

DOI: 10.3901/JME.2023.20.401

# 碳纤维复合材料结构件自动铺放技术与装备 研究进展\*

柯映林<sup>1,2</sup> 曲巍崑<sup>1</sup> 李江雄<sup>1</sup> 程 亮<sup>1</sup> 柯臻铮<sup>3</sup> 吴剑波<sup>3</sup> 祝建彬<sup>3</sup>  
杨 迪<sup>1</sup> 杨 倩<sup>1</sup> 蔡志嘉<sup>3</sup> 王 青<sup>1</sup> 朱伟东<sup>1</sup> 董辉跃<sup>1</sup> 徐 强<sup>1</sup>  
俞慈君<sup>1</sup> 王庆涛<sup>3</sup> 倪佐僖<sup>3</sup>

- (1. 浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室 杭州 310027;
2. 浙江大学航空制造技术与高端装备教育部重点实验室 杭州 310027;
3. 杭州艾美依航空制造装备有限公司 杭州 311225)

**摘要:** 现代航空航天飞行器结构中复合材料的应用比例已成为衡量其先进性的重要指标, 不断提升复合材料的应用水平是实现航空航天结构轻量化、功能化和智能化的重要途径。然而, 复合材料的高端应用是一项复杂的系统工程, 涉及材料、力学、设计、制造、控制和计算机等多个领域, 整体水平提升需要产-学-研-用多方面协同发展。从航空复合材料结构件自动化铺放应用切入, 通过剖析大尺寸双曲面飞机壁板和异形回转体进气道两类典型结构的自动化铺放需求, 探讨热固性复合材料结构件自动铺放的主要技术发展方向。进而, 从复合材料自动铺放工艺规划技术、自动化铺放装备研制, 以及铺放工艺规划软件开发 3 个方面全面分析和总结国内外研究和应用现状, 探讨高端复合材料构件制造面临的核心技术问题。然后, 分析指出复合材料结构设计制造一体化能力的形成需要深入分析设计、工艺和制造等要素之间的复杂耦合关系, 通过单要素分析多要素协调机制实现工艺优化和制造反馈。最后, 提出我国在自动铺放技术装备方面的发展思路, 为加速构建我国高端复合材料结构件制造能力提供方向性参考。

**关键词:** 复合材料结构件; 自动铺放; 铺放工艺; 铺放设备; 铺放缺陷

**中图分类号:** TG156

## Researches on Automated Placement Technologies and Equipment for Carbon Fiber Reinforced Composites: A State-of-the-art Review

KE Yinglin<sup>1,2</sup> QU Weiwei<sup>1</sup> LI Jiangxiong<sup>1</sup> CHENG Liang<sup>1</sup> KE Zhenzheng<sup>3</sup>  
WU Jianbo<sup>3</sup> ZHU Jianbin<sup>3</sup> YANG Di<sup>1</sup> YANG Qian<sup>1</sup> CAI Zhijia<sup>3</sup> WANG Qing<sup>1</sup>  
ZHU Weidong<sup>1</sup> DONG Huiyue<sup>1</sup> XU Qiang<sup>1</sup> YU Cijun<sup>1</sup> WANG Qingtao<sup>3</sup> NI Zuoxi<sup>3</sup>

- (1. State Key Laboratory of Fluid Power and Mechatronic System, Zhejiang University, Hangzhou 310027;
2. Laboratong of Aerospace Manufacturing Technology and High-end Equipment, Zhejiang University, Hangzhou 310027;
3. Hangzhou AME Aviation Manufacturing Equipment Co., Ltd., Hangzhou 311225)

**Abstract:** The application proportion of composite materials in the structure of modern aerospace vehicles has become an important indicator to measure progress, and the continuous improvement of the application level of composite materials is an important access to realize the lightweight, functionalization and intelligence of aerospace structures. However, the advanced application of composite materials is a complex system engineering, involving multiple fields such as materials, mechanics, design, manufacturing, control and computer science, and requiring the coordinated development of production-learning-research-application. Starting from the application cases in aviation structure manufacturing, the development direction of automated placement technologies for

\* 国家自然科学基金(91948301)和浙江省科技计划(2020C01039)资助项目。

20230705 收到初稿, 20230829 收到修改稿

thermosetting composites are discussed by analyzing the technical demands for two typical aviation structures, large-size hyperbolic panel and specially-shaped rotary inlet. Furthermore, the current research and application status at home and abroad are comprehensively analyzed and summarized from three aspects: process planning technology, automated placement equipment development, and placement process planning software development, and the core technical issues faced in the manufacturing of advanced composite components are discussed. Then, developing the integrated capability of composite design and manufacturing is identified to require in-depth analysis of the complex coupling relationship among design, process and manufacturing factors, while process optimization and manufacturing feedback are achieved through single-factor analysis and multi-factor coordination mechanisms. Finally, the development ideas in the field of automated placement technology and equipment are proposed, aiming to provide directional reference for accelerating the construction of high-performance composite manufacturing capability for China.

**Key words:** composite structure; automated fiber placement; fiber placement process; automated placement equipment; placement defects

## 0 前言

复合材料具有高比强度、高比刚度、抗腐蚀、耐疲劳、性能可设计等优势,在飞机、潜艇、导弹、运载火箭等领域显示出巨大的应用潜力。碳纤维复合材料是结构轻量化的首选材料,也是极端服役环境不可替代的功能材料,在国家“双碳”战略下将发挥重要作用。碳纤维复合材料根据树脂基体不同,可分为热塑性复合材料和热固性复合材料两类。热固性碳纤维复合材料研究较早,材料成本相对较低,固化后力学性能优良,因而在航空航天等高端领域应用更为广泛。

国外在碳纤维复合材料应用领域已形成先发优势,如民用飞机空客 A350XWB 与波音 787,其复合材料用量已超过结构总量的 50%,军用飞机(尤其是直升机)结构占比甚至超过 80%<sup>[1]</sup>。相比而言,我国复合材料应用水平落后明显,民机 ARJ21 复合材料用量在 2%,C919 用量在 12%左右<sup>[2]</sup>。近年来,我国开始大力推动复合材料产业的转型升级,从材料制备与配套、设计理念与方法、制造工艺与设备等多个方面共同发力,以国产大飞机 CRJ929 为代表,预计其复合材料用量将突破 50%以上。

复合材料结构件制造是将优异的材料性能和先进的设计理念在物理世界实现的过程,受到大量来自材料、设计和工艺的诸多约束和限制,对构件的最终成型质量和服役性能影响极大,因而是复合材料产业链条中备受关注的一环。热固性碳纤维复合材料的成型工艺主要包括热压罐工艺和非热压罐工艺两种。热压罐固化工艺由于成型质量佳、工艺重复性好、孔隙率低和树脂含量均匀等特点得到广泛应用,目前已成为复合材料构件的主流成型工艺<sup>[3]</sup>,具有较高的技术成熟度和较大的应用规模。热压罐

工艺主要包括铺放成型和热压固化两个阶段。对于含有几十个、甚至上百个铺层的层合板结构,其铺放过程周期长(达数天)、影响要素多(材料、设备、环境、工艺等)且难预测,工艺过程敏感性强且直接关系到制造质量一致性,因此受到工业界和学术界格外重视。随着 20 世纪 60 年代世界首台自动铺带机和 80 年代世界首台自动铺丝机研制成功,热固性复合材料结构件自动铺放技术经过了 50 多年的发展,取得了一系列富有成效的研究成果,推动了欧美航空制造强国新一代复合材料飞机的研制和生产。但是,我国复合材料应用长期停留在手工为主的制造阶段,产品制造质量尤其是质量一致性水平不高,未能充分发挥复合材料性能优势。

认识到我国复合材料应用的技术薄弱环节是取得进步的前提。本文从高端复合材料结构件制造入手,依托国产自动铺丝机,以大尺寸双曲度飞机壁板和大曲率异形回转体进气道两类复杂结构件为典型代表,比较详细地分析结构件复杂几何特征,采取铺层设计策略,进而完成多要素综合作用的可铺放性设计及制造一体化分析,梳理出热固性高端复合材料结构件自动铺放制造的共性关键问题,探讨主要技术发展方向和重点。从复合材料自动铺放技术、装备和系统 3 个方面论述国内外研究发展现状,结合应用需求牵引,提出高端复合材料结构件自动铺放面临的技术问题,为加速构建我国高端复合材料结构件制造能力提供方向参考。

## 1 航空复合材料结构铺放需求与难点分析

碳纤维增强复合材料的密度仅为铝合金的

60%，大量使用复合材料可以使飞机结构重量减少 20%~25%<sup>[4]</sup>。早期，碳纤维增强复合材料主要应用于飞机的非承力部件上，如飞机雷达罩、舱门、整流罩等。后来，逐渐过渡到飞机尾翼的垂直尾翼、水平尾翼及方向舵等一些非主要承力部件上。随着复合材料制备工艺越来越成熟，结构设计水平越来越高，碳纤维增强复合材料开始应用于飞机的主要承力部件<sup>[1]</sup>。

美国碳纤维复合材料技术的发展和一直处于世界领先水平。美国 V-22 鱼鹰倾转旋翼机(V-22 Osprey tiltrotor aircraft)采用全复合材料机翼，整机重量的 60%以上是碳纤维复合材料，另外有 12%是玻璃纤维复合材料<sup>[4]</sup>。美国 AV-8B 鹞式攻击机的复合材料用量约占结构重量的 26%，应用范围包括尾翼、机翼和前机身，整体结构减重约 9%<sup>[1]</sup>。此外，在战斗机方面，如表 1 所示，从 F-15 到 F-35 战斗机，碳纤维复合材料占总机身重量的比例不断上升<sup>[5]</sup>。

表 1 美国 F-15 到 F-35 战斗机的碳纤维复合材料占比和应用<sup>[5]</sup>

战斗机型号	碳纤维复合材料所占的比例(%)	应用
F-15	2	尾翼结构
F-18	19	尾翼结构、航母环境的可靠性
F-22	24	一体化机身结构、隐身功能
F-35	42	一体化翼身融合结构、隐身功能

欧洲军用飞机上碳纤维复合材料应用也很普遍。如台风战斗机(Eurofighter Typhoon)的复合材料用量达到了其外部总面积的 75%、总体结构的 40%，应用部位有机身、机翼、襟副翼和方向舵<sup>[6]</sup>。达索“阵风”喷气式战斗机(Dassault Rafale)的复合材料重量为 26%，而萨博“鹰狮”(Saab Gripen)的复合材料结构重量在 20%~25%<sup>[7]</sup>。如表 2 所示，A400M 运输机的大部分机翼、几乎整个尾翼、后货舱门、起落架舱门和螺旋桨叶片使用的都是复合材料，重量占比达 30%<sup>[8]</sup>。

在民用飞机复材应用方面，美国波音公司和欧洲空客公司也获得了极大成功。1990 年，波音公司的 B777 客机复合材料占全机总重量仅 9%，而到了 2004 年的 B787 上，碳纤维复合材料占比已经达到了 50%，其中机身、机翼、尾翼采用碳纤维层合板，升降舵和方向舵采用碳纤维夹芯复合材料<sup>[9]</sup>。

表 2 A400M 的主要复合材料结构和工艺<sup>[8]</sup>

结构形式	成型材料	工艺
外翼蒙皮	中模碳纤维单向带	自动铺带、共胶接
外翼梁	中模碳纤维单向带	自动铺带
中央翼蒙皮	高模/中模碳纤维单向带	共固化
中央翼梁	高模/中模碳纤维单向带	自动铺带
襟翼	蒙皮、筋条、梁、肋、前端保护罩和叶片：高强碳纤维单向带	共固化
固定及可移动整流罩	高强材料	自动铺丝、夹芯
整流罩后锥体	碳纤维织物	树脂转移模塑成型
整流罩前突	高强碳纤维织物	夹芯
扰流板	高强碳纤维单向带	共胶接、夹芯
副翼蒙皮和梁	高强碳纤维织物	共胶接、共固化、夹芯
平尾蒙皮和梁	中模碳纤维单向带	共胶接
平尾前缘和梢部	碳纤维织物	树脂转移模塑成型
升降舵	高强碳纤维织物、中模碳纤维单向带	共胶接、夹芯
垂尾蒙皮、梁和肋	中模碳纤维单向带	共胶接
垂尾前缘和梢部	碳/玻璃纤维高强织物	夹芯
方向舵蒙皮	中模碳纤维单向带	共固化
方向舵肋	PPS热塑性树脂基复合材料	—
货舱门	蒙皮、框架、顶板、中央横梁：无褶皱碳纤维织物	树脂注塑
翼身整流罩	高强碳纤维织物	夹芯
翼梢浮筒	高强碳纤维织物	夹芯
引擎罩	高强碳纤维织物	树脂转移模塑成型、夹芯

1983 年，空客公司成为第一家在方向舵设计和制造中使用复合材料的商用飞机公司。空客 A310 垂直稳定器的空气动力结构全部采用碳纤维复合材料，比铝合金结构减重近 400 kg。A320 的整个尾翼、固定前缘、副翼、后缘襟翼、机身腹部蒙皮、主起落架整流罩舱门等，也都是用聚合物复合材料(Polymer matrix composite, PMC)制造的，比铝合金蒙皮结构减重近 800 kg<sup>[10-11]</sup>。A380 首次采用了碳纤维增强复合材料的中央翼盒(图 1)。该客机地板梁和后压力舱壁也采用了碳纤维复合材料，碳纤维复合材料占比达到总体的 40%<sup>[12-13]</sup>。

国产民用飞机碳纤维复合材料用量相对较少。在 C919 客机中，复合材料占比达到 12%，分布于机身、平垂尾、机翼前后缘、活动翼面等部件<sup>[14]</sup>。

分析国内外复合材料航空结构，主要包括：  
①小曲率的开曲面类，如翼面和机翼壁板等；

② 局部大曲率的开曲面类, 如梁、整流罩等; ③ 规则回转体类, 如机身筒段蒙皮; ④ 不规则回转体类, 如发动机进气道等。不同结构件的铺放要求侧重点不同, 因而面临的技术问题也可能不同。如壁板类构件尺寸大、结构平坦, 高效率铺放是其追求的主要目标。而翼梢小翼、进气道类大曲率构件, 其铺放速度总体不高, 铺放质量则是关注重点。

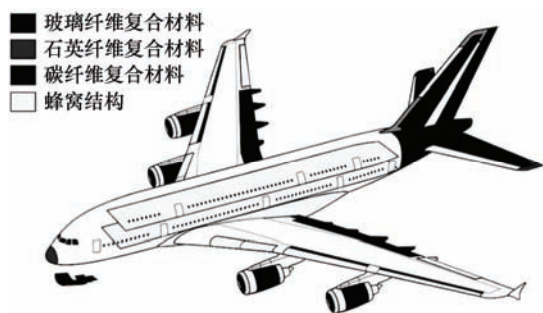


图 1 A380 的复合材料结构分布<sup>[12]</sup>

为提高复合材料航空结构铺放性能, 结合结构件几何设计特点开展铺放技术研究是十分必要的。然而, 我国复合材料结构设计和制造过程相对独立, 在设计阶段比较少考虑制造方法和工艺约束。在复合材料结构件铺放前期的工艺仿真分析环节将可能出现的制造问题反馈给设计部门, 是提升复合材料高水平应用的重要手段。为此, 本节以大尺寸双曲度壁板和异形回转体进气道两类航空结构为代表, 结合国产自动铺丝机和铺放工艺规划软件的能力, 分析高端复合材料结构自动铺放制造技术难点, 为提升我国高端复合材料主承力结构设计制造能力和促进复合材料结构设计制造一体化提供参考。

### 1.1 复合材料壁板铺放分析

以某型飞机中后机身双曲度壁板蒙皮试验件为对象(图 2), 蒙皮尺寸约为  $8\text{ m} \times 4\text{ m}$ , 其上包含了 2 个窗口区域及多处厚度增强区域。采用国产大型龙门式自动铺丝机进行铺放验证, 铺放现场如图 3 所示。



图 2 某型飞机壁板蒙皮模型

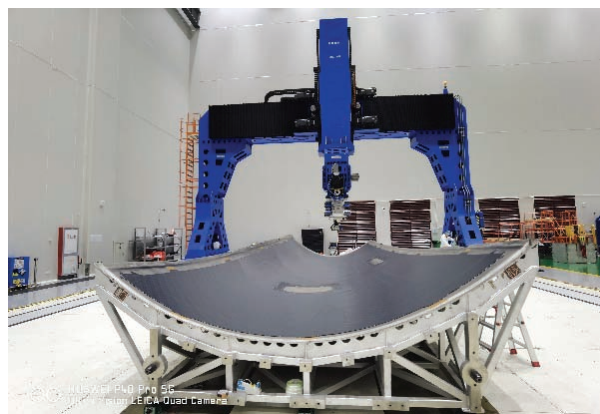


图 3 壁板铺放过程图

该试验件的铺放主要面临如下技术难点。

(1) 整体高速铺放和局部工艺降速的协调。该试验件尺寸大, 具有双曲度几何特征但曲率相对平缓, 平均铺放速度可以达到  $30\text{ m/min}$ ; 但是在内部窗口区域, 受到二次重送工艺影响, 过快的铺放速度容易导致重送精度超差, 如图 4 所示, 故一般需要提前适度降速, 完成二次重送和窗口区域周边铺放后再恢复到高速铺放。因此, 为了同时保障总体铺放效率和二次重送位置精度, 合理规划工艺降速位置和铺放速度曲线是大尺寸复杂壁板铺放规划设计的核心问题之一。

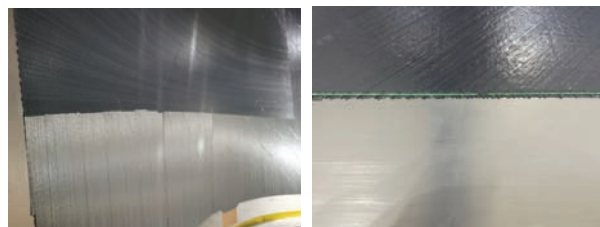


图 4 速度调整前后二次重送精度

(2) 增强区域铺放质量难控制。壁板增强区域的厚度要高于其他区域, 且增强区域面积远小于完整铺放区域。随着预浸料堆叠, 增强区域边界处由于高度差异会呈现出台阶状过渡, 根据设计不同, 最大台阶高度可达  $10\text{ mm}$  以上。在台阶区域铺放时容易产生如下工艺问题(图 5): ① 受压辊几何形状和变形量的限制, 在铺放台阶处时, 压辊易出现局部悬空现象, 如图 5b 所示, 导致对应预浸料丝束无法被压实, 诱发架桥缺陷; ② 台阶处路径曲率局部突变, 如图 5c 所示, 引发铺放速度大幅度波动, 使部分机床运动轴加速度超差, 严重时甚至导致铺丝头运动过程出现较大震颤, 对铺贴质量与机床寿命均带来不良影响。



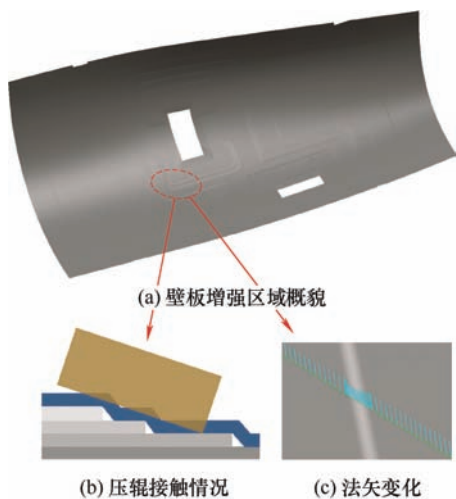


图5 增强区及其铺放工艺问题

(3) 间隙/搭接标准和错层要求难保证。针对该蒙皮试验件结构特点, 铺放路径可采用定角度法和平行等距密化法进行设计, 并逐条评价铺放路径的铺放要求, 如角度偏差、转弯半径等。当评价不满足铺放要求时停止密化, 进而形成由 1 条或多条平行曲线(即中心路径, 引导多根预浸料丝束铺放)所对应的铺放区域。当该铺放区域没有完全覆盖铺放曲面时, 需要进一步对相邻未覆盖区域重复上述过程, 直至实现铺放曲面的完全覆盖。由路径规划方法所决定, 因丝束剪断/重启导致的间隙/搭接三角区会集中在相邻铺放区域的边界处, 如图 6 所示。

如果各铺层间隙/搭接三角区在层合板同一区域汇聚, 一定程度上将影响成型后复合材料结构件的几何外形和力学性能, 因此在复合材料构件铺放规划中一般要求三角区分布满足错层规则要求。然而, 在该蒙皮试验件中, 由于增强区域数量较多、边界形状复杂, 存在壁板零件厚度不统一、边界不一致的复杂情况。因此难以将满铺层与增强区铺层进行统一错层规划, 极易出现间隙/搭接区域汇聚或交叉等现象。

