

# 纤维张力对复合材料管道缠绕轨迹影响分析

田建德<sup>1</sup>, 刘保全<sup>1</sup>, 马美琴<sup>1</sup>, 张剑<sup>2\*</sup>

(1. 衡橡科技股份有限公司, 河北 053000; 2. 哈尔滨理工大学自动化学院, 哈尔滨 150080)

**摘要:**为实现复合材料管道纤维缠绕优质成型,纤维张力起关键作用,其张力波动的程度直接影响复合材料管道成型的性能。为减小缠绕过程中张力大小差异,规划缠绕轨迹时需考虑纤维张力的影响,提出在机械臂末端增添预设张力负载的方法规划缠绕轨迹。建立六自由度机械臂缠绕模型,用 MATLAB 对机械臂的缠绕轨迹进行设计,通过建立 MATLAB 与 ADAMS 的联合仿真平台,对有无张力负载下的机械臂末端质心位移曲线进行仿真分析,并搭建张力控制实验平台,进行机械臂末端有无张力负载复合材料管道的纤维缠绕实验,实验表明有张力负载下规划的缠绕轨迹能有效抑制缠绕过程中张力的波动程度。

**关键词:**纤维张力; 复合材料管道; 缠绕轨迹; 机械臂; 仿真分析

**中图分类号:** TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0999(2018)02-0041-06

## 1 引言

与传统材料相比,复合材料管道具有质量轻、强度高、耐腐蚀、不易结垢和表面光滑等显著优点,在化工、石油和水处理等各领域被广泛应用<sup>[1]</sup>。玻璃钢管道的成型技术通常是把纤维浸渍树脂后沿预先规划好的轨迹缠绕在定长芯模上,这种方法能更好地发挥玻璃纤维的优点<sup>[2]</sup>。现有的缠绕轨迹大多是根据所需缠绕线形进行设计的,未考虑张力对缠绕轨迹的影响,而在缠绕过程中张力的变化容易导致“内松外紧”或者滑线等现象<sup>[3]</sup>,所以在设计缠绕轨迹时考虑到张力的影响是提高管道质量的重要方式。

目前,在缠绕轨迹设计方面国际上已有多个设计 CAD 软件,但大部分软件只能设计简单的轴对称管件,非轴对称管件只有比利时 Leuven 大学的 CAD-WIND<sup>[4]</sup>和英国 Nottingham 大学的 CADFIL<sup>[5]</sup>两个软件能够设计,而比利时 Leuven 天主教大学研发了一台 PUMA-726 缠绕机器人,并用超声波进行质量检验,采用三角片逼近的方法设计轨迹<sup>[6]</sup>,这种近似方法设计出的纤维轨迹是否稳定和能否均匀覆盖弯管需要开机试缠才能检验,这其实是一种尝试和修正方法。加拿大 Ottawa 大学机械工程系的 Bernard、Fahim 和 Munro 虽然也研制出了用于纤维缠绕的软件<sup>[7]</sup>,但只能缠绕“T”形管。在理论上,此方法是可行的,但却分割了芯模整体。这些 CAD/CAM 软件均未考

虑张力对缠绕轨迹的影响,无法对提高产品性能起到实质性作用,而且它们的价格较高,不能有效地在玻璃钢管道制造行业里进行推广。国内对于复合材料缠绕轨迹设计的研究开展时间不长,起步较低。哈工大、西安复合材料研究所等单位虽在精密张力控制方面进行了大量研究,并取得阶段性进步<sup>[8]</sup>,但与发达国家仍有较大的差距,主要在于:高性能纤维缠绕制品所需缠绕技术水平较低,国外的 CAD/CAM 软件价格昂贵,而我国有自主知识产权的 CAD/CAM 软件很少,所以无法对高性能缠绕制品的缠绕轨迹进行精确设计<sup>[9]</sup>。

针对以上不足,本文对缠绕过程中的张力变化进行分析<sup>[10]</sup>,考虑到张力对缠绕轨迹影响的空间性,采用六自由度机械臂进行缠绕,建立机械臂运动数学模型<sup>[11]</sup>,设计机械臂的缠绕轨迹,通过 MATLAB 与 ADAMS 的联合仿真平台<sup>[12,13]</sup>,对机械臂末端有无张力负载的缠绕轨迹进行仿真,分析出不同的末端位移综合曲线下缠绕张力的波动程度,进行机械臂末端有无张力负载的管道缠绕实验,验证在有张力负载下规划的缠绕轨迹进行复合材料管道缠绕过程中,是否出现滑纱、断纱、压纱及纱线松弛等现象。

