

机器人高效自动铺丝技术 研究进展*

王显峰¹, 严 飙², 薛 柯¹, 肖 军¹

(1. 南京航空航天大学材料科学与技术学院, 南京 210016;

2. 上海宇航系统工程研究所上海市空间飞行器机构重点实验室, 上海 201108)

[摘要] 以机器人为平台的自动铺丝设备可高效铺放复杂的复合材料构件, 受到了国内外航空航天产业的高度关注。根据目前机器人式自动铺丝技术的研究现状, 介绍了机器人式自动铺丝机的发展历程, 并对其核心结构——铺丝头和铺丝机器人的特点及发展进行了综述, 分析了当前国内外机器人式自动铺丝软件技术及应用, 最后对机器人式自动铺丝技术未来实现更高效铺放的发展趋势进行了展望。

关键词: 机器人; 自动铺丝技术; 复合材料; 铺丝头; 软件

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.16.014



王显峰

副教授, 长期从事缠绕、铺带、铺丝等复合材料自动化成型技术研究。先后主持国家级项目 4 项、参与国家级、省部级项目 10 余项; 发表论文 20 余篇, 获授权国家发明专利 10 余项; 先后获国家科技进步二等奖 1 项, 省科技进步二等奖 1 项。

先进复合材料因其比强度和比模量高、耐腐蚀性好、抗疲劳特性优越等众多优点, 在航空航天等很多领域得到广泛应用^[1]。复合材料自动化成型技术一直是业内研究的热点, 其中自动铺放成型技术是目前自动化程度高且成型范围较广的典型制造技术^[2-4], 包括了自动铺带和自动铺丝技术。自动铺带技术虽然成型效率高, 但其应用范围因带宽和芯模复杂程度而受到限制^[5]。自动铺丝技术丝束可控, 可实时地增减预浸纱的数目来满足实际铺放需求, 适合不规则外形和边界复杂的大尺寸构件的自动化成型, 该技术现已成为大型复杂复合材料部件的典型制造工艺技术。

类似传统数控装备, 铺丝机可根据加工工件的形状要求, 分别设计成立式、卧式或龙门式。随着铺丝技术

的发展, 其应用范围不断扩大, 从大型航空航天整体结构件到小而复杂的功能部件均可采用铺丝技术成型; 其装备形式也呈多样化发展, 不再局限于传统数控装备形式, 开始出现低成本小型的机器人式自动铺丝机^[6]。

工业机器人具有自由度高、成本低廉、工作空间范围大等优点, 能够很好地满足铺丝工艺需求, 机器人与铺丝技术的结合可以大大降低装备成本, 因此, 以其作为运动平台的复合材料自动铺丝设备应运而生, 如图 1 所示。

机器人式自动铺丝机能够兼顾复材构件的复杂程度和生产效率, 实现复合材料构件的低成本高效制造。本文将系统介绍机器人式自动铺丝机高效化铺放的研究进展, 并就当前的发展现状做出总结与展望。

* 基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB1103400); 装备发展部装备预研共用技术(41422010403)。

机器人式自动铺丝机的发展历程

20世纪90年代,欧洲国家开始着力研究自动铺丝技术。法国科里奥斯复合材料公司(Coriolis Composites)是基于商用机器人平台进行自动铺丝机研究与开发的先行者,图2为Coriolis开发的机器人式自动铺丝机,集成了预浸纱的储藏、输送、引导与切断等功能。美国Automated Dynamics公司自1990年起就已经供应小型铺放设备,该公司在研制机器人式自动铺放设备方面具有丰富的经验,成功研制出型号为AFP/ATL-0510的机器人式小型自动铺丝机,并且相信小型化的机器人式自动铺丝平台将快速向前发展。MAGIAS公司在20世纪90年代将自动铺丝机做成商业化产品,该公司还开发了小型机器人自动铺丝系统用于手工铺叠的小型零件的自动铺放,该系统的铺丝头可输送4~16束预浸纱,预浸纱宽度为3.18mm或6.34mm。

