

面向柱面结构的自动铺带四轴联动成形研究

李俊斐, 王显峰, 肖军*, 肖健, 方宜武

南京航空航天大学 材料科学与技术学院, 江苏 南京 210016

摘要: 根据柱面的结构特点,提出了面向柱面复合材料结构的自动铺带四轴联动成形方案,并以卧式自动铺带机为例进行分析。以保证铺放头压力线平行于曲面在铺放点的法线和保证铺放速度恒定为原则,根据 D-H 理论建立柱面固定角度铺放成形时铺带机各关节运动量的计算方法。应用逆运动学理论,对四轴联动铺带成形进行了运动学分析。从四轴联动铺带机的机构与控制、铺放速度、成形效率、方案可行性 4 个方面进行了深入分析,并进行可视化仿真和实验验证。结果表明应用本文方法,可实现用四轴联动铺带机完成柱面复合材料自动铺放成形,对于铺放成形效率要求不苛刻的小批量实验或生产,具有低成本的突出优势。

关键词: 复合材料; 自动铺带; 柱面结构; 四轴联动; 逆运动学

中图分类号: V261.97; TP273 文献标识码: A 文章编号: 1000-6893(2013)05-1232-09

随着航空航天事业的飞速发展,实现大型复合材料构件的自动化低成本制造已经成为了该领域的攻关重点。自动铺放技术包括自动铺带技术(Automated Tape Laying, ATL)和自动铺丝技术(Automated Fiber Placement, AFP),是近 30 年来发展和广泛应用的自动化制造技术。该技术采用预浸料成形,并能实现自动化和数字化制造,高效高速^[1]。自动铺放技术特别适用于大型复合材料结构件制造。近年来,欧美将自动铺带技术应用于波音 787 的中央翼盒、主翼蒙皮、尾翼和机身 47 段, A400M 的机翼、翼梁和 A350XWB 的机翼、蒙皮、中央翼盒等飞机构件的制造^[2-4]。波音 787 复合材料使用量达到 50%,这在很大程度上得益于自动铺放技术,所有翼面蒙皮均采用自动铺带技术制造^[1,5-6]。

国内自动铺带技术起步于“十五”初期,南京

航空航天大学于 2005 年成功研制国内第一台自动铺带原理样机,并于 2007 年成功研制国内第一台中型自动铺带工程样机综合实验系统,可以实现 3 m×5 m 小曲率面自动铺带和(∅1 m×3 m 筒段/锥壳自动铺带。此后陆续研制多台大型(最大∅2.5 m×18 m)卧式自动铺带机,用于复合材料圆筒结构自动铺带,大幅度提高了生产效率^[1,7]。

目前自动铺带技术主要用于成形平面、小曲率翼面和圆柱面、圆锥面等截面形状比较规则的回转类构件^[8]。对于截面形状任意并不规则的柱面铺带成形,相关研究不多、尚未见报道。柱面在大型结构中的应用比较广泛,如飞机机身中段、火箭发射筒、高铁车厢等。如何针对这一类结构的特点,研究低成本自动铺放成形理论与方法,具有理论意义和重要的工程应用价值。

收稿日期: 2012-06-01; 退修日期: 2012-06-28; 录用日期: 2012-08-02; 网络出版时间: 2012-08-16 08:57

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20120816.0857.001.html

基金项目: 国家自然科学基金(50905088); 国家科技重大专项(2010ZX04016-013); 中央高校基本科研业务费专项资金(NS2012112)

* 通讯作者. Tel.: 025-84892980 E-mail: j.xiao@nuaa.edu.cn

引用格式: Li J F, Wang X F, Xiao J, et al. Research on four-axis simultaneous motion controlled automated tape laying for cylindrical structures. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(5): 1232-1240. 李俊斐, 王显峰, 肖军, 等. 面向柱面结构的自动铺带四轴联动成形研究. 航空学报, 2013, 34(5): 1232-1240.

1 柱面结构的铺带成形分析

1.1 自动铺带设备特征分析

按所铺放构件的几何特征,自动铺带机有平面铺带和曲面铺带 2 类。平面铺带有 4 个运动轴,采用 150 mm 和 300 mm 宽的预浸带,主要用于平板铺放;曲面铺带有 5 个运动轴,主要采用 75 mm 和 150 mm 宽的预浸带,适于小曲率壁板的铺放,如机翼蒙皮、大尺寸机身壁板等部件^[1]。

如图 1 所示,一般的自动铺带机为 3P-2R(P 代表移动关节,R 代表旋转关节)结构,平动轴通过 X 轴、Y 轴和 Z 轴来控制铺带头的空间位置,转动轴通过回转轴 C 轴和偏摆轴 A 轴来控制铺带头的空间姿态。

