

复合材料自动铺丝装备及软件技术的发展现状与挑战*

王华侨^①, 郝齐国^②, 王宣鉴^②, 王显峰^②

(^①湖北三江航天红阳机电有限公司, 湖北 孝感 432000;

^②南京航空航天大学材料科学与技术学院, 江苏 南京 211106)

摘要: 复合材料因其具有高比强度、高比模量和耐腐蚀性等优点,在航空航天等关键领域得到广泛应用。为解决自动铺丝(automated fiber placement, AFP)技术在装备和软件方面存在的挑战,深入分析了AFP技术在国内外的发展现状及趋势,国外AFP技术相对成熟,拥有先进的装备和成熟的软件系统,可实现复杂构件的精准铺放和实时监控。相比之下,国内AFP装备仍处于发展阶段,在铺放精度、生产效率和稳定性方面有待提升。同时,国内AFP软件在复杂构件轨迹规划算法上尚未形成统一标准,导致软件功能和效率与国外存在差距。这些因素制约了我国复合材料构件制造水平的提升。因此,AFP装备及软件技术的发展与应用成为复合材料复杂构件自动化成型的研究热点。文章分析了龙门式、卧式和机器人式铺丝机,并对国内外自动铺丝机的研究进展进行了分析与总结。综述了自动铺丝路径规划与运动仿真的相关研究,以及我国AFP技术与国际先进水平的差距与现存挑战。最后,文章对AFP装备与软件的发展趋势进行了总结与展望,为铺丝机的设计与优化提供了参考方向,旨在推动复合材料在我国航空航天等领域的应用,助力新一代铺放装备的升级。

关键词: 复合材料; 碳纤维; 机器人铺丝机; 路径规划; 软件

中图分类号: V258+.3, TH6, TG1 **文献标识码:** A

DOI: 10.19287/j.mtmt.1005-2402.2025.08.007



全文在线

Research status and challenges of automatic fiber placement equipment and software technology for composite materials

WANG Huaqiao^①, HAO Qiguo^②, WANG Xuanjian^②, WANG Xianfeng^②

(^①Hubei Sanjiang Aerospace Hongyang Mechanical & Electrical Co., Ltd., Xiaogan 432000, CHN; ^②College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, CHN)

Abstract: The high specific strength, high specific modulus, and corrosion resistance of composite materials make them widely used in critical fields such as aerospace. To address the challenges in automated fiber placement (AFP) technology regarding equipment and software systems, a comprehensive analysis of the current development status and trends of AFP technology both domestically and internationally is conducted. Globally, AFP technology has achieved relative maturity, featuring advanced equipment and well-developed software systems capable of precise fiber placement and real-time monitoring for complex composite components. In contrast, China's AFP equipment is still in the development phase, requiring significant improvements in placement accuracy, production efficiency, and operational stability. Furthermore, domestic AFP software systems currently lack standardized algorithms for trajectory planning of complex components, resulting in noticeable gaps in functionality and

* 江苏省科技攻关计划项目“大涵道比航空发动机复材叶片短程自动铺放装备技术研发”(BE2023014-4); xx 专项“航天大型 xx 复合材料自动铺放 xx 验证”(2024ZD0704401)

computational efficiency compared to international counterparts. These technological limitations collectively constrain the advancement of China's composite component manufacturing capabilities to higher precision and productivity levels. Therefore, the development and application of AFP equipment and software technology have become research hotspots for the automated forming of complex composite components. This paper analyzes gantry-type fiber placement machines, horizontal fiber placement machines, and robotic fiber placement machines, summarizing and analyzing the research progress of automated fiber placement machines domestically and internationally. It reviews relevant studies on automated fiber placement path planning and motion simulation, as well as the gaps and existing challenges between China's AFP technology and international advanced levels. Finally, this paper summarizes and forecasts the development trends of AFP equipment and software, providing a reference direction for the design and optimization of fiber placement machines, aiming to promote the application of composite materials in fields such as aerospace in China and facilitate the upgrading of the next generation of AFP equipment.

Keywords: composites; carbon fiber; robotic AFP machine; path planning; software

先进复合材料因其高比强度、高比模量、显著的减重效果以及良好的耐腐蚀性^[1], 已成为航空航天领域的理想材料。碳纤维复合材料在航空航天领域的应用广泛, 涵盖了商用飞机、军用飞机和无人机^[2]。根据《2023 全球碳纤维复合材料市场报告》, 商用飞机占比 36%, 军用飞机 21%, 无人机 18%^[3-5]。全球树脂碳纤维复合材料需求和中国碳纤维需求如图 1 所示。

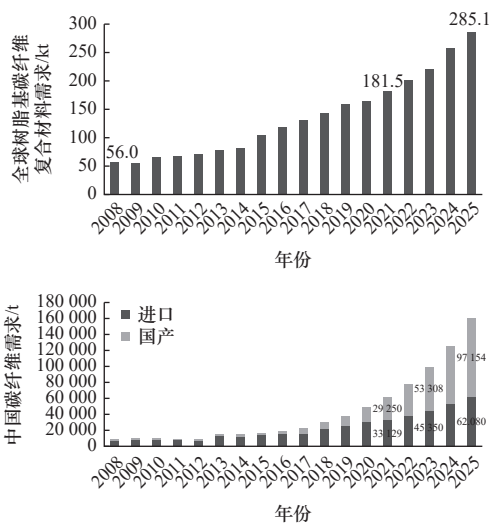


图 1 全球树脂碳纤维复合材料需求和中国碳纤维需求

Fig. 1 Global demand for resin carbon fiber composites and China's demand for carbon fiber

随着复合材料技术的不断进步, 其应用范围也在不断扩大, 从大型航空航天整体结构件到小型复杂功能部件, 复合材料的使用愈加普遍。自动铺丝 (AFP) 技术作为一种新兴的自动化制造方法, 正在逐步取代传统的手工铺丝工艺, 在复合材料的制

