

# 复合材料自动铺带技术研究 ( III)

## ——平面铺带 CAD /CAM 软件开发

还大军 李 勇 吴海桥 肖 军 刘 林

(南京航空航天大学材料科学与技术学院,南京 210016)

**文 摘** 根据所研制自动铺带样机的工作模式和结构特征,详细讨论了铺放平面凸多边形构件的自动铺放加工指令模型和算法,包括轨迹坐标生成与边界处理、考虑预切的切送带指令等。在 Auto CAD 平台上利用 Object ARX 技术开发了相应 CAD /CAM 软件,具有自动指令生成、交互设计和图形仿真等功能;经实际铺放检验,该软件能够满足平面自动铺带的基本要求。

**关键词** 自动铺带, CAD /CAM 软件, 运动轨迹规划

### Study on Automated Tape-Laying Technique for Composites Part III: Flat Tape-Laying CAD /CAM Software Development

Huan Dajun Li Yong Wu Haiqiao Xiao Jun Liu Lin

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

**Abstract** According to the work module and dimensions of prototype of the automated tape-laying machine, the tape-laying motion trajectory algorithm of plane convex polygon is discussed in detail including tape head track generation, board handing with pre-cutting, etc. An CAD /CAM software is developed by the Object ARX technique in Auto CAD with function of track auto-generation, mutual design and graph simulation. The software is verified to meet the technological requirement of tape-laying by practice.

**Key words** Automated tape-laying, CAD /CAM software, Motion trajectory

#### 1 前言

自动铺带技术作为连续纤维层合复合材料的一种自动化制造技术,具有生产效率高、质量好和废率低等优点,可用于各类航空航天器的大尺寸、小曲率构件的制造,是复合材料制造技术的重要发展方向,在发达国家得到了广泛应用<sup>[1~4]</sup>。目前,国内自动铺带技术研究刚刚起步。2003年由南京航空航天大学、北京航空材料研究院和上海万格复合材料技术有限公司合作,共同研制开发自动铺带技术,试制了国内第一台自动铺带样机,并开展了相关理论研究,在预浸带试制、铺带工艺研究等方面积极探索。本文简要介绍了自动铺带原型机的结构与工作模式,着重介绍平面自动铺带的运动轨迹规划、机器路径生成、CAD /CAM 软件开发平台和软件功能等内容。

#### 2 运动轨迹规划算法

#### 2.1 工作模式

所研制的铺带机为龙门式,核心部件——铺带头有 5 个运动自由度,详见复合材料自动铺带技术( )。对于平面铺带而言,基准坐标  $(X, Y, Z, C, A)$  与机器坐标重合,且摆角参数退化,本文重点研究  $(X, Y, C)$  坐标生成与加工指令模型。

铺带头结构如图 1 所示。铺带时,预浸带由压辊铺放到模具表面,背衬纸由收带轮回收。预浸带在铺放到模具表面之前,利用带子与背衬间的黏性,由背衬纸带动预浸带移动。主压辊工作时,压辊直接与背衬纸接触,通过背衬纸将预浸带铺放到模具表面。辅压辊工作时,压辊处于背衬纸与预浸带之间,辅压辊直接与预浸带接触。主、辅压辊直径  $d$  均为 40 mm,主压辊与辅压辊之间距离  $l_1$  为 50 mm,预浸带宽  $D$  为 40 mm。

收稿日期: 2005 - 10 - 27

作者简介: 还大军, 1981 年出生, 博士研究生, 主要从事复合材料自动化工程软件开发工作

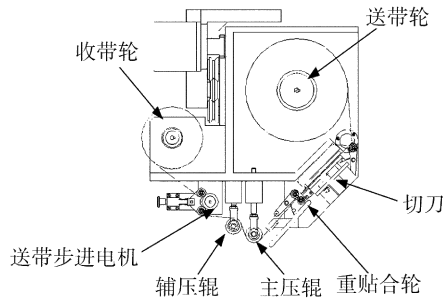


图 1 铺带头结构简图  
Fig 1 Tape-Laying head structure sketch

预浸带的切割模式为,先将预浸带和背衬纸分离,用可旋转的切刀将预浸带按预定角度( $-45^{\circ} \sim 45^{\circ}$ )切断,再利用重贴合轮将切好的预浸带与背衬纸重新贴合。切刀与主压辊间的距离  $l_2$  为 250 mm。

铺放一条预浸带的典型过程,按顺序可分为以下几个步骤:定位(移动到铺带轨迹起点)、送带、主压辊走轨迹、切割、主压辊走轨迹、边界走轨迹。铺带头机器人动作则包括定位、送带、主压辊走轨迹、切割以及边界走轨迹 5 种(表 1)。

