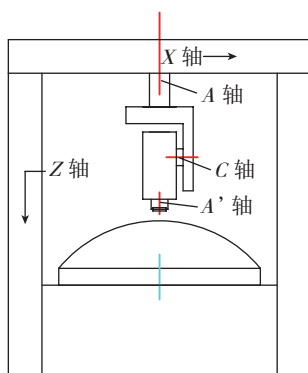
1.1 机床构型模型

两种铺丝机的构型如图 1 所示,分别为 $XYZACA'$ 构型和 $XYZBAC$ 构型。其中, $XI/Y/Z$ 为龙门平动轴, $A/B/C/A'$ 的转动轴线分别平行于 $Z/Y/X/Z$ 轴。

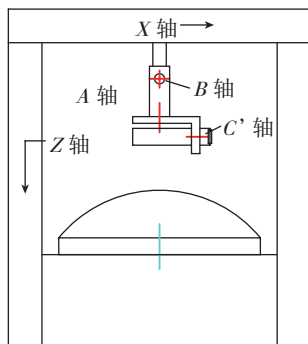
计算的误差类型见表 1 和表 2, 偏转误差考虑由安装或垂直度误差引起的 A 轴绕 Y 轴, (图 2 (a)) 和 A 轴绕 Z 轴的角度偏差。偏移误差考虑 A/A' 轴的不同轴度和 A'/C 轴的垂直度误差等引起的在 X 方向, 图(2 (b)) 和 Y 方向的偏移。 BAC 构型铺丝机的误差类型与 ACA' 构型类似。

1.2 误差计算方法

设定各轴起始坐标系均与机床坐标系方向一致, 模具坐标系原点位于球冠面的球心, 铺放辊坐标系起始

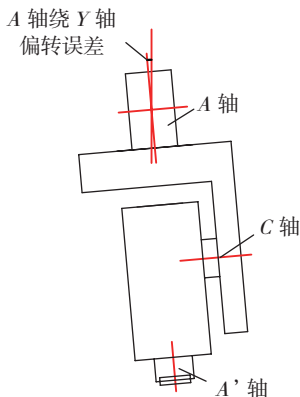


(a) $XYZACA'$ 构型铺丝机

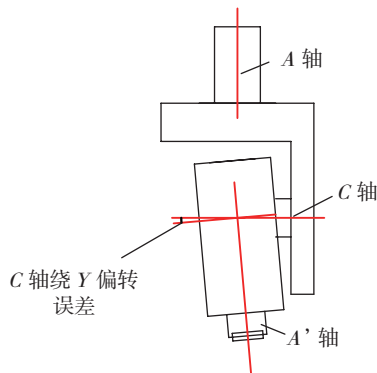


(b) $XYZBAC$ 构型铺丝机

图1 两种构型铺丝机的结构图



(a) $XYZACA'$ 构型 A 轴绕 Y 轴偏转误差



(b) $XYZACA'$ 构型不同轴度误差

图2 铺丝机误差示意图

位置与镜面模具中心接触, 模具中心与镜面球心位于一条铅垂线。

铺放经线时, 铺丝机由模具坐标系的 Y 轴负方向, 向 Y 轴正方向铺放经线。铺放纬线时, 转台转动 90° , 坐标系不动, 仍在原坐标系中由 Y 轴负方向开始向 Y 轴正方向铺放。

通过坐标系的齐次坐标变换, 得到有误差和没有误差时两种构型铺

丝机从铺放辊坐标系到模具坐标系的变换矩阵 M' 和 M 。这一步很多文献都有论述, 这里不再详述。再通过公式(3) 从有误差影响的铺放辊坐标系 P' 变换到没有误差的铺放辊坐标系 P 中。 P 和 P' 中表示 XYZ 的列向量已进行标准化(模为 1)。坐标系 P 中, P_0 原点在 P 中的 y_2 坐标值即为铺放辊的横向偏移误差。用 matlab 编程计算。

$$P = M \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$P' = M' \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$P_0 = M^{-1}P', \quad (3)$$

$$P_0 = \begin{pmatrix} * & * & * & * \\ y_1 & * & * & y_2 \\ * & * & * & * \\ * & * & * & * \end{pmatrix}. \quad (4)$$