造中展现出显著优势^[6-10]。近年来, AFP 装备的研发取得了一系列进展, 涵盖机床结构、导纱系统、剪切机构、重送机构、铺放压力系统和加热系统等方面^[11-17]。然而, 随着复合材料在航空航天领域的广泛应用, 设备研发仍面临挑战。本文通过对龙门式、卧式和机器人铺丝机的综述调研, 总结了近年来国内外 AFP 装备和软件技术的研究进展, 对其未来发展趋势做出了预测。希望国内继续加大对相关产业的支持力度, 积极引入高端 AFP 装备和软件技术, 同时加强材料和工艺工程化的应用研究, 从而推动我国航空航天工业和复合材料产业的不断发展。

1 AFP 装备及其架构

典型的自动铺丝设备由机床主体、纱架系统和铺丝头三大部分组成, 以机床主体分别介绍三类 AFP 装备, 分为卧式、龙门式和机器人式铺丝机^[6], 三种类型的铺丝机的使用场景和优缺点^[18]见表 1。AFP 装备及其铺放原理^[19]如图 2 所示。

1.1 龙门式铺丝机

图 3 所示的龙门式自动铺丝机通常采用动柱式设计, 其工作模式为模具固定、龙门架移动。该设备的结构特征表现为 X、Y、Z 三个轴向具有大行程运动能力, 且整体机械部件尺寸较大^[20-22]。适合场景为大型复合材料构件的制造, 以及采用开敞式模具的铺放成型工艺。

目前, 复合材料龙门式结构作为铺丝头的运动平台, 基本由欧美国家垄断生产, 比如美国 Ingersoll

和 EI (Electroimpact), 法国 Fives 与西班牙 MTorres 等公司, 国内还处于追赶阶段。图 4 所示为国外典型的 AFP 装备。

表 1 卧式、龙门式和机器人式铺丝机的优缺点及适用场景
Tab. 1 Advantages and disadvantages of horizontal wire spreaders, gantry wire spreaders, and robotic wire spreaders and their application scenarios

铺丝机	优点	缺点	适用场景
卧式铺丝机	适用于大直径回转类构件的铺放, 铺放速度较快	不太适用于复杂曲面构件的铺放, 精度受限	适用于直径较大的圆形或曲面构件的铺放
龙门式铺丝机	适用于大型复杂构件的成型制造, 具有较高的稳定性	设备体积大, 占地面积较大	适用于较大型的复杂构件, 如机身等
机器人式铺丝机	相对灵活, 适用于不同形状的构件, 可以实现多轴运动	刚度相对较弱, 可能导致铺放精度不理想, 对工作环境要求较高	适用于形状复杂, 小批量生产的构件, 需考虑工作环境条件和精度要求

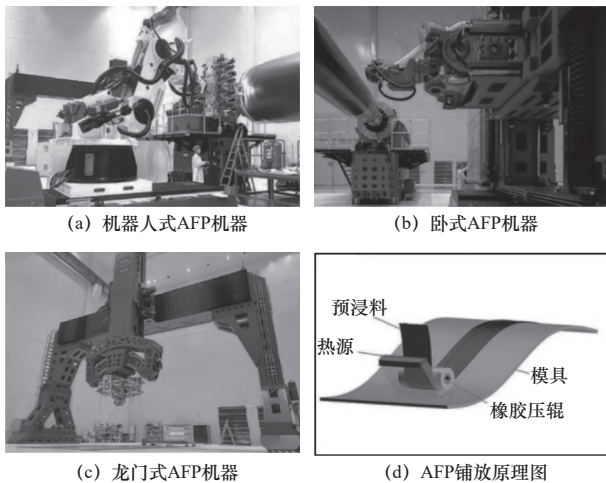


图 2 AFP 装备及其铺放原理

Fig. 2 AFP equipment and its principle

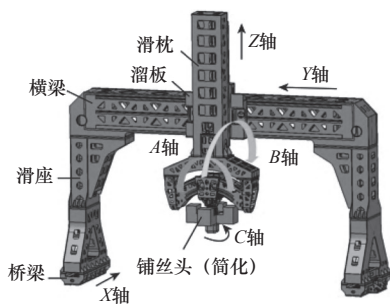


图 3 典型龙门式铺丝机结构

Fig. 3 Typical structure of gantry AFP machine

Mongoose 是 Ingersoll 公司的标志性 AFP 装备 (图 4a), 该设备支持 4~32 丝束铺放 (3.18 mm、6.35 mm 或 12.7 mm 宽), 并配备西门子 840D 和

Sinumerik One CNC 控制器。Electroimpact 公司与 WITTENSTEIN 公司合作, 推出模块化伺服纱架头 (图 4b), 解决碳纤维层压板制造中的头部运动滞后问题。选用 WITTENSTEIN TP+ 系列中最小的减速器, 确保系统紧凑、轻量且具高刚度和效率。Fives 公司研制的辛辛那提双子座 (Cincinnati GEMINI) 为混合 ATL (automated tape laying) /AFP 系统 (图 4c), 它可以处理长达 8 m 的大型复合构件, 支持多种铺带宽度并配置大型龙门平台以实现并发工作, 节省生产时间。MTorres 公司研制的龙门式铺放设备 (图 4d), 能够处理复杂的凸凹大型部件几何形状, 系统配备可更换头部, 支持 AFP-AFP 和 AFP-ATL 配置, 每个铺丝头最多可铺放 24 丝束, 提升了生产效率和材料利用率。