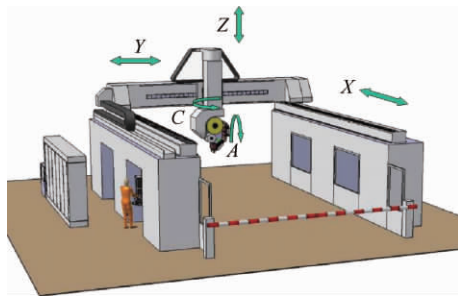


图 1 龙门式五轴自动铺带机

Fig. 1 Gantry 5-axis ATL machine

为使预浸带较好的贴合在模具表面,铺放时需要预浸带施加一定压力,即铺放压力。由于铺放压力的存在,使预浸带与模具及上一铺层贴合地更加紧密,从而减少铺层间气泡的产生,但铺放压力过大会导致预浸带发生较大变形,严重影响铺带的质量^[9]。因此,在铺放过程中不仅要选择合适的铺放压力,而且要保持铺放压力的恒定以确保铺放质量的稳定。而当加工模具为曲面时,若铺放头压力线(铺带头压辊的施压方向或压辊在施压过程中相对于铺放点的运动路径)不平行于曲面在铺放点的法线,则铺层成形压力会随曲率的变化而波动,导致各预浸带铺层的厚度不均匀及铺层中纤维束形态畸变。如铺层存在局部“屈曲”变形、预浸带屈皱或其他不稳定因素,则会降低构件的质量可靠性和抗疲劳特性。因此,为提高预浸带铺放的表面质量,使铺带机械臂

在加工过程中时刻垂直于模具表面,以使压辊施压方向沿曲面在铺放点的法方向,是保证成形压力恒定的一个较为理想的方法^[10-11]。根据空间几何,要实现铺放头压力线与曲面上任意点的法线平行,铺带机有 3 个角坐标,仅靠五轴铺带机是无法实现上述功能的,需要再增加 1 个轴:①对于开放曲面构件(平面、小曲率翼面类构件),在铺放头上加入俯仰轴 B 轴,成为具有 3P-3R 结构的六轴自动铺带机;②对于封闭曲面构件(圆柱面等回转或类回转类构件),可以在模具上另加 1 个旋转轴(也称为主轴,如图 2 所示),本文重点针对这种卧式铺带机进行分析,但所用方法具有一般性。

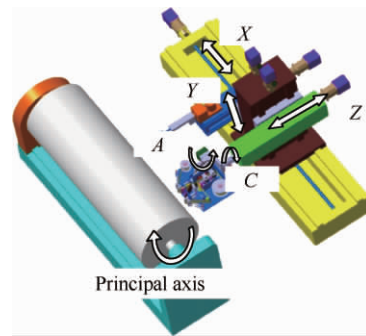


图 2 具有主轴的卧式自动铺带机

Fig. 2 Horizontal ATL machine with a principal axis

1.2 铺放成形分析

柱面在工程制造业中是常见结构,特别在一些大型结构中应用比较广泛,这类构件若采用复合材料自动铺带成形,可大大减轻重量,并提高比强度、比刚度等力学性能。

柱面,即一直线沿定曲线移动所形成的曲面,该直线称母线^[12]。对于任意的柱面,面内任意一点的法向始终与母线垂直。当铺带头角度轴(C 轴)与柱面母线垂直时,能够满足铺放头压力线与柱面法线平行的必要条件,因此偏航轴可以不参与成形的多轴联动。

由几何知识可知,柱面两点间测地线上任意一点的切线方向与母线成固定角度。因此,柱面构件上,按与母线成固定角度规划的铺带路径为测地线,满足自动铺带的“自然路径”要求^[13-14]。从复合材料结构设计上看,铺层角度是一个重要的工艺参数,应保证同一铺层内铺层角度的稳定。

若不改变铺放方向,铺带头角度轴无需参与成形过程的插补。

根据上述分析,通过合理的设计,采用四轴联动即可实现铺放头压力线与柱面法线平行,满足柱面铺带成形的要求。这不仅能大大降低自动铺带机的制造成本,而且可以规避发达国家对五轴联动机床数控系统禁运的障碍。本文针对国内已经装备的铺带机,以卧式自动铺带机为对象,分析面向柱面的自动铺带四轴联动成形方法和数控模型。

2 四轴联动方案理论分析

2.1 铺带机全局杆件坐标系

研究对象为如图 3 所示的主轴卧式自动铺带机,铺带机机械手臂为 3P-1R 结构。主轴装夹轴与柱面母线平行,且与机床坐标系 X 轴平行。按照铺带机机床的 X、Y 和 Z 轴方向,建立如图 3 所示的铺带机机床坐标系 (X, Y, Z)。

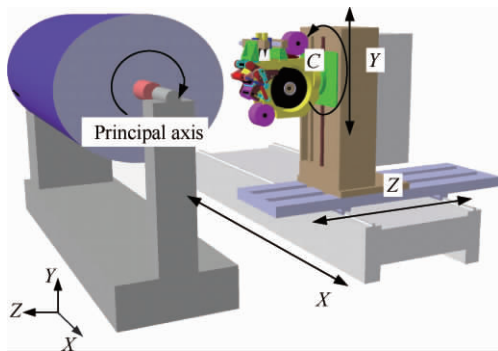


图 3 主轴卧式自动铺带机(3P-1R 铺带机机械手臂)
Fig 3 Horizontal ATL machine with a principal axis (3P-1R ATL head)