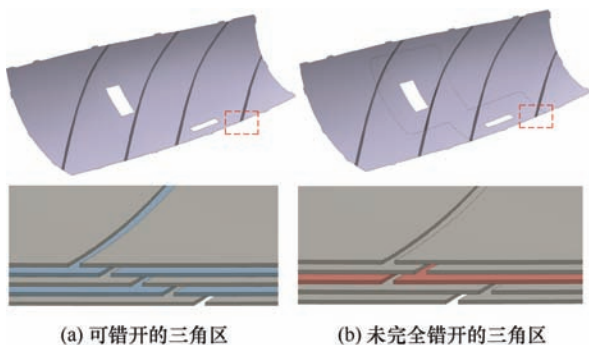


图6 间隙/搭接三角区分布情况

## 1.2 复合材料进气道铺放分析

如图 7 所示, 作为最为复杂的整体航空结构件

之一, 进气道一般采用大幅度扭曲、大截面变化的结构设计方法以实现飞机隐身效果。进气道的高质量铺放对复合材料自动化铺放技术和设备都提出了极大的挑战。



图7 进气道铺放

采用国产卧式铺丝机对进气道试验件进行了自动化铺放仿真分析, 发现进气道铺放中存在缺陷类型多、缺陷分布广的主要制造问题。受困于现阶段尚无成熟的缺陷力学影响研究方法和分析模型, 因而以复合材料进气道为代表的复杂曲率构件, 还难以准确评价制造过程对成型质量和综合性能的影响水平。进气道铺放过程主要面临的技术问题归纳如下。

(1) 间隙/搭接缺陷多。异形回转体进气道类构件外形曲面通常存在比较严重的扭曲, 为典型的不可展曲面。而预浸料丝束属于二维平面结构, 因此理论上就无法实现对铺放曲面在无搭接情况下的完整覆盖, 反映在铺放规划中即存在较多的间隙/搭接缺陷。

(2) 不可避免褶皱缺陷。预浸料丝束沿着曲线路径铺放时, 当丝束内部积聚的势能达到了其屈曲条件, 粘结的丝束就会脱离铺放表面, 形成褶皱缺陷, 如图 8 所示。在影响褶皱的各类因素中, 模具和路径的几何特性的影响最为显著。异形回转体进气道多半属于大曲率凹凸性混合的复杂曲面, 高嘉鑫<sup>[15]</sup>通过对不同路径生成方法下角度偏差、最小转弯半径等指标的符合情况分析表明, 无论采用何种铺放路径生成方法都难以消除褶皱缺陷的产生。



图8 进气道褶皱缺陷

(3) 铺放缺陷的力学影响机理不明。如前所述, 复合材料结构件制造过程不可避免会引入铺放缺陷, 如角度偏差、间隙/搭接、褶皱缺陷等。针对复杂结构铺放, 经常面临多种制造要求相互矛盾的情况。如为了降低角度偏差, 可能会引起褶皱缺陷, 反之亦然。解决该问题的思路是从各缺陷的力学影响机理分析, 评价各缺陷的影响强度, 进而确立最佳的铺放工艺方案。近年来, 许多研究人员定性或定量分析了缺陷对制件拉压强度、断裂韧性、损伤容限、疲劳寿命的影响<sup>[16]</sup>。但由于铺放缺陷类型多样、程度不一、分布复杂, 目前尚未形成统一清晰的铺放缺陷成型机理。并且现有研究多数围绕单一类型缺陷展开, 样件尺寸普遍处于试片级, 且多数未考虑到实际服役的载荷工况<sup>[4]</sup>。

(4) 异形回转体大曲率结构光顺铺放。众所周知, 机床加工路径的大曲率变化会导致机床运动速度大幅波动, 严重时甚至会引起机床末端抖动。在复合材料铺放过程中, 这种抖动现象极易导致预浸料丝束滑移、折叠和变形, 严重降低复合材料制造性能。如图 9 所示, 在两处大曲率变化区域, 末端铺放速度发生了从 2 m/min 到 0.5 m/min 的骤降。针对该类问题的一种可能解决方案是充分利用铺放系统的冗余特性, 通过冗余轴运动优化提高铺丝机的运动光顺性和运动效率。

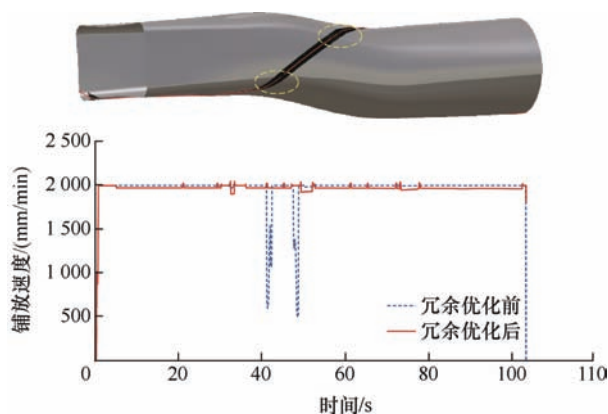


图 9 不同冗余轴运动策略对铺放速度的影响

针对本节所述壁板类和进气道类航空结构件铺放试验中面临的制造难点, 分析其可能的技术解决方案, 如表 3 所示, 包括复合材料铺放技术中的路径规划、工艺设计、缺陷分析及机床运动优化等方面。值得注意的是, 表 3 中仅关注了具有一定普遍性的技术问题, 并未覆盖复合材料构件制造中的所有问题。

复合材料自动铺放技术体系庞大、软件-硬件-

工艺关联关系复杂, 按照铺放过程可分为铺放前的数控程序规划、铺放中的机床运动及工艺控制和铺放后的质量检测与性能分析 3 个部分。

表 3 实际铺放问题及对应的铺放技术

序号	制造要求或存在问题	可能涉及的铺放技术
1	总体高铺放效率要求	机床运动优化
2	边界精度与总体高效率的矛盾	二次重送控制机理、机床运动优化
3	局部增强区域铺放质量差	铺放路径及铺放工艺协同优化
4	大曲率构件褶皱缺陷多	
5	错层要求难满足	铺放路径规划
6	间隙/搭接缺陷多	
7	多种制造要求互相矛盾	结构级铺放缺陷力学分析
8	大曲率高速光顺铺放	冗余系统运动优化

铺放前的数控程序规划是指利用铺放规划软件完成铺放路径创建和铺放工艺设计, 生成满足设计与制造要求的数控程序。铺放中的运动及工艺控制主要利用自动铺丝机的运动特性和铺丝头工艺控制能力, 保证铺放过程满足数控程序指令要求和精度指标。铺放后的质量检测 and 性能分析主要包括铺放缺陷在线检测、固化后超声检测及结构性能分析等, 由于部分工作是在固化后开展, 因此不作为本文综述重点。但需要说明的是, 如果铺放后的性能分析不达标, 可能会造成极大的材料和时间成本浪费, 故本文将铺放前的缺陷预测及性能分析列为综述内容之一。综上, 本文将重点讨论 3 个方面问题: ① 复合材料铺放技术, 包括铺放工艺影响机理、铺放路径规划评价、铺放缺陷建模及性能影响分析; ② 铺丝设备研发及应用技术, 包括国内外自动铺丝设备的研制历程、铺丝头工艺控制、铺丝机运动规划及精度控制; ③ 自动铺放规划软件系统。

## 2 复合材料自动铺放技术

### 2.1 铺放工艺影响机理

铺放工艺为预浸料的粘结提供必要的物理和化学条件, 合适的铺放工艺参数能保证铺放成型质量, 有效提高固化后结构件的力学性能。铺放过程主要工艺参数有铺放温度、压力、速度和丝束张力。

#### 2.1.1 铺放温度

铺放温度是影响预浸料黏性和铺放质量最为显著的工艺参数, 但温度对于铺放质量的影响并不是



简单的线性关系<sup>[17]</sup>。宋清华等<sup>[18]</sup>研发了一种新型的自动铺丝装置和单向预浸料剥离力测试夹具,测试了碳纤维热固性复合材料预浸料在不同温度和暴露时间下的表面黏性,获得了表面黏性、环境温度及暴露时间的相关曲线。结果表明在相同环境温度下,预浸料的黏性随暴露时间的延长而降低,表现出近似线性关系。不同环境温度下预浸料表面黏性下降速率也不同,即环境温度增加会导致预浸料表面黏性下降速率的增加。当预浸料暴露时间过长,表面黏性基本丧失。ENGELHARDT 等<sup>[19]</sup>研究了自动铺放的温度、压力和真空压实时间对层合板压实情况的影响。试验结果表明,温度和真空压实时间对未固化层压板的压实影响最大,且这两个因素显示出相互依赖的关系,有可能通过提高温度来取代真空压实的作用。WANG 等<sup>[20]</sup>发现当设置红外加热器结构并保持铺层温度为 35 °C 时,自动铺放的缺陷区域(气泡和褶皱)有所减少,而高于或低于此温度都会导致缺陷区域的增加。

研究铺放温度最主要的内容是获取整个铺放过程的温度历史,而在铺放过程中对温度历史进行实时监测是比较困难的,因此可以采用建立有限元模型并进行预测的方式,这也为温度的控制提供了基础。HÖRMANN 等<sup>[21]</sup>开发了一种红外激光加热系统,研究了热源对于加热位置和方向的敏感度,将红外热源的热辐射传导过程与二维热模型结合建立了有限元模型。通过与裂纹扩展速率的试验结果比较,证明了该模型的有效性,并验证了热固性复合材料对红外发射器不同照射部位的敏感性。LICHTINGER 等<sup>[22]</sup>利用参数化三维有限元分析模型,如图 10 和图 11 所示,分析发现相邻铺放路径间存在明显的温度梯度,另外受铺放速度变化影响,沿路径方向的铺放温度极有可能存在分布不均匀的情况,且两种效应可能随铺放过程成倍扩大,由此可见多角度路径规划时的热效应不容忽视。ORTH 等<sup>[23]</sup>模拟一种新型 LED 热源在自动铺丝过程中工件表面的辐照度分布,并分析比较二维和三维层合板传热模型受不同梯度分布辐照时的响应情况,计算结果差异相对较小,这归因于垂直路径方向热扩散系数较低。WANG 等<sup>[20]</sup>对自动铺放中红外灯辐射传热机理及加热过程进行了理论建模,并通过钢板温度试验验证了该模型的有效性。QU 等<sup>[24]</sup>针对 C 型梁类曲率突变结构件铺放过程中铺放速度与铺放温度的耦合关系,提出一种融合辐射传热模型。试验

结果表明,最高铺放温度的仿真预测结果与试验测量值之间的误差为 1~2 °C,具有良好的致性。

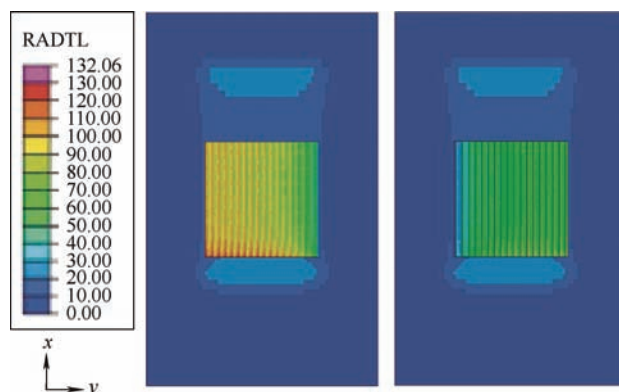


图 10 热量分布有限元计算结果<sup>[22]</sup>

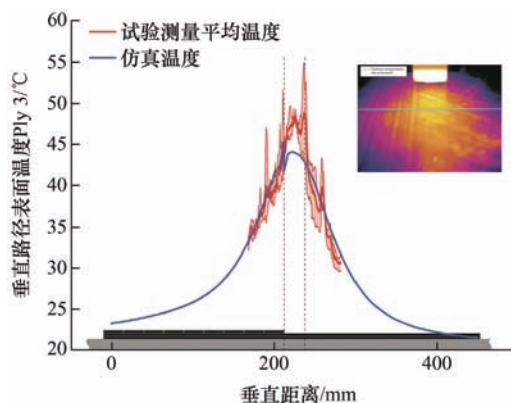


图 11 铺放过程表面温度及有限元计算结果对比<sup>[22]</sup>

### 2.1.2 铺放压力

国内外研究均表明,在一定范围内提高铺放压紧力,有助于增强铺层的层间黏性、减小层间孔隙率、减少铺放缺陷以及提高固化后复合材料层合板的力学性能<sup>[25-32]</sup>。AIZED 等<sup>[25]</sup>基于提出的铺放质量五分制评价指标,通过平面铺放试验得到了提高铺放压紧力有助于提高铺放质量的结论。KHAN 等<sup>[27]</sup>结合试验和仿真手段研究了铺放压紧力对固化后层间剪切强度的影响,结果表明提高压紧力能够提高层间剪切强度。ZHAO 等<sup>[28]</sup>通过平面铺放试验研究了铺放压紧力与铺放缺陷之间的关系,当沿着转弯路径铺放时,在一定范围内增大铺放压紧力有助于减少外面褶皱的出现。都涛<sup>[29]</sup>通过固化后复合材料层合板的短梁剪切试验,得到了随着铺放压紧力的增加层合板刚度以及层间剪切强度逐渐增大的结论。彭啸等<sup>[33-34]</sup>分别通过预浸料剥离试验和探针试验研究了铺放压紧力与预浸料层间黏性以及预浸料与模具之间黏性的关系。结果表明,增大铺放压紧

力会增强预浸料黏性,有助于减少铺放缺陷从而提高铺放质量。

但是复杂曲面铺放时,压强即单位面积上的压紧力才是评价铺放质量的核心指标<sup>[28, 35-36]</sup>。褚奇奕等<sup>[37-38]</sup>对曲面铺放过程中柔性压辊与模具间的接触区域进行了几何分析,并利用有限元仿真研究了压辊与圆柱类模具的铺放压力场。ZHOU<sup>[39]</sup>也开展了类似研究工作,并进一步探究了铺放压紧力、包胶厚度对压力场的影响。BAKHSHI 等<sup>[40]</sup>通过有限元仿真研究了平面铺放中压辊包胶硬度对压辊与模具接触面积以及铺放压力场的影响。然而上述铺放压力场分析主要通过有限元仿真以及试验手段展开,存在有限元仿真耗时长、计算代价较大的实际问题。何玉筱<sup>[41]</sup>针对大曲率复杂模具型面的铺放,通过对曲面模具、预浸料铺层与柔性压辊之间的接触变形与应力分析,建立了单个路径点处的铺放压力场力学模型,并提出了对应的数值求解算法,实现了铺放压力场的快速计算。其压力试验采集结果和仿真数据如图 12 所示,两者吻合度较高,验证了模型的有效性。



图 12 压力分布试验与仿真数据<sup>[41]</sup>

### 2.1.3 铺放速度

铺丝机铺放速度可单独或与其他铺放参数耦合对最终成品的铺放质量产生影响。过低的铺放速率会导致铺放效率低下,同时局部聚集过高的热量会导致预浸料性能退化。提高铺放速率可以节省铺放时间,但较少的压实时间会降低固化后复合材料的层间性能。为了探索最优的铺放速率和铺放压力,ENGELHARDT 等<sup>[19]</sup>针对热固性复合材料开展试验研究,结果如图 13 所示。发现当压辊压力较低时,铺放速率对铺放质量的影响不大。在较大的铺放压力和较低的铺放速率组合时,预浸料有了充足的压实时间,此时铺放质量最好。CHU 等<sup>[42]</sup>利用图 14 所示的铺丝头配置开展了工艺试验研究,发现 E-玻璃纤维增强聚丙烯复合材料在 0.15 MPa 铺放压力和 1 mm/s 铺放速率时,可以获得最佳的层间强度,同时通过降低铺放速率提高层间的强度。

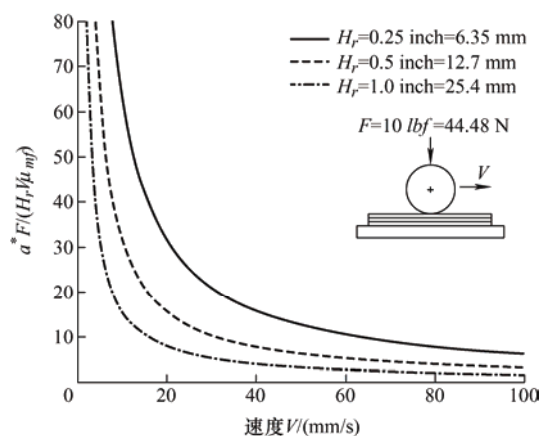


图 13 铺放过程最优无量纲(压力与铺放速度)参数<sup>[19]</sup>

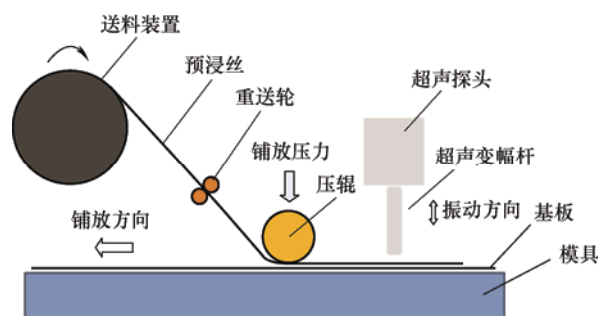


图 14 超声振动辅助加热自动铺丝系统<sup>[42]</sup>

### 2.1.4 丝束张力

铺放张力对铺放质量的影响一般体现在丝束的褶皱和路径的曲率半径上。在铺放过程中,树脂会沿着压辊丝束路径沉积,形成铺放阻力,使得预先设置的张力减小,铺放质量也将随着时间的推移而变化。蔡立成等<sup>[43]</sup>通过自主设计搭建的曲线铺贴模拟试验平台,发现张力会影响预浸料曲线铺贴质量。在张力取值为 2~4 N 时,随着铺放张力的增加,曲线铺贴的有效贴合长度比例趋近于 1,铺放皱褶角度逐渐减小,曲线铺贴质量得到改善;而张力进一步增大,会引起有效贴合长度比的下降与皱褶角度的增大;当铺放张力取值为 4~6 N 时,曲率半径与设定值之比均趋近于 1,曲线铺贴的准确性可得到保证;铺放张力较小时,预浸料丝束松弛,无法与压辊紧密接触,导致预浸料与压辊间的摩擦力不足,预浸丝束无法产生设定所需的侧向弯曲变形,从而导致曲线铺贴路径偏移。而当丝束张力过大时,张力的径向分力大于贴合界面抗剪切力,推动丝束产生向设定路径外侧的滑移,导致铺放曲率半径大于设定值,铺放准确性下降。彭啸等<sup>[33]</sup>通过试验与仿真结合的方法发现预浸料的铺放张力对预浸料的铺放和送丝质量有明显的影响,试验结果和仿真结果



相差不大,均呈现黏性随着铺放张力的增加而增加,而当铺放张力进一步增大,黏性的增加幅度逐渐减小。合适范围内的张力可以使预浸料表面铺放平整,增强树脂与模具间的浸润效果。为了获得较好的铺放效果,通常要求预浸料丝束在铺放过程保持稳定的丝束张力。

综上所述,复合材料铺放工艺对预浸料的层间黏性性能具有直接影响。但现有研究主要集中于铺放工艺的作用机理和性能影响方面,研究对象多为平板试件。但从壁板增强结构处的铺放效果看,模具曲面和铺放路径的几何特性对铺放工艺的作用效能影响极大。此外,现有的研究多是针对一到两个工艺,而事实上,几种工艺参数存在耦合关系,对于多工艺耦合的协同仿真和优化,还没有完整的模型和明确的规律。因此,铺放工艺研究还应从如下方面加强:① 扩展平面试验件为曲面试验件,建立结构曲率特性与工艺力学的内在关联,根据结构几何特性驱动铺放工艺适应性设计;② 开展铺放路径和铺放工艺的协同规划将更能满足复杂构件的铺放需求,提升工艺规划效率;③ 开展多工艺耦合协同仿真和作用机理研究,探明多种工艺参数之间的关联关系及对铺放质量的影响规律。

## 2.2 铺放路径规划

铺放路径决定了预浸料丝束在铺层曲面上的分布及纤维方向,因此对层合板最终力学性能具有重要影响。复合材料构件铺层设计方法包括定角度铺层和变角度铺层两类,目前工程上以定角度铺层设计为主。无论何种设计方法,铺放路径规划的核心问题是设计一条处处满足设计提出的技术要求和制造要求的曲线,其中设计要求主要包括角度偏差、边界覆盖率及间隙/搭接要求等,制造要求有预浸料最小转弯半径、最短铺放长度等。

### 2.2.1 定角度铺放路径规划

定角度铺放路径规划包括了种子点选择、初始路径生成、路径偏置密化、路径评价和区域划分等主要过程,目前的研究重点主要集中于自动铺放的初始路径设计和密化分区过程。

初始铺放路径也称为基准铺放路径,是单个铺层中首条被创建的铺放路径,也是后续采用路径偏置方法获取其他密化路径的基础,因此初始铺放路径的位置和几何性质往往影响着整个铺层的路径规划结果。初始路径生成方法主要有自然路径法、截

面线法、固定角度法以及测地线法等<sup>[44]</sup>。

自然路径法较多应用于自动铺带工艺中,罗海燕等<sup>[45]</sup>和王松<sup>[46]</sup>针对自动铺带中的工艺强约束,分别基于三角网格曲面和参数化特征曲面提出了初始路径的自然路径生成方法(图 15),该方法可以较好地保证铺带工艺性,对于宽度较大的铺带过程不易产生褶皱缺陷。截面线方法是将铺放曲面同铺放方向平面相交以获取初始路径,如图 16 所示,只适用于小曲率的简单曲面,对于大曲率复杂曲面可能会引入较大的角度偏差<sup>[47-48]</sup>。