21世纪初期,美国Electroimpact公司(简称EI)率先实现模块化铺丝头(Modular Fiber Head Placement)的概念,该公司研发的机器人式自动铺丝机上铺丝头与机器人相对独立,在实现铺放模块快速更换的基础上,极大地提高了铺放效率(图3)。继模块化铺丝头之后,机器人式自动铺丝机在结构功能方面又得到了进一步发展。波音公司联合KUKA研制了一种型号为Titan的机器人热塑性自动铺丝设备,并在2012年使用该装备为美国国家航空航天局制造了大型复材筒状构件。2014年,德国弗朗霍夫研究院(Fraunhofer Institute for Production Technology, IPT)开发了一种可以根据用户不同需要更换铺放机构模块的铺丝设备,该设备具备热塑性预浸纱铺放及干纱铺放等功能,见图4。

国内方面,自动铺丝技术的研究起步较晚,但随着大型复材构件需求增多,自动铺丝技术的应用范围越来越广,机器人式自动铺丝设备的研发方面已经取得了一定的成果。南京航空航天大学(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, NUAA)率先开展了自动铺丝机相关技术的探索研究,成功研制了8丝束的机器人式自动铺丝机,如图5所示,并与相关单位合作完成了多种试验件工艺性探索研究^[7-9],同时将自动铺丝技术推向了实际工程应用。西安交通大学(Xi'an Jiaotong

University, XJTU)开发了以6轴机器人为平台的8丝束和16丝束的机器人式自动铺丝机^[10],此种铺丝机纱架和铺丝头集成在一起,工作效率高、可靠性和稳定性好,满足了实际复材构件铺放加工成型的需要,图6为西安交通大学研制的机器人式自动铺丝机。哈尔滨工业大学(Harbin Institute of Technology, HIT)也以3P-3R型机器人为平台^[11],成功开发了机器人式自动铺丝机。

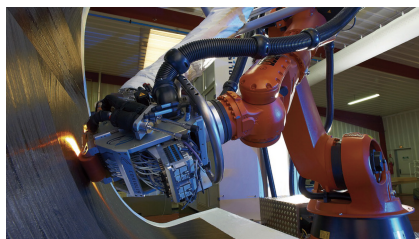
国内外各大公司、高校、科研机构等对机器人式自动铺丝机的成功研制,充分说明机器人平台与复合材料



图1 机器人铺丝设备
Fig.1 Robot fiber placement platform



(a) 整体



(b) 局部放大

图2 Coriolis机器人式自动铺丝机
Fig.2 Robot automatic fiber placement machine from Coriolis

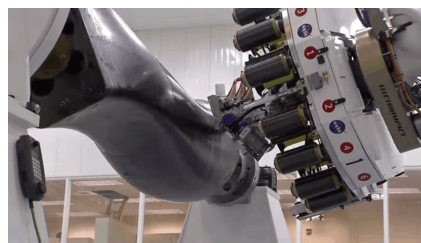


图3 EI公司机器人式自动铺丝机
Fig.3 Robot automatic fiber placement machine from EI



图4 德国弗朗霍夫研究院铺放设备
Fig.4 Robot automatic fiber placement machine from IPT



图5 南航8丝束机器人式自动铺丝机
Fig.5 Robot placement machine with 8 tows from NUAA

自动铺丝技术的结合是成功的。

机器人式自动铺丝机 核心构成及相关软件技术

20世纪70年代,波音公司和Hercules公司提出了自动铺放技术的概念,铺放头的结构设计、机床控制以及预浸料制备工艺是自动铺放技术的3个核心组成部分^[12-13]。机器人式自动铺丝机以其灵活的位姿控制、广泛的适应范围、高效的铺放速度,渐渐成为自动铺放技术装备中的主流技术,下面详细剖析其核心构成,即铺丝头和自动铺丝机器人。

1 铺丝头

典型的铺丝头主要由剪切装置、夹紧装置、重送装置、滚压装置和加热装置构成^[13-15],将这些功能集成到模块化的铺丝头上,然后将该铺丝头装夹于机械臂末端,构成机器人式自动铺丝机的机械部分。模块化的铺丝头不仅体积小、重量轻,而且结构简单,很好地满足了机器人自动铺丝的需求。机器人式自动铺丝机中的模块化铺丝头与机器人通过法兰盘相连,拆装便捷。通过不同规格铺丝头的更换可以实现铺丝机的一机多用,扩大其适应范围;通过相同规格铺丝头的更换可以实现快速装料,有助于提高生产效率^[16]。