为了描述相邻杆件间平移和转动的关系,Denavit 和 Hartenberg^[15] 1955 年在《ASME Journal of Applied Mechanics》发表了一篇论文,对机器人进行表示和建模,并导出了它们的运动方程,已经成为机器人运动建模的经典方法^[16]。

根据 D-H 表示法建立该自动铺带机的空间全局杆件坐标系,如图 4 所示,其中, (X, Y, Z) 为铺带机机床坐标系; (X₀, Y₀, Z₀) 为铺带机杆件的基坐标系; X₁、X₂、X₃、X₄、X₅、Z₁、Z₂、Z₃、Z₄、Z₅ 分别代表铺带机杆件

坐标系 1~5 的 X、Z 坐标轴; (X₆, Y₆, Z₆) 为铺带机末端手部坐标系 6; d₁、d₂ 和 d₃ 为移动关节的位移量; θ₄ 为旋转关节的旋转变量, l₅ 为连杆 5 的偏置。

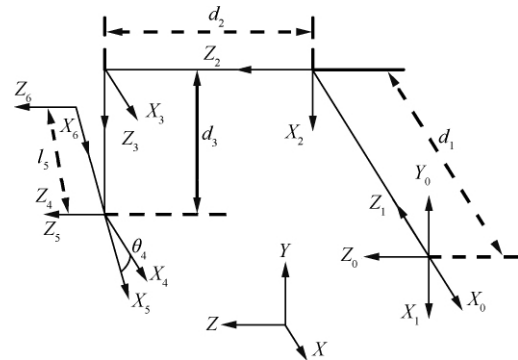


图 4 铺带机全局杆件坐标系
Fig 4 Global linkage coordinates of ATL machine

根据利用 D-H 表示法建立的自动铺带机的空间全局杆件坐标系以及通用相邻杆件公式,可以得出相邻杆件 i-1 和杆件 i 之间的齐次变换矩阵: 0_1T 、 1_2T 、 2_3T 、 3_4T 、 4_5T 。

铺带头相当于铺带机的末端执行器,它的实际结构比较复杂,图 5 为典型的铺带头结构。在铺带头的前端装有一带弹性的圆柱形压辊,铺带机末端手部坐标系原点处在压辊表面与模具的接触点上。实际上该原点是一个动态点,它需要依据铺带路径上的离散控制点来确定每一个具体的位置^[17]。如图 5 所示,铺带头坐标系的 Z 轴方向处于接近模具的方向,习惯上称为接近矢量; Y 轴方向为铺带头的运动方向,习惯上称为法向矢量; X 轴方向为压辊轴线方向,习惯上称为滑动矢量。

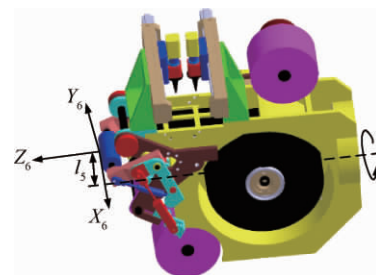


图 5 铺带机铺带头结构
Fig 5 Structure of ATL head

根据图 4,铺带机末端手部坐标系 6 是由杆件坐标系 5 在其 X 轴负方向平移 l_5 长度所得,其齐次变换矩阵 6_5T 为

$${}^6_5T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -l_5 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

可获得末端手部坐标系 6 与基坐标系 0 之间的齐次变换矩阵为

$${}^6_0T = {}^1_0T \times {}^2_1T \times {}^3_2T \times {}^4_3T \times {}^5_4T \times {}^6_5T = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & -\sin \theta_4 & 0 & -l_5 \cos \theta_4 - d_1 \\ \sin \theta_4 & \cos \theta_4 & 0 & -l_5 \sin \theta_4 - d_3 \\ 0 & 0 & 1 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

则法向矢量 $\bar{n} = (\cos \theta_4, \sin \theta_4, 0)$ 、滑动矢量 $\bar{o} = (-\sin \theta_4, \cos \theta_4, 0)$ 、接近矢量 $\bar{a} = (0, 0, 1)$, 而末端手部坐标系 6 的原点相对于基坐标系 0 的位置为 $(-l_5 \cos \theta_4 - d_1, -l_5 \sin \theta_4 - d_3, d_2)$ 。

2.2 逆运动学解

假设芯模截面为任意形状,芯模装夹轴线与母线平行,且平行于三维坐标的 X 轴。为了便于推导,设截面轮廓在极坐标系中表示为 $\rho = \rho(\theta)$,极轴为 x 轴,芯模穿轴线穿过极坐标原点 O ,如图 6 所示。

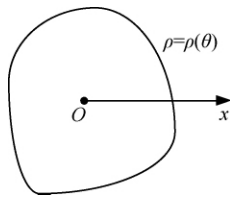


图 6 芯模截面的形状示意

Fig. 6 Section view of rotation mandrel

对于主轴卧式铺带机而言,铺放方案的第 1 原则是:始终保持压辊沿水平方向施压,即保持铺放表面上的铺放点处法方向与机床坐标系 Z 轴平行。若法向量为 $n = (x_n, y_n, z_n)$,即保证铺放过程中 $n = (0, 0, 1)$ 。如图 7 所示,设主轴按逆时针方向转动,当铺放至点 $P(x_P, y_P, z_P)$ 时,主轴旋转角度为 θ ,则点 P 在极坐标系中表示为 $(\rho(\theta), \theta)$,在截面内点 P 切向向量为 τ ,法向向量

