

# 复合材料自动铺带技术 ——曲面铺带 CAM 技术

叶 进 文立伟 李 勇 肖 军

(南京航空航天大学, 南京 210016)

**摘 要** 以自行研制的 10 轴龙门式自动铺带机为研究对象, 建立铺带机的机构数学模型, 基于 D-H 法求解运动学问题; 根据数控技术原理并结合铺带机的工作特点, 制定相应的数控代码; 基于 Visual C++6.0 平台开发了曲面铺带数控代码生成系统, 具有文件读取、参数设定、指令生成等功能和友好的人机交互界面。

**关键词** 复合材料, 自动铺带, 数学模型, 运动学, 数控代码

## Automated Tape-Laying Technology for Composites —Curved Surface Tape-Laying CAM Technology

Ye Jin Wen Liwei Li Yong Xiao Jun

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

**Abstract** By taking existing 10-axis automated tape layer as research objective, configuration mathematic model was established and kinematic problems were analyzed by D-H method. Corresponding numerical control codes were defined on the basic of numerical control principle and with combination of working characteristics of tape layer. In addition, based on the visual C++6.0 platform, the numerical control codes system was developed possessing the function of file reading, parameter setting, code making and so on.

**Key words** Composites, Automated tape-laying, Mathematic model, Kinematic, Numerical control codes

### 0 引言

自动铺带技术具有生产效率高、质量好和废料率低等优点, 主要适用于各种航天器的大尺寸、小曲率部件的制造, 如翼面、壁板等<sup>[1]</sup>。自动铺带根据铺放制件的几何特征可分为平面铺带 (FTLM) 和曲面铺带 (CTL) 两类。随着自动铺带设备、编程、铺带技术以及材料工艺的进一步发展, 自动铺带的效率变得更高, 性能更可靠, 操作界面更友好。与手工相比, 先进铺带技术可降低制造成本的 30%~50%, 可成型超大尺寸和形状复杂的复合材料制件, 而且质量稳定, 缩短了铺层及装配时间, 工件近净成型, 切削加工及原材料耗费减少。目前最先进的第五代铺带机是带有双超声切割刀和缝隙光学探测器的十轴铺带机, 铺带宽度最大可达到 300 mm, 生产效率可达到手工铺带的数十倍<sup>[2]</sup>。

自动铺带技术由装备技术、CAD/CAM 软件技术和材料工艺技术构成, 国外均已形成相关的工业产品: 在自动铺带 CAD/CAM 软件方面, 美国 VISTAGY

公司在 CATIA 软件平台上开发了用于复合材料制造和分析的 FiberSim 软件, 欧洲 Airbus 与法国 Dassault Systemes 公司合作于 2006 年开发的 Tapelay 软件等。

目前国内在复合材料制造技术方面仍以手工铺带为主, 自动铺带机和 CAD/CAM 软件尚处在的研究阶段: 南京航空航天大学 2004 年开始对自动铺放技术进行了探索和研究, 先后研制出原理样机、对应平面铺带 CAD/CAM 软件<sup>[3]</sup>, 并对可展曲面的相关铺带理论进行了研究<sup>[4~5]</sup>。

2007 年南京航空航天大学研制成功新的自动铺放系统, 系统由五自由度龙门和五轴铺带头及辅助主轴构成, 在数控系统驱动下完成预浸带的剪裁、定位、铺叠、辊压等动作, 实现预浸带按照预先规划的路径和方向在模具表面的自动铺叠, 包括翼、面壁及筒形结构。

本文以自行研制的自动铺带机为基本研究对象, 考虑通用自动铺带机的工作模式, 分析铺带机的机械结构及其工作过程, 按机器人原理建立连杆坐标系、求解逆运动学问题; 根据数控技术原理, 定义铺带机相应数控

收稿日期: 2008-10-27; 修回日期: 2008-12-10

基金项目: 国防基础研究 (B0520060441)