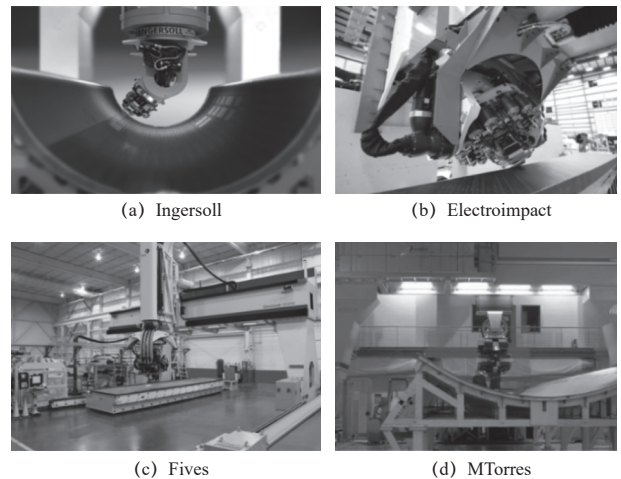


图 4 国外典型的龙门 AFP 装备

Fig. 4 Typical foreign gantry AFP equipments

近年来, 中国也研发出了七轴同步联动的龙门式铺丝机, 实现了铺丝过程的连续性, 最大铺放速度可达 30 m/min。该设备的 X 方向行程达 30 m, Y 方向行程达 6.5 m, 能高效地铺叠最多 32 丝束铺放, 尽管速度略低于美国的机器, 但标志着中国技术实现了重大突破。其中, 浙江大学研发的 7 轴 16 丝束大型龙门铺丝机是一款出色的 AFP 装备^[23], 这台机器具有七轴操作能力, 可以实现多轴同步联动, 其性能参数见表 2。

2023 年, 通用技术齐二机床推出的 GAFP30/L120 地轨龙门式碳纤维复合材料铺丝/铺带设备^[24], 铺丝设备支持 16 丝束铺放, 专为翼面等平板零件的纤维铺放而设计 (图 5)。设备具备冗余驱动控制, 最高运动速度可达 40 m/min。其高精度定位 (0.03 mm) 和重复定位精度 (0.015 mm) 确保了

铺放的精准性。 X 轴、 Y 轴和 Z 轴行程分别为12 000 mm、4 000 mm和1 500 mm。

表2 大型复材构件自动铺放设备的性能参数

Tab. 2 Performance parameters of automatic laying equipment for large composite parts

材料类型	热固性预浸料
丝宽/mm	6.35
丝数	16
最大压力/N	1 300
铺放宽度/mm	104
红外加热/ $^{\circ}\text{C}$	18~80
进给速率/(m/min)	60
过程控制	AFP系统与铺放程序



图5 通用技术齐二机床地轨龙门式碳纤维复合材料铺丝/铺带设备
Fig. 5 Ground rail gantry-type AFP equipment developed by Qiqihar No.2 Machine Tool (Group) Co., Ltd.

中国航空制造技术研究院^[25]研制了高架桥式(图6a)和动龙门式(图6b)两种结构形式的铺丝设备,可搭配8、16、24、32丝束分体式铺丝头和8、16、24丝束可换头集成式铺丝头,多丝束铺放兼顾铺放效率和复杂结构适用性。 X 、 Y 、 Z 三个直线轴+三个摆动轴的六轴联动可实现复杂铺丝轨迹,现有设备最大工作范围30.0 m \times 6.5 m \times 2.0 m,最大速度60 m/min,铺放位置偏差 ± 2 mm,铺放间隙0~2.5 mm,最短铺丝长度90 mm(分体头)/110 mm(集成头)。

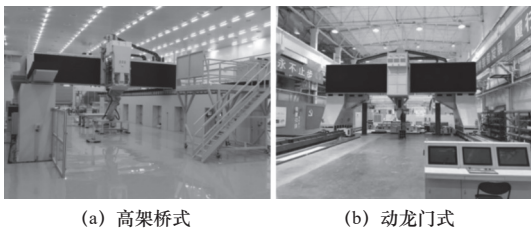


图6 中国航空制造技术研究院大型立式复合材料AFP装备
Fig. 6 Large vertical AFP equipment developed by AVIC Manufacturing Technology Institute

1.2 卧式铺丝机

卧式自动铺丝机的机床主轴与地面平行,如图7

所示。卧式铺丝机 X 轴(回转类模具轴向)和 Z 轴(竖直方向)行程长,尤为适合铺放大直径回转类构件,通过多轴联动控制实现高度灵活的铺丝操作,为了达到适应更多的回转体工件的目标。

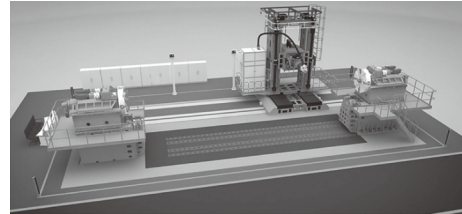


图7 浙江大学自主研发9轴8丝束大型卧式铺丝机
Fig. 7 Zhejiang University independently researched and developed a 9-axis, 8-filament bundle large-scale horizontal AFP machine

空客公司采用MTorres公司的卧式铺丝设备生产机翼大梁^[26](图8a),该铺丝机具备16丝束铺放能力,铺放预浸料丝宽6.35 mm,其铺放速度可达60 m/min。Fives公司研发的Cincinnati VIPER[®]1200配备7个运动轴(图8b),其切割-夹紧-重启系统提供精确的丝束铺放。每根丝束(可选3.2、4.0、6.4 mm)均可独立控制,从而最小化间隙和重叠^[27]。

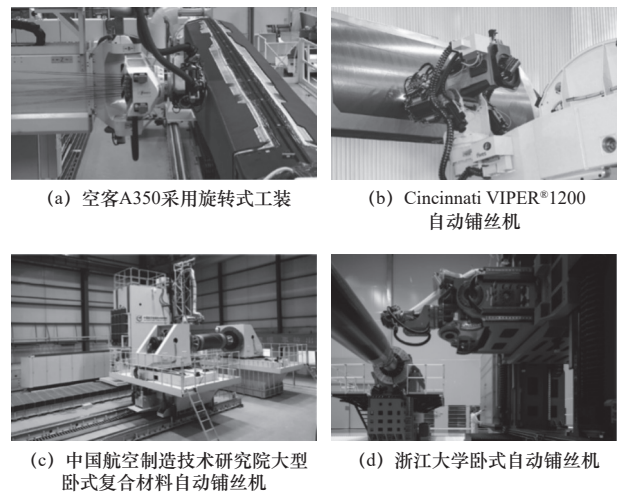


图8 国内外不同型号的卧式铺丝机
Fig. 8 Horizontal fiber placement machines of different models domestically and internationally