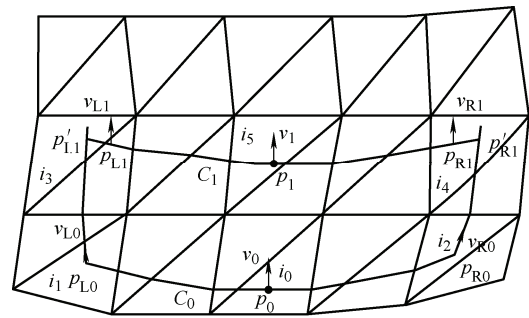


图 15 基于三角网格的自然路径<sup>[45]</sup>

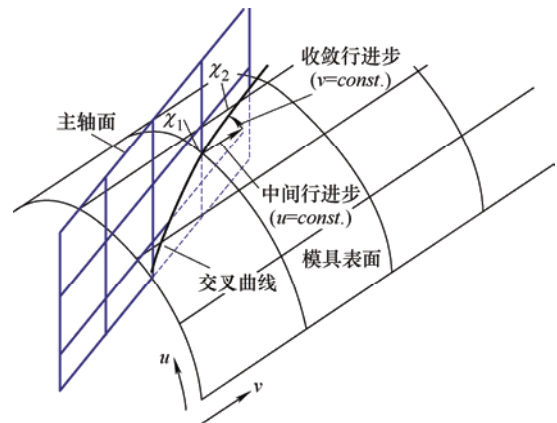


图 16 截面线法<sup>[47]</sup>

为了避免铺放方向偏差对构件力学性能造成影响,保证路径在各个位置处的铺放角度均与铺层设计角度一致,定角度法是工程上最常应用的方法之一。LI 等<sup>[49]</sup>和李俊斐等<sup>[50]</sup>分别基于三角网格曲面建立了定角度路径的生成方法。PEI 等<sup>[51]</sup>进一步针对网格铺放面上铺层方向变化较大的问题,提出了一种利用结构载荷特征划分铺放曲面,在每个子域利用多参考线生成定角度铺放路径的方法,使生成的铺放路径更顺应参考线方向,降低了铺放路径的角度偏差。针对参数化特征铺放面,通常将铺放方向主轴在参数化铺放面上的投影曲线作为初始路径<sup>[52-54]</sup>。BLOM 等<sup>[55-57]</sup>提出了一种封闭圆锥面上初

始路径规划算法(图 17), 利用圆锥面参数方程推导参考曲线的纤维角度和曲率, 联立求解得到圆锥面上的定角度铺放路径。曾伟等<sup>[58]</sup>和王念东等<sup>[59]</sup>以一般回转体的母线为参考线, 建立了与母线成固定角度的路径规划方法。

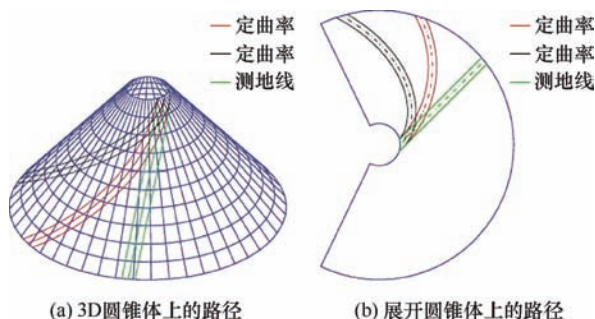


图 17 定角度法和测地线法在圆锥面上的应用<sup>[55]</sup>

对于定角度法生成的铺放路径来说, 虽然路径的铺放方向符合设计要求, 但在大曲率的复杂曲面上, 频繁出现的褶皱缺陷反而可能降低构件的最终力学性能。测地线法是面向铺放工艺性、避免丝束转弯变形的另一种重要的路径设计方法。ZHANG 等<sup>[60]</sup>提出一种高效的测地线路径计算方法, 可以直接在光滑曲面上构造测地线而不需要求解测地线微分方程组。张婷婷等<sup>[61]</sup>鉴于测地线法求解过程复杂且计算量大的问题, 提出一种改进的测地线生成算法, 通过保测地曲率算法<sup>[62]</sup>来简化法曲率的求解过程。熊文磊<sup>[63]</sup>则给出了网格化曲面上测地线路径的生成算法。

为满足铺放曲面满铺覆要求, 基于初始路径的面内密化是一种高效实现方法。铺放路径密化策略主要有平行法和平移法两种<sup>[44]</sup>。平行法生成的偏置路径与初始路径完全平行, 因此铺放路径之间的间隙/搭接均匀可控, 不存在由丝束剪断引起的间隙/搭接。SCHUELER 等<sup>[52]</sup>提出一种近似的平行等距偏置法, 算法误差与曲面曲率及压辊宽度相关, 在曲率变化较大的曲面上精度不足。YAN 等<sup>[64]</sup>在此基础上分析了密化距离内压辊压实等工艺特性, 提出了一种变密化距离的平行等距算法。SHIRINZADEH 等<sup>[47]</sup>提出了一种更为精确的方法来获取等距偏置路径, 并且取得了良好覆盖效果。BRUYNEE 等<sup>[65]</sup>、LEMAIRE 等<sup>[66]</sup>针对网格化曲面提出一种快速推进法用于在网格化曲面上获取等距偏置路径(图 18), 相比以前的算法, 此法不受曲面形式制约、适用性更广, 但是其计算效率受网格化

精度影响。

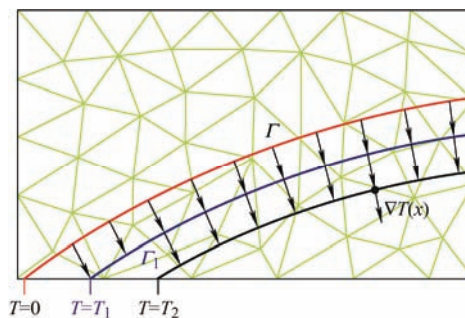


图 18 平行法在网格化曲面上的应用<sup>[66]</sup>

平移法较多应用于变角度路径的密化中<sup>[67-68]</sup>, 密化路径完全继承了初始路径的力学特性, 但路径间分布着大量间隙/搭接缺陷, 如图 19 所示。蒋敏等<sup>[69]</sup>针对纤维间隙和搭接的不同情况, 提出基于丝束位置动态调整的铺丝路径覆盖性优化方法。当密化路径不满足角度偏差、转弯半径等指标要求时, 则由初始路径和所有满足要求的密化路径构成了一个铺放区域。随后在铺放曲面上其他未覆盖区域重复上述过程, 直至达到满铺覆要求。针对复杂曲面上先路径规划后评价的过程会极大降低路径规划效率的问题, GAO 等<sup>[70]</sup>利用 Gauss-Bonnet 定量和平行向量性质, 研究了角度偏差和转弯半径约束下的最大密化距离确定方法, 可保证区域内纤维路径免评价, 提高了铺放规划效率。

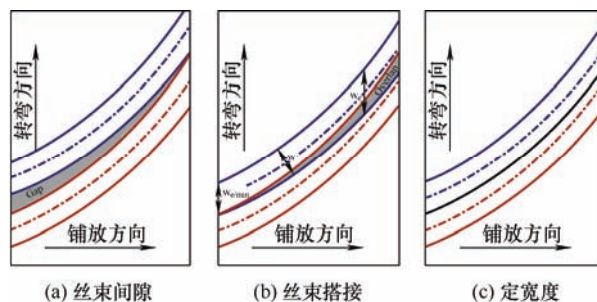


图 19 平移法带来的路径缺陷<sup>[67]</sup>

## 2.2.2 变角度铺放路径规划

定角度铺放方法中要求每个铺层的纤维方向均满足同一角度约束, 无法充分发挥复合材料的方向特性, 限制了设计自由度<sup>[71]</sup>。而为了进一步提高复合材料的结构效率, 伴随着自动铺放技术的发展, 严格按照设计参数铺放空间连续变化的丝束路径成为可能, 也由此诞生了变角度铺层设计的概念。

变角度铺层方法提供了更大设计自由度的同时, 也增加了变角度复合材料优化设计的难度。其中一个重要的问题为纤维铺放方向的表达, 目前有



直接定义任意位置纤维方向的离散法<sup>[72-74]</sup>和定义变角度铺放路径的连续法<sup>[75-76]</sup>, 如图 20 和图 21 所示。STEGMANN 等<sup>[77]</sup>提出了离散材料优化方法, 任意位置的纤维角度由几个候选角度加权表达。TIAN 等<sup>[78-79]</sup>提出了应用参数化的无散向量场表征纤维方向向量场的思路, 通过对向量场系数的优化, 实现对每个离散单元纤维方向的优化。该方法在平面构件上取得了有效应用, 但对于复杂曲面的变角度优化还需进一步研究。针对连续化纤维方向表达, TATTING<sup>[80]</sup>提出以切向不断变化的曲线来描述纤维方向, 其中路径首末点的切向方向为设计变量。BLOM 等<sup>[55-57, 67]</sup>扩展了该方法, 增加了路径中间点纤维方向的定义, 并针对平板、圆柱、圆锥类构件铺放, 提出了以铺层强度、刚度或频率为优化目标的变角度轨迹规划方法。吴尘瑾等<sup>[81]</sup>提出了多种铺放角非线性变化曲线线型, 并以此为基础分析了不同铺放路径变刚度层合板的屈曲性能。

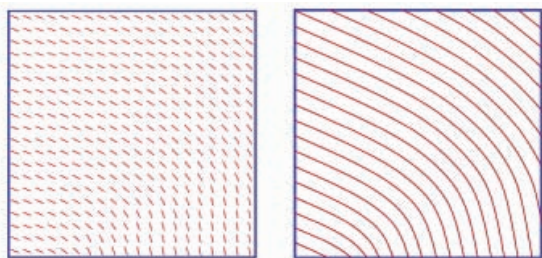


图 20 定义任意位置纤维方向的离散法<sup>[78]</sup>

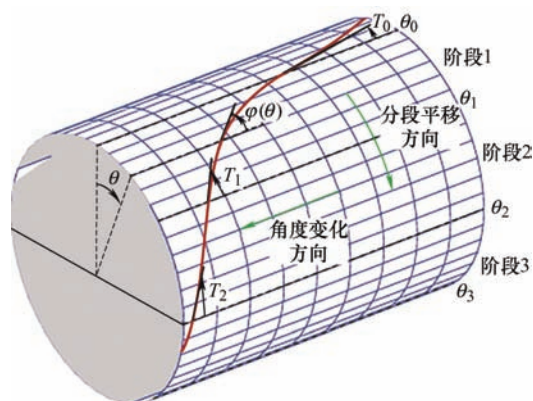


图 21 切向不断变化的纤维方向连续表达<sup>[67]</sup>

目前关于变角度复合材料研究, 较多集中于面向特定力学性能的纤维角度优化方法。研究工作也表明了通过合理的优化设计变角度设计复合材料力学性能较常规定角度材料有明显改善。针对变角度纤维取向的优化方法, MATSUZAKI 等<sup>[82]</sup>以纤维曲线五阶函数的控制点坐标为控制变量建立遗传算法

寻找最优纤维路径(图 22), 提高了复合材料层合板的开孔拉伸强度。PEDERSEN 等<sup>[83]</sup>和 CHENG 等<sup>[84]</sup>分别通过假定应力或应变相对纤维角度固定, 以最小柔度为目标提出了基于应变的开创性研究和基于应力的优化方法, 但这两种方法高度依赖于初始的纤维设计取向。基于能量的优化方法通过引入近似能量因子来研究应力应变场对纤维取向的依赖性, 可以有效解决这些问题<sup>[85]</sup>。LUO 等<sup>[86]</sup>也提出了一种新的离散连续参数化法来处理局部最优问题, 将原始的连续定向优化问题转化为离散子区间选择问题和子区间中的连续定向优化问题。

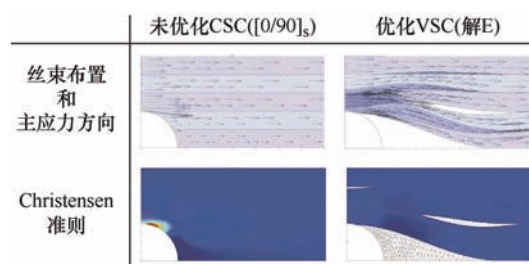


图 22 提高力学性能优化纤维路径<sup>[82]</sup>

至今, 铺放路径规划已取得丰富的研究成果, 部分路径生成方法已集成到商用铺放规划软件中。但在面向复杂结构铺放规划时, 还存在如下问题。

(1) 多要素作用下的可铺放性总体分析方法缺乏。复合材料铺放过程作用要素多(模具曲面、材料、工艺与装备)、作用链长且全过程耦合。由于铺放路径间的强关联性, 某条路径某一要素的局部不适宜, 也将导致区域路径规划失效, 甚至整体路径规划失效, 因此亟需一套面向复杂曲面构件铺放的可铺放性总体分析方法, 为路径规划提供合理的系统配置和工艺条件, 提高铺放规划的效率。

(2) 多约束间的协调和路径设计方法缺失。目前复合材料结构设计与制造过程相对独立, 设计过程无法考虑制造约束, 因此针对复杂曲面铺放, 单目标路径设计方法往往无法同时满足多个技术指标要求, 需要创建多目标约束的铺放路径设计方法实现指标间的权衡与协调。

(3) 面向层合板的铺放方案评价和优化方法缺乏。层合板构件的最终性能由每层的性能决定, 各层的性能由纤维排布决定。不同的路径拓扑方案对应不同的纤维角度和制造缺陷, 进而影响构件的最终力学性能。但目前仅有单条路径的评价指标, 单个铺层及层合板级铺放方案的总体评价优化方法仍



是空白。

### 2.3 铺放缺陷建模与仿真分析

DENKENA 等<sup>[87]</sup>将自动铺放成型缺陷分为 4 类(图 23): ① 定位缺陷, 如间隙、搭接、层合板面外波纹等; ② 粘结缺陷, 如丝束面外褶皱、架桥、气泡(孔隙)等; ③ 外部杂质造成的缺陷; ④ 丝束本身自带缺陷, 其中定位缺陷最为常见。研究人员通过试验或仿真等方式, 探究了制件的拉伸、压缩、剪切等力学性能对缺陷的敏感性, 发现制件性能受缺陷类型、缺陷尺寸、缺陷位置等多种因素的影响<sup>[88]</sup>。

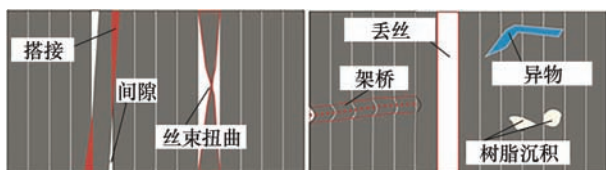


图 23 自动铺放成型缺陷<sup>[87]</sup>

#### 2.3.1 间隙/搭接缺陷建模与分析

间隙/搭接主要由相交路径间的剪断/重启操作引起的, 其大小及分布由铺放路径的位置和形态所决定, 不同的路径规划策略可能导致不同的间隙/搭接分布。研究人员对间隙/搭接缺陷的力学影响进行了深入而广泛的研究。SAWICKI 等<sup>[89]</sup>研究了层内间隙和搭接对层合板压缩强度的影响, 结果发现当存在较小间隙和搭接时, 试件压缩强度将会相对急剧地下降。TUROSKI<sup>[90]</sup>研究了孤立的和错层分布的铺放间隙对准各向同性层合板的拉伸性能的影响, 结果表明极限拉伸强度最大下降 15%。ZHOU 等<sup>[91]</sup>研究了自动铺放引起的随机间隙对层合板面外特性的影响, 如图 24 所示, 随机间隙分布下不同的细观结构变化引起单层或多层裂纹失效模式。相比上述试验法的高昂成本和时间代价, 数值方法提供了一个高性价比和高效的方式, 也更有助于理解铺放缺陷对构件力学行为的驱动机理。GARNICH 等<sup>[92]</sup>提出了一种数值均匀化方法来考虑单向复材中局部纤维弯曲的影响。QIAN 等<sup>[93]</sup>研究了不同组合形式下铺放间隙和搭接对曲梁面外拉伸强度和层间界面强度的影响, 其建立的间隙和搭接模型如图 25 所示。BLOM 等<sup>[94]</sup>开发了含有缺陷的变刚度层合板力学性能的数值模型。LI 等<sup>[95]</sup>开发了一个逐层建模技术, 表征了由间隙和搭接导致的面外波纹和铺层厚度变化, 并预测不同缺陷组合的强度折减。FAYAZBAKHSH 等<sup>[96]</sup>提出了缺陷层方法表征每一个铺层材料性能变化, 讨论了单一间隙和单一搭接对变刚度层合板面内刚度和屈曲载荷的影响。

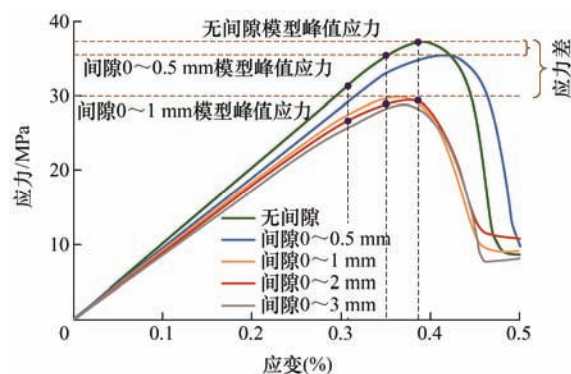


图 24 间隙大小对层合板面外力学特性的影响<sup>[92]</sup>

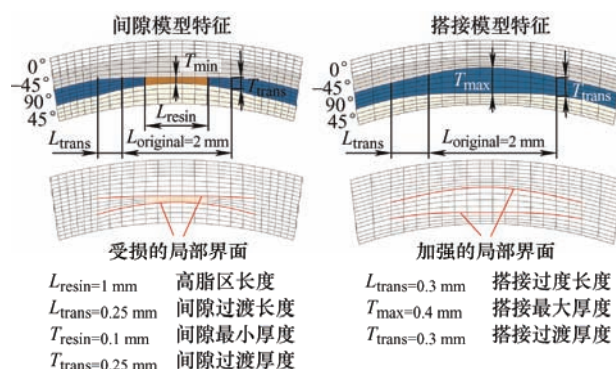


图 25 间隙和搭接缺陷模型<sup>[93]</sup>

#### 2.3.2 面外褶皱缺陷建模与分析

面外褶皱一般是沿转弯路径铺放时, 丝束受压侧出现的屈曲现象。褶皱缺陷产生的根本原因是实际丝束与丝束路径的长度失配。随着复杂曲率复合材料结构的广泛应用, 面外褶皱的形成机理成为近年的研究热点之一。BEAKOU 等<sup>[97]</sup>将单个褶皱的形成视为弹性基底上正交各向异性矩形板的屈曲问题, 建立了预浸料丝束临界转向转弯半径的理论预测模型。MATVEEV 等<sup>[98]</sup>通过引入更符合实际的边界条件对理论模型进行了修正, 获得了临界转向半径的封闭解。BELHAJ 等<sup>[99]</sup>考虑了弹性基底中弹簧单元的相互作用, 将剪切层引入基底, 显著提高了模型的预测精度。PAN 等<sup>[100]</sup>在此基础上提出了仅考虑剪切黏性力的工艺依赖性的褶皱形成理论模型, 分析了工艺参数对临界转弯半径的影响。BAKHSHI 等<sup>[101]</sup>进一步在剪切层中引入了粘弹性单元, 利用线性粘弹性材料的本构关系模拟模具与预浸料界面的时间依赖黏弹性行为。然而, 上述力学模型采用的均为局部方法, 只能处理平面铺放中单个褶皱的形成问题, 而且无法得到铺放后丝束的几何形貌。BAKHSHI 等<sup>[102]</sup>还提出了一种用于预浸料沉积过程模拟的有限元建模方法, 捕捉了褶皱演变过程并证明了褶皱的应力释放作用。RAJAN 等<sup>[103]</sup>建立了一种基于有限元的丝束铺放和粘附模型, 预

测了典型 AFP 过程中的面外褶皱。然而, 考虑到自动铺放过程的复杂性和有限元模型的运算效率, 目前针对预浸料丝束起皱的有限元建模, 仍主要以平面铺放为主。WHEBE 等<sup>[104-105]</sup>通过分析模具型面与丝束路径的几何信息, 建立了曲面模具铺放中丝束褶皱的几何模型, 如图 26 所示, 实现了曲线路径上褶皱的可视化, 并指出了丝束铺放后潜在的起皱区域。然而, 纯几何的建模方法忽略了预浸料丝束的材料特性以及铺放工艺等的影响, 为满足工艺评估的精度需求还需要额外开展相应的铺放试验。何玉筱<sup>[41]</sup>选用质点-弹簧-粘壶力学系统来表征预浸料丝束的正交各向异性与粘弹性, 考虑了预浸料丝束的整体行为, 实现了铺放过程的动态模拟与面外褶皱缺陷的预测。但仅主要考虑铺放压力对预浸料黏性的影响, 而将其他工艺参数设为定值是不合理的。