EI、MTorres、MAGIAS、Ingersoll等公司先后研制了料筒与铺丝头一

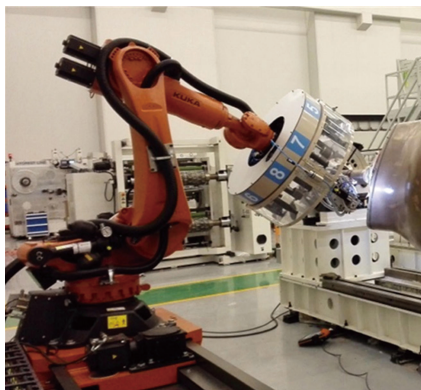


图6 西交大机器人式自动铺丝机
Fig.6 Robot automatic fiber placement machine from XJTU

体的直传纱型铺丝机构,铺丝头中囊括了对预浸纱的各种操作,开卷、收集胶膜、丝束管理、控制张力、调节纱箱温度和湿度、压实等。此种铺丝头还可有效减少预浸纱的传输距离,并降低断纱概率,但也限制了料卷直径,从而使得铺放长度减少。EI公司随后又对这种铺丝头进行升级改造,设计了可更换铺放模块的快速装夹结构,铺丝头与其控制平台是分离的,料卷用完,即可更换新的铺丝头继续进行铺放,铺放效率得到了极大的提高^[17],图7为EI公司研发的机器人用铺丝头。一个机器人运动平台配备多个模块化的铺丝头便可实现不同复材构件(包括不同复杂程度和材料)的铺放制造,与此同时,还能够保证复材构件的铺放生产效率。

美国Ingersoll公司研发的Mongoose系列自动铺丝头采用了内置纱箱式结构及高效辅助技术,包括丝束自动快速搭接技术和红外加热系统,见图8,实现了3min快速更换



图7 EI研发的机器人用铺丝头
Fig.7 Placement head from EI



图8 采用红外加热热源的机器人式自动铺丝机
Fig.8 Fiber placement machine with infrared heating source

铺丝头。而法国Coriolis公司新开发的铺丝头可以实现一头多用,它同时可以兼容铺放热固性、热塑性和干纤维,铺放不同的材料,只需更换相应的加热模块即可。

马其顿麦科罗(Mikrosam)公司在第23届中国国际复合材料工业技术展览会上展出了5个可互换铺丝/铺带头的机器人式自动铺丝/铺带机,铺丝/铺带头可以铺放热固性预浸纱、热塑性的预浸带和预浸纱以及干纱带。此外,该设备还配备了缠绕头,可用于干法缠绕。热塑性预浸料铺丝头配备了激光加热装置作为铺放过程中的温控装置,热固性预浸料铺丝头则配备了红外加热装置。此台具有多铺放头的机器人式自动铺丝/铺带机具有生产简单零件的高效性,同时具有生产复杂结构的先进性,设备支持MikroPlace软件,可用于编程、设计和仿真模拟。

总结各公司研制的铺丝头可以发现,现有铺丝头的优势特点如下:装置的离散性、整体结构的模块化、可更换性及一头多用性。其中,铺丝头的装置方面,丝束的加热装置、剪切装置和重送装置等离散装配在铺丝头中,加热装置的更换可实现铺丝头的一头多用性。将加热装置的可更换技术与铺丝头的可更换技术结合,研制的可更换多用途铺丝头能够实现快速换纱,满足复杂工件的不同纤维铺放需求,进一步实现机器人式自动铺丝机的高效铺放。铺丝头的模块化和可更换性能够使得料筒的更换、穿纱和清洗刀具等任务在线下进行,不影响铺丝过程的进行,同样可起到提高生产效率的作用。而马其顿麦科罗公司的多头机器人式自动铺丝/铺带机在铺放过程中可以根据需要直接调换铺丝头,在铺放效率和灵活性上展现出了更大的优势。

2 机器人

以机器人作为铺丝头的运动平

台可满足铺放复杂模具曲面运动路径、姿态调整、参数控制等各方面的要求。机器人手臂工作范围大、灵活度高,提高了铺丝头在可到达的空间范围内的姿态调整能力,增加了铺放过程中的柔性;主轴的旋转自由度可以满足回转部件的铺丝加工成型。对于铺放路径复杂的不规则曲面类构件,机器人式自动铺丝机较机床形式的自动铺丝设备有明显的优点,可精确控制厚度,并根据曲面的变化实时精准调控压力。

早期,科研人员主要研究单机器人系统的结构特征、运动学解决方案、控制技术等方面的问题。随着对机器人相关交叉技术的深入研究,为满足实际生产中相对复杂的任务需求,可使用多个机器人相互协调工作,共同完成加工任务^[18]。