中国航空制造技术研究院^[25]研制的大型卧式铺丝机主要铺放6.35 mm宽热固性碳纤维预浸料(图8c)。设备主体前方平行布置模具回转工装,可搭配8、16丝束分体式铺丝头,多丝束铺放兼顾铺放效率和复杂结构适用性。 X 、 Y 、 Z 三个直线轴+三个摆动轴及模具回转轴七轴联动实现复杂铺丝轨迹,现有设备可铺最大零件 $\phi 5$ m、长度15 m,

直线轴采用直线电机驱动，最大速度 45 m/min，铺放位置偏差 ± 2 mm，铺放间隙 0~2.5 mm，最短铺丝长度 90 mm。浙江大学联合团队^[28]研制的大型卧式铺丝机主要用于航空、航天领域复合材料回转体零件的丝束自动铺贴，适用对象包括大型机身壁板、机翼梁、进气道等复杂零件（图 8d）。

1.3 机器人式铺丝机

机器人式铺丝机采用机器人作为机床主体，具有灵活性高、适应性强的特点^[29]。机器人铺丝机有 6 个与机械臂相关的旋转自由度和 1 个线性轴。

在国外，KHERADPISHEH M 等^[30]使用康科迪亚复合材料中心的商用 AFP 机器（图 9a），该 6 轴机器人的每道工序可支持 4 丝束铺放，长度可超过 76.2 mm，并支持随时重新启动，并使用氮气热喷枪加热。同时，美国的 Automated Dynamic 公司^[31]在直升机尾梁生产中，采用 XT 系列纤维铺放机器人（图 9b），铺放单向碳纤维和 PEEK 热塑性预浸料过程。

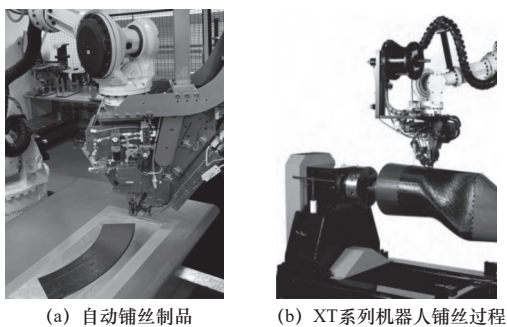


图 9 国外的机器人式铺丝机
Fig. 9 Robotic AFP machines abroad

国内通用技术齐二机床的机器人式铺丝设备采用卧式布局，具备 9 轴控制和联动能力，可配置 2、4、8 丝束圆盘型铺丝头，专为回转类和梁类复合材料构件的自动铺放设计（图 10），其轻量化结构满足高速动态要求，最高运动速度可达 50 m/min^[32]。

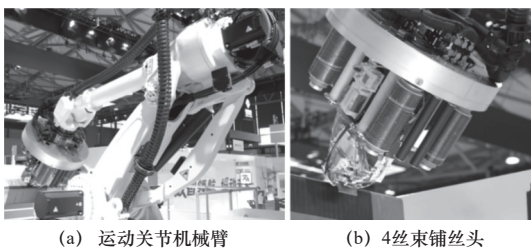


图 10 通用技术齐二机床机器人式自动铺丝机

Fig. 10 Robotic AFP machine developed by Qiqihar No.2 Machine Tool (Group) Co., Ltd.

图 11 所示为光威精密机械有限公司研制的自

动化碳纤维铺缠一体机，通过加热软化碳纤维预浸料，逐层铺叠在模具表面，并利用湿法缠绕技术将浸树脂的纱线缠绕到芯模上。设备参数：最大工件长度不低于 4.5 m，回转半径不低于 0.75 m，主轴转速不低于 30 r/min，承载能力不低于 3.5 t，最大有效铺缠长度不低于 3.5 m，机械臂自由度不低于 6 等。铺丝头有不低于 8 个的通道，铺放精度不可达 ± 2.5 mm，缠绕机最大出纱速度不低于 90 m/min，确保了碳纤维铺缠过程的高效、精确与稳定^[33]。



图 11 自动铺缠一体机

Fig. 11 Automatic placement and winding integrated machine

中国航空制造技术研究院开发的一款机器人式自动铺丝机（图 12），铺放 6.35 mm 宽的热固性碳纤维预浸丝束，适用于进气道、C 型框等复杂构件的曲面变化。系统配置灵活，可选用 8、16、24 或 32 丝束的分体式及集成式铺丝头，加工能力覆盖直径 5 m、长度 10 m 的大型构件，并具备 ± 2 mm 的高铺放定位精度。在工艺控制方面，可实现 0~2.5 mm 的铺放间隙调节，其中分体式铺丝头最短铺丝长度 90 mm，集成式铺丝头则为 110 mm，充分满足航空航天领域高精度复合材料构件的制造需求。



图 12 机器人式复合材料自动铺丝机

Fig. 12 Robot-based composite AFP machine

2 自动铺丝路径规划与运动仿真

复合材料自动铺丝过程涉及 AFP 装备在模具表面按照预定路径输送和剪切丝束。硬件设备的效率、可靠性、张力控制精度和定位精度对铺放质量至关重要^[34]，其中国内外自动铺丝路径规划相关的研究见表 3。