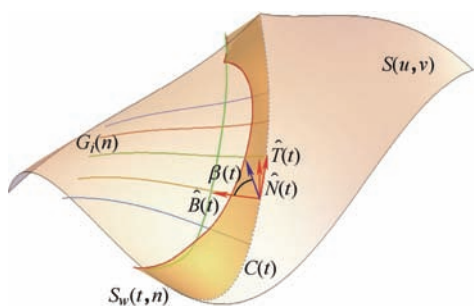


图 26 面外褶皱几何模型<sup>[105]</sup>

### 2.3.3 多尺度缺陷建模方法

随着复合材料结构的服役应用, 在复杂载荷条件频繁作用下, 初始缺陷可能逐渐演化并最终引起结构失效。因此不同类型缺陷的结构力学影响分析对铺放过程缺陷控制和保证结构设计性能至关重要。但铺放缺陷的精细建模方法存在过程复杂、效率低等问题, 难以满足设计阶段或制造阶段的实时工艺评估需求, 多尺度分析方法引起了学者们的注意。HEINECKE 等<sup>[106]</sup>通过设置合适的宏观尺度, 将局部材料水平的影响应用到宏观结构水平的结构响应分析中, 研究三种缺陷配置(窄间隙、宽间隙和宽搭接)对结构力学行为的影响。MARROUZE 等<sup>[107]</sup>定义了一个多尺度渐进失效分析方法, 该方法以不同层级构造块的形式将结构级尺度降到微观尺度, 如图 27 所示, 可以综合考虑不同尺度下材料的损伤起始和扩展、载荷分布和力学特性退化等。ABDI 等<sup>[108]</sup>将基于层级构造块的多尺度建模方法应用到分析商用飞机机身上间隙和搭接的影响。

目前复合材料铺放缺陷研究较多是基于平板试验件预制缺陷展开的, 推广到复杂曲率结构时, 还应综合考虑模具、路径、材料和工艺等多方面共同

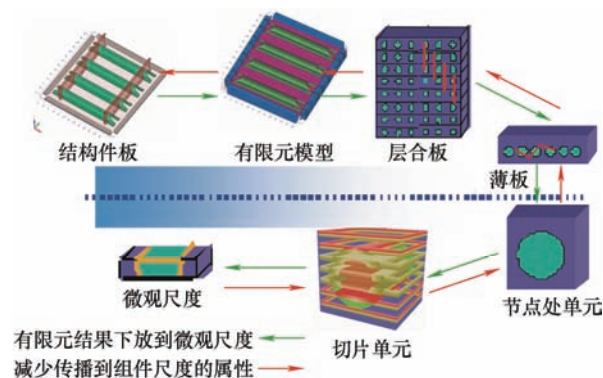


图 27 构件级宏观尺度到材料级微观尺度渐进损伤跟踪<sup>[107]</sup>

影响。并且样件尺寸普遍处于试片级, 且多数未考虑到实际服役的载荷工况, 因而开展结构级的多缺陷并存、宏细观并发下的力学分析研究是非常重要的。

## 3 铺丝设备研发及应用技术

研发和应用自动铺丝设备是降低复合材料构件制造成本、提高铺放质量和铺放效率的重要途径。自动铺丝设备通过机构运动将铺丝头精准地定位至模具指定位置, 并提供稳定可靠的铺放工艺条件, 保证预浸料丝束良好地铺敷于模具或铺层表面上。因此, 设备静动态运动精度、铺放速度和工艺控制水平等是评价铺丝设备技术先进性的重要指标。此外, 随着复合材料构件向大型化和复杂化发展, 自动铺丝设备的运动冗余度也随之增加, 如何在众多可能的运动轴规划方案中找到最适合的解决方案, 满足铺放要求的同时降低控制难度, 一直是冗余系统运动规划的主题。本节主要围绕自动铺丝设备的发展历程、工艺控制方法、冗余运动规划和静动态精度控制等方面进行讨论。

### 3.1 自动铺丝设备研制

自动铺丝机诞生于 20 世纪 80 年代, 由美国波音、洛克希德和诺斯罗普等航空航天公司率先开展商业化应用。紧随其后, 在 20 世纪 90 年代, 欧洲国家也开始着力研发自动铺丝设备。目前, 著名的国外先进自动铺丝设备生产厂商有美国 Cincinnati 公司、Ingersoll 公司、Electroimpact 公司、法国 Coriolis 公司、Forest-line 公司, 西班牙的 M-Torres 公司, 北马其顿 Mikrosam 公司等, 其代表性自动铺丝设备如图 28 所示。

自动铺丝机结合了纤维缠绕(Filament winding)的差动放线能力和自动铺带技术(Automatic tape



laying, ATL)的压实、剪切和重启能力<sup>[109]</sup>, 并且具备丝束独立控制功能, 因而可以铺放复杂边界构件和曲线路径。根据不同的应用场景, 铺丝机通常会

进行个性化设计, 但基本由以下部分组成: ① 铺丝机本体; ② 铺丝头和压实系统; ③ 喂丝系统; ④ 数控系统及上位机。



图 28 国外先进自动铺丝设备

其中铺丝机本体有龙门式、卧式、悬臂式、机器人式等, 对于大尺寸、大曲率开曲面或异形回转体构件, 可通过增加移动轴和回转轴实现铺放任务。另外, 由于机器人灵活性和体积小特点, 多机协同铺丝系统(同侧多机或异侧多机)的应用场景越来越普遍, 如图 29 和图 30 所示。目前, 国外铺丝机商业化程度高、技术成熟, 铺丝机本体结构适应于各种工况。铺丝头和铺带头型号丰富, 可满足多带宽和多通道的预浸料丝束铺放, 且可实现铺丝头的自动在线更换。铺丝机末端静态精度在 2 mm 以内, 二次重送位置精度在 2.5 mm 以内; 铺放速度和剪切速度可达到 100 m/min 和 60 m/min 以上, 加速度快, 动态性能好; 加热温度和压紧力等工艺控制水平高。此外, 具有更短的铺放距离和二次重送距离, 意味着能够较好地实现边角覆盖和增强/开孔结构的铺放, 避免丝束浪费<sup>[110]</sup>。

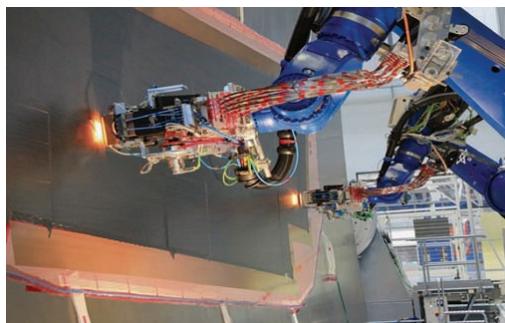


图 29 德国宇航中心双工位生产机器人<sup>[128]</sup>

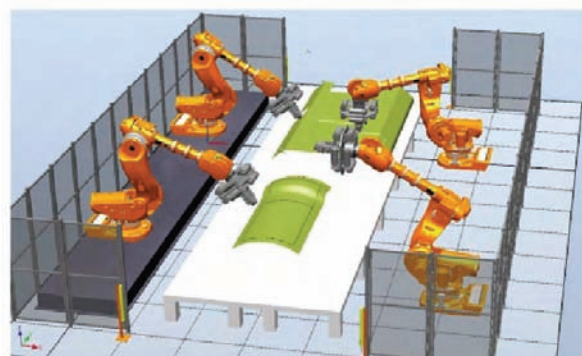


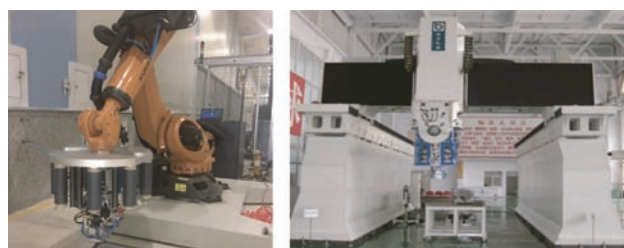
图 30 麦科罗公司多机器人工作单元<sup>[128]</sup>

国内复合材料自动铺放技术与设备研究起步较晚, 21 世纪初, 南京航空航天大学研制了国内第 1 台复合材料小型自动铺带机, 随后西安交通大学、哈尔滨工业大学等也进行了系统研究<sup>[111-114]</sup>, 如图 31 所示。经过 20 多年的发展, 国内的自动铺丝机设计也日臻完善。各大高校、科研机构和企业相继研发了多种机床式、机器人式自动铺丝机。在铺丝头控制方面, 开展了铺丝质量检测<sup>[115-118]</sup>、张力控制系统<sup>[119-120]</sup>、收放料机构<sup>[121]</sup>、铺丝温度控制系统<sup>[120, 122-124]</sup>、超声切割<sup>[125]</sup>、压实机构<sup>[64, 126-127]</sup>等研究。

浙江大学飞机数字化装配团队拥有 20 多年从事航空制造技术与高端装备的丰富科研经历, 联合杭州艾美依航空制造装备有限公司的产业化制造和



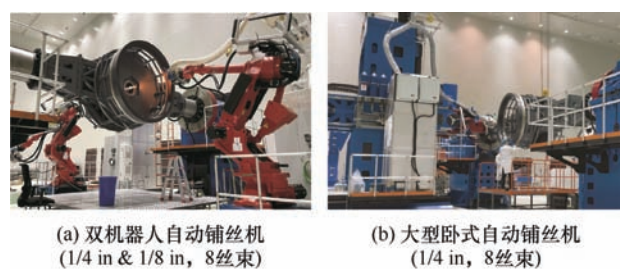
市场服务能力,研发了多种面向重大工程应用的自动铺丝机和自动铺带机,包括龙门铺丝机、双机器人自动铺丝机(图 32a)、大型卧式自动铺丝机(图 32b)、重载机器人自动铺丝机(图 32c)和大型龙门自动铺带机(图 32d)。利用国产化自动铺丝装备,完成了含增强和窗口结构的大尺寸飞机壁板、球面框、C 型梁、进气道等试验件的铺放制造,系统研究了国产材料和国产装备的工艺匹配性,为工程化应用奠定了技术和装备基础。



(a) 南京航空航天大学  
机器人自动铺丝机

(b) 西安交通大学  
大型龙门铺丝机

图 31 国内主要自动铺丝设备



(a) 双机器人自动铺丝机  
(1/4 in & 1/8 in, 8 丝束)

(b) 大型卧式自动铺丝机  
(1/4 in, 8 丝束)



(c) 重载机器人自动铺丝机  
(1/8 in, 16 丝束)

(d) 大型龙门自动铺带机  
(150 mm & 300 mm)

图 32 浙江大学自动铺丝/铺带设备

针对常规固定带宽铺放技术难以实现复杂复合材料曲面全覆盖,存在大量间隙/搭接缺陷及铺放角度偏差大等问题,浙江大学研究了可变带宽的铺放路径规划方法和复杂预浸带边界的切刀动态规划方法,研制了大行程高精度重载机器人及复合材料变带宽自动铺带头,如图 33 所示,可实现球面、锥面结构的高覆盖率铺放。

然而,与国外铺丝设备相比,国内铺丝种类单一,工程应用经验相对不足,研究工作主要集中在硬件装置设计和控制算法实现上,对工艺参数作用规律和调控机理的研究还不够充分<sup>[110]</sup>。

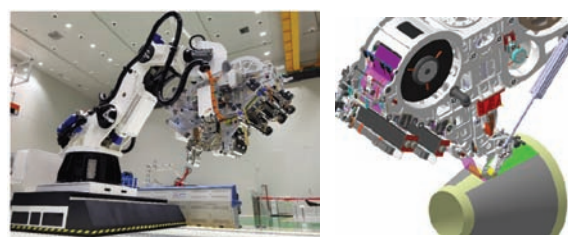


图 33 浙江大学变带宽自动铺带装备

### 3.2 铺放工艺控制

铺放工艺是影响复合材料铺放成型质量的重要因素,铺放设备对铺放工艺参数的精确稳定控制,是复合材料铺放成型技术的关键一环,也是评价铺放设备性能的重要指标。

在四项关键铺放工艺中,铺放压力、铺放温度和铺放张力相对独立,一般单独控制。铺放速度受数控系统影响,可对其施加作用的手段受限,且受模具型面曲率的影响,铺放速度的波动难以避免。并且,铺放速度对铺放质量的影响,绝大部分是通过影响压力和温度作用时间而实现的。因此,大多数研究学者以及从业人员在研究铺放设备的工艺控制问题时,只研究铺放压力、铺放温度和铺放张力的控制,而将铺放速度视为控制问题的输入。

#### 3.2.1 铺放温度

自动铺丝设备的加热系统主要包括红外加热灯、激光加热器、热气喷枪以及脉冲光加热器<sup>[129]</sup>。四种加热系统的适用范围以及特点如表 4 所示。

表 4 各种加热系统的特点总结<sup>[129]</sup>

加热系统	材料	可控性	温度
热气喷枪	热固/热塑性预浸料	低	中
红外加热灯	热固性预浸料	中	低
激光加热器	热塑性预浸料	高	高
脉冲光加热器	热固/热塑性预浸料	高	中/高

铺放温度的控制是比较困难的。一方面,准确测量预浸料的表面温度比较困难,尤其是面对复杂曲面的模具时,铺放温度的实时反馈难以实现。另一方面,铺放速度对铺放温度的影响大。由于铺放速度决定了加热系统的工作时间,动态变化的铺放速度对铺放温度准确控制带来了挑战。目前,主要通过铺放温度预测和铺放速度规划来达到铺放温度控制的目标。

WANG 等<sup>[20]</sup>提出了一种基于加热器结构的加热策略,以有效地实现不同铺放速度的恒温控制。通过确定加热器功率、反射膜弧度和红外管长度,可以在不同铺放速度下保持 25 °C、30 °C 和 35 °C 恒温的加热目标如图 34 所示,设置红外加热器结构并保持铺层温度为 35 °C 后,缺陷区域(气泡和褶皱)有所减少。

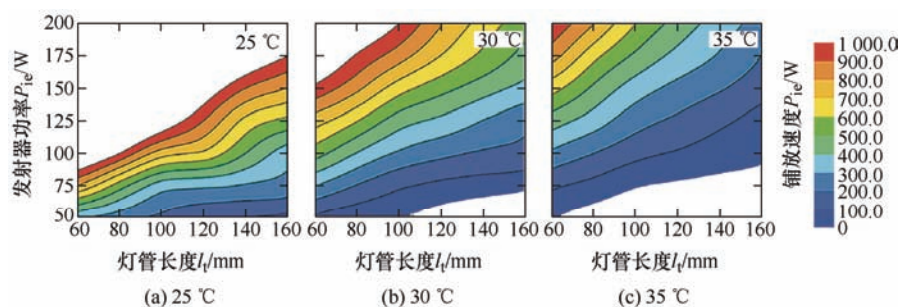


图 34 在不同铺层速度下实现 25 °C、30 °C 和 35 °C 恒温加热的控制所采用的加热器功率和红外管长度 (反射膜弧度范围在  $\pi/3$  到  $\pi$ )<sup>[20]</sup>

QU 等<sup>[24]</sup>提出了 S 型速度前瞻规划方法以及考虑铺放姿态的温度预测方法, 针对过 R 角区域铺放温度过高现象(超过 90 °C), 提出了一种温度调控方法来实现最佳温度铺放, 并通过试验验证了温度调控方法的可行性, 如图 35 所示。

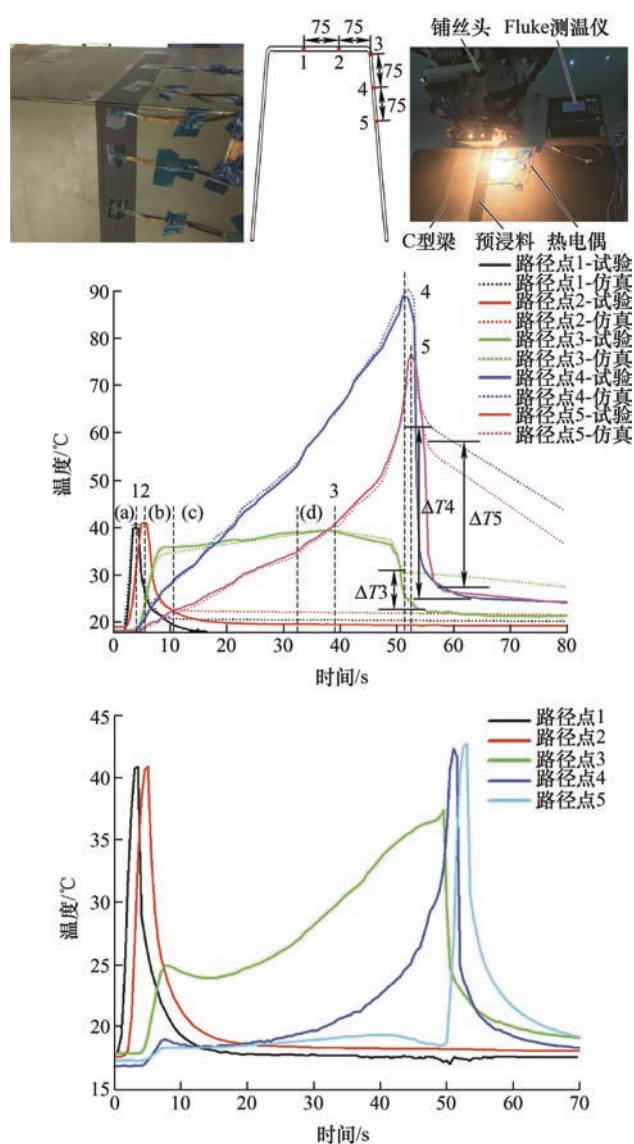


图 35 铺放温度调控前后效果<sup>[24]</sup>

### 3.2.2 铺放压力

铺放压力的施加方式有两种: 气动式和直压式。气动式是指铺放压力的气源由一个或多个驱动气缸提供, 压辊连接在气缸活塞杆末端, 通过控制气缸工作腔的气压实现对铺放压力的控制。很多铺放设备制造商如 Coliris, Cincinnati, MTorres 等均采用这种方式实现铺放压力的控制。对于气动式压辊而言, 对铺放压力的控制研究等价于对压辊气动系统的控制研究, 而气动系统具有很强的非线性特性, 因此实现铺放压力的精确控制和快速响应都十分困难。SHIH 等<sup>[130-131]</sup>利用系统辨识的方法获取气动系统的线性时不变模型, 根据时间误差绝对值最优控制原理设计了 PID 控制器。GROSS 等<sup>[132-133]</sup>采用多层神经网络技术设计前馈控制器以实现对非线性气动系统的控制。国内外学者及从业人员利用优秀的气动系统控制算法使气动式压辊能够很好地实现铺放压力的控制需求。

直动式是指压辊与铺放设备末端刚性连接, 没有气缸等额外的驱动源, 铺放设备在执行铺放路径时, 压辊位置取决于机床位置, 铺放压力则来自于压辊的变形力。且由于该方式需要深度结合数控系统, 因此控制难度高。美国 ElectricImpact 公司的铺放设备就采用了直动式压辊实现压力控制。由于该方式需要深度结合数控系统, 因此控制难度高。张建宝等<sup>[126]</sup>基于 UMAC 控制系统提出了用于龙门式铺放设备的直动式铺放压力控制方法。OJEDA 等<sup>[134]</sup>提出了通过实时调整机器人铺放系统位姿控制铺放压力的方法。