当前,国内外科研人员对于多机器人系统的研究,无论是理论还是实践方面都已经取得较大的进展,已经成功搭建了一些关于多机器人协作的仿真系统和试验系统,同时双工位机器人式自动铺放设备已成为现代复材产品制造领域研究热点^[19]。德国宇航中心轻量化生产技术中心与德国空客复合材料中心、弗劳恩霍夫协会工厂运行和自动化研究所^[20]对使用两台平行的同步工作机器人,如何在不发生碰撞的情况下大幅减少复材工件的生产时间进行了研究,见图9。在同一运动轨道铺放区域的重叠部分配备两台机器人同步进行自动铺丝,首次测试便缩短了38%的生产时间,进一步优化程序以及铺

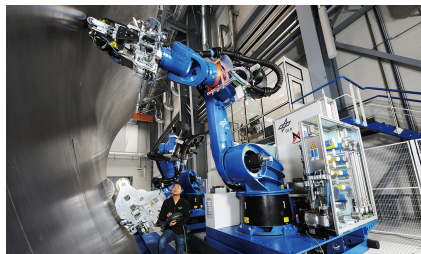


图9 平行的同步工作机器人
Fig.9 Parallel synchronous paving robot

放和固化工艺,可更加有效地提高构件的生产效率。

双机器人系统在工作空间中具有冗余自由度,为机器人的柔性加工提供了更高的优化空间。目前,如何精确控制多机器人的协作系统也是机器人领域研究的热点问题之一。

除了双工位机器人,多个机器人同时在特定工作环境中的不同工位或多个工位工作,更是可以倍速提高整体的生产效率。比如马其顿麦科罗公司(Mikrosam)旗下的新型纤维铺放多机器人工作单元,如图10所示,当一个或多个机器人由于操作人员人为原因或其他因素而无法进行工作时,其他机器人会自动重新组织执行预先设定的工作任务。

机器人运动平台搭载所需时间短、占用空间少,以其构建的机器人式自动铺丝机能够在降低成本的同时保证复合材料构件铺丝成型的效率。目前,各大机器人供应商如库卡(KUKA)、艾波比(Asea Brown Boveri, ABB)、发那科(FANUC)等公司可以生产产品化的成熟机器人及控制系统,并且可直接依赖机器人自身的控制方案来搭建铺放系统,不仅方便可靠,且经济高效。在充分利用机器人结构优势的基础上,对于机器人式自动铺丝机的双工位机器人及多工位多机器人协作铺放的研究也应继续向前推进,以促使铺放灵活性及复材构件生产效率得到更大的提高。

3 软件技术

复杂的复合材料构件铺放成型

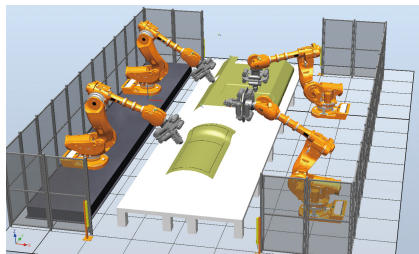


图10 多机器人铺放单元
Fig.10 Multi-robot placement unit

时,简单的示教编程方式已经不能满足轨迹控制的需要,必须借助离线编程技术。离线编程技术主要包括用户接口、三维建模、运动学和动力学仿真等核心模块,借助于计算机图形学来建立机器人及其工作环境的三维模型。大部分离线编程系统含有机器人的基本模型库,内置一套机器人运动学算法,具有轨迹规划和模拟仿真功能,可实现离线编程。KUKA、ABB、COMAU及FANUC等机器人生产商都已开发出了机器人离线编程的商业化配套软件^[21]。例如,ABB公司开发的基于Windows平台的仿真软件Robotstudio^[22],该软件接口开放,能够识别各种CAD格式数据,生成的程序能够直接控制机器人,还能使机器人与电脑进行通信,使机器人的运动通过计算机指令被操作人员远程控制,最终,机器人编程效率和安全保障也得到了极大的提高^[23]。

国内最早研究机器人离线编程技术的单位是哈尔滨工业大学,基于PC机和CAD2000平台,哈工大研发了一款简易的离线编程系统,该系统具备弧焊机器人建模、转换程序、运动仿真等功能^[24];基于OPGL图形语言,北京工业大学也开发出一款具备实用价值的离线编程系统。