Conbility 公司与 SWMS 公司合作开发的 CAM

表 3 国内外自动铺丝路径规划相关的研究

Tab. 3 Research related to AFP path planning at home and abroad

作者	构件	主要内容
SCHUELER K ^[35]	NURBS 曲面	提出了沿偏置方向取距离为带宽的点向曲面作投影，推导了偏置误差的计算公式
SHIRINZADEH B ^[36]	开曲面	推导并给出了开曲面铺放的初始路径算法、等距偏置算法、轨迹延伸算法的数值求解方法
LEMAIRE E ^[37]	圆锥	生成了平面定角度、变角度层合板轨迹及复合材料圆锥壳轨迹
HÉLY C ^[38]	Y形管	探索了机器人自动铺放在多轴交叉曲面（Y形管）上路径生成算法
WEHBE R ^[39]	圆柱面	通过轮廓扫描图像评估铺层质量，发现路径曲率对缺陷的影响程度最高
HYER M W ^[40]	曲面	基于复合材料有限元仿真结果，采用与单元主应力方向构造变角度纤维路径
NAGENDRA S ^[41]	曲面	基于几何模型特征，选取一系列的控制点，构造非均匀有理B样条曲线（NURBS），将NURBS曲线作为变角度纤维路径
PARNAS L ^[42]	曲面	提出用三次贝塞尔曲线（cubic bezier curves, CBC）进行纤维路径定义
HONDA S ^[43]	曲面	建立二维三次函数等值线来描述纤维路径
BLOM A W ^[44]	锥壳	定义了四种不同的理论路径：测地线路径、定角度路径、线性变角度路径和定曲率路径
富宏亚 ^[45]	闭曲面	对四边形网格轨迹算法和UG软件二次开发法进行对比分析
	薄壁曲面	采用Bezier曲线进行纤维铺放路径的构造
李玥华 ^[46]	非可展回转曲面	对两类非可展回转曲面进行了轨迹规划及覆盖性分析，通过变角度方式实现了曲面的布满
张一卓 ^[47]	飞机尾椎曲面	提出了定角度和变角度算法
李俊斐 ^[48-49]	S形进气道	研究了适用于网格化曲面的定角度纤维路规划方法
	机头座舱	对曲面在开孔的时候如何进行轨迹设计比较全面地分析
曹忠亮 ^[50]	薄壁曲面	采用三次NURBS曲线对圆柱壳进行变角度纤维铺放路径规划
徐涛 ^[51]	一般类回转体	探索了一般类回转体在铺丝时的轨迹算法以及相关的覆盖性分析方案
王培源 ^[52]	自由曲面	基于承载信息为单层的自由曲面进行变角度轨迹规划方案，对轨迹规划算法做了补充

软件增强了复杂路径的离线编程能力，并可在线监测工艺参数，确保生产过程的质量控制（图13），而且该系统能在最高工艺速度下将温度保持在 $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

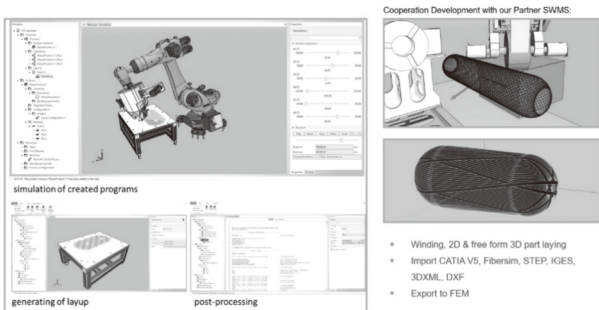


图 13 利用 SWMS 开发的 CAM 软件

Fig. 13 CAM software developed using SWMS

Cincinnati 公司开发的 ACES[®] 专为铺带和铺丝层合板设计，其功能包括快速评估零件覆盖率、碰撞检测、图形和表格报告，以及全面的仿真和编程

工具，检查纤维偏差、起皱、间隙等重要参数（图14）。ACES[®] 兼容 Microsoft Windows 7 和 10（32 位和 64 位），Catia V5、Dassault 的 Composites Workbench、Siemens NX 和 PTC Creo。

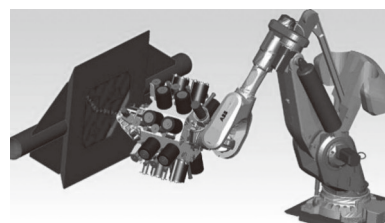


图 14 ACES 软件仿真画面

Fig. 14 ACES software simulation interface

国内在 AFP 路径规划与运动仿真方面，与国外成熟的 AFP 路径规划与后者处理仿真商业化软件相比，在大型复杂构件铺丝路径生成效率方面仍有差距，针对部分异形构件的算法效率与可靠性还有

待大幅提高。但是关于自动铺丝路径规划与运动仿真的步伐从未停止。例如，张俊等^[53]提出了一种自适应主应力驱动的变角度铺丝路径规划算法（图 15），模拟生物结构，实时监测应力分布并自动调整铺放方向。

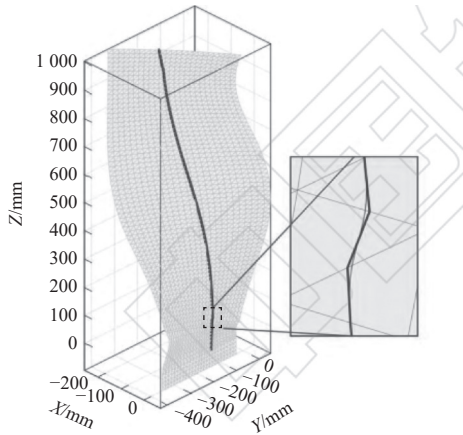


图 15 初始路径三次 B 样条插值处理

Fig. 15 Initial path cubic B-spline interpolation processing

张铭雨等^[54]开发了一种基于网格模型的自动铺丝路径规划方法。该方法梳理了路径规划流程，重建三角网格拓扑以节省存储空间，结合 CATIA 二次开发工具，在 Visual Studio 平台开发了路径规划模块（图 16a）。薛柯等^[55]针对大尺寸变截面翼梁（长度超过 10 m）的复合材料自动铺丝成型技术，确定了各角度铺层的轨迹规划方法（图 16b），并给出了铺丝成型轨迹的优化处理方案。姜世阔等^[56]研究了点云曲面自动铺丝路径规划，提出了直接投影法，利用移动最小二乘投影法优化初始路径。改进了点云切片法，提出点云投影切片法（图 16c）。通过 CATIA 的逆向工程模块实现了算法的可视化，建立了三维建模软件与路径规划算法的系统关系。王霖等^[57]对树脂基复合材料机身角片的铺丝路径进行了两种设计及分析，探讨了铺丝路径对固化后零件质量的影响（图 16d）。孙超等^[58]提出了一种改进的 RRT-Connect (rapidly-exploring random tree-