何玉筱<sup>[41]</sup>提出了单个路径点处与沿整条路径两个层面的铺放压力均匀度指标, 从整体式压辊结构参数、铺放压紧力以及压辊姿态 3 个角度对铺放



压力均匀度优化方法展开了系统研究。由于整体式压辊的固有结构对其径向变形能力的限制，为此提

出了一种分段式压辊结构，显著提高了压力均匀度，如图 36 所示。

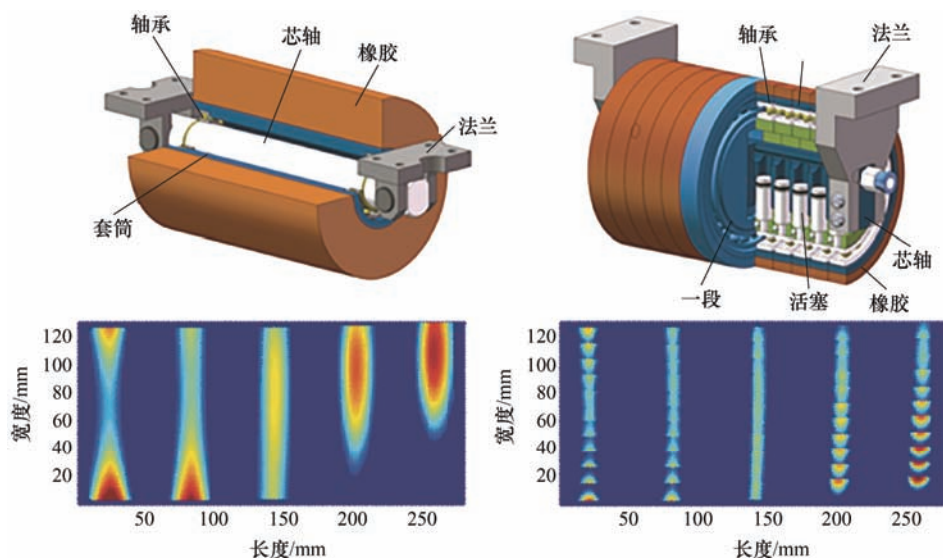


图 36 整体式压辊和分段式压辊单点铺放压力场<sup>[41]</sup>

### 3.2.3 铺放张力

铺放张力对复合材料铺放质量的影响是多方面的，过小的铺放张力有可能造成预浸料脱离输送辊，铺放时会大量出现气泡、褶皱等缺陷。过大的铺放张力则会导致架桥、翻边等缺陷。同时，在送丝阶段，过大的张力会导致丝束打滑，严重影响预浸料铺放的边界精度。因此，控制铺放张力在合适的工艺窗口内是衡量铺丝设备性能最重要指标之一。国内外研究学者对铺放张力的控制研究颇多。POLINI 等<sup>[135]</sup>研究了复合材料丝束缠绕过程中缠绕速度与轨迹对复合材料丝束张力的影响，并通过控制丝束缠绕速度来控制丝束张力。IMAMURA 等<sup>[136]</sup>采用 PID、I-PD 控制策略利用芯模与导纱辊部分的旋转速度差异和芯模上力矩伺服控制两种方法进行张力控制。刘毅等<sup>[137]</sup>将铺放速度作为张力控制系统的不确定干扰项，结合被动舞蹈辊设计，提出了一套基于  $H_\infty$  控制算法的铺放张力控制方法。韩振宇等<sup>[138]</sup>研究了张力控制系统小型化的方法，设计了一套基于气动元件的张力控制系统。ASSADI 等<sup>[139]</sup>开发了一种新型的伺服传感铺放装置，用以支持高速铺放中的准确纤维张力控制。为了克服在复杂曲面铺放中铺丝头末端速度剧烈变化对张力控制精度造成的干扰，LI 等<sup>[140]</sup>提出一种主动控制与被动控制相结合的张力控制方法，通过对放卷电机的主动控制实现丝束保持恒值张力，设计被动舞蹈辊结构参数，实现高频张力波动的实时补偿，如图 37、38 所示。

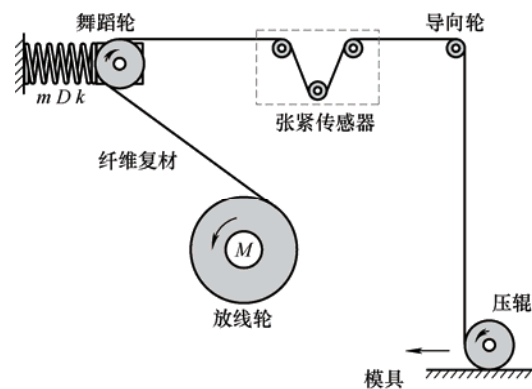


图 37 张力系统模型<sup>[140]</sup>

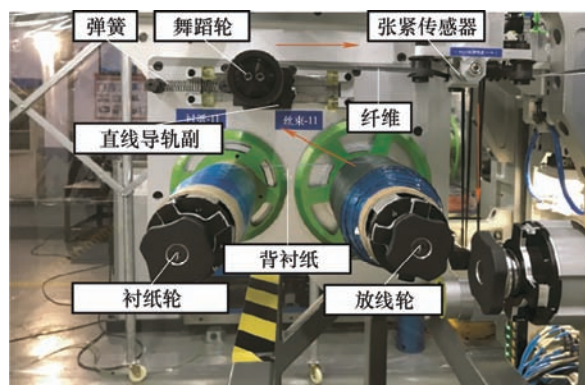


图 38 喂丝系统<sup>[140]</sup>

### 3.3 铺丝机运动规划

如前所述，为了提高铺放过程的效率和灵活性，铺丝系统往往具备多个冗余自由度，甚至包括多台铺丝设备，如图 39 所示。在这种情况下，铺丝机到达任务空间中的任意位姿就会对应无穷多种关节配



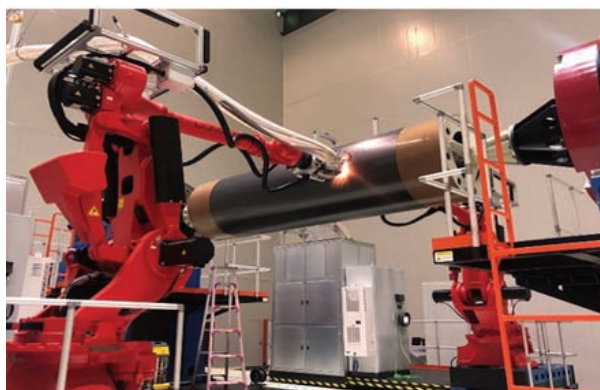


图 39 异侧双机铺丝系统

置。如何根据铺放质量和铺放效率要求,结合铺丝工艺约束,确定(相对)最佳的运动轴配置方案,就属于冗余机床运动规划范畴。

传统的冗余轴规划可通过建立相应性能指标,求解雅可比矩阵广义逆来解决,如可操作度指标<sup>[141-142]</sup>、扭矩<sup>[143]</sup>等。然而,雅可比矩阵的伪逆计算过程耗时,且难以考虑加工过程中多种约束。另一种方法则是基于“主从”思想<sup>[143-144]</sup>,首先确定“主”关节的轨迹,然后确定“从”关节的对应轨迹。这种方法往往适用于主从设备操作空间较大的多机协作系统。另外,有研究者通过绘制设备的性能指标分布图,确定性能最佳的设备位姿。如 LIN 等<sup>[145]</sup>通过分析机器人可操作度、刚度及末端变形分布图确定了机器人最佳钻孔位姿。ZARGARBASHI 等<sup>[146]</sup>提出新的机器人性能指数以评估末端的力利用率,通过该指标在操作空间内的分布确定机器人加工姿态。这种方法简便直观,但是更适用于冗余度较小的单点加工,从复杂度考虑不适用于多冗余情况,也不适用于连续加工场景。

结合智能算法的冗余运动规划研究正变得越来越普遍。KANG 等<sup>[147]</sup>集成了基于雅可比的逆运动学求解和退火算法进行运动规划,并通过局部更新迭代避免陷入局部极小值,得到无碰撞的平滑轨迹。LIU 等<sup>[148]</sup>以时间最短为目标,将约束函数离散化,结合贪婪算法和自然优化算法得到冗余机械臂加工轨迹。FARZANEHKALOORAZI 等<sup>[149]</sup>对于由多机器人组成的多冗余系统,以可操作度最优为目标,首先利用牛顿法优化转台冗余自由度,再使用粒子群算法(Particle swarm optimization, PSO)优化并联机器人位姿,得到该协作系统的关节运动轨迹。类似地,DOAN 等<sup>[150]</sup>采用 PSO 算法得到了焊接机器人的无奇异、无碰撞的空间布局和关节轨迹。DEBOUT 等<sup>[151]</sup>首先利用自适应滤波调整了铺丝姿态,并以关节曲率最小为目标采用 Levenberg-

Marquardt 算法优化了冗余关节。XIONG 等<sup>[152]</sup>提出一种新的刚度评价指标,并将冗余问题转化为一维优化问题,在关节极限、避免奇异点等约束下,通过简单的离散搜索算法得到了刚度最优的机器人加工轨迹。这种算法不要求优化问题具有较好的结构信息,更适用于一般问题描述,但收敛效果对参数的选择更敏感,参数调整过程比较复杂。

应用更为广泛的冗余运动规划算法为基于图的搜索算法。这种方法通过离散化关节空间构建搜索图,将连续问题转化为离散形式,则目标函数最优对应的期望轨迹表示为图上的最短路径<sup>[153-154]</sup>。GAO 等<sup>[155]</sup>使用两阶段优化策略找到时间最优的平滑关节轨迹。该策略采用启发式思想,包括初始阶段的“全局粗搜索”和最终阶段的“迭代局部精搜索”。LU 等<sup>[156]</sup>为五轴侧面铣削规划了无碰撞、平滑的关节运动轨迹。该算法结合了 Dijkstra 的最短路径技术和差分进化算法,加快了计算速度,能够避免陷入局部最优解。DAI 等<sup>[157]</sup>基于抽样策略构建了一个冗余节点图,首先通过图搜索确定初始路径,然后采用贪婪算法在具有大抖动的区域应用自适应滤波器来优化路径。GAO 等<sup>[158]</sup>提出了一种改进的快速探索随机树算法来解决焊接机器人连续轨迹规划问题,该方法通过调整姿态欧拉角来避免碰撞。这种方法在低维空间轨迹寻优方面,计算效率及质量都很高,但对于多冗余系统高维空间计算,计算负担和收敛难度大大增加。

### 3.4 铺丝机精度控制

自动铺丝设备属于非线性、强耦合、大惯量的机电系统,要求具备高速度、高精度和高稳定性的运动性能,其设计研发过程涉及运动学、动力学、数控原理、控制理论、机械设计等多学科的深入交叉,是一项复杂且具有突破性和系统性的工作。自动铺丝设备的基本工作流程如图 40 所示。

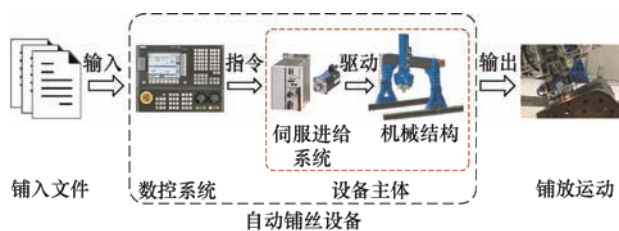


图 40 铺丝设备工作流程

#### 3.4.1 运动精度

运动精度是指自动铺丝设备主体对运动指令的复现能力。实际上,自动铺丝设备无法完美复理

论规划轨迹, 导致其铺放精度差, 进而降低铺放质量。造成该现象的因素主要有静态误差和动态误差。静态误差是指不随时间变化或随时间变化缓慢且与设备自身结构相关的误差, 如几何误差、重力变形误差等; 而动态误差则指设备在运动过程中产生的误差, 如各轴跟随误差、外力引发的结构变形误差等。

动态误差与静态误差有着本质的区别, 它更多地依赖于设备运行工况, 且与速度规划结果密切相关。随着设备运动速度的增加, 动态误差将逐渐取代静态误差, 成为影响设备运动精度的主要因素。影响设备动态误差的因素主要包括控制系统伺服误差和设备在动态力下引起的结构变形<sup>[125-126]</sup>。其中, 在对伺服进给系统的跟随误差分析时, 张会瑞<sup>[159]</sup>综合考虑了丝杠的纵向、扭转和横向的 3 种振动以及工作台在各个方向的振动, 分析了滚珠丝杠进给系统的固有特性和动态响应时。

而结构变形则是在运动过程中, 设备受到惯性力、驱动力、摩擦力等外力作用而引起的形变。其主要发生在关键部件和结合面上。低频、中频和高频作用力引起的主要结构变形形式分别是弹性变形、结构振动和颤振。其中, 弹性变形引起的动态误差幅值相对于结构振动和颤振较大, 是动态误差的主要误差源<sup>[160]</sup>。在动力学领域中, 对于结构动态变形的研究主要为机械系统在外力作用下的动力响应。ANDOLFATTO 等<sup>[161]</sup>研究了机床结构在运动轴加速过程中的挠曲变形, 通过试验评估了挠曲变形的演变规律, 并给出了进给速率与挠曲变形之间的关系。张广鹏等<sup>[162]</sup>应用均质梁、集中质量及结合部单元对机床进行整机动态建模, 并采用子结构合成的思想建立了整机系统的动力学方程。随着有限元技术及相关软件的发展, 建立整机的有限元模型并对其进行动力学分析逐渐成为研究机械系统的常用方法<sup>[163-165]</sup>。

在提高运动精度方面, 研究重点集中在设备主体上, 其方法主要可分为误差防止法和误差补偿法<sup>[166]</sup>。误差防止法通过优化铺丝设备结构设计、提高设备零部件制造安装精度、优化设备伺服系统控制算法等方式, 在源头上减小各类误差的引入, 从而达到提高设备运动精度的目的。但是这种方法成本高、周期长, 并且提高精度的能力有限。误差补偿法则通过对设备主体各项误差进行分析、统计和归纳, 掌握误差的特点和规律, 建立误差数学模型, 并人为地引入一种新的误差去抵消或减弱原始误

差, 所需费用低且调整简便, 因而受到广大研究学者的青睐<sup>[167-169]</sup>。

误差补偿法的关键在于对设备主体的系统性能分析, 通过建立设备主体的数学模型, 包括运动学模型、多体动力学模型和结构动力学模型等, 实现误差预测, 有利于后续误差补偿。在各种数学模型中, 运动学模型是实现设备运动控制的基础。国内外学者主要从机器人学<sup>[170-173]</sup>、多体系统理论<sup>[174-176]</sup>和旋量理论<sup>[177-179]</sup>等角度来描述设备运动学建模过程。但是由于制造误差、装配偏差等误差源的存在, 通过上述方法建立的运动学模型无法充分揭示各运动轴位置与末端位姿之间的关系, 导致模型预测能力差, 难以在实际中应用。因此, 部分学者采用运动学建模与标定技术, 完成对运动学模型的修正, 从而提高设备定位精度。WU 等<sup>[114, 180]</sup>结合几何偏差和重力变形, 建立了龙门铺丝机的综合运动学建模方法, 并对其进行了运动学标定。郑成淦等<sup>[181]</sup>基于多体系统理论建立了自动铺丝机实际运动学模型和末端空间误差模型。CHENG 等<sup>[182]</sup>和 ZHANG 等<sup>[183]</sup>提出了基于旋量理论的自动铺丝机床运动学建模, 通过迭代反解法对位姿误差进行补偿。MIAO 等<sup>[184]</sup>探讨了重载机器人铺丝机的快速建模和标定方法。XU 等<sup>[185]</sup>考虑了关节依赖误差和顺应性误差, 对重载机器人进行了标定, 并将平均残差控制在 0.2 mm 以内。显然, 建立一个准确的运动学模型对提高设备定位精度和控制精度具有重要意义, 同时也对后续运动速度规划、动力学建模和动态误差研究具有深刻影响。

然而, 在误差源多样、误差形式复杂的情况下, 运动学建模与标定技术也会因无法引入合适的运动学参数而呈现出一定的局限性, 所以误差建模与补偿技术也成为了研究热点之一。任永强等<sup>[186-188]</sup>研究了几何误差和热误差的综合建模方法, 并采用多项式拟合与线性拟合方法建立机床几何误差与热误差的综合数学模型。TSUTSUMI 等<sup>[189]</sup>通过使用球杆仪对机床四个运动轴配合运动时的运动轨迹进行测量, 提出了双转台五轴机床回转轴的八项几何误差参数的一种辨别方法。HSU 等<sup>[190]</sup>在对五轴机床几何误差建模基础上, 提出了一种将平动轴与转动轴分离的解耦补偿法, 并在后处理过程中通过修改刀具路径的方式, 实现对几何误差的预补偿。

综上, 多种误差因素综合作用会导致自动铺丝设备的运动精度严重降低。有关误差产生方式、误

差影响规律和提高设备运动精度的手段等方面的研究仍需进一步开展。图 41 总结了影响设备运动精度的关键因素。

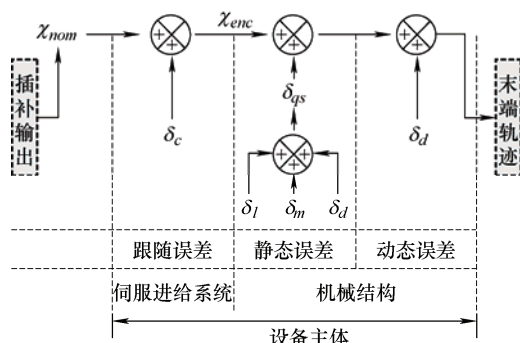


图 41 影响设备精度的关键因素

### 3.4.2 铺放精度

自动铺丝机的铺放精度决定了预浸丝束实际的铺放位置和方向，直接影响固化成型后复合材料构件的力学性能。为了提高复合材料构件的铺放质量，保证自动铺丝机的铺放精度是重要的基础和前提。铺放精度受到自动铺丝机床的空间运动、预浸丝束的输送、自动铺丝机床与预浸丝束的协同运动等多因素综合影响。尤其在铺放大型复杂型面复合材料构件时，自动铺丝机床面临着工作范围大且型面曲率变化剧烈的难点。另外，预浸丝束在重送阶段由于依靠摩擦力进行输送，稳定性差。而自动铺丝机床与预浸丝束又需要在高速铺放下进行协同控制。以上因素加剧了铺放精度保障和改善的难度。为此，研究自动铺丝机的铺放精度保障技术，对促进我国自动铺丝设备在航空领域中的应用具有重要意义。

根据预浸丝束在模具上的实际铺放位置和方向，铺放精度可以分成 3 个部分：① 端头精度；② 方向精度；③ 铺贴间隙，如图 42 所示。CHENG 等<sup>[191]</sup>建立了预浸丝束在重送阶段的输送模型，通过优化夹紧方案提高了预浸丝束的重送精度，同时针对高速铺放下自动铺丝机床与预浸丝束的协同精度难以保证的问题，提出一种基于时序的重送和剪切指令执行方法，获得了实际的重送和剪切提前量，并根据位置信息将丝束动作控制点与插补点结合在一起，从而将协同误差控制在一个 PLC 扫描周期之内。为保障自动铺丝机的铺放精度，相关研究还需要从自动铺丝机床的位姿误差、预浸丝束的输送误差、自动铺丝机床与预浸丝束的协同误差 3 个方面进一步系统性开展。

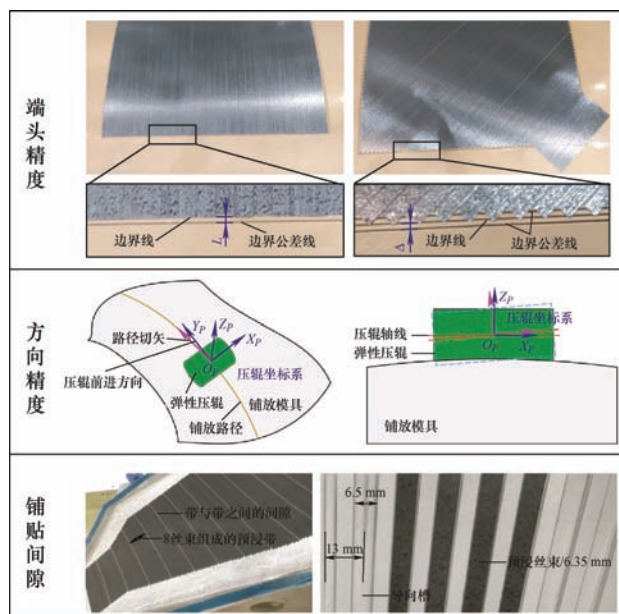


图 42 铺放精度示意图<sup>[191]</sup>

自动铺放设备是实现复合材料构件高性能制造的硬件基础，自动铺放设备的运动性能和精度水平直接影响到复合材料构件的铺放质量和性能可靠性。从表 3 所列铺放技术需求和本节铺丝机应用技术的分析可以看出，铺丝机运动性能和精度水平提升仍是我国铺丝机技术和装备研发的重要方向，对我国航空航天领域高端装备的研制和批产具有重要意义。虽然复杂产品的铺放系统多具有一定的运动冗余度，但在满足运动可达、避免奇异等基本运动要求后，面向铺放姿态大幅度变化下的铺放高效率 and 运动光顺性要求时，铺放系统的运动冗余性也变得极为受限。尤其铺放路径起始端的冗余关节设置对后续运动性能具有直接影响。因此如何面向整个铺放过程开展冗余铺丝系统运动规划，是一项极富挑战性的工作。此外，高速铺放状态下丝束的剪切和重送精度是关系到复合材料构件铺放效率和铺放精度的重要技术指标，还需要进一步开展丝束传输系统、剪切重送系统的性能优化和内部丝束传输-外部末端运动间的高速动态匹配研究工作。

## 4 铺放工艺规划系统

铺放工艺规划系统作为复合材料构件设计 (CAD) 和制造 (CAM) 之间的桥梁，是复合材料构件制造技术的重要载体，直接控制着整个制造过程的运动与工艺，很大程度上决定了复合材料构件的最终性能。铺放工艺规划软件读取复合材料构件设计模型，如 FiberSIM 模型或 CATIA CPD 模型等，根



据铺层角度信息、铺放曲面、边界曲线、坐标系等信息, 结合铺覆材料工艺特性和设备制造约束等, 规划生成满足结构铺层设计要求的铺放路径。进而依据铺放设备运动结构和铺放模式, 生成可供专用铺放设备实现复合材料构件成型制造的 NC 加工代码, 并且构建仿真环境进行可视化计算, 实现铺放过程的预先准确模拟分析<sup>[192-193]</sup>。

国外的复合材料 CAD/CAM 技术研究工作起步早且发展水平已经比较高。更加重要的是伴随着一系列自动铺放设备的研发和应用, 逐步开发了与自动铺放设备相匹配的软件系统, 从单一的 CAD 系统兼容发展为多 CAD 系统兼容, 并不断地拓宽了软件的适用范围, 满足龙门式、卧式、机器人式等多系列化铺丝装备的需求。

