

## 预浸纤维丝束自动搭接方法与系统

严 飙<sup>1</sup> 肖 军<sup>2</sup> 文立伟<sup>2</sup> 宋清华<sup>2</sup> 孙 成<sup>2</sup>

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京, 210016; 2. 南京航空航天大学材料科学与技术学院, 南京, 210016)

**摘要:** 针对复合材料丝束手工搭接低效率及不稳定性问题, 在现有铺丝机基础上, 研制了一套复合材料丝束自动搭接机构; 在原有控制系统上增加独立模块, 采用可编程控制器 (Programmable logic controller, PLC) 结合触摸屏的控制方式, 实现各功能单元的逻辑运动及实时状态监控显示, 并可对工艺参数进行设定。通过与原铺丝系统的联合调试, 验证了丝束搭接系统的可行性和可靠性; 丝束搭接区域能满足自动铺丝要求, 大大缩短搭接时间, 提高铺丝效率。

**关键词:** 自动铺丝; 搭接机构; 可编程控制器; 触摸屏

**中图分类号:** TP273      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-2615(2013)02-0250-05

## Prepreg Tows Auto-Splicing Method and System

Yan Biao<sup>1</sup>, Xiao Jun<sup>2</sup>, Wen Liwei<sup>2</sup>, Song Qinghua<sup>2</sup>, Sun Cheng<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China; 2. College of Material Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

**Abstract:** An auto-splicing apparatus of prepreg tow is designed to improve the efficiency and stability based on the fiber placement machine made before. The control system is built with the added independent modulus from the original one, and controlled with the help of programmable logic controller (PLC) and touch screen together. The logic movements of functional modulus, as well as the real-time displaying and the input of processing parameters, can be realized successfully. The validation of the feasibility and reliability of tow splicing system is completed by union debugging with the original system. It is concluded that the time of splicing is decreased significantly. Meanwhile, the quality of the splicing regions can meet the requirement of the fiber placement.

**Key words:** fiber placement; auto-splicing apparatus; programmable logic controller (PLC); touch screen

先进复合材料是航空航天器重要的结构材料, 随着其在航空航天领域的应用范围逐渐增加, 复合材料低成本制造技术已成为目前国际复合材料技术领域的核心问题之一。自动铺丝技术作为先进复合材料低成本制造技术的重点发展方向备受关注。

自动铺丝技术兼备了纤维缠绕和自动铺带技

术的优点, 但比纤维缠绕和自动铺带更先进, 对制品的适应性更强, 主要用于复杂曲面型复材构件的铺放制造, 它是集机电装备技术、CAD/CAM 软件技术和材料工艺技术于一体, 不仅大大提高了复合材料构件的生产效率, 降低了生产成本, 而且通过对成形工艺参数和技术指标的精确控制, 极大提高了复合材料构件质量的可靠性和稳定性<sup>[1]</sup>。

**基金项目:** 民机专项资助项目; 商飞基金 (SAMC11-JS-07-222) 资助项目。

**收稿日期:** 2012-06-13; **修订日期:** 2012-09-03

**通信作者:** 肖军, 男, 教授, 博士生导师, 1959 年 3 月生, E-mail: j. xiao@nuaa. edu. cn。

高效铺放是铺丝机技术的重要发展方向,影响它的因素有很多,例如,机床运行速度、丝束最大数目、换纱等辅助流程占用时间等。提升自动化、高速化和铺放工艺集成复合化水平是提高铺丝生产效率的重要手段。对于现有铺丝技术而言,机床速度已接近铺放工艺允许的速度极限,丝束总宽度的增加也受到制件形状等限制,而减少换纱环节占用时间是提高效率的有效途径,实现自动化可明显提升铺丝生产效率。

国外高性能多自由度数控铺丝设备发展迅速,丝束换纱研究工作亦有报道。Warek 等人<sup>[2]</sup>在复合材料成形装置及方法中设计了搭接框图,用来搭接同种或不同材料的纤维丝束,实现纤维丝束的连续进给;Cairns 等人<sup>[3]</sup>提出了窄带自动搭接装置,它将多卷料辊安装在可旋转平台上,通过旋转支架平台使备用辊旋转至主辊所在位置,进而与原窄带实现搭接;Hoffmann, Tingley 和 Oldani 等人<sup>[4-6]</sup>设计了两种丝束搭接装置来协助操作者进行搭接,一是将搭接装置整体放在纱箱内进行快速搭接,二是将搭接装置分为两部分,一部分安装在铺丝头机构上实现丝束的搭接动作,另一部分则安装在每一纱箱中,便于快速更换纱箱;文献<sup>[7]</sup>报道 TORRESFIBERPLAYUP 铺丝机具有自动搭接功能,只需将设备暂停 2 s 便可完成搭接,大大提高了铺丝效率,但未给出具体实施方案。国内的铺丝技术起步较晚,南京航空航天大学已率先研制出国内第一台自动铺丝工程样机用于铺丝工艺研究,同时在缠绕基础上开展了预浸带自动搭接研制<sup>[8]</sup>。本文在此基础上,以自行研发的 8 丝束自动铺丝设备为实验平台,针对自动铺丝搭接问题研制用于连续铺丝的自动搭接装置及方法。