为 n 。由于 $\theta = \langle n, x \rangle$,则该角度满足如下关系:

$$\tan \theta = \frac{\rho(\delta) \sin \delta - \rho'(\delta) \cos \delta}{\rho(\delta) \cos \delta + \rho'(\delta) \sin \delta} \quad (3)$$

式中: δ 为 OP 连线与极坐标 x 轴的夹角。

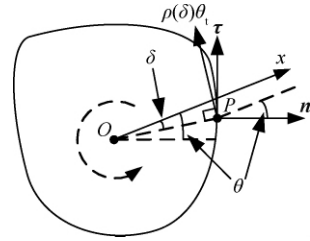


图 7 旋转角度 θ 后芯模截面

Fig. 7 Section view of mould with rotation angle of θ

设铺放角即铺放轨迹与轴线所成角度为 α ,点 P 在铺放轨迹上的切向即铺放方向为 F ,则 $F \cdot (1, 0, 0) = \cos \alpha$ 。又 $F \cdot n = 0$,求得 $F = (\cos \alpha, \sin \alpha, 0)$ 。则 $n \times F = (-\sin \alpha, \cos \alpha, 0)$,又 $n \times F$ 指向方向为压辊轴线方向,即平行于 \bar{o} ,求得 $\theta_4 = \alpha$ 。

铺放开始时,即 $\theta = 0$ 时,铺放点对应的 $\delta = \delta_0$,则

$$\frac{\rho(\delta_0) \sin \delta_0 - \rho'(\delta_0) \cos \delta_0}{\rho(\delta_0) \cos \delta_0 + \rho'(\delta_0) \sin \delta_0} = 0 \quad (4)$$

设铺放起始处截面与穿轴线的交点为原点,则铺放起始点坐标为 $(0, -\rho(\delta_0) \sin \delta_0, \rho(\delta_0) \cos \delta_0)$ 。根据几何特征,可求得主轴旋转角度 θ 后铺带头原点在基坐标系 0 中的坐标,即点 $P(x_P, y_P, z_P)$:

$$\begin{cases} x_P = \cot \alpha \int_{\delta_0}^{\delta} \sqrt{\rho(\gamma)^2 + \rho'(\gamma)^2} d\gamma \\ y_P = \rho(\delta) \sin(\theta - \delta) \\ z_P = -\rho(\delta) \cos(\theta - \delta) \end{cases} \quad (5)$$

可得如下各关节变量的解:

$$\begin{cases} d_1 = -\cot \alpha \int_{\delta_0}^{\delta} \sqrt{\rho(\gamma)^2 + \rho'(\gamma)^2} d\gamma - l_5 \cos \alpha \\ d_2 = -\rho(\delta) \cos(\theta - \delta) \\ d_3 = -\rho(\delta) \sin(\theta - \delta) - l_5 \sin \alpha \end{cases} \quad (6)$$

2.3 运动特性分析

为了保证铺放过程中工艺参数的稳定性,应保持铺放速度的稳定,铺放速度即铺放头相对于模具的运动速度。因此,铺放方案的第 2 原则是:

保证预浸带在模具的铺放速度的始终恒定。

设芯模角速度即主轴角速度为 θ_t ，铺放速度为 v ，则如图 7 所示，芯模上点 P 线速度为 $\rho(\delta)\theta_t$ ，方向与水平方向夹角为 $\theta - \delta$ 。将各平动轴运动与芯模运动分解至 3 个轴向，得到以下关系：

$$\begin{cases} -\frac{dd_1}{dt} = v \cos \alpha \\ -\frac{dd_2}{dt} = \rho(\delta)\theta_t \sin(\theta - \delta) \\ \frac{dd_3}{dt} + \rho(\delta)\theta_t \cos(\theta - \delta) = v \sin \alpha \end{cases} \quad (7)$$

式中： $\frac{dd_1}{dt}$ 、 $\frac{dd_2}{dt}$ 和 $\frac{dd_3}{dt}$ 分别为杆件 1、杆件 2 和杆件 3 的运动速度，将式(3)和式(7)联立，得：

$$\begin{cases} \frac{dd_1}{dt} = -v \cos \alpha \\ \frac{dd_2}{dt} = [\rho'(\delta)\rho(\delta)^3 + 2\rho(\delta)\rho'(\delta)^3 - \rho(\delta)^2 \cdot \frac{\rho'(\delta)\rho''(\delta)}{[\rho(\delta)^2 + \rho'(\delta)^2]^2}] v \sin \alpha \\ \frac{dd_3}{dt} = \frac{\rho'(\delta)^4 + \rho(\delta)^3 \rho''(\delta)}{[\rho(\delta)^2 + \rho'(\delta)^2]^2} v \sin \alpha \\ \theta_t = \frac{\rho(\delta)^2 + 2\rho'(\delta)^2 - \rho(\delta)\rho''(\delta)}{[\rho(\delta)^2 + \rho'(\delta)^2]^{\frac{3}{2}}} v \sin \alpha \end{cases} \quad (8)$$