1989 年美国 Cincinnati 公司自主开发了 ACES(Advanced composites environment software)离线编程与仿真软件系统(图 43), 该系统包括自动铺带模块(ACRAPATH)和自动铺丝模块(ACRAPLACE), 并成功应用于雷神公司的商务喷气式飞机、美国 V-22“鹞”式军用飞机、空客公司的 A340 宽体客机和 A380 巨型客机的复合材料结构轨迹规划和铺放制造<sup>[194]</sup>。美国的 Ingersoll 公司和法国达索公司联合开发了一套复合材料铺放编程软件系统(Ingersoll composite programming system, ICPS)<sup>[193]</sup>。该系统由设计与制造两个模块构成, 其中制造模块主要功能为零件的可制造性分析并生成相应的铺放路径和 NC 程序源码等。

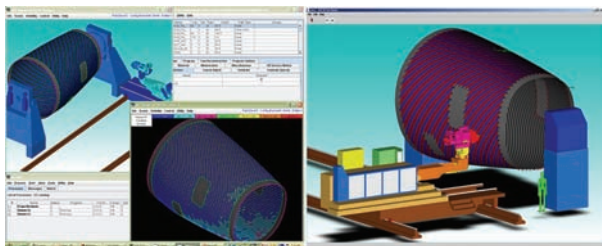
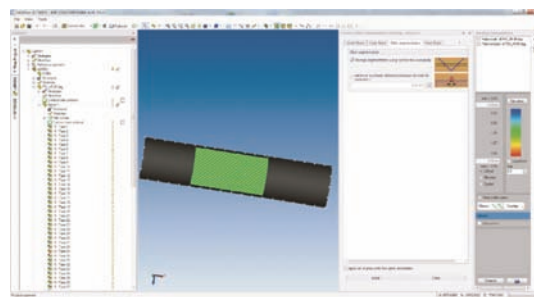


图 43 ACES 软件界面

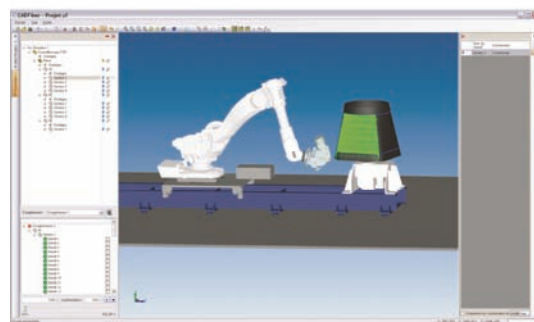
西班牙的 MTorres 公司与法国达索公司合作开发了 TORFIBER 软件系统<sup>[195]</sup>, 由设计模块 TORFIBERDES 和制造模块 TORFIBERMAN 构成, 其中路径规划功能属于制造模块。这两款软件均由机床制造商同达索公司联合开发并集成于 CATIA 软件中, 避免了数据输入及输出过程中可能出现丢失或者偏差的问题。

法国 Coriolis Composites 公司根据用户需求开发了 CADFiber 和 CATFiber 两套自动铺放编程软件, 如图 44 所示。前者可读取 CATIA 和 FiberSIM

系统的设计数模; 而后者只支持 CATIA 数模<sup>[196]</sup>。两种软件核心算法是类似的, 被空客公司和庞巴迪公司广泛应用。



(a) 路径规划界面



(b) 运动仿真界面

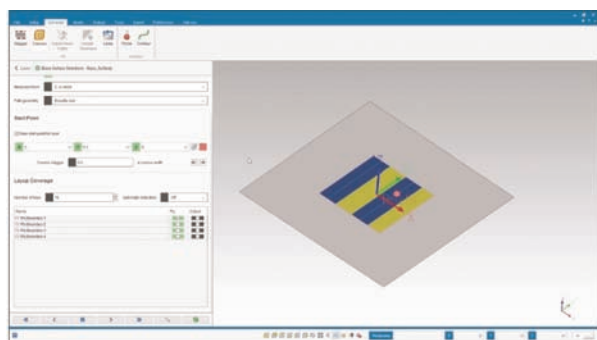
图 44 CADFiber 软件界面

美国 VISTAGY 公司开发的 FiberSIM 软件, 集复合材料设计、分析、生产为一体, 能与主流的 CAD/CAM 软件兼容。FiberSIM 设计模块可以基于不同结构形式选用不同的复合材料设计方法, 结合路径生成算法实现制造方案下的缺陷预测并为用户提供精确的有限元分析, 从而实现以更低成本满足更多的设计要求。

美国 CGTech 公司 HASENJAEGER<sup>[197]</sup>在原有金属加工领域的仿真软件的基础之上开发了一套独立于机床环境的包含路径规划和仿真的软件系统 VERICUT Composite Programming and Simulation (VCP & VCS), 如图 45 所示。其中 VCP 模块提供了多种 CAD/CAM 软件接口, 可兼容 CATIA、UG、MasterCAM 等数据模型运行, 适用性相比其他软件系统得到进一步提高。该软件系统由于兼容性强及可视化效果优越等受到各大制造公司的青睐, 包括波音公司、Electroimpact 公司和 MTorres 公司。

虽然国内复合材料自动铺放起步较晚, 但伴随着自动铺放工艺理论研究和装备条件逐步完善, 自动铺放 CAD/CAM 相关技术也得到了一定程度的发展。目前国内主要以南京航空航天大学、哈尔滨工业大学、西安交通大学、浙江大学等高校为代表参与了相关技术研究, 并开发出具备一定工程应用能

力的自动铺放软件模块和系统<sup>[198]</sup>。



(a) VCP路径规划模块界面



(b) VCS仿真模块界面

图 45 VERICUT(VCS)模块界面

南京航空航天大学与上海万格复合材料有限公司联合研发了我国第一台铺丝开放式数控系统,并基于路径规划研究成果在 CATIA 平台上开发了一套自动铺丝编程软件,具有轨迹规划与运动仿真功能<sup>[192, 199-200]</sup>。哈尔滨工业大学多年从事纤维缠绕设备的研制和纤维缠绕工艺软件的开发,先后研发了不同规格和系列的自动化纤维缠绕设备,并开发了软件 WINDSOFT 用于纤维缠绕轨迹设计,在纤维缠绕成型技术方面积累了丰富的经验,已在众多企业和科研机构得到应用<sup>[201-202]</sup>。西安交通大学基于自研的自动铺丝装备和工艺技术的研究,基于 CATIA 平台开发了一套自动铺丝轨迹规划及后处理软件,验证了纤维铺放轨迹规划算法的可行性,初步实现了自动铺丝软件系统的开发<sup>[110, 203-204]</sup>。

浙江大学针对重大工程应用需求,先后研制了大型龙门式自动铺丝机、大型卧式自动铺丝机、机器人自动铺丝机、重载机器人铺丝机和龙门式自动铺带机等自动化铺放装备。在此基础上,结合成型工艺理论和铺放路径规划研究,开发了 AMEFiber 自动铺放路径规划软件和 AMESim 后置仿真软件(图 46),能够直接读取复合材料设计软件生成的复材模型几何数据和复材模型制造铺层数据,并利用铺层信息如铺层边界、铺层方向、铺层厚度、铺贴起始点、铺贴轨迹驱动线等数据,基于多种自动生

成策略对铺丝路径进行自动规划,并可基于不同设计要求进行铺放丝束评价和编辑;同时可自动生成同铺放设备相匹配的铺放 NC 代码,构建相应的铺放仿真环境,实现铺放过程的仿真、碰撞检测和铺放结果模拟。

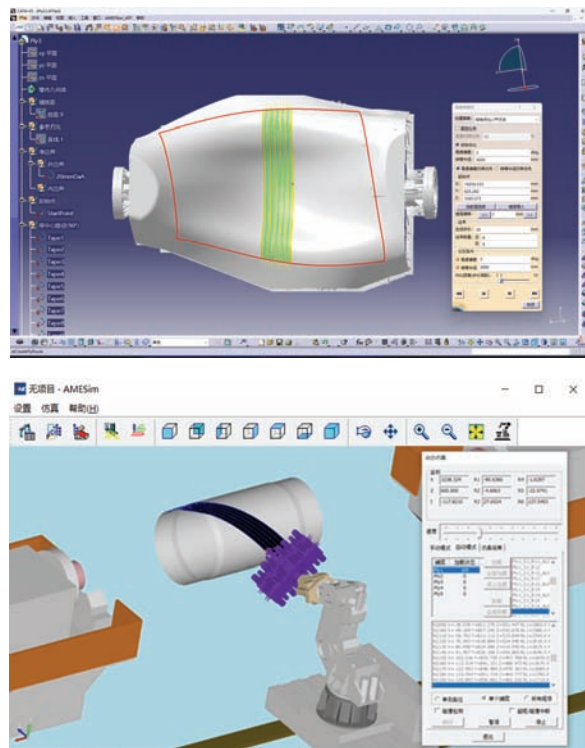


图 46 AMEFiber 路径规划和 AMESim 仿真软件

## 5 高端复合材料结构件制造面临的主要问题

通过分析复合材料自动化铺放技术、装备和系统的国内外研究现状可知,复合材料制造技术链条上每个单项技术均有突破,但随着铺放结构件的复杂化,各项技术还需要进一步加强研究。面向大尺寸双曲面壁板、异形回转体进气道的铺放,表 3 中所列部分问题,如对应铺放路径规划、冗余系统运动规划、铺丝机铺放精度控制和铺丝设备优化改进等,均有望通过持续研究得以解决。但是如缺陷抑制或性能评估,其影响要素众多,而且,要素与结果间呈现复杂耦合映射关系。对此类复杂问题,需要深入分析制造过程各要素之间的关联关系,明确各单个要素和多要素综合对铺放缺陷的影响规律,建立面向结构级的复合材料结构件力学分析模型,以结构件性能为目标,提出各要素之间的协调机制,一方面可为高端复合材料结构件制造提供比较优化



的工艺路线,另一方面,也可在制造质量无法满足时,将性能损失预测结果预先反馈给设计部门,为高端复合材料结构件设计制造一体化指明方向。

### 5.1 路径与工艺协同规划

目前,无论从国内外复合材料铺放规划软件操作流程还是实际制造过程上看,均存在铺放路径规划和工艺设计分离的问题。以复合材料构件的铺放路径规划为主,工艺窗口多是基于铺放试件的力学测试或是经验,在自动铺放数控系统的上位机软件中进行设置。然而,如C型梁的铺放温度仿真研究结果<sup>[24]</sup>所示,在铺放构件的大曲率区域,由于路径法矢的突变,造成铺放速度骤降进而加大了铺放温度和铺放压力的作用时间,导致部分区域铺放温度超过90℃。另外,针对某些铺放质量问题,可以通过路径或工艺优化两种手段进行改善,将铺放路径和铺放工艺相结合更能满足复杂构件的铺放需求,提升工艺规划效率。因此,建立铺放路径和铺放工艺的协同分析模型,根据铺放工艺效能分析结果指导铺放路径调整和铺放工艺动态调控对提升复杂构件铺放质量具有重要应用价值。

### 5.2 铺放缺陷多尺度建模

如第2.3节所述,目前主要针对单一、预设的铺放缺陷开展研究。但在复杂复合材料构件铺放过程,极有可能出现多种缺陷共存的情况,如图47所示,角度偏差、间隙/搭接或褶皱等同时存在。此外,由于样件尺寸多为试件级,由于尺寸效应的影响,现有试件级的研究结论还无法直接推广至大尺寸复合材料结构分析。因此,实现多缺陷并存、宏观并发的结构力学分析对铺放方案的确定至关重要。为此亟需解决多尺度建模分析中的宏-细尺度计算精度和计算效率相矛盾的问题,满足多类型缺陷的表达和嵌入要求。

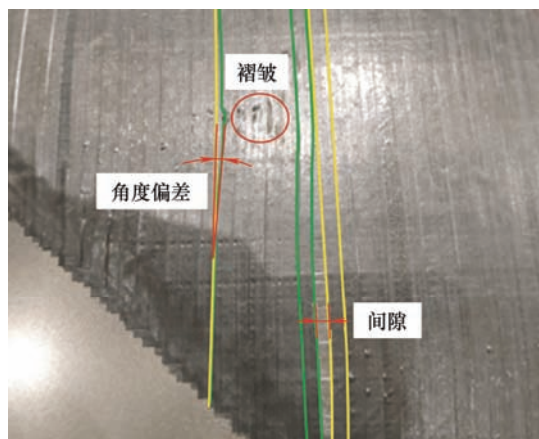


图 47 间隙、褶皱、角度偏差共存

### 5.3 面向结构件性能的设计制造集成优化

复合材料结构件的设计制造过程主要由以下几个阶段组成:设计、工艺规划、制造以及检测。由于目前复合材料构件设计与制造过程尚未完全打通,结构件设计阶段还无法系统考虑制造约束影响,因此,在面向复杂曲面铺放时经常出现多个技术指标无法同时满足的情况。不同的技术指标往往对应着不同的设计和制造需求,如控制纤维角度偏差主要为保证成型后构件的承载性能。控制丝束最小转弯半径主要为了避免褶皱缺陷形成。控制铺放温度和压力等主要为了保证层间的粘结性能。在制造分析阶段,当出现多种技术指标矛盾时,则需要进行指标间的权衡与协调,并将分析结果反馈至设计部门校核,为此,构建一套铺放工艺规划-铺放性能建模-设计校核优化的复合材料构件设计制造集成系统对解决我国高端复合材料结构件制造实际需求、提高设计部门决策效率、提升我国复合材料整体应用水平具有十分重要意义。

## 6 结论

碳纤维复合材料在航空航天领域的大范围应用已成为必然之势,此外,船舶、兵器、高铁、汽车等领域也在积极探索利用复合材料实现其低成本、轻量化制造。我国在复合材料制造技术、装备与系统方面开展了持续的、卓有成效的研究,成功研发了系列国产化复合材料自动铺放装备和软件系统,相关技术及装备在航空航天领域获得了应用验证和工程实践,初步建立了我国高端复合材料结构件自动化铺放技术体系和标准规范。

然而,为了实现复合材料用量从大型民用飞机12%(C919)到50%(C929)的跃升,针对上述主要问题,还需要进一步理清复合材料构件制造的材料学、机构学和力学等机理,建立完整的铺放工艺方案-铺放缺陷预测-制造性能分析框架,形成面向结构件最终力学性能的铺放工艺调控机制,解决由于缺乏理论指导而采取的保守制造方案所带来的结构件性能损失问题,强化制造前的结构件性能预测分析,为复合材料结构设计提供优化方向。

同时还需要看到,复合材料构件制造过程链条长、要素多,且约束条件复杂时变,存在大量机理不清、难以建立数学模型或高度非线性过程与环节。随着工业5G、大数据、云平台、人工智能等先进技术的飞速发展,采用无模型的机器学习或者机理-数据融合的智能分析方法都是值得探索的研究



方向。未来,基于多传感器的智能装备状态监控、高速铺放过程中缺陷的智能检测、机理-数据融合的工艺过程智能分析和基于云计算的智能决策等关键技术,将在大飞机复合材料结构高质量、高效率、智能化和低成本制造中发挥重要作用。

### 参 考 文 献

- [1] 黄亿洲, 王志瑾, 刘格菲. 碳纤维增强复合材料在航空航天领域的应用[J]. 西安航空学院学报, 2021, 39(5): 44.  
HUANG Yizhou, WANG Zhijin, LIU Gefei. Application of carbon fiber reinforced composites in aerospace field[J]. Journal of Xi'an Aeronautical Institute, 2021, 39(5): 44.
- [2] 马志阳, 高丽敏, 徐吉峰. 复合材料在大飞机主承力结构上的应用与发展趋势[J]. 航空制造技术, 2021, 64(11): 24-30.  
MA Zhiyang, GAO Limin, XU Jifeng. Application and development trend of composite materials in main load-bearing structure of large aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(11): 24-30.
- [3] 贾振元, 赖一楠, 王福吉, 等. 复合材料构件制造关键基础科学问题[J]. 中国科学基金, 2021, 35(5): 764-773.  
JIA Zhenyuan, LAI Yinan, WANG Fujie, et al. Key basic scientific problems of composite component manufacturing[J]. National Natural Science Foundation of China, 2021, 35(5): 764-773.
- [4] SOUTIS C. Carbon fiber reinforced plastics in aircraft construction[J]. Materials Science and Engineering: A, 2005, 412(1-2): 171-176.
- [5] 唐见茂, 李建龙. 航空航天复合材料应用的最新进展[J]. 航天器环境工程, 2010, 27(5): 552-557.  
TANG Jianmao, LI Jianlong. The latest progress in the application of aerospace composite materials[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2010, 27(5): 552-557.
- [6] KATNAM K B, DA SILVA L, YOUNG T. Bonded repair of composite aircraft structures: A review of scientific challenges and opportunities[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2013, 61: 26-42.
- [7] SOUTIS C. Fibre reinforced composites in aircraft construction[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2005, 41(2): 143-151.
- [8] 陈吉平, 苏佳智, 郑义珠, 等. 复合材料在 A400M 军用运输机上的应用[J]. 航空制造技术, 2013, 56(15): 82-85.  
CHEN Jiping, SU Jiazhi, ZHENG Yizhu, et al. Application of composite materials in A400M military transport aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(15): 82-85.
- [9] 刘爱平, 林仁伟, 陈壁茂. 民用飞机复合材料结构在位修理环境控制方法研究[J]. 航空维修与工程, 2021(1): 60-62.  
LIU Aiping, LIN Renwei, CHEN Bimao. Research on the environmental control method of composite structure in-situ repair for civil aircraft[J]. Aviation Maintenance and Engineering, 2021(1): 60-62.
- [10] AGYEPONG L, RAFLA M, TOMLINSON D, et al. Light weight aerospace assembly fixture[R]. SAE, 2015-01-2496, 2015.
- [11] NAJMON J C, RAEISI S, TOVAR A. Review of additive manufacturing technologies and applications in the aerospace industry[J]. Additive Manufacturing for the Aerospace Industry, 2019: 7-31.
- [12] 陈绍杰. 浅谈空客 A380 的复合材料应用[J]. 高科技纤维与应用, 2008, 33(4): 1-4.  
CHEN Shaojie. Application of Airbus A380 composite material[J]. High-tech Fiber and Application, 2008, 33(4): 1-4.
- [13] 林德春, 潘鼎, 高健, 等. 碳纤维复合材料在航空航天领域的应用[J]. 玻璃钢, 2007(1): 18-28.  
LIN Dechun, PAN Ding, GAO Jian, et al. The application of carbon fiber composites in aerospace field[J]. Fiber Glass-reinforced Plastics, 2007(1): 18-28.
- [14] 陈博. 国内外复合材料工艺设备发展述评之八——热压罐成型[J/OL]. 复合材料科学与工程, 2022, [2022-02-14]. <https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=3uoqIhG8C45S0n9fL2suRadTyEVl2pW9UrhtDCdPD65SyGdPSZrdN9Xo6IKzj4fLo3cECJD5EwzgH2NaI5RPnBkeesxkQhlp&uniplatform=NZKPT>.  
CHEN Bo. Review on the development of composite process equipment at home and abroad ( VIII ) - autoclave molding[J/OL]. Composite Materials Science and Engineering, 2022, [2022-02-14]. <https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=3uoqIhG8C45S0n9fL2suRadTyEVl2pW9UrhtDCdPD65SyGdPSZrdN9Xo6IKzj4fLo3cECJD5EwzgH2NaI5RPnBkeesxkQhlp&uniplatform=NZKPT>.
- [15] 高嘉鑫. 复杂回转曲面自动铺放路径规划关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.  
GAO Jiaxin. Research on key technologies of automatic placement path planning for complex rotary surfaces[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.