## 2 复合材料管道缠绕张力分析

在复合材料管道成型过程中,为了使张力满足

收稿日期: 2017-03-14

作者简介: 田建德 (1972-), 男, 高级工程师, 主要从事化工机械方面的研究。

通讯作者: 张剑 (1993-), 男, 研究生, 主要从事机器人应用、复合材料成型张力控制优化方面的研究, 1063548627@qq.com。

工艺要求,必须有摩擦力或阻力施加于复合材料上。摩擦力和阻力产生可分为两种情况:一种是在缠绕过程中在缠绕材料表面设置摩擦辊或皮带,在缠绕过程中随着芯模的旋转,摩擦辊或皮带与复合材料产生摩擦力,进而在复合材料上形成张力,在这种情况下缠绕材料上的张力不随纱团半径的变化而变化,系统结构简单,但针对不同复合材料的性质差异,在一些材料上摩擦辊对材料表面施加的正压力和摩擦力不适用;另一种情况是对开卷辊施加阻力矩,在开卷辊放线时在卷辊中心轴添加产生阻力矩的装置,此种情况在缠绕过程中如果阻力矩保持不变,复合材料上的张力会随卷辊半径变化而变化,此种方式虽然复杂,但由于对不同性质的材料均适用,所以得到广泛的使用,目前大部分缠绕机的张力控制系统都采用该方式。

在缠绕过程中由于同一纤维上的张力处处相等,所以以开卷辊侧张力作为研究对象,根据力矩平衡原理推导出力矩方程:

$$J\dot{\omega} + J\dot{\omega} + F_0R + M_0 + M_f = M \quad (1)$$

其中: $J$ 为纱团当前的转动惯量; $F_0$ 为预设纱线张力; $M_0$ 为干纱摩擦力矩; $M$ 为控制力矩; $\omega$ 为卷轴角速度; $R$ 为纱团实际半径; $M_f$ 为粘性摩擦力矩。

从力矩方程可以看出,在缠绕过程中张力受到多个变量影响,系统是时变系统。因为纱团的瞬时转动惯量变化较小,所以 $J\dot{\omega}$ 对张力的影响可忽略不计<sup>[14]</sup>。

方程(1)可化简为:

$$J\dot{\omega} = M - F_0R - M_0 - M_f \quad (2)$$

从方程(2)可以得出,纤维张力主要受到纱团角速度和纱团半径的影响,纱团的当前转动惯量也随着纱团半径的变化而变化,纱团转动惯量与纱团半径之间的关系为:

$$J = J_s + \frac{\pi B\rho}{2}(R^4 - R_{\min}^4) \quad (3)$$

其中: $J_s$ 为卷轴当前转动惯量; $B$ 为纱线宽度; $\rho$ 为纱线密度; $R_{\min}$ 为纱团最小半径。

纱团半径与纱线厚度及纱团的转角关系为:

$$R = R_{\max} - \frac{\delta}{2\pi}\theta \quad (4)$$

其中: $R_{\max}$ 为纱团最大半径; $\delta$ 为纱线厚度; $\theta$ 为纱团旋转角度。

纱线速度与卷轴角速度的关系为:

$$v = R\omega \quad (5)$$

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (6)$$

对式(4)求导,代入式(2)得:

$$\frac{d^2R}{dt^2} = -\frac{\delta}{2\pi J}(M - M_f - M_0 - F_0R) \quad (7)$$

综合以上公式可以推导出 $R$ 与 $t$ 的关系,将运动学公式 $\frac{d^2R}{dt^2} = \frac{v}{R^2}$ 代入式(7)得:

$$M - M_f - M_0 - F_0R = J \frac{v}{R^2} \quad (8)$$

由于 $M_f$ 与 $M_0$ 很小,可以忽略不计,故式(8)可以化简为:

$$F_0 = \frac{2M - \pi B\rho v R^2}{2R} \quad (9)$$

式(9)即为缠绕过程中纤维张力与各参数的关系。

### 3 机械臂数学模型建立及运动学方程解算

#### 3.1 数学模型建立

机械臂的运动主要依赖于运动学的控制,运动精度主要取决于运动学数学模型的选择。本文选用的六自由度机械臂以日本的 MotoMan 机器人为原型<sup>[15]</sup>,采用经典的 D-H 表示法建立数学模型,其基本原理是提出一种在连杆和关节配套结构中每一连杆建立局部坐标系的矩阵方法,对相邻两个连杆 $i$ 和 $i-1$ 的空间几何关系用 $4 \times 4$ 的齐次变换矩阵进行描述,从而推导出机械臂末端局部坐标系相对于参考坐标系的空间位置和姿态关系。