计算模具坐标系中各铺放轨迹点处的位姿, 求出球冠面经纬线铺放时各轴运动分量。代入横向偏移误差公式可计算形位误差的数值解, 直观比较两种构型铺丝机的铺放精度。

2 结果与讨论

2.1 误差公式

计算出铺丝机的形位误差使铺放辊横向偏移的误差公式。 a' $|a/b|$ c 为 $A'/A/B/C$ 轴的旋转角度, $XI/Y/Z$ 为 3 个平动轴的运动分量, $h/k/m$ 为

表1 $XYZACA'$ 构型的误差类型及表示方法

误差类型	符号	线条
A 轴绕 Z 轴偏转	Δf_0	圆形数据点
A 轴绕 Y 轴偏转	Δg_0	菱形数据点
A/A' 轴线在 X 方向偏移量	Δx_0	方形数据点
A/A' 轴线在 Y 方向偏移量	Δy_0	十字数据点

表2 $XYZBAC$ 构型的误差类型及表示方法

误差类型	符号	线条
B 轴伸臂绕 Z 轴偏转	Δf_1	圆形数据点
B 轴伸臂绕 Y 轴偏转	Δg_1	菱形数据点
C 轴轴线在 Y 方向的偏移量	Δy_1	方形数据点
C 轴轴线在 Z 方向的偏移量	Δz_1	十字数据点

3个转动轴的臂长。

XYZACA' 双摆构型铺丝机的形位误差引起的横向偏移误差如下:

$$\Delta f_0 = -(h^2 + (k+m)^2 + 2 \times h \times (k+m) \times \cos(c))^{\frac{1}{2}} \times f \times \cos(a'), \quad (5)$$

$$\Delta g_0 = -(h + (k+m) \times \cos(c)) \times g \times \sin(a'), \quad (6)$$

$$\Delta x_0 = x \times \sin(a'), \quad (7)$$

$$\Delta y_0 = y \times \cos(a'). \quad (8)$$

XYZBAC 双摆构型铺丝机的形位误差引起的横向偏移误差如下:

$$\Delta f_1 = -(h^2 + (k+m) \times \sin(a)^2)^{\frac{1}{2}} \times f \times \cos(c), \quad (9)$$

$$\Delta g_1 = -(k+m) \times \cos(a) \times g \times \sin(c), \quad (10)$$

$$\Delta z_0 = z \times \sin(c), \quad (11)$$

$$\Delta y_0 = y \times \cos(c). \quad (12)$$

由公式(5)~(12)可以看出,形位误差引起的铺放轨迹横向偏移误差与铺丝机各轴运动分量有关。不同轨迹点处,铺丝机姿态不同,各轴运动分量不同,因此铺放轨迹横向偏移误差不同。

2.2 数值分析

球冠面铺放经线时,球冠面半径为 800mm。所以,铺放范围为 X/Y 轴坐标 -800~800mm。以分别铺放绕极轴偏转 30° 和偏转 0° 的经线为例,沿 Y 轴坐标均匀选取 20 个数据点,求出每个点处各轴运动量。垂直度、同轴度误差设为 0.05mm,安装误差或垂直度误差等引起的轴线偏转误差设为 0.005°。设 3 个转动轴臂长均为 300mm。

代入误差公式(5)~(12)计算形位误差对两种构型铺丝机铺放精度的影响,结果如图 3 所示。由图 3 可以看出,XYZACA' 构型的铺丝机铺放一般角度(30°)经线时,最大横向偏移误差的绝对值小于 0.1mm。此外,误差曲线变化平缓,因此,铺放轨迹虽然有偏差但变化平缓。

但是,XYZACA' 构型的铺丝机在顶点处存在奇异点。当铺放接近

0° 的经线或纬线时,铺放辊到达顶点附近,A 轴会在较短的距离内转动较大的角度。铺放 0° 经线时,在顶点 A 轴会快速转动 180°,A' 轴相应快速反方向转动 180°。这样的短距离内大角度转动,会使原本平滑的误差曲线(图 3(a))在顶点附近产生台阶,误差反号见图 3(b)。所以,这一点处铺放轨迹的横向偏移误差绝对值瞬间增大 1 倍,铺放轨迹变化明显。