点 P 的曲率为

$$K_P = \frac{\rho(\delta)^2 + 2\rho'(\delta)^2 - \rho(\delta)\rho''(\delta)}{[\rho(\delta)^2 + \rho'(\delta)^2]^{\frac{3}{2}}} \quad (9)$$

则 $\theta_t = K_P v \sin \alpha$ ，芯模的角加速度为

$$\begin{aligned} \beta = \frac{d\theta_t}{dt} = & [-\rho^3(\delta)\rho'(\delta) - \rho^3(\delta)\rho'''(\delta) + \\ & 3\rho^2(\delta)\rho'(\delta)\rho''(\delta) - 4\rho(\delta)\rho'^3(\delta) - \rho(\delta) \cdot \\ & \rho'^2(\delta)\rho''(\delta) + 3\rho(\delta)\rho'(\delta)\rho''^2(\delta) - 3\rho'^3(\delta) \cdot \\ & \rho''(\delta)] v^2 \sin^2 \alpha / [\rho(\delta)^2 + \rho'(\delta)^2]^3 \quad (10) \end{aligned}$$

为方便表达，记 $f(\delta)$ 使得 $\beta = f(\delta)v^2 \sin^2 \alpha$ 。

3 方案分析

3.1 机构与控制

从自动铺带机机构上来看，3P-1R 的铺带机机械手臂通常用于制造平板和筒形构件，而面向柱面结构的四轴联动成形方案的提出，扩展了自动铺带机的应用范围。从自动铺带机控制上来

看，采用四轴联动柱面铺放成形方案，在同一铺层的铺放过程中， C 轴无需参与插补转动。若铺放速度恒定为 v ，铺放角度为 α ，则 X 轴以 $-v \cos \alpha$ 匀速平移，而 Y 轴、 Z 轴和主轴变速运行，速度大小与 δ 的取值有关。

因此，本方案仅有 3 个平动轴和 1 个芯模转动轴共 4 轴参与插补，能够用相对简单的方法完成柱面的铺放成形。

3.2 铺放速度

在同一铺层的铺放过程中， C 轴始终静止，因此主轴的惯量是控制过程中的主要考虑因素。若截面 $\rho = \rho(\delta)$ 的最大曲率为 K_{\max} ，则主轴对应的最大角速度为 $\theta_{t,\max} = K_{\max} v \sin \alpha$ 。若主轴转速上限为 n_{\max} ，则 $2\pi n_{\max} \geq \theta_{t,\max}$ ，则 $v \leq \frac{2\pi n_{\max}}{(K_{\max} \sin \alpha)}$ 。

若主轴转动惯量为 J ，主轴转矩为 $M = J \cdot \beta$ ，主轴电机最大负载转动惯量为 M_{\max} ，则 $M_{\max} \geq$

$$J \cdot \beta, v \leq \frac{\sqrt{\frac{M_{\max}}{f(\delta)}}}{\sin \alpha}。$$

因此，综合考虑主轴性能，即主轴电机的转速上限和最大负载转动惯量，铺放速度 v 不应超过最大铺放速度 v_{\max} ，其中

$$v_{\max} = \min \left\{ \frac{2\pi n_{\max}}{K_{\max} \sin \alpha}, \sqrt{\frac{M_{\max}}{f(\delta)}} \right\} \quad (11)$$

最大铺放速度的确定，可为铺带机机械手臂的设计提供指导，如各轴惯量的计算、电机的选用等。

3.3 成形效率

若使用 3P-2R 的五轴铺带机机械手臂，主轴能够以转速上限匀速旋转，发挥主轴的最大作用。此时，铺放一周即主轴旋转一个周期所需时间为 $T = \frac{1}{n_{\max}}$ 。若使用四轴联动铺带成形方案， K_{δ} 代表 $\rho = \rho(\delta)$ 处曲率，则主轴角速度 $\theta_t = K_{\delta} v \sin \alpha$ ，与点 P 所在位置或角度 δ 相关。则

$$\theta_t = K_{\delta} v_{\max} \sin \alpha \leq \frac{2\pi n_{\max} K_{\delta}}{K_{\max}} \quad (12)$$

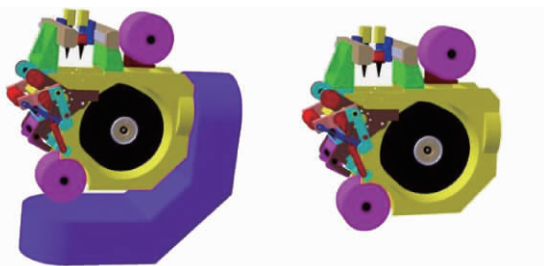
则使用四轴联动铺带成形方案铺放一周所需时间为

$$T' = \int_0^{2\pi} \frac{d\theta}{\theta_t} = \int_{\delta_0}^{2\pi+\delta_0} \frac{d\delta}{\theta_t} = \int_0^{2\pi} \frac{d\delta}{\theta_t} \geq \int_0^{2\pi} \frac{K_{\max} d\delta}{2\pi n_{\max} K_{\delta}} \geq T \quad (13)$$