MotoMan 机器人是具有六个自由度的空间机构,包括六个转动关节和六个连杆。第一个转动关节与地面之间的部分称为基座,基座与连杆1通过转动关节1相连,连杆1与连杆2通过转动关节2相连,以此类推。采用 D-H 表示法对机械臂进行建模<sup>[16]</sup>,坐标系如图1所示。

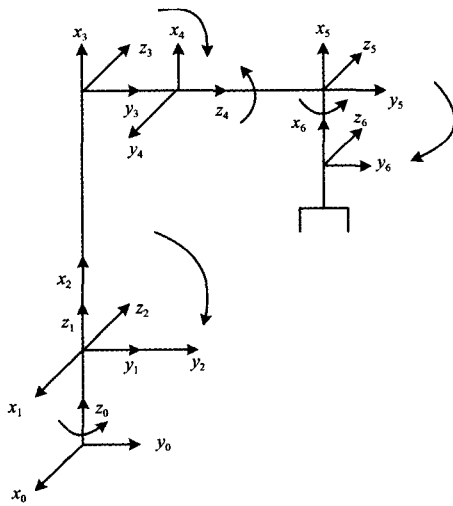


图1 机械臂坐标系

Fig. 1 Robotic arm coordinate system

机械臂六个转动关节的转角分别为  $\theta_1 \sim \theta_6$ , 六个连杆的长度分别为  $a_1 \sim a_6$ , 确定了连杆坐标系后, 可根据坐标变换公式(10)推导出坐标系  $i$  与  $i-1$  之间的坐标变换矩阵:

$$T_i^{i-1} = \begin{bmatrix} c_i & -s_i & 0 & a_{i-1} \\ s_i c(\alpha_{i-1}) & c_i c(\alpha_{i-1}) & -s(\alpha_{i-1}) & -a_i s(\alpha_{i-1}) \\ s_i s(\alpha_{i-1}) & c_i s(\alpha_{i-1}) & c(\alpha_{i-1}) & a_i c(\alpha_{i-1}) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中:  $c_i = \cos\theta_i$

$s_i = \sin\theta_i \quad i=1, 2, \dots, n$

将各关节参数代入式(10)得到相邻坐标系之间的变换矩阵如下:

$$T_2^1 = \begin{bmatrix} c_1 c_2 & -c_1 s_2 & s_1 & c_1 \\ s_1 c_2 & -s_1 s_2 & -c_1 & a_1 s_1 \\ -s_2 & -c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_3^2 = \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & a_2 \\ s_3 & c_3 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_4^3 = \begin{bmatrix} c_4 & -s_4 & 0 & a_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -s_4 & -c_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_5^4 = \begin{bmatrix} c_4 c_5 & -c_4 s_5 & s_4 & 0 \\ s_5 & c_5 & 0 & a_4 \\ -s_4 c_5 & s_4 s_5 & c_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_6^5 = \begin{bmatrix} c_6 & -s_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ s_6 & c_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

### 3.2 运动学方程解算

运动学方程分为运动学正解和运动学逆解两部分, 运动学正解是通过已知的各关节运动参数变量  $\theta_1 \sim \theta_6$ , 求解机器人末端相对于参考坐标系的位置和姿态; 运动学逆解是通过已给定的满足工作要求的机器人末端相对于参考坐标系的位置和姿态, 求解各关节的运动参数  $\theta_1 \sim \theta_6$ 。