## 1 搭接方法

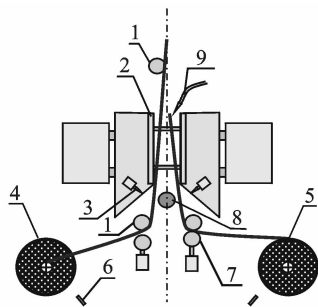
自动铺丝过程中采用的预浸丝束标准宽度有 3.2, 6.4, 12.7 mm 三种,每一根独立的丝束缠绕在线轴上并存储在温度可控的纱箱内,纱箱内最多可存储 32 卷纤维丝束,每卷丝束长度都是有限的(少于 5 000 m),在铺丝过程中必然要求换丝和将新丝束的首端与将耗尽丝束的尾端进行一定长度的搭接。

传统的搭接方法采用手指挤压搭接区的纤维丝束,使搭接区的树脂在手指压力下依靠自身黏性形成搭接界面层,保证足够的强度以使搭接丝束顺利通过铺丝头机构铺覆至模具表面,该方法很大程度上取决于操作者的熟练程度和树脂本身特性,给

搭接过程带来明显的不稳定性,并会花费较长的时间,显著降低了自动铺丝的效率。本文提出的自动搭接装置及方法,采用自动加热、搭接、剪切、风冷等功能,能最低程度地暂停自动铺丝过程,降低铺丝工作时间,提高生产效率,保证铺丝制品的质量;同时,针对不同树脂黏度的预浸纤维丝束,可采用触摸屏输入不同加热温度,扩大应用范围。

## 2 自动搭接机构及流程

丝束搭接过程一般在纱箱内进行,针对手工搭接存在的问题,本文设计了图 1 所示的自动搭接模块。该模块为对称结构,可进行丝束的交替更换,其中:1 为丝束导向辊,丝束经导向辊集束成窄带;2 为热压接板,旧丝束尾部与新丝束首部在其作用下形成搭接区域;3 为切刀,旧丝束在搭接过程中需切断形成尾部,与新丝束首部搭接;4 为旧料辊;5 为新料辊;6 为半径检测传感器,用来实时检测料卷剩余状态;7 为夹紧头,确保丝束不回卷;8 为切断用砧辊;9 为风冷头,经热压接后的丝束搭接区域通过风冷头降低黏度,确保顺利通过铺丝头机构。每一丝束放料卷都有一自动搭接模块与之对应。



1.导向辊;2.热压接板;3.切刀;4.旧料辊;5.新料辊;  
6.半径传感器;7.夹紧头;8.砧辊;9.风冷头

图 1 自动搭接模块

在铺丝准备过程中,备用丝束手工送至搭接板下并夹紧待用(该过程不妨碍铺丝运行),搭接模块各单元初始状态如图 1 所示。在铺丝运行过程中,半径检测传感器实时监测铺放料卷的半径变化:若传感器检测到某一卷丝束达到预定半径  $R_0$  时,搭接系统启动自动搭接模块中的加热单元工作;若传感器检测到丝束临界耗尽、到达预定半径  $R_1$  时,搭接系统通过通信使铺丝系统暂停运行,并启动自动搭接:热压接板将新料卷首部与旧料卷按照丝束预送长度重叠搭接,丝束中的树脂在温度压力作用下形成稳定相容的搭接界面层;随后切刀在热压板

夹紧状态下将旧丝束切断;热压达到预定搭接时间后热压板松开预浸丝束、冷气风冷搭接区域;在搭接界面温度降低后,铺丝系统继续运行。搭接系统可有效减少重新穿丝或手指搭接占用的铺丝中断时间,纤维丝束搭接流程图如图2所示。