因此,在四轴联动成形铺放过程中,主轴无法发挥其最大转速,铺放效率低于五轴联动铺带。

3.4 方案可行性分析

使用 3P-1R 的铺带机械手臂,与普通的机械手臂相比省去了一个轴。这不仅降低了机构在设计上的复杂程度,还节约了铺带机的制造成本。轴数的减小,降低了铺带头组件整体(如图 8 所示)的转动惯量,这大大减轻了 X、Y 和 Z 轴的驱动负担,降低了对各轴电机的功率要求。为了实现多轴间的插补,各轴往往使用成本较高的伺服电机控制,采用四轴联动成形可省去一个 A 轴电机,这同样也节约了成本。



(a) Head component with A axis (b) Head component without A axis

图 8 带 A 轴和不带 A 轴的铺带头组件对比

Fig 8 Contrast between ATL head component with A axis and one without A axis

一般的多轴铺带机控制系统需采用 SINUMERIK 840D、FANUC 等数控系统,均属国外高端数控产品,成本昂贵。在 X、Y、Z 和 C 4 轴控制的基础上,虽然仅增加一个 A 轴的转动控制,但控制系统成本将大幅上升。而且,轴数的增多会增加编程与控制的难度。另外,四轴联动机床的控制软件属非受控产品,可直接从国外进口。

因此,本方案的提出不仅扩展了四轴联动铺带机的应用范围、降低了铺带机制造成本,还规避了发达国家对五轴联动机床数控系统禁运的障碍。

4 仿真与实验验证

为了验证提出的面向柱面结构的自动铺带四轴联动成形方案,根据上述基于 D-H 法建模得出的各轴运动关节量以及铺带轨迹规划信息,利用 CATIA 的 DMU 运动机构模块进行柱面四轴联动铺带成形方案可视化仿真^[18]。

验证方案的旋转芯模截面为一椭圆,其尺寸如图 9 所示。若铺放速度 $v=500$ mm/s,铺放角度(铺放轨迹切向与芯模装夹轴所成夹角) $\alpha=45^\circ$,铺放时除 X 轴是匀速运动外,其他各关节位置随时间变化,如图 10 所示(主轴旋转 360°)。

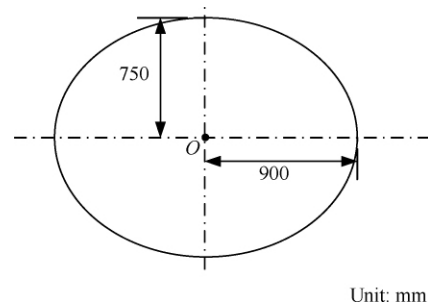


图 9 芯模截面尺寸

Fig 9 Mandrel sectional dimension of mould

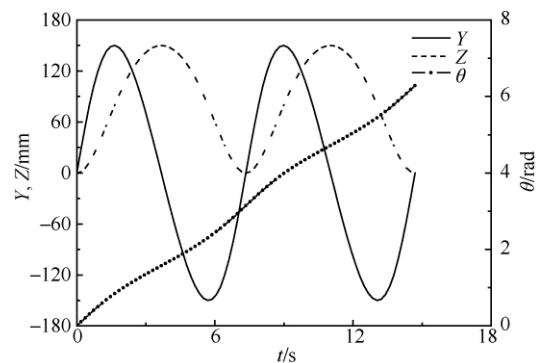


图 10 各关节位置与时间的关系

Fig 10 Relationship between positions of joints and time

图 11 给出了以四轴联动方案分别进行 45° 和 90° 铺带的仿真模拟效果,并使用 CATIA“距离和区域分析功能”监视铺带头与模具之间的关系。在整个动态仿真过程中,压辊与模具表面之间的最小与最大距离一直维持在零点不变,表明各轴联动控制下的铺带头压辊能始终贴合于模具表

面。选取铺放轨迹点,比较各点在曲面上的法线方向与该时刻铺放头压力线方向,表明两者之间为平行关系;检查铺放头坐标原点与预设轨迹线之间的距离,表明逆运动学解正确合理,能够实现固定铺放角度的铺带成形。