将相邻坐标系之间的变换矩阵相乘, 可得到坐标系  $n$  相对于坐标系 1 的变换矩阵:

$$T_6^1 = T_2^1 T_3^2 T_4^3 T_5^4 T_6^5 \quad (12)$$

公式(12)是包含所有关节变量的函数, 对各个关节赋值后即可推导出连杆 6 的位置和姿态。由公式(12)即可得到运动学正解:

$$T_6^1 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

运动学逆解与正解是相反的解算过程, 将公式(13)两边同乘  $(T_2^1)^{-1}$  得:

$$(T_2^1)^{-1} T_6^1 = T_3^2 T_4^3 T_5^4 T_6^5 \quad (14)$$

即:

$$\begin{bmatrix} c_1 c_2 & s_1 c_2 & 0 & 0 \\ -c_1 s_2 & -s_1 s_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = T_3^2 T_4^3 T_5^4 T_6^5 \quad (15)$$

令公式(15)等号两边各个元素分别相等, 即可求出第一个转动关节的转角  $\theta_1$ , 同理可得其余各转动关节转角  $\theta_2 \sim \theta_6$ 。

## 4 机械臂仿真模型的建立及末端轨迹规划

### 4.1 模型的建立

机械臂由基座、六个转动关节和六个连杆组成。根据确立的坐标系建立仿真模型。

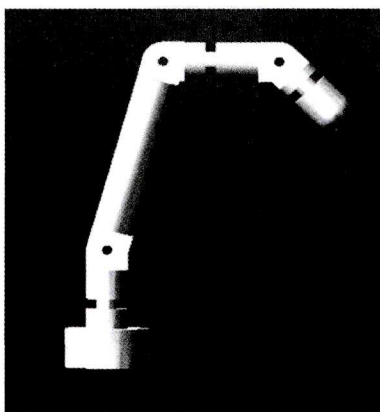


图2 机械臂仿真模型  
Fig. 2 Robotarm simulation model

如图2所示,固定在地面的部分是基座,基座上放置连杆1,与转动关节1相连,以此类推。连杆1、连杆3、连杆5的尺寸均为200 cm,连杆2的尺寸为800 cm,连杆4的尺寸为300 cm,连杆6的尺寸为200 cm。机械臂的全局坐标系方向与局部坐标系1相同,设立在基座上,重力方向为 $-Y$ 轴,模型采用刚性材质,最大限度地保证了模型不易发生形变。

本文设计的机械臂仿真模型是六自由度的机械结构,由基座、六个转动关节和六个连杆组成,结构十分复杂,所以采用PRO/ENGINEER Wildfire进行机械臂建模,然后把模型直接导入ADAMS中进行解算。首先根据确立的坐标系,在PRO/ENGINEER Wildfire 5.0软件中对每部分零件进行建模,局部坐标系与相应坐标系匹配,将零件保存并生成“.prt”格式的文件;然后在PRO/ENGINEER Wildfire中创建组件文件,将基座模型作为完整机械臂模型的基础导入组件文件,再将其余部分模型按连接顺序依次导入,通过PRO/ENGINEER Wildfire自带的装配功能将所有建立完成的零件模型进行装配,调节各关节角度,使装配模型与实际机械臂相匹配,将装配模型保存生成机械臂完整模型文件“model\_\_out.log.1”;最后为了便于将机械臂完整模型导入ADAMS,将模型文件“model\_\_out.log.1”保存为ADAMS能较好识别的“Parasolid”格式的副本。

#### 4.2 末端轨迹规划

本文用MATLAB软件对机械臂轨迹规划进行设计,根据前文建立的六自由度机械臂数学模型及所推导的运动学方程,首先在MATLAB中对机械臂末端添加速度函数,使机械臂末端沿 $X$ 轴方向做往复运动,然后通过坐标系的空间变换矩阵,将规划的函数方程衍生到参考坐标系,通过运动学方程对各

个关节的运动进行解算,最后对程序进行仿真运算,将运行后的仿真结果导入“.txt”文件,作为ADAMS中模型的驱动样条函数。

## 5 机械臂模型的仿真分析及实验验证

### 5.1 仿真分析

机械臂的仿真及分析是通过ADAMS与MATLAB联合仿真完成的<sup>[16]</sup>。由于用PRO/ENGINEER建立的模型在导入ADAMS后所有约束默认失效,所以需要重新对模型添加约束,方法如下:

(1)用PRO/ENGINEER Wildfire 5.0将“.x\_t”格式的六自由度机械臂模型副本导入ADAMS中,得到机械臂仿真计算平台的模型,然后设置重力方向为全局坐标系的 $-Y$ 轴方向,设置参数单位为MMKS;