connect) 算法提高了算法的目标导向性，加快了路径规划效率。仿真结果表明，改进的 RRT-Connect 算法相较于传统 RRT-Connect 算法，平均路径规划时间缩短了 48.7%，平均路径长度减少了 25.2%。

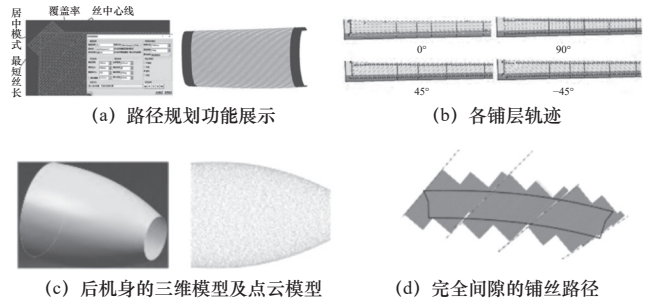


图 16 自动铺丝的路径规划

Fig. 16 Path planning for AFP

3 国内 AFP 技术的差距及挑战

国内的 AFP 装备涉及的装备主机技术及数控技术存在差距较大，表现在铺丝机的速度、效率、质量稳定性均表现一般，主要差距在以下两个方面：

(1) 自主研发的 AFP 装备虽然已经可以完成复合材料铺放要求，但是在铺放精度和设备运行可靠性方面，国内设备仍需要不断完善改进。

(2) 自主研发的 AFP 装备的铺放效率要低于国外的同类设备，尤其是铺放速度差距较大，对于如何在高速状态下保证铺放精度和丝束张力稳定性仍有很多问题亟待研究。

(3) AFP 路径规划与运动仿真方面，与国外成熟的 AFP 路径规划与后者处理仿真商业化软件相比，在大型复杂构件铺丝路径生成效率方面仍有差距；针对部分异形构件的算法效率与可靠性还有待大幅提高；国产研制的 AFP 装备与国外主流装备的差距见表 4。

4 总结与展望

随着我国航空工业的快速发展，先进复合材料

表 4 西安交通大学与国外 AFP 装备的主要功能参数比较

Tab. 4 Comparison of major functional parameters of AFP equipments between Xi'an Jiaotong University and foreign countries

制造厂家	铺放精度/mm	铺放速度/(m/min)	CAD/CAM软件系统	主要差距表现
西安交通大学	±2.50	30	具有功能较完备的配套CAD/CAM系统	国内设备铺放速度较低； 国内设备精度较低； 国内设备可靠性有待提高； 路径规划效率与可靠性低
MTorres (西班牙)	±1.25	60	具有功能完备的CAD/CAM系统	
Forest-Liné (法国)		60	具有功能完备的CAD/CAM系统	
Electroimpact (美国)		50.8	采用第三方VERICUT软件	

在机翼、机身、进气道等关键结构件上的广泛应用,对自动纤维铺放装备提出了更高要求。本文系统梳理了国内外 AFP 技术发展现状,从设备发展历程、主体结构(龙门式、卧式和机器人式)等多个维度进行了深入分析。研究表明,虽然国内在功能原理样机研发和平面模具应用方面取得了一定成果,并在复杂曲面轨迹规划、工艺性研究、设备控制等领域取得明显进展,但与国际先进水平相比仍存在显著差距。国产 AFP 装备在核心技术指标上表现不足,主要体现在:铺放速度普遍低于 40 m/min(国外可达 60 m/min 以上)、铺放精度实际控制在 ± 2.5 mm(国外可达 ± 1.25 mm)、智能化控制水平较低等方面。特别是在线检测、模具自动标定、温湿度控制等关键技术环节亟待突破。当前国产 AFP 装备面临的主要挑战包括:结构设计针对性不足,常借鉴金属切削机床设计理念;铺丝头动态稳定性有待提升;高速大惯量运动控制技术不成熟;CAD/CAM 软件算法效率不足,复杂型面路径规划能力欠缺。此外,在热塑性材料和干纤维铺放等新兴工艺领域的研究也相对滞后。为推动国产 AFP 技术发展,需要重点突破以下方向:开展专用化机床结构设计研究,满足多自由度、高速大惯量要求;提升控制系统智能化水平,完善在线检测功能;优化铺丝头机械结构,提高动作控制精度;深化工艺研究;开发具有自主知识产权的 CAD/CAM 软件系统。只有通过系统性的技术创新,才能实现高端 AFP 装备的国产化替代,提升我国复合材料制造的工艺水平和质量一致性。