表 1 铺带 NC 代码  
Tab 1 Tape-Laying NC codes

| NC 代码名称 | 运动坐标                        |                           |     |   | 说明  |
|---------|-----------------------------|---------------------------|-----|---|---|
|         | 运动                          |                           | 送切带 |   |   |
|         | $X$                         |                           | $u$ |   |   |
| 定位      | $X_{\text{locate start}}$   | $X_{\text{locate end}}$   | 0   | 0 | $X_{\text{locate start}}$ 为机器原点或上一轨迹终点<br>$X_{\text{locate end}}$ 为当前轨迹起点   |
| 送带      | $X_{\text{deliver}}$        |                           | $u$ | 0 | 铺带头由 $X_{\text{locate start}}$ 运动至 $X_{\text{locate end}}$ 铺带起点<br>$X_{\text{deliver}}$ 为铺带头当前位置<br>铺带头保持原有状态和位置不变,送带使预浸带移动 $u$ 长度  |
| 主压辊走轨迹  | $X_{\text{start}}$          | $X_{\text{end}}$          | 0   | 0 | $X_{\text{start}}$ 为主压辊走轨迹的起点<br>$X_{\text{end}}$ 为主压辊走轨迹的终点<br>铺带头在 $X_{\text{start}}$ 处主压辊下压,随后铺带头由 $X_{\text{start}}$ 到 $X_{\text{end}}$ 。主压辊保持下压状态,将预浸带铺放到模具表面  |
| 切割      | $X_{\text{cut}}$            |                           | 0   | 0 | $X_{\text{cut}}$ 为切割位置<br>当铺带头运行至 $X_{\text{cut}}$ 处时,保持原有位置和状态不变,切刀转动 $\theta$ 角,切带,切割完成后切刀回复初始状态  |
| 边界走轨迹   | $X_{\text{boundary start}}$ | $X_{\text{boundary end}}$ | 0   | 0 | $X_{\text{boundary start}}$ 为边界走轨迹起点<br>$X_{\text{boundary end}}$ 为边界走轨迹终点<br>铺带头运行至 $X_{\text{boundary start}}$ 时,主压辊先保持下压状态,待辅压辊下压后,主压辊再抬起,辅压辊保持下压状态,由 $X_{\text{boundary start}}$ 运动至 $X_{\text{boundary end}}$ 完成边界返程动作 |

## 2.2 运动轨迹规划算法

自动铺带分为平面铺带(FILM)和曲面铺带(CTLM)。平面铺带简单、高效;曲面铺带适于有一定曲率曲面铺放。通常,翼面类曲面可以用单曲面近似,其上铺带轨迹——“自然路径”是测地线<sup>[5]</sup>,对应展开面上是一条直线;只要研究展开面上的平面铺带轨迹,通过逆变换即可得出曲面上压辊位置与姿态坐标<sup>[6]</sup>。本文从最基本的平面铺带着手,讨论平面铺带的运动轨迹规划算法。

铺带 NC 代码由运动坐标量和动作量两部分构成(表 1)。

根据铺放角度的不同对运动轨迹规划详细说明如下。

### 2.2.1 $\theta = 0^{\circ}$ (或 $90^{\circ}$ ) (图 2)

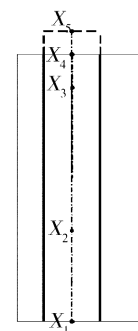


图 2  $0^{\circ}$  或  $90^{\circ}$  铺放

Fig 2  $0^{\circ}$  or  $90^{\circ}$  tape-laying

(1) 铺带头定位到  $X_1$  点,如为首条轨迹,送带步进电机驱动预浸带前进  $l_2$ ,使预浸带到达模具平面与主压辊的切线处;如连续铺放则  $X_{\text{locate start}}$  为上一轨迹终点,无送带动作。