作者简介: 叶进, 1982 年出生, 硕士研究生, 主要从事复合材料自动铺放 CAM 技术研究。E-mail: yeejim@163.com

加工代码;最后基于 Visual C++ 6.0 开发平台,编制出铺带机的数控加工代码生成系统的 CAM 软件。

### 1 自动铺带机逆运动学解

为研究铺带机的加工过程中各关节的运动情况,必须首先对铺带机各个关节进行运动学的分析。运动学分析是机器人动力学、轨迹规划和位置控制的重要基础,机器人运动学中有两类基本问题:一类是已知杆件几何参数及各关节变量,求解此时末端执行器相对于参考坐标系的位置与姿态,即“正运动学”问题;另一类是已知杆件几何参数及末端执行器相对于参考坐标系的期望位置与姿态,求出对应于这个位置与姿态的关节变量,即“逆运动学”问题<sup>[6]</sup>。在实际应用中,大多是在已知预定运动轨迹的前提下求解机器人各关节的位姿变化,这正是铺带机进行轨迹加工要解决的问题。

#### 1.1 杆件坐标系的确立

典型的五自由度龙门式机器手臂采用 3P-2R (P 代表移动关节,R 代表旋转关节)结构,见图 1。

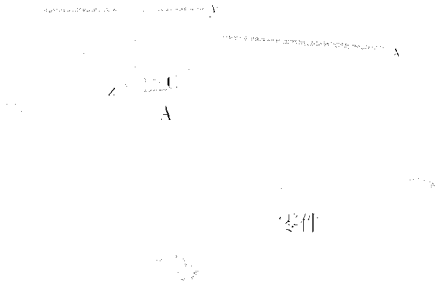


图 1 铺带机原理图

Fig. 1 Schematic diagram of automated tape layer

Denavit 和 Hartenberg<sup>[6]</sup>提出了一种为关节链中的每一杆件建立附体坐标系的矩阵方法,即 D-H 法。D-H 法是应用机器人运动学求解的常用方法,用以描述机器人手臂相邻杆件间的相互运动关系。根据自动铺带机的结构,利用 D-H 法建立该自动铺带机的空间连杆坐标系(图 2)。对应的机器人连杆 D-H 参数表见表 1。

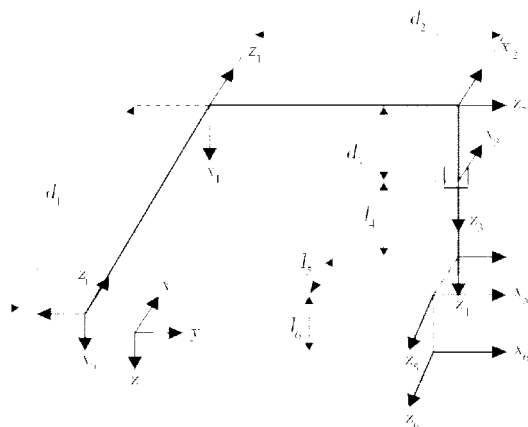


图 2 连杆坐标系

Fig. 2 Linkage coordinate

表 1 连杆 D-H 参数表<sup>1)</sup>

Tab. 1 Table of D-H parameter

连杆 $i$	$l_{i-1}$ /mm	$a_{i-1}$ /(°)	$d_i$ /mm	$\theta_i$ /(°)	关节变量范围
1	0	0	$d_1$	0	0 ~ 2500mm
2	0	90	$d_2$	90	0 ~ 2000mm
3	0	90	$d_3$	0	0 ~ 800mm
4	0	0	$l_4$	$\theta_4$	-30° ~ 30°
5	$l_6$	-90	$l_5$	$\theta_5$	-180° ~ 180°

注:1)  $d_1, d_2, d_3$  移动关节的位移量;  $\theta_4, \theta_5$  旋转关节的旋转变量;  $l_4, l_5$  是连杆 4、5 的长度;  $l_6$  是连杆 5 的偏置;  $(x, y, z)$  机器人机床坐标系;  $(x_0, y_0, z_0)$  机器人杆件的基坐标系;  $(x_6, y_6, z_6)$  机器人末端手部坐标系。

#### 1.2 末端手部坐标系与基坐标系的变换矩阵

根据 D-H 法可知,坐标系 0, 1, ..., 5 相连之间的齐次变换矩阵可以表示为:

$${}_{i-1}^i T = \begin{pmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & l_{i-1} \\ \sin\theta_i \cos\alpha_{i-1} & \cos\theta_i \cos\alpha_{i-1} & \sin\alpha_{i-1} & -d_i \sin\alpha_{i-1} \\ \sin\theta_i \sin\alpha_{i-1} & \cos\theta_i \sin\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} & d_i \cos\alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