(2)按Render图标使模型变为非渲染效果,在基座与连杆1相交的平面上选取中心点,建立Working Grid, $X$ 、 $Y$ 轴线选取方向与连杆1的局部坐标系方向相同,选择Joint Revolute转动副添加在中心点,使连杆1绕基座旋转,并选择Rotational Joint Motion电机副在中心点添加电机,作为旋转的驱动MOTION\_1,用同样的方法添加其余5个关节的转动副和驱动电机JOINT\_3~7、MOTION\_2~6,由于基座为绝对静止,所以还需添加固定副Joint Fixed,将基座底面中心固定在大地上即可;

(3)进行模型测试,测试模型无赘余约束,选择Interactive Simulation Controls,仿真测试得到的模型满足设计要求。

然后将MATLAB程序的仿真结果“.txt”文件导入ADAMS中,在六个转动关节的驱动电机输入样条函数,运行仿真用后处理Post Processing软件测得机械臂末端质心速度和在无张力负载条件下的位移曲线分别如图3、图4所示。

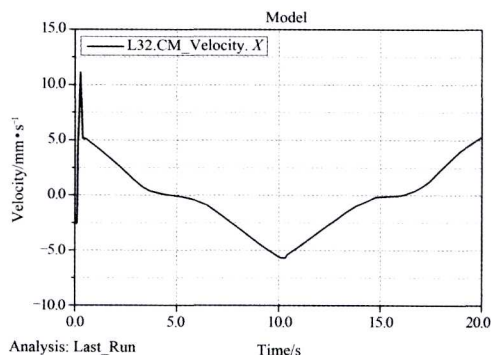


图3 末端质心速度曲线  
Fig. 3 End-centroid velocity curve

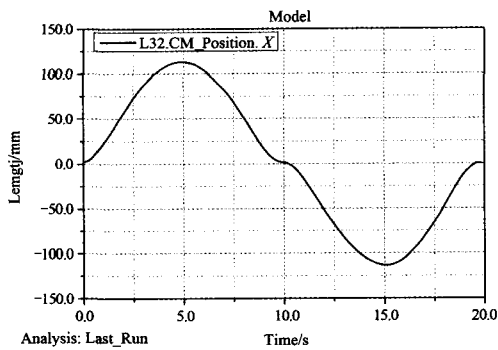


图4 无张力负载末端质心位移曲线

Fig. 4 End-central displacement curve without tension load

由图3、图4可知,机械臂在无张力负载条件下,末端质心沿 $X$ 轴方向做往复直线运动,在 $Y$ 轴和 $Z$ 轴方向无位移增量;在 $X$ 轴坐标原点处速度为最大值,从坐标原点沿 $X$ 轴正负方向速度逐渐减小至0,速度为0后机械臂做反方向运动。

将机械臂恢复到初始位置,在ADAMS中选择Applied Force,在末端添加大小为 $F_0$ 的张力,由式(9)可知缠绕中的预设纤维张力与控制力矩 $M$ 和纱团实际半径 $R$ 有关,缠绕过程中动态调整预设张力值 $F_0$ 。用测量模块测得末端质心与 $X$ 轴夹角 $\varphi$ ,由于张力与 $X$ 轴夹角与质心相同,所以张力沿 $X$ 轴方向分力为 $F_0 \cos \varphi$ ,沿 $Y$ 轴方向分力为 $F_0 \sin \varphi$ ,沿 $Z$ 轴方向分力为0。再次运行仿真,用后处理Post Processing软件测得机械臂在受到张力负载条件下以预定速度运动时末端质心沿 $XY$ 轴的综合位移曲线,如图5所示。

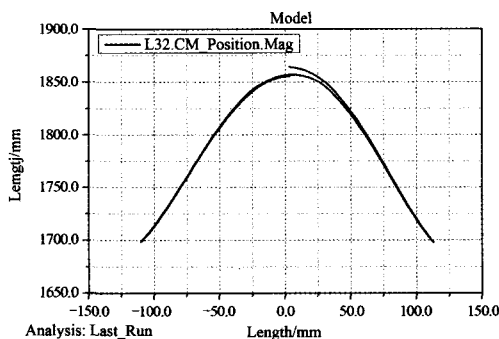


图5 有张力负载末端质心综合位移曲线

Fig. 5 Integrated displacement curve of the gravity center with tension load

由图5可知,在有张力负载的情况下,末端质心在原点处 $Y$ 轴位移增量最大,在速度为0位置 $X$ 轴方向位移受到张力分力影响向内偏移。当纤维复合材料缠绕到管道的端部,做往返运动时,通过预设纤维张力与 $X$ 轴方向分量 $F_0 \cos \varphi$ 和 $Y$ 轴方向分量 $F_0 \sin \varphi$ 对缠绕时的张力进行调整使其保持稳定,从而