(2) 仅当铺放轨迹长度恰等于  $l_2$  时,  $X_2$  点与  $X_1$  点

重合,  $X_2 \rightarrow X_1$ , 转入 (4)。

(3)若铺放轨迹长度大于  $l_2$ , 在  $X_1$ 至  $X_3$ 段机器动作为主压辊走轨迹。

(4)在  $X_2$  ( $X_2$ 距理论轨迹终点  $X_4$ 为  $l_2$ )按  $\theta$ 角切割预浸带。

(5)  $X_2$ 至  $X_3$ 段机器动作为主压辊走轨迹。

(6)当铺带头运行至铺放轨迹终点时,预浸带切口亦到达终点。为了避免主压辊在实际铺放过程中将下一段预浸带也压在该轨迹终点(图3),在  $X_3$ 处 ( $X_3$ 与理论轨迹终点  $X_4$ 的距离应大于  $d \times \pi/4$ , 本文取 40 mm)开始边界走轨迹(辅压辊工作)。轨迹终点  $X_5$ 由理论轨迹终点  $X_4$ 沿铺放方向延长主压辊与辅压辊的距离  $l_1$ 。铺放结束后送带量  $u$ 不变。

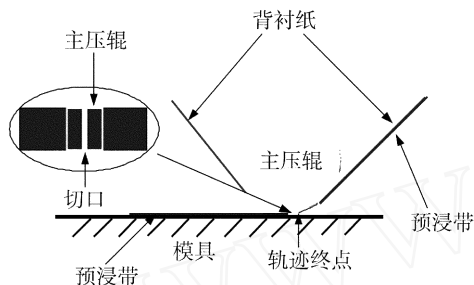


图3 铺带终点示意图

Fig 3 Tape-Laying end-point sketch map

### 2.2.2 $0^\circ$ 和 $90^\circ$ (图4)

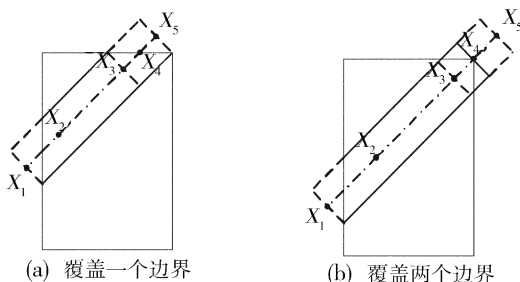


图4 其他角度铺放

Fig 4 Other angle tape-laying

(1)铺带头运行到  $X_1$ 完成定位及相应送带。

(2)仅当铺放轨迹长度恰等于  $l_2$ 时,  $X_2$ 点与  $X_1$ 点重合,  $X_2 \rightarrow X_1$ , 转入 (4)。

(3)若铺放轨迹长度大于  $l_2$ , 在  $X_1$ 至  $X_3$ 段机器动作为主压辊走轨迹。

(4)在  $X_2$  ( $X_2$ 距理论轨迹终点  $X_4$ 为  $l_2$ )切割预浸带:如图4(a)时,则按  $\theta$ 角度切割;如图4(b)时,为保证完全铺覆,切割角度为  $0^\circ$ 。

(5)  $X_2$ 至  $X_3$ 段机器动作为主压辊走轨迹。

(6)如图4(a)时,  $X_3$ 与距理论轨迹终点  $X_4$ 距离为  $(D/2) \times \tan \theta$ , 开始边界走轨迹(主压辊抬起,辅压辊工作)至  $X_5$ ,  $X_5$ 由理论轨迹终点  $X_4$ 沿铺放方向延长  $(D/2)$

$\times \tan \theta$ 与主压辊与辅压辊的距离  $l_1$ 之和。铺放结束后,送带量  $u$ 回溯  $D \times \tan \theta$ 以保证下点起始位置;如图4(b)时,为保证全覆盖,同  $\theta = 0^\circ$ 或  $90^\circ$ 情况的步骤(6)。

综上所述,NC代码格式的坐标量为:  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $C$ 、 $A$ 、 $u$ 。动作为:定位、送带、切割、主压辊走轨迹、边界走轨迹。

### 3 软件开发

Auto CAD提供了各种二次开发的环境和应用接口,如: Visual Lisp 语言、Active X接口、Object ARX等。其中 Object ARX<sup>[5-6]</sup>是针对 Visual C++环境二次开发而提供的 API,支持 ADS、ADSRX。由于 Object ARX应用程序的实质是 Windows DLL,与其他 API相比, Object ARX与 Auto CAD共享内存地址,并直接调用 Auto CAD内部函数,避免了由于 IPC (Inter Process Communication, 进程间通讯)引起的系统开销和系统性能下降,同时提供了面向对象化编程机制和大量丰富的类库。

#### 3.1 软件功能

据自动铺带的工艺要求,本软件分为两大模块。

##### (1) CAD模块

应用 Auto CAD的绘图功能,设计所铺放复合材料构件的几何形状;输入铺放角度后,自动生成铺带轨迹;通过人机交互,对自动生成轨迹的修改,确定最佳铺带方案。生成的铺带轨迹如图5所示。