参照连杆 D-H 参数表,依次带入相关参数到式(1),可求出  ${}^0_1 T, {}^1_2 T, {}^2_3 T, {}^3_4 T, {}^4_5 T$ 。铺带机末端手部坐标系  $(x_6, y_6, z_6)$  是由坐标系 5 在其  $y$  轴负方向平移  $l_6$  长度所得坐标系:

$${}^5_6 T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -l_6 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

末端手部坐标系 6 与基坐标系 0 的齐次变换矩阵为:

$${}^0_6 T = {}^0_1 T \times {}^1_2 T \times {}^2_3 T \times {}^3_4 T \times {}^4_5 T \times {}^5_6 T = \begin{pmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中,  $p_x, p_y, p_z$  为末端手部坐标系 6 的原点相对于基坐标系 0 的位置大小。带入所有矩阵  ${}^0_1 T, {}^1_2 T, {}^2_3 T, {}^3_4 T, {}^4_5 T$  至式(2)求解出  ${}^0_6 T$  的值,分析可得:

$$\begin{aligned} p_x &= \cos(\theta_5) \times l_6 + l_4 + d_3 \\ p_y &= -\sin(\theta_4) \times \sin(\theta_5) \times l_6 - \cos(\theta_4) \times l_5 - d_2 \\ p_z &= \cos(\theta_4) \times \sin(\theta_5) \times l_6 - \sin(\theta_4) \times l_5 + d_1 \end{aligned} \quad (3)$$

### 1.3 机床坐标系与零件坐标系(设计坐标系)的变换

零件加工最终将放在整个机床坐标系中,需要分析零件坐标系与相应的机床坐标系的矩阵变换。已知零件坐标系在机床坐标系中的位置,通过坐标旋转和偏移可以实现坐标系转换。考虑一般情况,零件水平放置在机床坐标系中,机床坐标系与零件坐标系变换矩阵  $T_s$  为:

$$T_s = \text{Rot}(z, -90) \times \text{Rot}(y, 180) \times \text{Trans}(l_1, l_2, l_3)$$

$$= \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & l_1 \\ 1 & 0 & 0 & l_2 \\ 0 & 0 & -1 & -l_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中,  $\text{Rot}()$  表示旋转,  $\text{Trans}()$  表示平移,  $l_1, l_2, l_3$  分别是零件坐标系原点在机床坐标系下沿  $x$  轴、 $y$  轴、 $z$  轴的偏移量。

### 1.4 逆运动问题的求解

机器人逆运动问题的求解,即根据设计坐标系下加工轨迹点的坐标信息求解在机床坐标系下铺带机器人各杆件关节变量。

由铺带机连杆坐标系(图2)可知,末端手部坐标系的原点位置与零件加工点(轨迹点)重合,机床坐标系的原点与基坐标 0 的原点重合。假设轨迹点信息为  $(x, y, z, v_x, v_y, v_z)$ , 其中  $(v_x, v_y, v_z)$  为轨迹点的法向量,由式(2)、(4)可知:

$$p_x = l_3 - z$$

$$p_y = y + l_2$$

$$p_z = x + l_1$$

再结合式(3)求解方程,得

$$d_1 = x + l_1 - \cos(\theta_4) \times \sin(\theta_5) \times l_6 + \sin(\theta_4) \times l_5$$

$$d_2 = y + l_2 - \sin(\theta_4) \times \sin(\theta_5) \times l_6 - \cos(\theta_4) \times l_5$$

$$d_3 = l_3 - z - l_4 - \cos(\theta_5) \times l_6$$

式中,  $\theta_4, \theta_5$  为关节 4 和 5 的旋转角度,可以利用每条铺带轨迹信息的开始点  $(x_0, y_0, z_0)$  和结束点  $(x_n, y_n, z_n)$  进行计算:

$$\theta_4 = \arctan[(x_n - x_0)/(y_n - y_0)]$$

$$\theta_5 = \arccos(v_z/\sqrt{s}), s = v_x \times v_x + v_y \times v_y + v_z \times v_z$$

综上所述,对于一个已知的设计坐标系下加工轨迹点,应用以上逆运动求解的方法,可以求出图 1 所示铺带机在机床坐标系下各个关节  $(x, y, z, A, C)$  的值,为进一步研究铺带机数控加工代码做好准备。