保证缠绕制品松紧度一致。

通过仿真对比分析,若机械臂沿图4轨迹运动,在复合材料缠绕管道的过程中,在受张力作用时仍沿 $X$ 轴做直线往复运动,必然造成缠绕过程中的张力大小差异;反之,通过调整添加的预设纤维张力 $F_0$ ,沿图5轨迹运动,最大限度地减小了缠绕中的张力波动。

## 5.2 实验验证

为了验证所采用机械臂末端添加预设张力负载规划的缠绕轨迹,从而抑制缠绕过程中张力波动方法的可能性,搭建张力控制实验台。设定张力为5 N,实时采集缠绕过程中张力的数值,进行仿真分析。

张力波动是影响复合材料缠绕管道性能优劣的决定性因素,缠绕过程中张力不同会导致滑纱、压纱、分缝等现象。通过图6、图7的仿真对比,可明显看出有预设张力负载下的缠绕轨迹,通过添加预设张力 $F_0$ ,在 $X$ 轴和 $Y$ 轴方向分力的调整下,纤维缠绕端部和管身时,缠绕张力波动明显优于无张力负载缠绕轨迹下的张力波动。

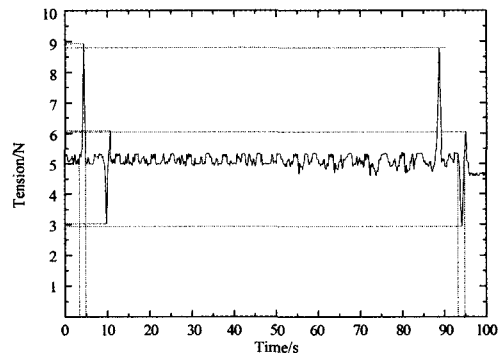


图6 无预设张力负载轨迹下的张力波动

Fig. 6 Tension fluctuation without the preset tension load trajectory

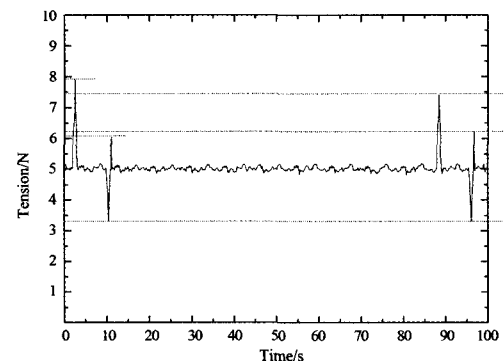


图7 有预设张力负载轨迹下的张力波动

Fig. 7 Tension fluctuation with preset tension load trajectory

在纤维缠绕复合材料管道的过程中无滑纱、压纱、断纱等现象出现。对缠绕线性进行测量,记录铺满一次制品相邻纱片之间的距离,如表1所示。由

表1可知,缠绕精度小于等于0.02 mm,满足设计要求,能够实现复合材料管道制品的稳定缠绕,进而有效增强了复合材料管道的耐磨性、抗压性、气密性等性能。因此,在规划缠绕轨迹时需考虑纤维张力的影响,本文验证了该方法的可行性。

表1 测量纱宽值

Table 1 Measure the width of the yarn

网格位置	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
纱宽/mm	15.80	15.80	15.82	15.80	15.78	15.80	15.82	15.80	15.80	15.78