如图 4 所示,在奇异点附近,铺放轨迹由于横向误差增大 1 倍而出现明显台阶,碳纤维预浸带可能因此褶皱、扭曲,显著影响铺放质量。

XYZBAC 构型铺丝机在球冠面铺放时没有奇异点,各轴运动平稳,各轴误差的误差曲线平滑(图 5)。由图 5 可以看到,有些误差对铺放轨迹的横向偏移没有影响,有的轴误差使铺放轨迹的横向偏移量为常数。

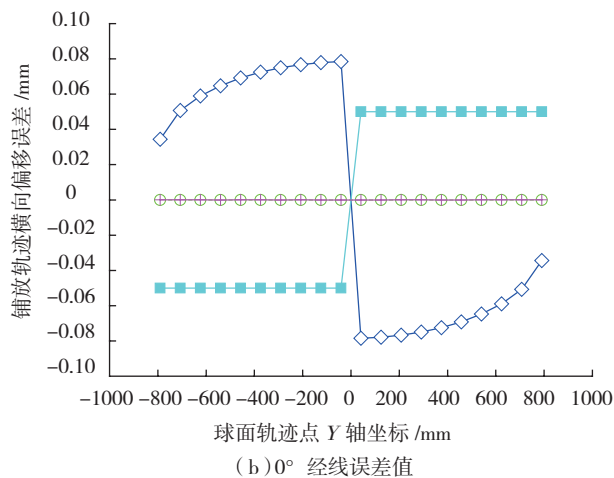
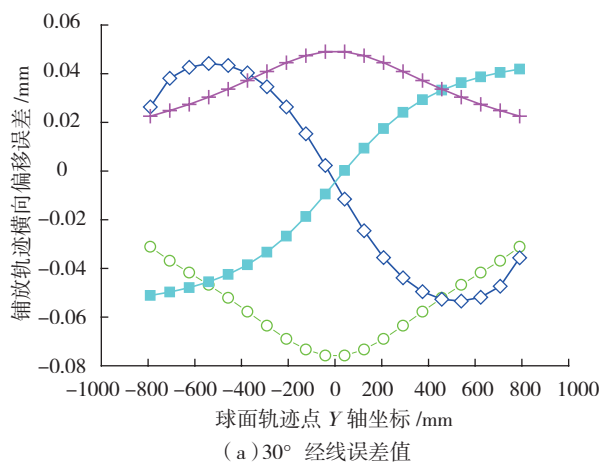


图3 XYZACA' 构型铺放经线误差值

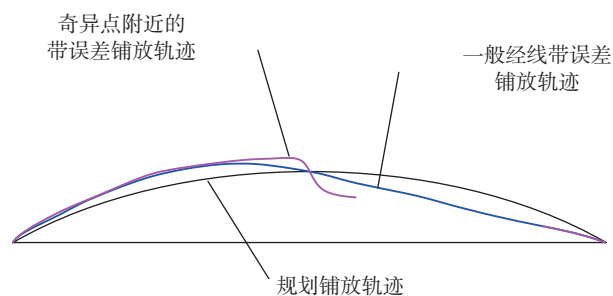


图4 XYZACA' 构型铺放经线误差示意图

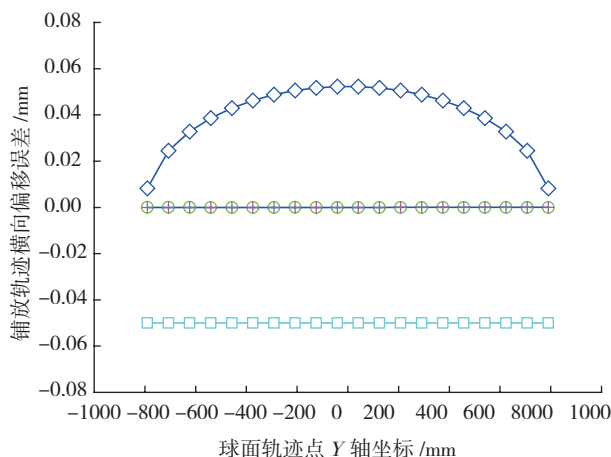


图5 XYZBAC构型的一般经线误差曲线

通过图5,可以看出几种误差对铺放轨迹横向偏移误差的影响程度,着重减小影响较大的误差因素,比如A/C轴轴线的垂直度误差,提高精度。对于使铺放轨迹副法线偏移常数量的轴误差,可以很方便地通过轨迹规划来补偿。所以,XYZBAC构型的铺丝机更容易实现高精度的球冠面铺放。