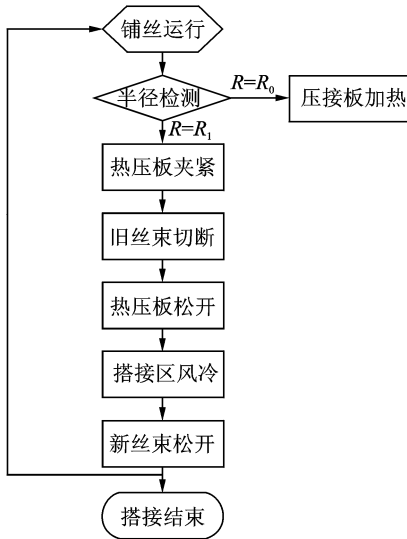


图2 纤维丝束搭接流程图

### 3 控制系统

#### 3.1 硬件平台

实验自动铺丝机采用基于工业个人计算机(Industrial personal computer, IPC)和多轴运动控制器(Universal motion and automation controller, UMAC)作为数控系统,完成纤维丝束在芯模表面的轨迹铺放,其硬件结构如图3所示。在本控制系统中,多轴运动控制器完成伺服电机位置与速度的实时控制、插补运算等工作;作为主机的工控机IPC完成数据的采集、存储、分析处理及显示输出等功能,这样主机可从繁重的控制中解脱出来,进行更高层次的管理和控制任务。

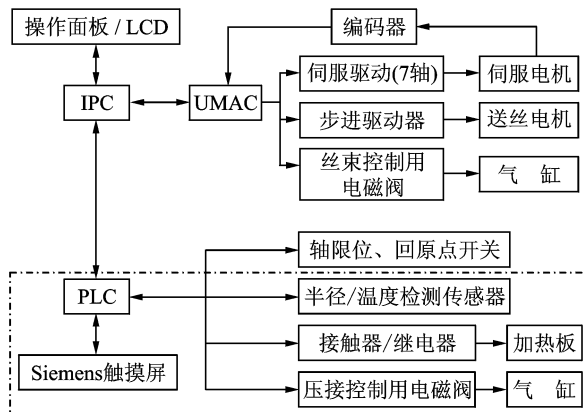


图3 硬件结构

数控系统内部的多轴运动控制器提供了内置型PLC,具有反应快、结构简单等特点,用于处理每一根丝束的夹紧、重送、剪切及施压的逻辑运算,与各坐标轴运动(即铺丝轨迹)密切相关。而对于丝束搭接系统(图3虚线框),尽管同样需要对丝束进行加热、夹紧、剪切、搭接及风冷等逻辑控制,但与各坐标轴运动没有直接逻辑关系,且如果共用一个CPU,大量的PLC程序会影响运行过程中的数据运算和位置控制。从系统经济性和控制角度均弊多利少,故丝束自动搭接系统选用独立的外置型PLC,所用ORMON CP1H PLC具有独立的CPU及控制电路、程序存储器、I/O接口、通信接口和电源等设备,独立于PC机和多轴运动控制器之外工作,既不占用PC机和多轴运动控制器的运行时间及资源,也不受两者运行忙和故障的影响,可以更加安全、可靠地保证机床运行<sup>[9]</sup>。

作为与可编程控制器配套的产品——触摸屏,在控制系统中起着越来越重要的作用。用户可以通过触摸屏随时了解、观察并掌握整个控制系统的工作状态,必要时,还可以通过触摸屏与PLC进行信息交换,向PLC控制系统输入数据、信息和控制命令,进行人工干预。触摸屏利用画面上的按钮和指示灯等来代替相应的硬件元件,以减少PLC需要的I/O点数,使机器的配线标准化、简单化,降低了系统的成本。本文针对ORMON PLC采用了Siemens Smart 700触摸屏,通过RS422通信协议(图4)建立稳定可靠的连接。

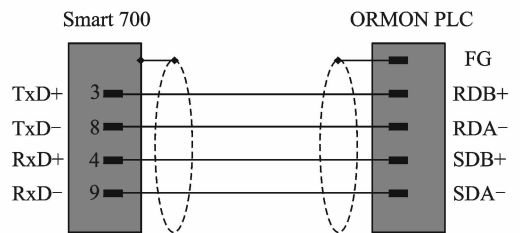


图4 触摸屏与PLC的连接

#### 3.2 软件设计

该控制系统软件包括两部分:(1)人机操作界面部分;(2)PLC程序控制部分。其中人机交互界面主要用于显示设备和系统状态的实时信息,界面上的按钮可产生相应的输入数值、字符或开关信息与PLC进行数据交换,从而产生相应的动作实现系统的控制。触摸屏作为人机界面,实现了启停搭接,驱动夹紧、剪切及风冷等电磁阀和气缸状态的控制,并可对工艺参数(各电磁阀动作时间和搭接压力等)进行设定。