## 2 铺带机数控(NC)加工代码定义

CAM 狭义上就是 NC 代码的编制,包括刀具路径规划、刀位文件生成、NC 代码生成等等。

分析自动铺带机的控制原理,其加工过程是由控制系统控制实现的,控制系统在加工过程中接受标准

的指令(NC 加工代码),控制铺带机各轴运动以及相应的加工辅助动作,实现铺带机铺放预浸带的过程。NC 加工代码标准格式如图 3 所示,主要包括准备功能码(G 代码)、坐标运动尺寸、工艺性指令以及其他功能指令代码。

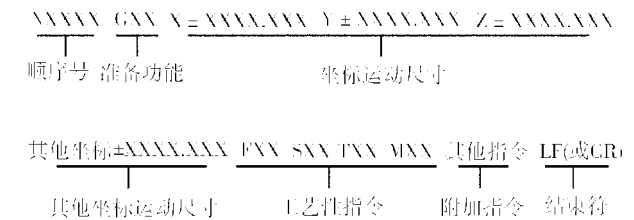


图3 标准加工程序格式

Fig.3 Standard processing format

铺带机的核心部件是典型的五轴铺带头<sup>[7]</sup>(图4),铺带头的主要构成包括:预浸带装夹和释放系统、衬纸回收系统、缺陷检测系统、预浸带传送系统、预浸带切割系统、预浸带加热系统、铺带和压实系统。预浸带传送系统和预浸带切割系统是铺带头关键部分。

(1)传送系统: $u$ 轴是铺带输送轴,在数控系统驱动下完成铺带的输送、回收,铺带筒放带和保持背衬纸的收取均有力矩电机控制,以保持预浸带在恒定张力下平直。

(2)切割系统: $d, e, v, q$ 是双切割器的运动轴, $v, q$ 是两个垂直于预浸带输送方向的运动轴,而 $d, e$ 则是保证切割器平行与切割曲线所必需的运动轴。切割器可以采用碳化硼切割片,也可以采用超声切割刀。切割过程中只切割预浸带而保留背衬纸的完整,切割掉的预浸带部分会被背衬纸自动带走。

铺带头的工作模式简单地分为:供带筒将预浸送下;切刀切割预浸带;加热系统加热预浸带;压靴下压预浸带;辅压辊下压预浸带;收带轮收起背衬纸。

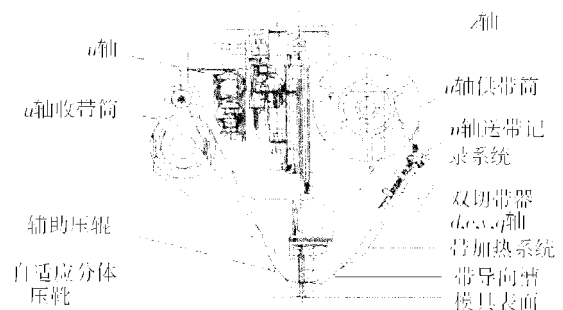


图4 铺带头结构简图

Fig.4 Structure sketch of tape-laying head

基于我国机械工业部制定了有关 G 代码和 M

代码的 JB3202—1983 标准和铺带机的加工过程,制定了铺带机相应的数控加工代码见表 2。

表 2 数控代码表

Tab.2 Table of numerical control codes

G	功能	M	功能
G00	快速定位	M20	压靴动作,下压
G01	直线插补	M21	辅压辊动作,下压
G02	顺圆插补	M22	切刀动作,压下
G03	逆圆插补	M23	切刀动作,抬起
G04	暂停,秒计	M24	供带筒电机控制模式
G90	绝对值坐标(增量)	...	.....
G91	相对值坐标(增量)	...	.....
...	.....	...	.....

### 3 开发自动铺带机数控代码生成系统

#### 3.1 CAD 模块与 CAM 模块的数据接口设计

自动铺带机 CAD/CAM 软件功能大致分为:CAD 模块主要完成铺带加工轨迹规划和轨迹点位置信息的计算;CAM 模块主要结合铺带机的加工过程进行数控加工代码的编制以及加工过程的仿真。

为了实现 CAD 模块与 CAM 模块数据的相互传递,制定了标准的数据格式,作为 CAD/CAM 系统集成的接口,其格式见表 3。

表 3 TXT 文件格式

Tab.3 TXT file

TXT 文件	注释
1	铺带轨迹编号 1
start	铺带轨迹点开始标志
$\alpha$	铺带切割角
$x_1 y_1 z_1 v_{x1} v_{y1} v_{z1} l_1$	轨迹点 1 的坐标、法矢、弧长
$x_2 y_2 z_2 v_{x2} v_{y2} v_{z2} l_2$	轨迹点 2 的坐标、法矢、弧长
...	.....
$x_n y_n z_n v_{xn} v_{yn} v_{zn} l_n$	轨迹点 n 的坐标、法矢、弧长
end	第 1 条铺带轨迹点结束
2	铺带轨迹编号 2
...	.....