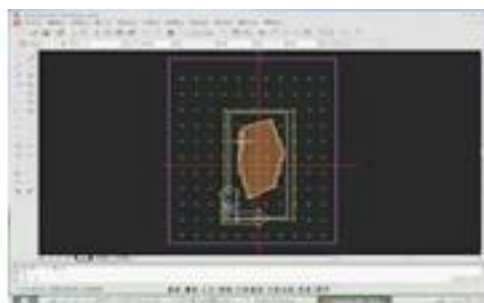


图5 CAD模块

Fig 5 CAD module

##### (2) CAM模块

利用前述运动轨迹规划算法自动生成 NC代码,同时提供离线仿真功能供用户检查 NC代码的正确性,如图6所示。

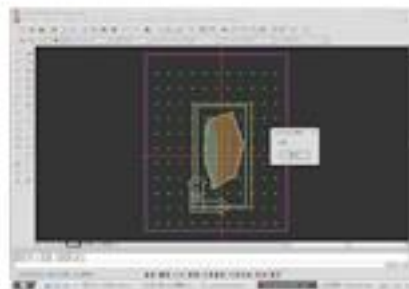


图6 CAM模块

Fig 6 CAM module

### 3.2 软件模块

软件模块见图 7所示。

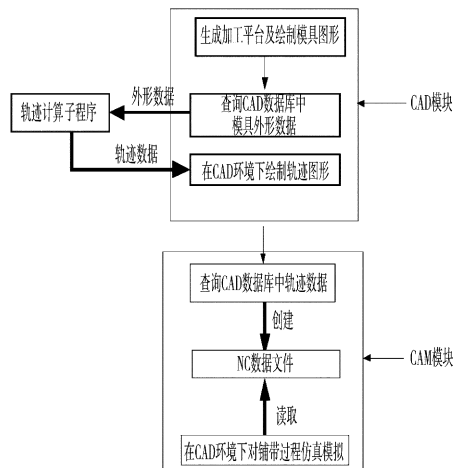


图 7 软件模块

Fig 7 Software modules

### 3.3 软件验证

实际铺带过程表明,本软件自动生成的 NC代码能够完成平面凸多边形构件的铺放(图 8)。



图 8 实际铺放效果

Fig 8 Practical effect

### 4 结论

(1)根据所研制自动铺带样机的工作模式和结构特征,详细讨论了铺放平面凸多边形构件的自动铺放加工指令模型和算法,包括轨迹坐标生成与边界处理、考虑预切的切送带指令等。

(2)在 Auto CAD平台上利用 Object ARX技术开发了相应 CAD/CAM软件,具有自动指令生成、交互设计和图形仿真等功能。

(3)由于曲面的铺带轨迹可转化为平面处理,在现有软件嵌入“沿弧长展开变换模块”构造展开面数据,以此生成铺带运动轨迹,再将坐标通过逆变换生成机器坐标,本软件可用于曲面铺带。

### 参考文献

- 1 Grimshaw M N, Beard Jr J, Schulz M D. Automated tape lay-up of a BMI vertical stabilizer skin In: ASM international/ESD advanced composites conference proceedings, 1987: 33 ~ 56
- 2 Heth J. Inside manufacturing: automated tape-laying excels for F-22 's wing skin panels high perform. Composites, 1999; 7(5): 7 ~ 6
- 3 Grimshaw M N, Grant C G, Luna Diaz J M. Advanced technology tape laying for affordable manufacturing of large composite structures <http://www.lambtech.com>
- 4 陈祥宝. 先进复合材料低成本技术. 北京:化学工业出版社, 2004: 69 ~ 99
- 5 McAuley C(爱尔兰)著,李世国等译. Auto CAD 2000 Object ARX编程指南. 北京:机械工业出版社, 2000: 24 ~ 28
- 6 陈杉,王宁,郭剑峰. 用 Object ARX开发 Auto CAD 2000应用程序. 北京:人民邮电出版社, 2000: 99 ~ 133

(编辑 李洪泉)

## 有关版权转让声明

凡向本刊所投稿件,全体作者需在投稿时签署《论文著作权转让书》,将该论文的复制权、发行权、信息网络传播权、汇编权等权利在全世界范围内转让给本刊。本刊已加入《中国学术期刊光盘版》、《中国期刊网》、《万方数据数字化期刊群》等,被中国核心期刊(遴选)数据库收录。凡被本刊录用的稿件将同时通过因特网进行网络出版或提供信息服务,稿件一经刊用一次性支付作者著作权使用报酬(包括印刷版、光盘版和网络版等各种使用方式的报酬)。