铺放装备的发展趋势呈现多样化和创新化的特点,主要体现在以下几个方面。

(1) 短程铺丝:短程铺丝技术可以更加灵活地适应各种构件的铺丝需求,降低材料浪费,提高生产效率。

(2) 单丝束网格铺放:单丝束网格铺放技术能够实现对复合材料构件的局部加强,提高其结构性能和使用寿命。

(3) 湿法铺缠:湿法铺缠技术是一种在纤维预浸料中直接进行铺缠的工艺,相比于干法铺丝,它能够更好地控制预浸料的浸润性和固化过程,提高了复合材料构件的质量和性能。

(4) 大宽度柔性铺贴:大宽度柔性铺贴技术主要针对大尺寸、复杂形状的构件,通过使用具有柔性的铺丝设备,实现对构件表面的覆盖和铺贴。

综上所述,铺放装备的发展趋势主要是向着更灵活、更智能、更高效的方向发展,以满足不断变化的市场需求和复杂的制造要求。

参 考 文 献

- [1] 王显峰,段少华,唐珊珊,等. 复合材料自动铺放技术在航空航天领域的研究进展 [J]. 航空制造技术, 2022, 65(16): 64-77.
- [2] 科技日报. 量体定制大飞机: 国产自动铺丝机诞生 [EB/OL]. (2023-07-28) [2024-12-03]. <https://www.chinaerospace.com/article/show/5580694ff-0a464ac8d5810860f47d7b9>.
- [3] 赛奥碳纤维技术. 全球碳纤维复合材料市场报告 [EB/OL]. (2022-05-11) [2024-12-10]. <https://caifuhao.eastmoney.com/news/20220511102709-100629350>.
- [4] 张一卓. 小鹰 500 机身尾椎纤维铺放路径规划与 CAM 技术 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [5] 李俨,蒋君侠,何玉筱,等. 先进复合材料自动铺丝设备研究现状与发展趋势 [J]. 航空制造技术, 2023, 66(12): 74-83.
- [6] 王显峰,张育耀,赵聪,等. 复合材料自动铺丝设备研究现状 [J]. 航空制造技术, 2018, 61(14): 83-90.
- [7] 程松,徐志明,陈金成. 复合材料自动铺丝计算机辅助设计软件的设计与应用 [J]. 上海电气技术, 2023, 16(1): 17-21.
- [8] 文立伟,肖军,王显峰,等. 中国复合材料自动铺放技术研究进展 [J]. 南京航空航天大学学报, 2015, 47(5): 637-649.
- [9] 徐志明,陈金成,程松,等. 碳纤维自动铺丝机三维运动仿真软件 [J]. 上海电气技术, 2021, 14(3): 50-55.
- [10] 段玉岗,刘芬芬,陈耀,等. 纤维铺放压紧力及预浸带加热温度对复合材料力学性能的影响 [J]. 复合材料学报, 2012, 29(4): 148-156.
- [11] 韩振宇,邵忠喜,路华,等. 七自由度四丝束纤维铺放机及数控系统的开发 [J]. 材料工程, 2009(增刊 2): 211-215.
- [12] 韩振宇,王志斌,路华,等. 一种新型自动铺丝张力控制系统的研制 [J]. 玻璃钢/复合材料, 2014(5): 4-8.
- [13] 冉庆波,肖鸿,杨富鸿,等. 含孔曲面自动铺丝轨迹规划算法 [J]. 航空学报, 2022, 43(9): 688-700.
- [14] 陈宇宇,逢博,张云峰. 复合材料自动铺丝技术研究进展 [J]. 纤维复合材料, 2022, 39(2): 95-99.
- [15] 曹忠亮,林国军,郭登科,等. 6 自由度自动纤维铺放成型机设计与研究 [J]. 制造技术与机床, 2022(4): 75-81.
- [16] 朱珮旗,樊红日,钱波. 复合材料自动铺丝软件技术研究与应用综述 [J]. 软件工程与应用, 2022, 11(6): 1521-1533.
- [17] 陈博. 国内外复合材料工艺设备发展述评之四: 自动铺放成型 [J]. 复合材料科学与工程, 2023(增刊 1): 34-43.
- [18] 付忠奎,张浩天. 复合材料铺放成型装备的架构及其适用范围 [J]. 复合材料科学与工程, 2020(9): 123-128.
- [19] MIAO L, ZHU W D, GUO Y J, et al. An analytical model for pressure distribution in automated fiber placement on irregular surfaces and its application in aeronautical manufacturing [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 106: 102-116.
- [20] 杨金辉. 大型复合材料丝束铺放机关键部件结构分析 [J]. 航空制造技术, 2010, 53(22): 12-15.
- [21] 刘兴松. 大跨距龙门式自动铺丝机横梁结构优化与变形补偿技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- [22] 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 [J]. 航空学报, 2013, 34(5): 1232-1240.
- [23] 吴剑波. 大型龙门自动铺丝机速度规划与精度保障技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2023.