## 6 结论

本文针对缠绕轨迹受纤维张力影响的问题,对缠绕过程中的张力波动变化进行了分析,采用六自由度机械臂进行缠绕的方式,建立机械臂模型并用MATLAB对机械臂的缠绕轨迹进行设计,建立MATLAB与ADAMS的联合仿真平台,对缠绕轨迹在缠绕过程中受到的张力影响进行了仿真分析,搭建张力控制实验平台,进行机械臂末端有无张力负载的复合材料管道的缠绕实验,验证了考虑纤维张力的影响设计缠绕轨迹能够抑制张力波动的有效性。缠绕过程中落纱点的精度控制在0.02 mm范围内,保证制品各处纱线的松紧一致性,从而提高复合材料管道的性能。通过仿真还可以求得各关节受力时有无张力时关节力的变化作为驱动补偿,也可以有效地提高复合材料管道的性能,这是进一步研究的方向。

### 参考文献

[1] Jhon E Green. Overview of filament winding [J]. Society for the Advancement of Material and Processing Engineering (SAMPE)

- Journal, 2011, 37(1): 7-11.
- [2] 何江华. 玻璃钢缠绕机控制系统设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2009.
- [3] 杨金纯, 陈利, 李嘉禄. 干纱缠绕圆柱壳体, 缠绕张力[J]. 天津工业大学学报, 2006(6): 1-4.
- [4] Mertiny P, Ellyin F. Influence of the filamentwinding tension on physical and mechanical properties of reinforced composites [J]. Composites Part A Applied Science & Manufacturing, 2002, 33(12): 1615-1622.
- [5] Béakou A, Mohamed A. Influence of variable scattering on the optimum winding angle of cylindrical laminated composites[J]. Composite Structures, 2001, 53(3): 287-293.
- [6] 于舒春, 何昆鹏, 魏延辉. 基于同构RBF网络的视差图像分治重建[J]. 计算机工程, 2010(24): 139-141.
- [7] 史耀耀, 阎龙, 杨开平. 先进复合材料带缠绕、带铺放成型技术[J]. 航空制造技术, 2010(17): 32-36.
- [8] 还大军. 复合材料自动铺放CAD/CAM关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- [9] 谢霞, 邱冠雄, 姜亚明. 纤维缠绕技术的发展及研究现状[J]. 天津工业大学学报, 2004(6): 19-22, 29.
- [10] 王春香, 付云忠, 杨汝清, 等. 纤维缠绕过程中的张力分析[J]. 复合材料学报, 2002(3): 120-123.
- [11] 王巍, 梁涛, 刘中文, 等. 柔性装配制孔设备运动学分析及仿真研究[J]. 航空科学技术, 2012(3): 71-74.
- [12] Meng C, Liang G. The dynamics simulation analysis of automotive air suspension and control system based on Adams and Matlab[J]. 2013.
- [13] 孙铭. 基于MATLAB和ADAMS的机械臂的轨迹规划与协调控制[D]. 北京: 北京化工大学, 2015.
- [14] 巫瑞. 纤维铺缠设备中张力控制器及张力测试台研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- [15] 何立婷. Motoman HP6机器人系统动力学分析[D]. 北京: 北方工业大学, 2009.
- [16] 李宪华, 郭永存, 张军, 等. 模块化六自由度机械臂逆运动学解算与验证[J]. 农业机械学报, 2013(4): 246-251.

## FIBER TENSION ON THE ANALYSIS OF COMPOSITE WINDING TRACK

TIAN Jian-de<sup>1</sup>, LIU Bao-quan<sup>1</sup>, MA Mei-qin<sup>1</sup>, ZHANG Jian<sup>2\*</sup>

(1. Hengshui Rubber Co., Ltd., Hebei 053000, China;

2. School of Automation, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

**Abstract:** In order to realize the high-quality formation of filament-wound composite pipes, the fiber tension plays a key role and the degree of the tension fluctuation directly affects the performance of composite pipes molding. In order to reduce the differences between the tension levels in the winding process, the impacts of the fiber tension should be taken into account when the winding trajectory is projected and the method of adding the preset tension load to the end of the manipulator ought to be proposed. Also, establishing a wound model of six freedom degrees' robotic arms and using the kinematic equations to find solutions. Meanwhile, needing to design a winding track by means of establishing a MATLAB and ADAMS cosimulation platform and the winding track affected by the tension is simulated. At the same time, it's also necessary to perform the winding experiment about the composite pipe fiber with or without tension load at the end of the mechanical arms. Finally, the simulation results suggest that the winding trajectory under the tension load can effectively restrain the fluctuation of the tension in the winding process.

**Key words:** fiber tension; composite material pipe; winding trajectory; manipulators; simulation analysis