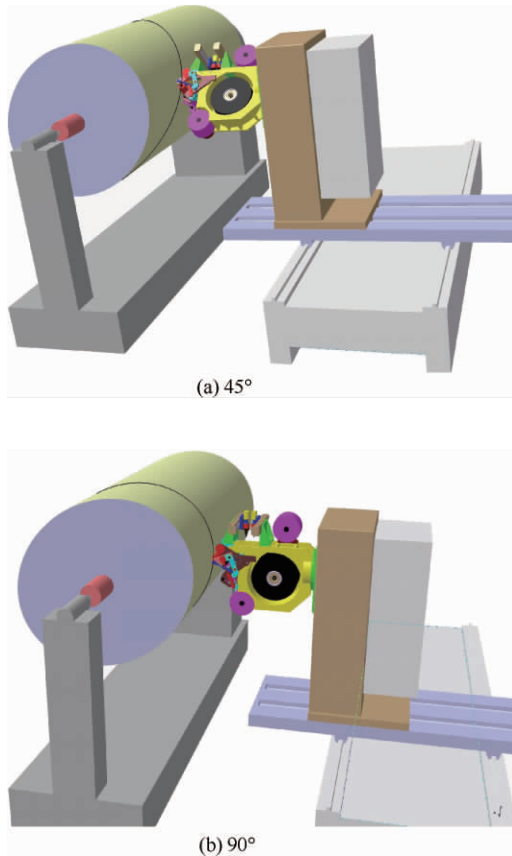


图 11 45°与 90°的四轴联动铺带方案仿真

Fig. 11 Simulation with 4-axis ATL machine in placement angles of 45° and 90°

最后,以仿真为基础,在芯模为椭圆柱面的五轴卧式自动铺带机上进行了铺放实验。为安全起见,实际铺放速度 $v=250$ mm/s,铺放温度为 25 °C,铺放压力为 230 N,预浸带为碳纤维/环氧体系(603 高温环氧树脂基体,航天材料及工艺研究所提供)、宽度为 150 mm。铺放过程中,将卧式铺带机的俯仰轴 A 轴始终保持静止,采用四轴联动铺放方案进行铺放实验,实现了正常的铺放功能(见图 12)。铺放后预浸带表面平整、无褶皱、无气泡,相邻预浸带间无间隙、无重叠,铺放效果良好。综上,仿真和实验证明了铺放方案规划的

合理性正确性。

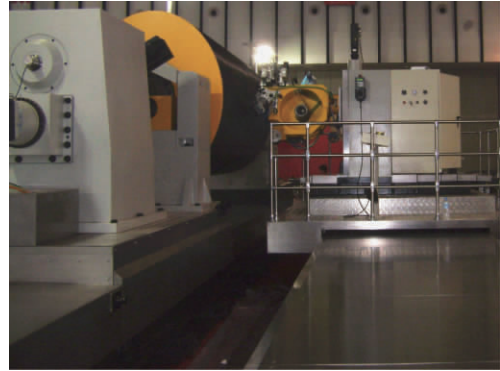


图 12 四轴联动自动铺带方案实验

Fig. 12 Experiment of 4-axis ATL scheme

5 结 论

1) 本文基于柱面的结构特点,提出面向柱面结构的自动铺带四轴联动成形方案,在逆运动学解的基础上,对铺带系统进行了运动学分析,着重考察了主轴的运动状态。

2) 从机构与控制、铺放速度、成形效率和方案可行性 4 个方面,对四轴联动铺带方案进行了论证:当四轴铺带机的最大允许铺放速度大于理想工艺的铺放速度,且成形效率要求不高的小批量实验或生产情况下,可应用该方案进行柱面结构的成形。

3) 根据逆运动学解,分析了各关节位置与时间的关系,运用 CATIA 的 DMU 运动机构模块对方案进行了可视化仿真,并使用自动铺带机进行了铺放验证,证明了方案的合理性。

4) 面向柱面结构的自动铺带四轴联动成形方案的提出,不仅扩展了 3P-1R 铺带机机械手臂的应用范围,还简化了机构、降低了设计和控制难度,并节约了铺带机制造成本,为自动铺带成形与设备研究提供了新思路。

参 考 文 献

- [1] Xiao J, Li Y, Li J L. Application of automatic fiber placement in manufacture of composite structures in large aircraft. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2008(1): 50-53. (in Chinese)

肖军, 李勇, 李建龙. 自动铺放技术在大型飞机复合材料构件制造中的应用. *航空制造技术*, 2008(1): 50-53.