- [16] 丁希仑, 罗伟恒, 刘斐, 等. 自动铺丝成型构件缺陷在线检测技术进展[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(9): 1721-1733.  
DING Xilun, LUO Weiheng, LIU Fei, et al. Progress of on-line defect detection technology for automatic fiber placement forming components[J]. Journal of Beihang University, 2022, 48(9): 1721-1733.
- [17] PAN H, QU W, YANG D, et al. Analysis and characterization of interlaminar tack for different prepreg materials during automated fiber placement[J]. Polymer Composites, 2022, 43(7): 4737-4748.
- [18] 宋清华, 王跃全, 石甲琪, 等. 环境时效对预浸料自动铺放工艺粘性的影响[J]. 纤维复合材料, 2021, 38(4): 28-32.  
SONG Qinghua, WANG Yuequan, SHI Jiaqi, et al. Effect of environmental aging on the viscosity of prepreg automatic placement process[J]. Fibrous Composite, 2021, 38(4): 28-32.
- [19] ENGELHARDT R, IRMANPUTRA R, BRATH K, et al. Thermoset prepreg compaction during automated fiber placement and vacuum debulking[J]. Procedia CIRP, 2019, 85: 153-158.
- [20] WANG H, WANG W, WANG H, et al. Thermal management for thermoset automated fiber placement based on infrared heater structure arrangement[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2022, 35(1): 173-183.
- [21] HÖRMANN P, STELZL D, LICHTINGER R, et al. On the numerical prediction of radiative heat transfer for thermoset automated fiber placement[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2014, 67: 282-288.
- [22] LICHTINGER R, HÖRMANN P, STELZL D, et al. The effects of heat input on adjacent paths during automated fibre placement[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2015, 68: 387-397.
- [23] ORTH T, KRAHL M, PARLEVLIT P, et al. Optical thermal model for LED heating in thermoset-automated fiber placement[J]. Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science, 2018, 4(3): 73-82.
- [24] QU W, PAN H, YANG D, et al. As-built FE thermal analysis for complex curved structures in automated fiber placement[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2022, 118: 102561.
- [25] AIZED T, SHIRINZADEH B. Robotic fiber placement process analysis and optimization using response surface method[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 55: 393-404.
- [26] ZACHERL L, SHADMEHRI F, ROTHER K. Determination of convective heat transfer coefficient for hot gas torch (HGT)-assisted automated fiber placement (AFP) for thermoplastic composites[J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2023, 36(1): 73-95.
- [27] KHAN M A, MITSCHANG P, SCHLEDJEWSKI R. Identification of some optimal parameters to achieve higher laminate quality through tape placement process[J]. Advances in Polymer Technology, 2010, 29(2): 98-111.
- [28] ZHAO C, XIAO J, HUANG W, et al. Layup quality evaluation of fiber trajectory based on prepreg tow deformability for automated fiber placement[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2016, 35(21): 1576-1585.
- [29] 都涛. 基于碳纤维预浸料铺放的工艺参数分析与试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.  
DU Tao. Process parameter analysis and experimental research based on carbon fiber prepreg placement[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [30] KHAN M A, MITSCHANG P, SCHLEDJEWSKI R. Parametric study on processing parameters and resulting part quality through thermoplastic tape placement process[J]. Journal of Composite Materials, 2013, 47(4): 485-499.
- [31] 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.  
DUAN Yugang, LIU Fenfen, CHEN Yao, et al. The effects of fiber placement pressure and prepreg tape heating temperature on the mechanical properties of the composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2012, 29(4): 148-156.
- [32] SONMEZ F O, AKBULUT M. Process optimization of tape placement for thermoplastic composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2007, 38(9): 2013-2023.
- [33] 彭啸, 舒展, 都涛, 等. 面向铺放工艺的预浸料剥离仿真与试验验证[J]. 航空学报, 2018, 39(12): 387-400.  
PENG Xiao, SHU Zhan, DU Tao, et al. Simulation and experimental verification of prepreg peeling for laying process[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(12): 387-400.
- [34] 舒展, 彭啸, 李发飞, 等. 基于探针试验的预浸料黏性内聚力模型[J]. 航空学报, 2018, 39(2): 280-292.  
SHU Zhan, PENG Xiao, LI Fafei, et al. Viscous cohesion

- model of prepreg based on probe test[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2018, 39(2): 280-292.
- [35] JIANG J, HE Y, WANG H, et al. Modeling and experimental validation of compaction pressure distribution for automated fiber placement[J]. *Composite Structures*, 2021, 256: 113101.
- [36] JIANG J, HE Y, KE Y. Pressure distribution for automated fiber placement and design optimization of compaction rollers[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2019, 38(18): 860-870.
- [37] 褚奇奕. 自动铺放过程中非完整接触约束下的纤维变形调控及缺陷抑制研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
- CHU Qiyi. Research on fiber deformation control and defect suppression under non-complete contact constraints during automatic fiber placement process[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.
- [38] CHU Q, LI Y, XIAO J, et al. Placeability restricted by in-complete contact between laying roller and mould in an automated fiber placement process[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2018, 37(7): 475-489.
- [39] ZHOU P. Numerical simulation for the pressure distribution of the compaction roller in in-situ consolidation processes[D]. Delft: Delft University of Technology, 2018.
- [40] BAKHSI N, HOJJATI M. Effect of compaction roller on layup quality and defects formation in automated fiber placement[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2020, 39(1-2): 3-20.
- [41] 何玉筱. 复合材料丝束自动铺放压力场关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
- HE Yuxiao. Research on key techniques of compaction pressure distribution for composites automated fiber placement[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.
- [42] CHU Q, LI Y, XIAO J, et al. Processing and characterization of the thermoplastic composites manufactured by ultrasonic vibration-assisted automated fiber placement[J]. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2018, 31(3): 339-358.
- [43] 蔡立成, 彭啸, 汪海晋, 等. 铺放工艺参数对预浸料丝束曲线铺贴质量的影响[J]. *复合材料学报*, 2021, 38(6): 1795-1808.
- CAI Licheng, PENG Xiao, WANG Haijin, et al. The influence of laying process parameters on the quality of prepreg tow curve laying[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(6): 1795-1808.
- [44] ROUSSEAU G, WEHBE R, HALBRITTER J, et al. Automated fiber placement path planning: A state-of-the-art review[J]. *Computer-Aided Design and Applications*, 2019, 16(2): 172-203.
- [45] 罗海燕, 李勇, 肖军, 等. 复合材料自动铺带技术研究——曲面铺带轨迹算法[J]. *航空学报*, 2009, 30(9): 1782-1787.
- LUO Haiyan, LI Yong, XIAO Jun, et al. Research on automatic tape laying technology of composite materials-Curved tape laying trajectory algorithm[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2009, 30(9): 1782-1787.
- [46] 王松. 自动铺带自然路径计算方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- WANG Song. Research on natural path calculation method of automated tape placement[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.
- [47] 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.
- [48] WANG X P, AN L L, ZHANG L Y, et al. Uniform coverage of fibres over open-contoured freeform structure based on arc-length parameter[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2008, 21(6): 571-577.
- [49] LI L, WANG X, XU D, et al. A placement path planning algorithm based on meshed triangles for carbon fiber reinforce composite component with revolved shape[J]. *International Journal on Control Systems and Applications (IJCS)*, 2014, 1(1): 23-32.
- [50] 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.
- LI Junfei, WANG Xianfeng, XIAO Jun, et al. Fixed angle fiber placement trajectory planning algorithm for gridded surfaces[J]. *Journal of Computeraided Design &*, 2013, 25(9): 1410-1415.
- [51] PEI J, WANG X, PEI J, et al. Path planning based on ply orientation information for automatic fiber placement on mesh surface[J]. *Applied Composite Materials*, 2018, 25: 1477-1490.
- [52] SCHUELER K, MILLER J, HALE R. Approximate geometric methods in application to the modeling of fiber placed composite structures[J]. *J. Comput. Inf. Sci. Eng.*,



- 2004, 4(3): 251-256.
- [53] LAND I B. Design and manufacture of advanced composite aircraft structures using automated tow placement[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1996.
- [54] WANG X, ZHANG W, ZHANG L. Intersection of a ruled surface with a free-form surface[J]. Numerical Algorithms, 2007, 46: 85-100.
- [55] BLOM A W, SETOOODEH S, HOL J M, et al. Design of variable-stiffness conical shells for maximum fundamental eigenfrequency[J]. Computers & Structures, 2008, 86(9): 870-878.
- [56] BLOM A W, TATting B F, HOL J M, et al. Fiber path definitions for elastically tailored conical shells[J]. Composites Part B: Engineering, 2009, 40(1): 77-84.
- [57] BLOM A W. Structural performance of fiber-placed, variable-stiffness composite conical and cylindrical shells[D]. Delft: Delft University of Technology, 2010.
- [58] 曾伟, 肖军, 李勇, 等. 回转体自动铺丝轨迹规划与覆盖性分析[J]. 宇航学报, 2010, 31(1): 239-243.  
ZENG Wei, XIAO Jun, LI Yong, et al. Trajectory planning and coverage analysis of rotary automatic fiber placement[J]. Journal of Chinese Society of Astronautics, 2010, 31(1): 239-243.
- [59] 王念东, 刘毅, 肖军. 复合材料管状结构自动铺丝路径算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2008, 20(2): 228-233.  
WANG Niandong, LIU Yi, XIAO Jun. Automatic fiber placement path algorithm for composite tubular structure[J]. Journal of Computeraided Design & Amp, 2008, 20(2): 228-233.
- [60] ZHANG P, SUN R, HUANG T. A geometric method for computation of geodesic on parametric surfaces[J]. Computer Aided Geometric Design, 2015, 38: 24-37.
- [61] 张婷婷, 王小平. CAD 曲面的测地线计算方法[J]. 机械设计与制造工程, 2014, 43(5): 16-20.  
ZHANG Tingting, WANG Xiaoping. Geodesic calculation method of CAD surface[J]. Mechanical Design and Manufacturing Engineering, 2014, 43(5): 16-20.
- [62] 胡森, 杨勋年. 保测地曲率的曲面曲线设计[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005(5): 981-985.  
HU Sen, YANG Xunnian. Design of surface curve preserving geodesic curvature[J]. Journal of Computeraided Design & Amp, 2005(5): 981-985.
- [63] 熊文磊. 基于网格化曲面的自动铺丝轨迹规划研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- XIONG Wenlei. Research on automatic fiber placement trajectory planning based on gridded surface[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [64] YAN L, CHEN Z C, SHI Y, et al. An accurate approach to roller path generation for robotic fibre placement of free-form surface composites[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2014, 30(3): 277-286.
- [65] BRUYNEEL M, ZEIN S. A modified fast marching method for defining fiber placement trajectories over meshes[J]. Computers & Structures, 2013, 125: 45-52.
- [66] LEMAIRE E, ZEIN S, BRUYNEEL M. Optimization of composite structures with curved fiber trajectories[J]. Composite Structures, 2015, 131: 895-904.
- [67] BLOM A W, STICKLER P B, GÜRDAL Z. Optimization of a composite cylinder under bending by tailoring stiffness properties in circumferential direction[J]. Composites Part B: Engineering, 2010, 41(2): 157-165.
- [68] 马永前, 张淑杰, 许震宇. 纤维曲线铺放的变刚度复合材料层合板的屈曲[J]. 玻璃钢/复合材料, 2009(5): 31-35.  
MA Yongqian, ZHANG Shujie, XU Zhenyu. Buckling of variable stiffness composite laminates with fiber curve placement[J]. FRP/Composites, 2009(5): 31-35.
- [69] 蒋敏, 吴保林. 基于丝束增减位置动态调整的自动丝束铺放路径覆盖性优化[J]. 玻璃钢/复合材料, 2018(7): 49-56.  
JIANG Min, WU Baolin. Coverage optimization of automatic tow placement path based on dynamic adjustment of tow position increase and decrease[J]. FRP/Composites, 2018(7): 49-56.
- [70] GAO J, QU W, YANG D, et al. Two-stage sector partition path planning method for automated fiber placement on complex surfaces[J]. Computer-Aided Design, 2021, 132: 102983.
- [71] 孔斌, 顾杰斐, 陈普会, 等. 变刚度复合材料结构的设计, 制造与分析[J]. 复合材料学报, 2017, 34(10): 2121-2133.  
KONG Bin, GU Jiefei, CHEN Puhui, et al. Design, fabrication and analysis of variable stiffness composite structures[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34(10): 2121-2133.
- [72] TOSH M, KELLY D. On the design, manufacture and testing of trajectorial fibre steering for carbon fibre composite laminates[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2000, 31(10): 1047-1060.

- [73] LI R, KELLY D, CROSKY A. Strength improvement by fibre steering around a pin loaded hole[J]. *Composite Structures*, 2002, 57(1-4): 377-383.
- [74] HYER M W, LEE H. The use of curvilinear fiber format to improve buckling resistance of composite plates with central circular holes[J]. *Composite structures*, 1991, 18(3): 239-261.
- [75] MAROUENE A, BOUKHILI R, CHEN J, et al. Effects of gaps and overlaps on the buckling behavior of an optimally designed variable-stiffness composite laminates—A numerical and experimental study[J]. *Composite Structures*, 2016, 140: 556-566.
- [76] GURDAL Z, OLMEDO R. In-plane response of laminates with spatially varying fiber orientations-variable stiffness concept[J]. *AIAA Journal*, 1993, 31(4): 751-758.
- [77] STEGMANN J, LUND E. Discrete material optimization of general composite shell structures[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2005, 62(14): 2009-2027.
- [78] TIAN Y, HUO Y H, SHI T L, et al. Filters for manufacturability in design optimization of variable stiffness composites[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2021, 34(4): 153-159.
- [79] TIAN Y, SHI T, XIA Q. A parametric level set method for the optimization of composite structures with curvilinear fibers[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2022, 388: 114236.
- [80] TATting B F. Analysis and design of variable stiffness composite cylinders[D]. Montgomery County: Virginia Tech, 1998.
- [81] 吴尘瑾, 祖磊, 李书欣, 等. 变刚度复合材料层合板的纤维铺设路径设计及屈曲分析[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2018(4): 5-10.  
WU Chenjin, ZU Lei, LI Shuxin, et al. Fiber placement path design and buckling analysis of variable stiffness composite laminates[J]. *FRP/Composites*, 2018(4): 5-10.
- [82] MATSUZAKI R, MITSUI K, HIRANO Y, et al. Optimization of curvilinear fiber orientation of composite plates and its experimental validation[J]. *Composite Structures*, 2021, 255: 112956.
- [83] PEDERSEN P. On optimal orientation of orthotropic materials[J]. *Structural Optimization*, 1989(1): 101-106.
- [84] CHENG H C, KIKUCHI N, MA Z D. An improved approach for determining the optimal orientation of orthotropic material[J]. *Structural Optimization*, 1994, (10): 101-112.
- [85] LUO J H, GEA H C. Optimal orientation of orthotropic materials using an energy based method[J]. *Structural Optimization*, 1998(15): 230-236.
- [86] LUO Y, CHEN W, LIU S, et al. A discrete-continuous parameterization (DCP) for concurrent optimization of structural topologies and continuous material orientations[J]. *Composite Structures*, 2020, 236: 111900.
- [87] DENKENA B, SCHMIDT C, VÖLTZER K, et al. Thermographic online monitoring system for automated fiber placement processes[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2016, 97: 239-243.
- [88] 彭啸. 基于自动铺放工艺的预浸料丝束转向铺贴质量表征与调控[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.  
PENG Xiao. Quality characterization and control of prepreg tow steering placement based on automatic placement process[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [89] SAWICKI A, MINGUETT P. The effect of intraply overlaps and gaps upon the compression strength of composite laminates[C]//39th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference and Exhibit. 1998: 1786.
- [90] TUROSKI L E. Effects of manufacturing defects on the strength of toughened carbon/epoxy prepreg composites[D]. Bozeman: Montana State University, 2000.
- [91] ZHOU W, CHENG Q, XU Q, et al. Deformation and fracture mechanisms of automated fiber placement pre-preg laminates under out-of-plane tensile loading[J]. *Composite Structures*, 2021, 255: 112948.
- [92] GARNICH M R, KARAMI G. Localized fiber waviness and implications for failure in unidirectional composites[J]. *Journal of Composite Materials*, 2005, 39(14): 1225-1245.
- [93] QIAN S, LIU X, YE Y, et al. Effect of gap and overlap fiber placement defects on the delamination behavior of L-shaped composite laminates[J]. *Composite Structures*, 2021, 268: 113963.
- [94] BLOM A W, LOPES C S, KROMWIJK P J, et al. A theoretical model to study the influence of tow-drop areas on the stiffness and strength of variable-stiffness laminates[J]. *Journal of Composite Materials*, 2009, 43(5): 403-425.
- [95] LI X, HALLETT S R, WISNOM M R. Modelling the effect of gaps and overlaps in automated fibre placement (AFP)-manufactured laminates[J]. *Science and Engineering*

- of Composite Materials, 2015, 22(2): 115-129.
- [96] FAYAZBAKHS K, NIK M A, PASINI D, et al. Defect layer method to capture effect of gaps and overlaps in variable stiffness laminates made by automated fiber placement[J]. Composite Structures, 2013, 97: 245-251.
- [97] BEAKOU A, CANO M, LE CAM J B, et al. Modelling slit tape buckling during automated prepreg manufacturing : A local approach[J]. Composite structures, 2011, 93(10): 2628-2635.
- [98] MATVEEV M Y, SCHUBEL P J, LONG A C, et al. Understanding the buckling behaviour of steered tows in automated dry fibre placement (ADFP)[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2016, 90: 451-456.
- [99] BELHAJ M, HOJJATI M. Wrinkle formation during steering in automated fiber placement: Modeling and experimental verification[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2018, 37(6): 396-409.
- [100] PAN H, YANG D, QU W, et al. Process-dependent wrinkle formation for steered tow during automated fiber placement: Modeling and experimental verification[J]. Thin-Walled Structures, 2022, 180: 109928.
- [101] BAKHSHI N, HOJJATI M. Time-dependent wrinkle formation during tow steering in automated fiber placement[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 165: 586-593.
- [102] BAKHSHI N, HOJJATI M. An experimental and simulative study on the defects appeared during tow steering in automated fiber placement[J]. Composites Part a-Applied Science and Manufacturing, 2018, 113: 122-131.
- [103] RAJAN S, SUTTON M A, SOCKALINGAM S, et al. Simulations and experiments for automated fiber placement of prepreg slit tape: Wrinkle formation and fundamental observations[J]. Composites Part B : Engineering, 2020, 201: 108287.
- [104] WEHBE R. Modeling of tow wrinkling in automated fiber placement based on geometrical considerations[D]. Columbia: University of South Carolina, 2017.
- [105] WEHBE R, TATTING B, RAJAN S, et al. Geometrical modeling of tow wrinkles in automated fiber placement[J]. Composite Structures, 2020, 246: 112394.
- [106] HEINECKE F, VAN DEN BRINK W, WILLE T. Assessing the structural response of automated fibre placement composite structures with gaps and overlaps by means of numerical approaches[C]//Proceedings of the 20th International Conference on Composite Materials. Aalborg University Aalborg, Denmark, 2015.
- [107] MARROUZE J, HOUSNER J, ABDI F. Effect of manufacturing defects and their uncertainties on strength and stability of stiffened panels[C]// ICCM19, Montreal Canada, 2013.
- [108] ABDI F, GÜRDAL Z, HUANG D. Certification modeling of composites fuselage, considering effect of defects from fiber placement manufacturing processes[C]//55th AIAA Aerospace Sciences Meeting. 2017: 0691.
- [109] BECKWITH S W. Filament winding vs. fiber placement manufacturing technologies[J]. Sampe Journal, 2008, 44(2): 54-55.
- [110] 张小辉, 朱玉祥, 张少秋, 等. 先进复合材料自动铺丝技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2018, 61(7): 54-61.
- ZHANG Xiaohui, ZHU Yuxiang, ZHANG Shaoqiu, et al. Research progress of advanced composite automatic fiber placement technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(7): 54-61.
- [111] 富宏亚, 邵忠喜. 七自由度纤维铺丝样机研制[J]. 航空制造技术, 2010, 53(17): 46-48.
- FU Hongya, SHAO Zhongxi. Development of seven-degree-of-freedom fiber placement prototype[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 53(17): 46-48.
- [112] 支勉, 侯玉婷, 马淑春. 龙门式复合材料自动铺丝机研发设计[J]. 装备制造技术, 2018(3): 31-35.
- ZHI Mian, HOU Yuting, MA Shuchun. R & D and design of gantry composite automatic fiber placement machine[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2018(3): 31-35.
- [113] 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, 62(16): 14-20.
- WANG Xianfeng, YAN Biao, XUE Ke, et al. Research progress of robot efficient automatic fiber placement technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(16): 14-20.
- [114] WU J, CHENG L, BI Y, et al. Kinematic modeling and parameter identification for a heavy gantry-type automated fiber placement machine considering gravity deformation[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2021, 235(8): 1418-1431.
- [115] 陶祎春, 贾书海, 段玉岗, 等. 碳纤维复合材料丝束