一般由机器人供应商提供的机器人式自动铺丝机配套编程系统受机器人型号的限制,并且读取数模格式有限,自动编程后置处理功能欠佳。通用的机器人离线编程系统可以从软件的兼容性、覆盖率的精确分析及仿真功能等方面进一步完善。

在机器人专用的自动铺放软件方面,美国计算机数控仿真技术CGTECH公司研发了一种数控加工仿真系统——VERICUT软件,该软件可以直接从数模文件中读取模型数据生成铺放轨迹,进行后置处理获取NC代码,同时它还具有加工仿真和验证功能,美国的EI公司开发的

机器人式自动铺丝机就采用了这一数控仿真软件^[25]。

软件系统的开发需要设备和工艺技术的支持。国内对自动铺丝轨迹规划技术的研究起步较晚,且缺乏相应较为成熟的铺放设备及工艺条件,匹配软件的开发仍处于初步探索研究之中。南京航空航天大学自主开发的自动铺丝软件,具有轨迹规划、后置处理及简单的运动仿真功能,并在一些复杂构件上应用该软件进行了实际铺放验证^[26-34],同时提出了一系列基础的轨迹规划算法。哈尔滨工业大学采用 CATIA 的 CAA 二次开发方法,完成了轨迹规划和铺放仿真等基础的功能模块。西安交通大学近年来研发了多台自动铺丝装备,结合对铺放工艺条件的摸索总结,目前已开发了轨迹规划及后处理软件。未来还需从算法的效率、鲁棒性以及商业化等方面重点研究,不断完善软件,形成系统的、成熟的自动铺丝软件。

机器人式自动铺丝技术的应用

目前,工业机器人在机翼、机身、整流罩等复合材料构件的自动铺放上已得到成功应用。美国 EI 公司等为波音 777X、波音 787 等型号飞机的结构件专门定制了机器人式自动铺丝机,应用于飞机复材构件制造中的自动铺放。空客公司也在制造 A350XWB 飞机复合材料纵梁和机架时应用了机器人式自动铺丝机。空客和庞巴迪都是重要的飞机制造商,2011 年,庞巴迪订购了法国 Coriolis 公司的机器人式自动铺丝机,用于 C 系列支线飞机项目,C 系列是大量使用复合材料的支线飞机^[35]。

美国纽约 Automated Dynamic 公司在直升机尾梁的生产过程中,其 XT 系列纤维铺放机器人用于铺放单向碳纤维/PEEK 热塑性预浸料^[12],见图 11。该铺丝头具有原位固化的

功能,每个精密的铺丝头与一个弹性压辊相连,压辊可以在压紧过程中被加热或冷却。

铺放过程中的一大发展重点就是在线检测,美国 Orbital ATK 公司与美国国家国防制造与加工中心、英格索尔机床公司合作开发了自动化复材结构检测系统(ACSIS),通过编程控制机器人/扫描头沿着与铺丝头相同的路径运动,可实现对铺放过程中易出现的丝束褶皱、架桥、间隙、搭接、杂质等异常情况的在线检测。目前,该系统已成功用于平面或复杂曲面飞机零件结构的制造^[36]。

存在问题与展望

复合材料的应用日益广泛,随着研究的深入,自动铺丝设备及软件技术会更加趋于稳定、成熟。以龙门式和卧式为代表的自动铺丝设备为满足大型复合材料构件整体成型需要,向着高效化、自动化和集成化的方向发展。与此同时,中小型的铺丝设备为满足小批量、多种类、柔性化的生产要求,向着轻量化、模块化、柔性化的方向发展。机器人式自动铺丝机运动灵活、智能高效,作为当前自动铺放领域的研究热点,仍需继续对其进行改进与升级,主要可从以下 6 个方面入手,以使机器人的高效化自动铺丝技术得到更好的发展。



图11 XT系列机器人铺放过程
Fig.11 Fiber placement process of XT series robot

(1)作为铺丝设备的核心结构,铺丝头的精度会直接影响机器人式自动铺丝机的铺放精度与铺放质量,需要建立完善的设计体系来指导铺丝头的结构设计。同时,探讨对于不同铺放过程的工艺参数,如铺放温度、铺放速率及铺放压力等,有助于提高最终铺放成型的精度与质量。