触摸屏的画面在 PC 上使用其专用软件 WinCC Flexible 2008 进行显示和按钮画面的编辑,它的最大特点是不占用 PLC 资源,即不需要 PLC 向串行端口送数据,就可以直接观察或改变 PLC 内部任意单元的数值和端口的状态,并将单元对应的含义以文字的形式显示出来,对操作者而言非常方便地完成置数或修改。鉴于丝束搭接系统的实际工作特点,配置了主界面、参数设置界面和状态显示界面等,其中参数设置界面和手动显示界面分别如图 5,6 所示。

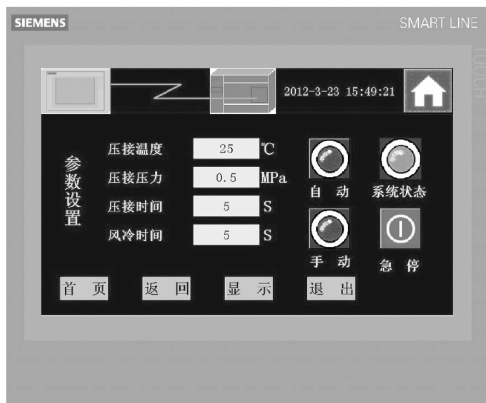


图 5 参数设置界面

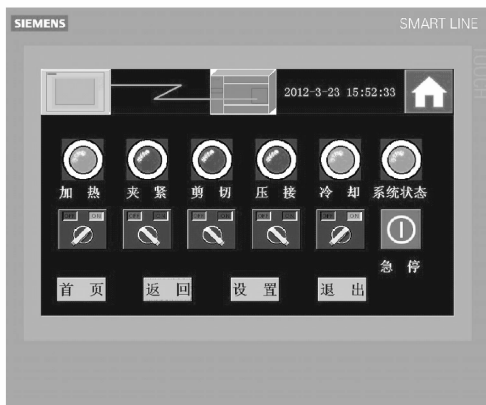


图 6 手动显示界面

ORMON 的 CP1H 系列 PLC 具有丰富的编程指令,软件设计环境良好,系统采用梯形图语言,利用 CX-Programmer 编程软件,同时根据触摸屏操作界面按钮的设定地址和定义的 PLC 端子功能编制程序<sup>[10]</sup>。为达到工艺要求,程序采用图 7 所示控制流程图,程序编制采用模块化结构,主要包括系统初始化模块、半径检测模块、丝束搭接模块和故障检测模块。

PLC 采用扫描方式进行,每个扫描周期全部过程均执行一遍。在系统上电后,系统等待操作人

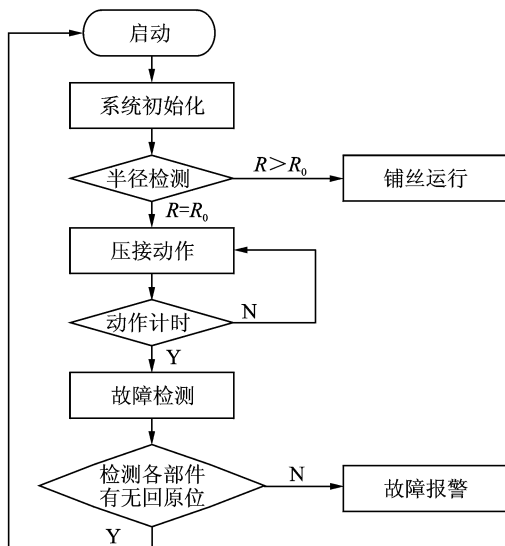


图 7 控制流程图

员在触摸屏上设置参数并显示,并检查各部件位置正常,允许搭接单元正常运行。在铺丝运行过程中实时检测丝束卷筒半径,当低于设定半径值时,通过外置 PLC 与铺丝系统间的通信,使铺丝机构暂停并启动搭接系统;按规定时间完成丝束搭接后,通过故障检测模块检测各部件是否回到原位,若某点未到位,即发出故障指令中断程序运行,待故障排除后,方可重新启动程序,保证各机械部件不受损伤。

控制系统设计成自动工作方式和手动工作方式两种类型。自动工作方式时,搭接机构按照预先输入的工艺要求:如加热温度、搭接压力、搭接时间、风冷时间等,自动将这些模块有机地结合起来完成全部操作。手动工作方式时,操作人员根据操作面板或触摸屏上的按钮,一步一步地调用相应的功能子程序,完成所有工作。无论处于自动工作方式还是手动工作方式,故障检测程序都将随时检测发生的故障并立即终止当前操作。手动工作方式与自动工作方式可以相互转换,但不可并存,在程序上设计了互锁功能的程序段。