- [24] 中国泵阀网. 齐二机床顺利完成大型地轨龙门式碳纤维复合材料铺丝铺带机生产组织任务 [EB/OL]. (2023-3-22) [2024-12-03]. <http://www.zgbfw.com/info/pump-news-1926671.html>.
- [25] 中国航空制造技术研究院. 复材构件制造设备 [EB/OL]. (2023-11-12) [2024-12-03]. <https://www.avicmti.com/c/2023-08-11/589808.shtml>.
- [26] 郑广强, 姚锋, 周晓芹. 自动铺丝技术及其在 A350 制造过程中的应用 [J]. 航空制造技术, 2017(16): 76-82.
- [27] 弗戈工业在线. 3D 打印复合材料加工设备的翘楚-法孚集团 (FIVES) [EB/OL]. (2016-1-14) [2024-12-11]. <https://mw.jgvoegel.cn/c7-63985.shtml>.
- [28] 杭州艾美依航空制造装备有限公司. 复合材料铺放装备 [EB/OL]. (2023-9-10) [2024-12-3]. <https://www.chinaame.com/fhclpfzb>.
- [29] 王显峰, 严飙, 薛柯, 等. 机器人高效自动铺丝技术研究进展 [J]. 航空制造技术, 2019(16): 14-20.
- [30] KHERADPISHEH M, HOJJATI M. In-plane and out-of-plane deformations in automated fiber placement employing micromechanics method [J]. *Composites, Part A. Applied Science and Manufacturing*, 2023, 170: 107543.
- [31] VENKATESAN C, ZULKIFLI F, SILVA A. Effects of processing parameters of infrared-based automated fiber placement on mechanical performance of carbon fiber-reinforced thermoplastic composite [J]. *Composite Structures*, 2023, 309: 116725.
- [32] 齐齐哈尔日报. 通用技术齐二机床参展国际展会 [EB/OL]. (2024-6-20) [2024-12-3]. https://www.qqhr.gov.cn/qqhe/c100124/202406/c02_47-8230.shtml.
- [33] 高新区党政办公室. 国内领先光威成功打造自动铺丝装备 [EB/OL]. (2024-8-12) [2024-12-03]. http://www.whctp.gov.cn/art/2024/8/12/art_4-1728_4805245.html.
- [34] 黄威, 姚锋, 郑广强. 自动铺丝软件技术及国内应用情况概述 [J]. 玻璃钢/复合材料, 2018(12): 102-106.
- [35] SCHUELER K, MILLER J, HALE R. Approximate geometric methods in application to the modeling of fiber placed composite structures [J]. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 2004, 4(3): 251-256.
- [36] SHIRINZADEH B, CASSIDY G, OETOMO D, et al. Trajectory generation for open-contoured structures in robotic fibre placement [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2007, 23(4): 380-394.
- [37] LEMAIRE E, ZEIN S, BRUYNEEL M. Optimization of composite structures with curved fiber trajectories [J]. *Composite Structures*, 2015, 131: 895-904.
- [38] HÉLY C, BIRGLEN L, XIE W F. Feasibility study of robotic fibre placement on intersecting multi-axial revolution surfaces [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2017, 48: 73-79.
- [39] WEHBE R, SACCO C, RADWAN A B, et al. Influence of process parameters in AFP fiber steering on cylinders: constant curvature paths [J]. *Composites Part C: Open Access*, 2020, 2: 100036.
- [40] HYER M W, CHARETTE R F. Use of curvilinear fiber format in composite structure design [J]. *AIAA Journal*, 1990, 29(6): 1011-1015.
- [41] NAGENDRA S, KODIYALAM S, DAVIS J, et al. Optimization of tow fiber paths for composite design [C]//36th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, New Orleans: AIAA, 1995: 1275.
- [42] PARNAS L, ORAL S, CEYHAN Ü J C S, et al. Optimum design of composite structures with curved fiber courses [J]. *Composites Science and Technology*, 2003, 63(7): 1071-1082.
- [43] HONDA S, NARITA Y. Vibration design of laminated fibrous composite plates with local anisotropy induced by short fibers and curvilinear fibers [J]. *Composite Structures*, 2011, 93(2): 902-910.
- [44] BLOM A W, TATTING B F, HOL J M, et al. Fiber path definitions for elastically tailored conical shells [J]. *Composites Part B*, 2009, 40(1): 77-84.
- [45] 富宏亚, 邵忠喜, 韩振宇. 纤维铺放轨迹规划的两种方法及其比较研究 [J]. 材料工程, 2009(增刊 2): 349-353.
- [46] 李明华, 富宏亚, 韩振宇, 等. 两类非可展曲面零件自动纤维铺放变角度轨迹规划算法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2013, 25(10): 1523-1529.
- [47] 张一卓, 韩妙玲, 赵尧旭, 等. 小型飞机尾椎类零件的纤维铺放轨迹规划算法 [J]. 玻璃钢/复合材料, 2018(10): 12-19.
- [48] 李俊斐, 王显峰, 肖军, 等. 网格化曲面的固定角度铺丝轨迹规划算法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2013, 25(9): 1410-1415.
- [49] 李俊斐. 基于结构设计的开孔曲面自调节铺丝轨迹规划算法研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013. 2013.
- [50] 曹忠亮, 林国军, 董明军, 等. 圆柱壳三次非均匀有理 B 样条曲线变角度铺放轨迹设计及屈曲特性 [J]. 复合材料学报, 2022, 39(6): 123-130.
- [51] 徐涛. 不可解析的类回转体自动铺丝轨迹规划的研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
- [52] 王培源. 基于铺层承载信息的自由曲面自动铺丝轨迹规划技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
- [53] 张俊, 曹忠亮. 自适应主应力驱动的复合材料叶片变角度铺丝路径规划算法 [J]. 复合材料学报, 2023, 41(1): 1-12.
- [54] 张铭雨, 周鹏, 范长好, 等. 基于网格模型的自动铺丝路径规划方法 [J]. *纤维复合材料*, 2024, 41(3): 113-21.
- [55] 薛柯, 何大亮, 薛凯, 等. 大尺寸变截面翼梁的自动铺丝成型 [J]. *复合材料科学与工程*, 2023(11): 96-101, 115.
- [56] 姜世阔, 王小平, 汪凯, 等. 基于点云曲面的定角度自动铺丝路径规划 [J]. *中国机械工程*, 2023, 34(21): 2629-2636, 2645.
- [57] 王霖, 田茶, 苏佳智, 等. 自动铺丝路径对复合材料机身“L”形角片的质量影响分析 [J]. *复合材料科学与工程*, 2023(8): 85-91.
- [58] 孙超, 胡志明, 彭麟谊, 等. 六自由度机械臂快速路径规划与手眼标定研究 [J]. *制造技术与机床*, 2025(2): 48-56.

第一作者: 王华侨, 男, 1974 年生, 硕士, 总工艺师, 主要研究方向为高档数控机床与基础制造装备、复合材料成型工艺与装备, 已发表论文 77 篇。E-mail: 3269388426@qq.com

通信作者: 王显峰, 男, 1980 年生, 博士, 教授, 主要研究方向为铺丝、铺带、铺缠和铺贴技术, 已发表论文 65 篇。E-mail: wangxf@nuaa.edu.cn

(编辑 高扬)

(收修改稿日期: 2025-05-27)