(2)机器人在实际工作中对定位精度的要求很高,机器人的定位精度影响复材构件的铺丝成型过程,高的定位精度也是机器人智能化的体现。目前大多数机器人采用激光定位和视觉定位,可在此基础上,从机器人的架构配置方面入手,研究、改进马达控制技术或安装附加编码器来进一步提高机器人的定位精度。

(3)机器人式自动铺丝机的智能控制方面与国外还存在着一定的差距,就缺陷检测、模具标定、温湿度与丝束张力的控制等功能需要继续进行改进完善,以提高机器人式自动铺丝机的智能化程度,降低铺放过程的操作难度,最终也可提高铺放效率。

(4)机器人式自动铺丝机的后置处理技术不同于龙门、卧式铺丝机,需要对冗余度进行优化、机器人离线编程与控制及各种代码的处理;亟需搭建可靠的运动仿真系统与干涉系统来获取铺放轨迹信息,进行铺放试验辅助优化系统。研究机器人铺丝平台后置处理技术与仿真系统,可以降低生产成本,提高复杂曲面的铺放效率和铺放质量。

(5)现代工业不断向前推进发展,生产系统愈发复杂、开放,商业化机器人的控制技术不开放,且没有对其就自动铺丝技术进行特别设计,除了通常提供的笛卡尔坐标系下的各种运动方式的接口外,使用通用接口实现后置处理功能还不成熟,需要不断完善,以获取一种通用的运动方式使其在各种机器人上都能实现高效自动铺放。

(6) 国外双机器人同步工作已经在某些复材构件上成功应用,并研发出了多机器人工作单元,国内对双机器人协调铺放系统的研究还限于特定结构的模具,对不同的模具进行铺放时,轨迹的设计分配及程序优化问题、双机器人之间的协作运动是否超出工作空间、二者的避碰问题及机器人运动范围的在线监视功能等都需要进行详尽研究。