## 4 实验验证

为验证搭接机构及控制系统的准确性,将上述方法及实验装置集成到自行研制的 8 丝束自动铺丝设备中(图 8)。采用 6.4 mm 宽纤维丝束在温度 20 °C,压力 0.5 MPa 下进行不同长度搭接实验,搭接及风冷时间均设定为 5 s。同时将自动搭接口系统与铺丝系统进行联合实验,检验两系统间

的逻辑关系。在铺丝运行过程中 PLC 检测料卷实时半径,通过比较指令输出控制铺丝机暂停及搭接开始,经过 PLC 各功能模块的运行,完成丝束搭接并返回控制指令给铺丝系统继续运行。

通过搭接装置搭接长度分别为 15, 20 及 25 mm 的纤维丝束如图 9 所示。从图中可以看出,搭接后的纤维丝束表面平整光滑,层间没有气泡;经测试,层间具有较高的抗撕裂强度满足自动铺丝要求;丝束搭接子机构与铺丝系统逻辑关系正确,控制系统运行稳定,相比手工缩短中断时间 50% 以上,显著提高铺丝效率。



图 8 国产铺丝设备

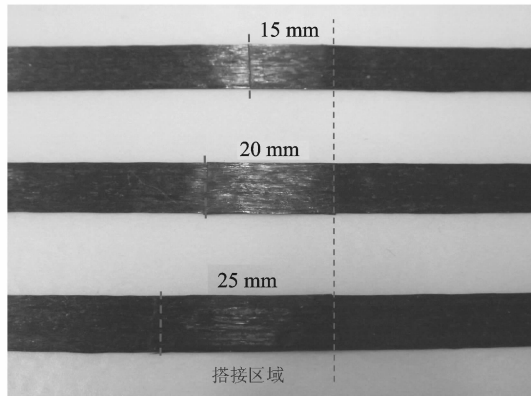


图 9 丝束搭接试件

## 5 结束语

本文针对自动铺丝过程中存在的丝束手工搭接低效率、低质量问题,提出了丝束自动搭接方法,构建了触摸屏加外置 PLC 的独立实验系统,与所研制的铺丝主机集成为铺丝-搭接实验系统;经联合实验,验证了本文所阐述方法的正确性,所开发系统的稳定可靠性,大大提高了丝束搭接质量及铺丝生产效率。

## 参考文献:

- [1] 李勇,肖军. 复合材料纤维铺放技术及其应用[J]. 纤维复合材料, 2002, 9(3): 39-41.  
Li Yong, Xiao Jun. The technology and application of fiber placement [J]. Fiber Composites, 2002, 9(3): 39-41.
- [2] Warek M B. Apparatus and method for manufacture and use of composite fiber components; USA, US 2005/0037195 A1[P]. 2005-02-17.
- [3] Cairns J. Automated tape splicing system; USA, US 6189587 B1[P]. 2001-02-20.
- [4] Tingley M C. Auto-splice apparatus and method for a fiber placement machine; USA, US 2007/0044896 A1[P]. 2007-03-01.
- [5] Oldani T. Fiber placement machine platform system having interchangeable head and creel assemblies; USA, US 2009/0095410 A1[P]. 2009-04-16.
- [6] Hoffmann K, Tingley M C. Replaceable creel in a fiber placement machine; USA, US 7632372 B2[P]. 2009-12-15.
- [7] 丁韬. 自动纤维铺放机[J]. 航空制造技术, 2007, 9: 60-64.  
Ding Tao. Automatic fiber placement machine [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2007, 9: 60-64.
- [8] 严飙,肖军,文立伟,等. 预浸带的快速热压接技术及其搭接性能研究[J]. 航空学报, 2012, 33(8): 1554-1560.  
Yan Biao, Xiao Jun, Wen Liwei, et al. Study on hot-press fast-bonded technology for prepreg winding and its performance of lap jointing [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(8): 1554-1560.
- [9] 文立伟,路华,王永章,等. 在开放式数控系统中 IPC 与 PLC 通信技术的研究[J]. 沈阳工业大学学报, 2007, 29(5): 590-593.  
Wen Liwei, Lu Hua, Wang Yongzhang, et al. Research on communication technology between IPC and PLC in open CNC system [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2007, 29(5): 590-593.
- [10] 雷新利,赵忠. 基于 PLC 和触摸屏的灌装系统设计[J]. 机械与电子, 2007(9): 78-80.  
Lei Xinli, Zhao Zhong. Automation filling system designed based on PLC and touch panel [J]. Mechanical and Electronic, 2007(9): 78-80.