#### 3.2 开发铺带机数控代码自动生成系统

对于三轴联动以上的数控机床,加工程序一般使用自动编程的方式来实现。本文基于 Visual C++ 6.0 平台,开发自动铺带机数控代码自动生成系统。系统操作界面如图 5 所示。

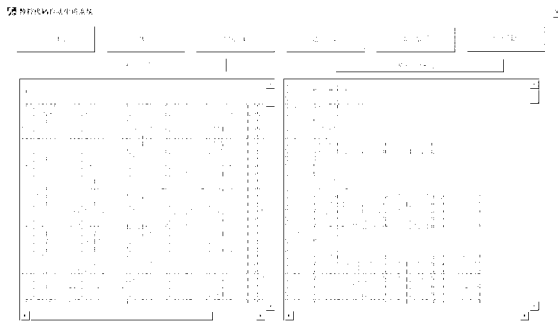


图 5 数控代码生成系统

Fig.5 Numerical control codes system

数控代码自动生成系统包括:导入 CAD 信息、参数设定、生成代码、显示代码、清除显示、系统帮助六部分。通过获取 CAD 模块轨迹点的信息,最终生成数控机床可以接受的标准数控加工代码程序,其软件操作流程如图 6 所示。

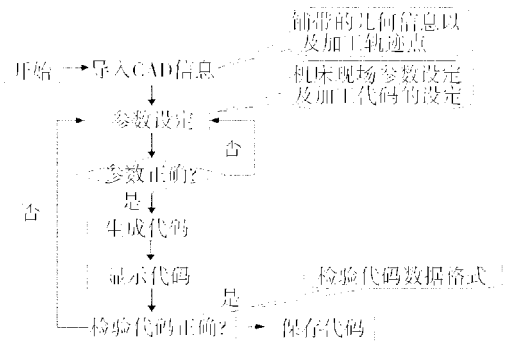


图 6 软件操作流程

Fig.6 Software flow chart

#### 3.3 数控加工程序的验证

通过实物试铺实验证明,本数控代码生成系统所生成的数控代码能够完成小曲率、大尺寸的曲面铺放,如凸台和小曲率构件的铺放。

### 4 结论

以自行研制的 10 轴龙门式自动铺带机进行运动学的分析,获取了铺带机的逆运动学解;结合数控技术,编制了铺带机数控加工代码生成系统。实现了铺带轨迹规划的加工信息点的位姿到数控加工代码直接转换,实现了铺带机曲面数控加工代码的自动编制。

#### 参考文献

- 1 陈祥宝. 先进复合材料低成本技术. 北京: 化学工业出版社, 2004: 23 ~ 88
- 2 郝建伟, 陈亚莉. 先进复合材料主要制造工艺和专用设备. 航空制造技术, 2008; (10): 40 ~ 45
- 3 还大军, 李勇, 吴海桥等. 复合材料自动铺带技术研究(III)——平面铺带 CAD/CAM 软件开发. 宇航材料工艺, 2007; 37(1): 47 ~ 50
- 4 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; 37(1): 40 ~ 43
- 5 臧建峰, 肖军, 李勇等. 复合材料自动铺带技术研究(II)——柱面上沿“自然路径”铺带的压辊坐标生成. 宇航材料工艺, 2007; 37(1): 44 ~ 46
- 6 蔡自兴. 机器人学. 北京: 清华大学出版社, 2000: 35 ~ 48
- 7 Charles. Tape-laying head. US Patent Document: 4508584. Apr. 2, 1985
- 8 Olsen Howard B. Automated composite tape lay-up using robotic devices. In: Proceedings-IEEE international conference on robotics and automation, 1993: 291 ~ 297

(编辑 李洪泉)