铺放过程运动分析

两种构型的铺丝机在球冠面的经纬线铺放时,各轴的运动量和速度相差很大。

对于XYZACA'构型的铺丝机,铺放经线和纬线过程中六轴均需联动运动,各轴运动量如表3所示。对于XYZACA'构型铺丝机,球冠面顶点为奇异点。铺放0°经线时,在奇异点处A'轴由-90°迅速转为90°,A轴由0°迅速转为-180°。铺放接

近0°的经线时,也会在顶点前后快速转动大角度。铺丝机的快速大角度转动不但会显著增大原有误差,而且使铺丝机的动态载荷增大,不利于电机的保养,会产生更大误差。

在铺放接近顶点位置的纬线的时候,也会出现A/A'轴的快速大角度转动,降低铺丝机的动态响应性和铺放精度。

对于XYZBAC构型的铺丝机,铺放经线时B轴和C轴不需要运动,只有A轴和XYZ轴需要跟随轨迹点而转动。铺放经线时各轴运动分量范围如表4所示。

XYZBAC构型的优点是显而易见的,自动铺放的后处理过程更简单快捷,也容易推断铺丝机是否发生干涉。更重要的是,XYZBAC构型的铺丝机在铺放纬线时,与铺放0°经线时运动状态类似,没有奇异点处运动轴高速或者大角度转动的情况。

表3 XYZACA'构型各轴分量范围

Y轴坐标	-	→	0	→	+
A'轴转角	$-(90^\circ - \theta)$	→	0°	→	$90^\circ - \theta$
C轴转角	-90°	→	-θ	→	-90°
A轴转角	0°	→	-90°	→	-180°

表4 XYZBAC构型经线铺放各轴分量范围

Y轴坐标	-	→	0	→	+
A轴转角	-90°	→	0°	→	90°
B轴转角			$-(90^\circ - \theta)$		
C轴转角			-90°		

结束语

比较两种构型的铺丝机在铺放球冠面经纬线过程中的运动状态。发现XYZACA'构型的铺丝机在球冠面顶点处有奇异点,铺丝机会快速大角度转动。这不利于铺丝机的动态响应性,会显著降低铺放精度。而XYZBAC构型的铺丝机铺放过程中没有奇异点,铺放过程平稳。

通过比较两种构型铺丝机的误差曲线,发现XYZACA'构型在奇异点处误差曲线出现台阶,误差增大1倍,铺放轨迹易出现褶皱、扭曲等缺陷。因此,这种构型的铺丝机精度较低,铺放质量较差。而XYZBAC构型的铺丝机没有这些问题,易于控制和提高精度。所以,XYZBAC构型的铺丝机更适合球冠面铺放,精度更高。

参考文献

- [1] 盛磊. 用碳纤维复合材料制造轻型空间光学镜面. 航天返回与遥感, 2003, 24(1):52-56.
- [2] 林再文, 刘永琪, 梁岩, 等. 碳纤维增强复合材料在空间光学结构中的应用. 光学精密工程, 2007, 15(8):1181-1185.
- [3] 武跃. 五轴联动数控加工后置处理研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- [4] 李晓丽. 面向多体系统的五轴联动数控机床运动建模及几何误差分析研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
- [5] 陶晓杰, 王治森. 滚齿机床的误差模型. 机床与液压, 2005(12), 19-24.
- [6] 任永强, 杨建国, 窦小龙, 等. 五轴数控机床综合误差建模分析. 上海交通大学学报, 2003, 37(1):70-75.
- [7] 霍彦波, 丁杰雄, 谢东, 等. 五轴数控机床转动轴与平动轴联动的轮廓误差仿真分析. 组合机床与自动化加工技术, 2012(3):21-28.
- [8] 黄风光, 刘瑛. 六轴义齿加工机床线性插补实现及误差分析. 设计与研究, 2012, 39(4):11-26.
- [9] 陈书涵, 严宏志, 明兴祖, 等. 六轴五联动螺旋锥齿轮磨床误差建模与分析. 中国机械工程, 2008, 19(3):288-294.

(责编 叶枫)