- [2] Brailsford B. Advanced fiber placement program for aircraft structures. Proceedings of the 10th ASME/ESD Advanced Composites Conference, Dearborn; ASM International (USA), 1994: 299-302.
- [3] Falchi A, Greffioz A, Ginbach E. Automatic laying of unidirectional prepreg tapes on compound surfaces. European Conference on Composite Materials, 1990: 135-140.
- [4] Someya Y, Ito T, Mizuno H, et al. Low cost towpreg for automated fiber placement. SAMPE Journal, 2004, 40 (2): 66-69.
- [5] Gutowski T P G. Advanced composites manufacturing. New York: John Wiley & Sons, 1997: 32-83.
- [6] Wang T Y, Liang X Z, Yang J J. Typical apparatus of automated tape laying/fiber placement for composite aircraft components. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008 (4): 42-45. (in Chinese)
王天玉, 梁宪珠, 杨进军. 飞机复合材料构件自动铺带/丝束铺放典型设备. 航空制造技术, 2008 (4): 42-45.
- [7] Zhang J B, Xiao J, Wen L W, et al. Research progress of automated tape-laying technology. Journal of Materials Engineering, 2010 (7): 87-91. (in Chinese)
张建宝, 肖军, 文立伟, 等. 自动铺带技术研究进展. 材料工程, 2010 (7): 87-91.
- [8] Wen L W, Zhang J B, Xiao J, et al. ATL technology for large cylinder production. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(12): 2456-2461. (in Chinese)
文立伟, 张建宝, 肖军, 等. 大型筒段构件自动铺带成型技术研究. 航空学报, 2009, 30(12): 2456-2461.
- [9] Qi J W, Li A R, Huang Z J, et al. Research on the tape laying technologic parameters. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2011 (4): 46-50. (in Chinese)
齐俊伟, 李安然, 黄志军, 等. 关于若干工艺参数对铺带质量影响的研究. 玻璃钢/复合材料, 2011 (4): 46-50.
- [10] Zhao Z L, Wang X F, Wen L W, et al. Configuration improvement of ATL mechanism applied to hyperbolic surface. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32 (6): 1132-1138. (in Chinese)
赵增林, 王显峰, 文立伟, 等. 双曲面自动铺带机床的构型改进. 航空学报, 2011, 32 (6): 1132-1138.
- [11] Zhang J B, Wen L W, Xiao J, et al. Processing pressure control technique for automatic tape laying. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(10): 1973-1977. (in Chinese)
张建宝, 文立伟, 肖军, 等. 自动铺带成型压力控制技术. 航空学报, 2009, 30(10): 1973-1977.
- [12] Department of Mathematics of Tongji University. Higher mathematics, 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2002: 314-315. (in Chinese)
同济大学数学系. 高等数学. 第四版. 北京: 高等教育出版社, 2002: 314-315.
- [13] Shinno N, Shigematsu T. Method for controlling tape of fixing direction of automatic tape affixing apparatus: USA, 5041179. 1991-08-20.
- [14] Hu C L, Xiao J, Li Y, et al. Study on automated tape-laying technique for composites Part I: natural path property analysis and calculation method. Aerospace Materials & Technology, 2007 (1): 40-44. (in Chinese)
胡翠玲, 肖军, 李勇, 等. 复合材料自动铺带技术研究(I)——“自然路径”特性分析及算法. 宇航材料工艺, 2007 (1): 40-44.
- [15] Denavit J, Hartenberg R S. A kinematic notation for lower pair mechanisms based matrices. ASME Journal of Applied Mechanics, 1955, 22(2): 215-221.
- [16] Saeed B N. Introduction to robotics: analysis, systems, applications. Sun F C, Zhu J H, Liu G D, translated. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004: 32-58. (in Chinese)
Saeed B N. 机器人学导论: 分析、系统及应用. 孙富春, 朱纪洪, 刘国栋, 译. 北京: 电子工业出版社, 2004: 32-58.
- [17] Ye J. Research on automated tape-laying CAM technology for composites. Nanjing: College of Material Science & Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009. (in Chinese)
叶进. 复合材料自动铺带 CAM 技术研究. 南京: 南京航空航天大学材料科学与技术学院, 2009.
- [18] Gao X H, Wang Z M, Wang J X, et al. Analysis & simulation and digital mockup-application of CATIA V5 in engineering. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 167-207. (in Chinese)
高秀华, 王智明, 王继新, 等. 工程分析及电子样机模拟——CATIA V5 在工程实践中的应用. 北京: 化学工业出版社, 2004: 167-207.

作者简介:

李俊斐 男, 博士研究生。主要研究方向: 复合材料自动铺放 CAD/CAM 技术。

Tel: 025-84892980

E-mail: lijunfei@nuaa.edu.cn

王显峰 男, 博士, 副教授。主要研究方向: 复合材料成型、铺放轨迹控制。

Tel: 025-84892980-805

E-mail: wangxf@nuaa.edu.cn

肖军 男, 硕士, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 先进复合材料设计、制造及自动化装备技术。

Tel: 025-84892980-801

E-mail: j.xiao@nuaa.edu.cn

Research on Four-axis Simultaneous Motion Controlled Automated Tape Laying for Cylindrical Structures

LI Junfei, WANG Xianfeng, XIAO Jun^{*}, XIAO Jian, FANG Yiwu

College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

Abstract: In this paper, the features of cylindrical structures are analyzed, and then a scheme of 4-axis simultaneous motion controlled automated tape laying (ATL) manufacturing is advanced for them. Furthermore, the scheme is illustrated in the model of a horizontal ATL machine. By the D-H method, the paper proposes a method to calculate the feed amount of the joints during the manufacturing process of cylindrical components when the trajectory path is designed by the fixed angle method. The solution is made observing two principles: to guarantee that the pressure direction of the ATL head is parallel to the normal direction of the molding surface in the tape laying place, and to guarantee the tape is laid in a constant tape laying rate. In addition, the scheme is examined in detail in terms of system and controlling, tape laying rate, manufacture efficiency and feasibility. According to reverse kinematics, the scheme is further discussed by kinematic analysis, visual simulation and experiment trials. Finally, the conclusion is made that the low-cost 4-axis simultaneous motion controlled ATL manufacturing method can be applied to manufacturing composite components in cylindrical structures in experiments and small-scale production where requirement for production rate is not demanding.

Key words: composite materials; automated tape laying; cylindrical structure; 4-axis simultaneous motion; reverse kinematics

Received: 2012-06-01; Revised: 2012-06-28; Accepted: 2012-08-02; Published online: 2012-08-16 08:57

URL: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20120816.0857.001.html

Foundation items: National Natural Science Foundation of China(50905088); National Science and Technology Major Project(2010ZX04016-013); The Fundamental Research Funds for the Central Universities(NS2012112)

^{*} Corresponding author. Tel.: 025-84892980 E-mail: j.xiao@nuaa.edu.cn