- 带剪断状态快速检测方法[J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(12): 112-116.
- TAO Yichun, JIA Shuhai, DUAN Yugang, et al. Rapid detection method for shear state of carbon fiber composite towbands[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(12): 112-116.
- [116] TAO Y, JIA S, DUAN Y, et al. An online detection method for composite fibre tow placement accuracy[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2016, 230(9): 1614-1621.
- [117] 原崇新, 李妍, 潘杰, 等. 自动铺丝过程中的典型缺陷及原因分析[J]. 航空制造技术, 2019, 62(4): 66-74.
- YUAN Chongxin, LI Yan, PAN Jie, et al. Typical defects and cause analysis in the process of automatic fiber placement[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(4): 66-74.
- [118] TANG Y, WANG Q, CHENG L, et al. An in-process inspection method integrating deep learning and classical algorithm for automated fiber placement[J]. Composite Structures, 2022, 300: 116051.
- [119] 王志斌. 基于 DSP 的自动铺丝机张力控制系统开发[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- WANG Zhibin. Development of tension control system of automatic fiber placement machine based on DSP[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [120] 孙天峰. 自动铺丝的铺放温度和张力控制技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- SUN Tianfeng. Research on placement temperature and tension control technology of automatic fiber placement[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.
- [121] 赵金鑫, 孙彩霞, 李初晔. 大型复合材料自动铺带机(ATL)收,放料机构研究及设计[J]. 制造技术与机床, 2016(6): 62-65.
- ZHAO Jinxin, SUN Caixia, LI Chuhua. Research and design of receiving and discharging mechanism of large composite automatic tape laying machine(ATL)[J]. Manufacturing Technology and Machine Tool, 2016(6): 62-65.
- [122] 文立伟, 余永波, 齐俊伟, 等. 基于自动铺放成型的红外加热系统研究[J]. 航空学报, 2011, 32(10): 1937-1944.
- WEN Liwei, YU Yongbo, QI Junwei, et al. Research on infrared heating system based on automatic placement molding[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(10): 1937-1944.
- [123] 徐强, 舒展, 王伟伟, 等. 自动铺放红外热源方程的建立与试验验证[J]. 浙江大学学报, 2018, 52(7): 1376-1389.
- XU Qiang, SHU Zhan, WANG Weiwei, et al. Establishment and experimental verification of infrared heat source equation for automatic placement[J]. Journal of Zhejiang University, 2018, 52(7): 1376-1389.
- [124] 邓琳蔚, 普远瞩, 张少秋, 等. 自动铺丝加热均匀性及其对复合材料性能的影响[J]. 航空制造技术, 2021, 64(9): 85-92.
- DENG Linwei, PU Yuanzhu, ZHANG Shaoqiu, et al. Heating uniformity of automated fiber placement and its effect on properties of composites[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(9): 85-92.
- [125] 文立伟, 严飙, 肖军, 等. 复合材料超声切割系统及稳定性研究[J]. 航空制造技术, 2010, 53(17): 49-52.
- WEN Liwei, YAN Biao, XIAO Jun, et al. Study on ultrasonic cutting system and stability of composite materials[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 53(17): 49-52.
- [126] 张建宝, 文立伟, 肖军, 等. 自动铺带成型压力控制技术[J]. 航空学报, 2009, 30(10): 1973-1977.
- ZHANG Jianbao, WEN Liwei, XIAO Jun, et al. Automated tape placement forming pressure control technology[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(10): 1973-1977.
- [127] 赵盼, 吴博, 史耀耀, 等. 纤维铺放压辊变形建模与分析[J]. 西北工业大学学报, 2021, 39(5): 1043-1048.
- ZHAO Pan, WU Bo, SHI Yaoyao, et al. Deformation modeling and analysis of fiber placement roller[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2021, 39(5): 1043-1048.
- [128] 阴鹏艳, 刘亚威. 机器人平台助力欧美航空自动铺丝高效化发展[C/CD]//第二十一届全国复合材料学术会议(NCCM-21)论文集. 2020.
- YIN Pengyan, LIU Yawei. Robot platform helps the efficient development of European and American aviation automatic fiber placement[C/CD]// Proceedings of the 21st National Conference on Composite Materials(NCCM-21). 2020: 129-134.
- [129] BRASINGTON A, SACCO C, HALBRITTER J, et al. Automated fiber placement: A review of history, current technologies, and future paths forward[J]. Composites Part C: Open Access, 2021, 6: 100182.
- [130] SHIH M C, TSENG S I. Pneumatic servo-cylinder

- position control by PID-self-tuning controller[J]. JSME International Journal Ser C, Dynamics, Control, Robotics, Design and Manufacturing, 1994, 37(3): 565-572.
- [131] SHIH M C, TSENG S I. Identification and position control of a servo pneumatic cylinder[J]. Control Engineering Practice, 1995, 3(9): 1285-1290.
- [132] GROSS D C, RATTAN K S. A feedforward MNN controller for pneumatic cylinder trajectory tracking control[C]//Proceedings of International Conference on Neural Networks (ICNN'97). New York: IEEE, 1997: 794-799.
- [133] GROSS D C, RATTAN K S. An adaptive multilayer neural network for trajectory tracking control of a pneumatic cylinder[C]//SMC'98 Conference Proceedings 1998 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (Cat No 98CH36218). New York: IEEE, 1998: 1662-1667.
- [134] OJEDA I D J G, PATROUX O, Aoustin Y. Pressure based approach for automated fiber placement (AFP) with sensor based feedback loop and flexible component in the effector[J]. IFAC-PapersOnLine, 2017, 50(1): 794-799.
- [135] POLINI W, SORRENTINO L. Influence of winding speed and winding trajectory on tension in robotized filament winding of full section parts[J]. Composites Science and Technology, 2005, 65(10): 1574-1581.
- [136] IMAMURA T, KUROIWA T, TERASHIMA K, et al. Design and tension control of filament winding system[C]//IEEE SMC'99 Conference Proceedings 1999 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (Cat No 99CH37028). New York: IEEE, 1999: 660-670.
- [137] 刘毅, 赵安安, 刘泽秋, 等. 自动铺丝机  $H_{\infty}$  张力控制系统设计[J]. 科学技术创新, 2018(28): 5-8.
- LIU Yi, ZHAO Anan, LIU Zeqiu, et al. Design of  $H_{\infty}$  tension control system for automated fiber placement machine[J]. Innovation of Modern Science and Technology, 2018(28): 5-8.
- [138] 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.
- HAN Zhenyu, WANG Zhibin, LU Hua, et al. Development of a new automated fiber placement tension control system[J]. FRP/Composites, 2014(5): 4-8.
- [139] ASSADI M, FIELD T. AFP processing of dry fiber carbon materials (DFP) for improved rates and reliability[J]. SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility, 2020, 2(3): 1196-1201.
- [140] LI Y, ZHENG C, JIANG J, et al. Numerical and experimental study of the viscosity and mechanical parameters effect on tow feeding quality during automated fiber placement[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 96: 31-40.
- [141] KAZEROUNIAN K, NEDUNGADI A. Redundancy resolution of serial manipulators based on robot dynamics[J]. Mechanism and Machine theory, 1988, 23(4): 295-303.
- [142] WU L, CUI K, CHEN S B. Redundancy coordination of multiple robotic devices for welding through genetic algorithm[J]. Robotica, 2000, 18(6): 669-676.
- [143] TABARAH E, BENHABIB B, FENTON R G. Optimal motion coordination of two robots—A polynomial parameterization approach to trajectory resolution[J]. Journal of robotic systems, 1994, 11(7): 615-629.
- [144] GAN Y, DAI X, LI D. Off-line programming techniques for multirobot cooperation system[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2013, 10(7): 282.
- [145] LIN Y, ZHAO H, DING H. Posture optimization methodology of 6R industrial robots for machining using performance evaluation indexes[J]. Robotics and Computer-integrated Manufacturing, 2017, 48: 59-72.
- [146] ZARGARBASHI S, KHAN W, ANGELES J. Posture optimization in robot-assisted machining operations[J]. Mechanism and Machine Theory, 2012, 51: 74-86.
- [147] KANG M, SHIN H, KIM D, et al. TORM: Fast and accurate trajectory optimization of redundant manipulator given an end-effector path[C]//2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). New York: IEEE, 2020: 9417-9424.
- [148] LIU Z, LI R, ZHAO L, et al. Automatic joint motion planning of 9-DOF robot based on redundancy optimization for wheel hub polishing[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2023, 81: 102500.
- [149] FARZANEHKALOORAZI M, BONEV I A, BIRGLEN L. Simultaneous path placement and trajectory planning optimization for a redundant coordinated robotic workcell[J]. Mechanism and Machine Theory, 2018, 130: 346-362.
- [150] DOAN N C N, LIN W. Optimal robot placement with consideration of redundancy problem for wrist-partitioned 6R articulated robots[J]. Robotics and

- Computer-Integrated Manufacturing, 2017, 48: 233-242.
- [151] DEBOUT P, CHANAL H, DUC E. Tool path smoothing of a redundant machine: Application to automated fiber placement[J]. Computer-Aided Design, 2011, 43(2): 122-132.
- [152] XIONG G, DING Y, ZHU L. Stiffness-based pose optimization of an industrial robot for five-axis milling[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2019, 55: 19-28.
- [153] GUETA L B, CHIBA R, OTA J, et al. Coordinated motion control of a robot arm and a positioning table with arrangement of multiple goals[C]//2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation. New York: IEEE, 2008: 2252-2258.
- [154] GUETA L B, CHIBA R, ARAI T, et al. Hybrid design for multiple-goal task realization of robot arm with rotating table[C]//2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation. New York: IEEE, 2009: 1279-1284.
- [155] GAO J, PASHKEVICH A, CARO S. Optimization of the robot and positioner motion in a redundant fiber placement workcell[J]. Mechanism and Machine Theory, 2017, 114: 170-189.
- [156] LU Y A, TANG K, WANG C Y. Collision-free and smooth joint motion planning for six-axis industrial robots by redundancy optimization[J]. Robotics and Computer-integrated Manufacturing, 2021, 68: 102091.
- [157] DAI C, LEFEBVRE S, YU K M, et al. Planning jerk-optimized trajectory with discrete time constraints for redundant robots[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2020, 17(4): 1711-1724.
- [158] GAO W, TANG Q, YAO J, et al. Automatic motion planning for complex welding problems by considering angular redundancy[J]. Robotics and Computer-integrated Manufacturing, 2020, 62: 101862.
- [159] 张会端. 机床进给系统的动力学分析[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
- ZHANG Huiduan. Dynamic analysis of feed system of machine tool[D]. Changchun: Jilin University, 2009.
- [160] RUIZ A R J, ROSAS J G, GRANJA F S, et al. A real-time tool positioning sensor for machine-tools[J]. Sensors, 2009, 9(10): 7622-7647.
- [161] ANDOLFATTO L, LAVERNHE S, MAYER J. Evaluation of servo, geometric and dynamic error sources on five-axis high-speed machine tool[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2011, 51(10-11): 787-796.
- [162] 张广鹏, 史文浩, 黄玉美, 等. 机床整机动态特性的预测解析建模方法[J]. 上海交通大学学报, 2001, 35(12): 1834-1837.
- ZHANG Guangpeng, SHI Wenhao, HUANG Yumei, et al. Predictive analytical modeling method for dynamic characteristics of machine tool[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2001, 35(12): 1834-1837.
- [163] 张学玲, 徐燕申, 钟伟泓. 基于有限元分析的数控机床床身结构动态优化设计方法研究[J]. 机械强度, 2005, 27(3): 353-357.
- ZHANG Xueling, XU Yanshen, ZHONG Weihong. Research on dynamic optimization design method of CNC machine tool bed structure based on finite element analysis[J]. Mechanical Strength, 2005, 27(3): 353-357.
- [164] DENG C, YIN G, FANG H, et al. Dynamic characteristics optimization for a whole vertical machining center based on the configuration of joint stiffness[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 76: 1225-1242.
- [165] DENG C, LIU Y, ZHAO J, et al. Analysis of the machine tool dynamic characteristics in manufacturing space based on the generalized dynamic response model[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 92: 1411-1424.
- [166] 杨建国, 范开国, 杜正春. 数控机床误差实时补偿技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- YANG Jianguo, FAN Kaiguo, DU Zhengchun. Real-time error compensation technology of CNC machine tools[M]. Beijing: China Machine Press, 2013.
- [167] 伍迪. 数控机床误差补偿技术及研究现状[J]. 煤矿机械, 2011, 32(6): 8-10.
- WU Di. Error compensation technology and research status of CNC machine tools[J]. Coal Mine Machine, 2011, 32(6): 8-10.
- [168] CUI G, LU Y, LI J, et al. Geometric error compensation software system for CNC machine tools based on NC program reconstructing[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 63: 169-180.
- [169] WU C, FAN J, WANG Q, et al. Machining accuracy improvement of non-orthogonal five-axis machine tools by a new iterative compensation methodology based on the relative motion constraint equation[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2018, 124:



- 80-98.
- [170] 陈则仕, 张秋菊. DH 法在五轴机床运动学建模中的应用[J]. 机床与液压, 2007, 35(10): 88-90.
- CHEN Zeshi, ZHANG Qiuju. Application of DH method in kinematics modeling of five-axis machine tool[J]. Machine Tool and Hydraulics, 2007, 35(10): 88-90.
- [171] 叶声华, 王一, 任永杰, 等. 基于激光跟踪仪的机器人运动学参数标定方法[J]. 天津大学学报, 2007, 40(2): 202-205.
- YE Shenghua, WANG Yi, REN Yongjie, et al. Calibration method of robot kinematics parameters based on laser tracker[J]. Journal of Tianjin University, 2007, 40(2): 202-205.
- [172] SANTOLARIA J, AGUILAR J J, YAGÜE J A, et al. Kinematic parameter estimation technique for calibration and repeatability improvement of articulated arm coordinate measuring machines[J]. Precision Engineering, 2008, 32(4): 251-268.
- [173] ZHU W, MEI B, KE Y. Kinematic modeling and parameter identification of a new circumferential drilling machine for aircraft assembly[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 72: 1143-1158.
- [174] 范晋伟, 费仁元, 田越, 等. 基于多体系统运动学理论的并联机床运动空间分析及仿真研究[J]. 机械工程学报, 2001, 37(1): 32-36.
- FAN Jinwei, FEI Renyuan, TIAN Yue, et al. Motion space analysis and simulation research of parallel machine tool based on multi-body system kinematics theory[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2001, 37(1): 32-36.
- [175] WU Nanxing, SUN Qinghong, YU Dongling, et al. Research on kinematics simulation and application of machine tool based on multi-body system theory[J]. Journal of Southeast University(English Edition), 2004, 20(2): 162-164.
- [176] 栗时平, 李圣怡. 五轴数控机床综合空间误差的多体系统运动学建模[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2003(5): 15-18.
- LI Shiping, LI Shengyi. Kinematics modeling of multi-body system for comprehensive spatial error of five-axis CNC machine tools[J]. Automatic Manufacturing Technique, 2003(5): 15-18.
- [177] GALLARDO-ALVARADO J, RICO-MARTÍNEZ J M, ALICI G. Kinematics and singularity analyses of a 4-dof parallel manipulator using screw theory[J]. Mechanism and Machine Theory, 2006, 41(9): 1048-1061.
- [178] 杨吉祥. 五轴数控机床的运动控制建模及精度提高方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- YANG Jixiang. Research on motion control modeling and precision improvement method of five-axis CNC machine tool[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015.
- [179] CHENG L, ZHANG L, LI J, et al. Modeling and compensation of volumetric errors for a six-axis automated fiber placement machine based on screw theory[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2021, 235(23): 6940-6955.
- [180] 吴剑波, 李俊, 郑成淦, 等. 大型龙门铺丝机综合误差建模及补偿[J]. 浙江大学学报, 2022, 56(2): 398-407.
- WU Jianbo, LI Jun, ZHENG Chenggan, et al. Comprehensive error modeling and compensation of large gantry laying machine[J]. Journal of Zhejiang University, 2022, 56(2): 398-407.
- [181] 郑成淦, 于杰保, 张立, 等. 大型龙门式自动铺丝机空间误差建模及参数辨识[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(3): 709-723.
- ZHENG Chenggan, YU Jiebao, ZHANG Li, et al. Spatial error modeling and parameter identification of large gantry automatic fiber placement machine[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2022, 28(3): 709-723.
- [182] CHENG L, ZHANG L, LI J, et al. Measurement, identification, and compensation of pose errors for six-axis gantry automated fiber placement machine[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 120(3-4): 2259-2276.
- [183] ZHANG L, CHENG L, LI J, et al. Kinematic modeling and error parameter identification of automated fiber placement machine based on measured data[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2023, 237(4): 588-600.
- [184] MIAO L, ZHANG Y, SONG Z, et al. A two-step method for kinematic parameters calibration based on complete pose measurement—Verification on a heavy-duty robot[J]. Robotics and Computer-integrated Manufacturing, 2023, 83: 102550.
- [185] XU X, CHENG L, GUO Y, et al. A modeling and calibration method of heavy-duty automated fiber

- placement robot considering compliance and joint-dependent errors[J]. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2023, 15(6): 1-20.
- [186] 任永强, 杨建国, 窦小龙, 等. 五轴数控机床综合误差建模分析[J]. *上海交通大学学报*, 2003, 37(1): 70-75.
- REN Yongqiang, YANG Jianguo, DOU Xiaolong, et al. Comprehensive error modeling analysis of five-axis CNC machine tools[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2003, 37(1): 70-75.
- [187] 王秀山, 杨建国, 闫嘉钰. 基于多体系统理论的五轴机床综合误差建模技术[J]. *上海交通大学学报*, 2008, 42(5): 761-764.
- WANG Xiushan, YANG Jianguo, YAN Jiayu. Comprehensive error modeling technology of five-axis machine tool based on multi-body system theory[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2008, 42(5): 761-764.
- [188] 王维, 杨建国, 姚晓栋, 等. 数控机床几何误差与热误差综合建模及其实时补偿[J]. *机械工程学报*, 2012, 48(7): 165-170.
- WANG Wei, YANG Jianguo, YAO Xiaodong, et al. Comprehensive modeling and real-time compensation of geometric error and thermal error of CNC machine tools[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(7): 165-170.
- [189] TSUTSUMI M, SAITO A. Identification of angular and positional deviations inherent to 5-axis machining centers with a tilting-rotary table by simultaneous four-axis control movements[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2004, 44(12-13): 1333-1342.
- [190] HSU Y, WANG S. A new compensation method for geometry errors of five-axis machine tools[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007, 47(2): 352-360.
- [191] CHENG L, ZHANG L, ZHENG C, et al. Research on the method of improving the laying accuracy of automated fiber placement[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 125(11-12): 4883-4897.
- [192] 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.
- HUAN Dajun. Research on the key technology of automated placement CAD/CAM for composite materials[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.
- [193] 池召艳, 周晓芹. 国外复合材料纤维自动铺放编程软件的功能特点及分析[J]. *航空制造技术*, 2014(12): 64-67.
- CHI Zhaoyan, ZHOU Xiaoqin. The functional characteristics and analysis of foreign composite fiber automatic placement programming software[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2014(12): 64-67.
- [194] GRIMSHAW M N, GRANT C G, DIAZ J M L. Advanced technology tape laying for affordable manufacturing of large composite structures[C]// *International Sampe Symposium and Exhibition*. Citeseer, 2001: 2484-2494.
- [195] 闫超, 陈萍. 自动铺丝技术及其在飞机复合材料构件制造中的应用[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2017, 11: 101-105.
- YAN Chao, CHEN Ping. Automated fiber placement technology and its application in aircraft composite component manufacturing[J]. *RFP/Composites*, 2017, 11: 101-105.
- [196] 曹忠亮, 郭登科, 林国军, 等. 碳纤维复合材料自动铺放关键技术的现状与发展趋势[J]. *材料导报*, 2021, 35(21): 21185-21194.
- CAO Zhongliang, GUO Dengke, LIN Guojun, et al. Present situation and development trend of key technologies for automatic placement of carbon fiber composites[J]. *Material Guide*, 2021, 35(21): 21185-21194.
- [197] HASENJAEGER B. Programming and simulating automated fiber placement(AFP) CNC machines[J]. *SAMPE J*, 2013, 49: 7-13.
- [198] 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.
- ZHU Peiqi, FAN Hongri, QIAN Bo. Review of research and application of composites automated fiber placement software technology[J]. *Software Engineering and Applications*, 2022, 11(6): 1521.
- [199] 还大军, 肖军, 李勇. 复合材料自动铺放 CAD/CAM 软件技术[J]. *航空制造技术*, 2010(17): 42-45.
- HUAN Dajun, XIAO Jun, LI Yong. CAD/CAM software technology for automatic placement of composite materials[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2010(17): 42-45.
- [200] 王升, 肖军, 吴海桥. 自动铺带轨迹规划中测地线算

- 法研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2007(2): 15-18.
- WANG Sheng, XIAO Jun, WU Haiqiao. Research on geodesic algorithm in automated tape placement trajectory planning[J]. FRP/Composites, 2007(2): 15-18.
- [201] 韩振宇, 李玥华, 富宏亚, 等. 锥壳零件自动铺丝变角度轨迹规划算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2012, 24(3): 400-405.
- HAN Zhenyu, LI Yuehua, FU Hongya, et al. Variable angle trajectory planning algorithm for automatic fiber placement of conical shell parts[J]. Journal of Computeraided Design & Amp, 2012, 24(3): 400-405.
- [202] 李玥华, 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.
- LI Yuehua, FU Hongya, HAN Zhenyu, et al. Variable angle trajectory planning algorithm for automatic fiber placement of two types of non-developable surface parts[J]. Journal of Computeraided Design & Amp, 2013, 25(10): 1523-1529.
- [203] 段玉岗, 董肖伟, 葛衍明, 等. 基于 CATIA 生成数控加工路径的机器人纤维铺放轨迹规划[J]. 航空学报, 2014, 35(9): 2632-2640.
- DUAN Yugang, DONG Xiaowei, GE Yanming, et al. Robot fiber placement trajectory planning based on CATIA to generate CNC machining path[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(9): 2632-2640.
- [204] 段玉岗, 葛衍明, 孟洋, 等. 基于角度与间距可控的纤维铺放轨迹规划[J]. 航空学报, 2015, 36(10): 3475-3482.
- DUAN Yugan, GE Yanming, MENG Yang, et al. Fiber placement trajectory planning based on controllable angle and spacing[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(10): 3475-3482.
- 
- 作者简介:** 柯映林, 男, 1963 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为数字化装配技术与装备、高性能复合材料结构制造技术与装备、深海无人装备技术与系统等。  
E-mail: ylke@zju.edu.cn
- 曲巍巍(通信作者), 女, 1981 年出生, 博士, 研究员, 博士研究生导师。主要研究方向为复合材料成型工艺数学及力学机理、热固/热塑性复合材料增材制造装备。  
E-mail: qwwwl@zju.edu.cn
- 李江雄, 男, 1969 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为空天海高端装备智能装配、高端复合材料设计制造等。  
E-mail: ljxiong@zju.edu.cn