参考文献

- [1] MAIR R I. Advanced composite structures research in Australia[J]. *Composite Structures*, 2002, 57(1): 3-10.
- [2] 古托夫斯基 T G. 先进复合材料制造技术[M]. 李宏运,译. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- GUTOVSKY T G. Advanced composite material manufacturing technology[M]. LI Hongyun, Tran. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [3] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. *复合材料学报*, 2007, 24(1): 1-12.
- DU Shanyi. Advanced composite materials and aerospace engineering[J]. *Acta Materiae Composite Sinica*, 2007, 24(1): 1-12.
- [4] 肖军, 李勇, 文立伟, 等. 树脂基复合材料自动铺放技术进展[J]. *中国材料进展*, 2009, 28(6): 28-32.
- XIAO Jun, LI Yong, WEN Liwei, et al. Progress of automated placement technology for polymer composites[J]. *Materials China*, 2009, 28(6): 28-32.
- [5] 张建宝, 肖军, 文立伟, 等. 自动铺带技术研究进展[J]. *材料工程*, 2010(7): 87-91.
- ZHANG Jianbao, XIAO Jun, WEN Liwei, et al. Research progress of automated tape-laying technology[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2010(7): 87-91.
- [6] 任晓华. 复合材料制造装备向小型化和机器人化发展[J]. *环球飞行*, 2012(6): 24.
- REN Xiaohua. Composite materials manufacturing equipments[J]. *World Flight*, 2012(6): 24.
- [7] 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. Trajectory planning of automated fiber placement for meshed surface in fixed angle algorithm[J]. *Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics*, 2013, 25(9): 1410-1415.
- [8] 熊文磊, 肖军, 王显峰, 等. 基于网格化曲面的自适应自动铺放轨迹算法[J]. *航空学报*, 2013, 34(2): 434-441.
- XIONG Wenlei, XIAO Jun, WANG Xianfeng, et al. Algorithm of adaptive path planning for automated placement on meshed surface[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2013, 34(2): 434-441.
- [9] 方宜武, 王显峰, 肖军, 等. 基于变角度算法的复合材料翼梁自动铺丝[J]. *航空制造技术*, 2014, 57(16): 90-94.
- FANG Yiwu, WANG Xianfeng, XIAO Jun, et al. AFP of composite wing spar based on fiber steering algorithm[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2014, 57(16): 90-94.
- [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.
- DUAN Yugang, LIU Fenfen, CHEN Yao, et al. Effects of compaction force and heating temperature of prepreg on composite mechanical properties during fiber placement process[J]. *Acta Materiae Composite Sinica*, 2012, 29(4): 148-156.
- [11] 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): 37-39.
- FU Hongya, SHAO Zhongxi. Development of the 7-DOF fiber placement sample machine[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2010, 53(17): 37-39.
- [12] MARSH G. Automating aerospace composites production with fibre placement[J]. *Reinforced Plastics*, 2011, 55(3): 32-37.
- [13] LUKASZEWICZ H J A, WARD C, POTTER K D. The engineering aspects of automated prepreg layup: history, present and future[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2012, 43(3): 997-1009.
- [14] 林胜. 自动铺带机/铺丝机(ATL/AFP)—现代大型飞机制造的关键设备(上)[J]. *世界制造技术与装备市场*, 2009(4): 84-89.
- LIN Sheng. ATL/AFP—the key machine for manufacturing of modern large airplane (A)[J]. *World Manufacturing Engineering & Market*, 2009(4): 84-89.
- [15] 石林. 自动铺丝束在航空工业中的应用现状[J]. *航空工程与维修*, 1997(9): 11-13.
- SHI Lin. Application status of automatic wire laying technology in aviation industry[J]. *Aviation Maintenance & Engineering*, 1997(9): 11-13.
- [16] JEFFRIES K A. Enhanced robotic automated fiber placement with accurate robot technology and modular fiber placement head[J]. *SAE International Journal of Aerospace*, 2013, 6(2): 774-779.
- [17] SLOAN J. ATL & AFP: defining the megatrends in composite aerostructures[EB/OL]. (2008-06-30)[2017-05-17]. <https://www.compositesworld.com/articles/atl-and-afp-defining-the-megatrends-in-composite-aerostructures>.
- [18] 张家飞. 机器人团体协同任务规划与协调避碰[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
- ZHANG Jiafei. Collaborative task planning and coordinate collision of robot swarm[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2010.
- [19] 薛企刚. 高效全自动的碳纤维复合材料铺放设备[J]. *航空制造技术*, 2008, 51(4): 53-56.
- XUE Qigang. High efficiency and full automatic carbon fiber composite laying equipment[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2008, 51(4): 53-56.
- [20] 中国航空报. 德国宇航中心首次采用两台机器人同步工作[EB/OL]. [2018-01-09]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1589099189280899003&wfr=spider&for=pc>.
- China Aviation News. For the first time, the German Aerospace Center uses two robots to work synchronously. [EB/OL]. [2018-01-09]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1589099189280899003&wfr=spider&for=pc>.
- [21] 曾翠华, 张纯忠, 杨军. 基于弗莱纳-雪列空间矢量的焊接离线编程路径规划[J]. *焊接技术*, 2011, 40(7): 44-48.
- ZENG Cuihua, ZHANG Chunzhong, YANG Jun. Trajectory planning of off-line programming of welding line based on Frenet-Serret vector space[J]. *Welding Technology*, 2011, 40(7): 44-48.
- [22] NUBIOLA A, BONEV I A. Absolute calibration of an ABB IRB 1600 robot using a laser tracker[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2013, 29(1): 236-245.
- [23] CONNOLLY C. Technology and applications of ABB robot studio[J]. *Industrial Robot: An International Journal*, 2009, 36(6):

540-545.

[24] 刘圣祥, 高洪明, 张广军, 等. 弧焊机机器人离线编程与仿真技术的研究现状及发展趋势[J]. 焊接, 2007(7): 21-27.

LIU Shengxiang, GAO Hongming, ZHANG Guangjun, et al. Current status and development trend of off-line programming and simulation technology for arc welding[J]. Welding & Joining, 2007(7): 21-27.

[25] 魏娟, 肖云娜. 基于 VERICUT 数控机床仿真系统的建立与应用[J]. 机床与液压, 2008, 35(11): 141-142.

WEI Juan, XIAO Yunna. The establishing and application of NC machine simulative system based on VERICUT[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2008, 35(11): 141-142.

[26] 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 of algorithm of geodesic lines involved in track programming of tape-laying[J]. Fiber Reinforcement Plastics/Composites, 2007(2): 15-18.

[27] 胡翠玲, 肖军, 李勇, 等. 复合材料自动铺带技术研究(I)——“自然路径”特性分析及算法[J]. 宇航材料工艺, 2007(1): 40-43.

HU Cuiling, XIAO Jun, LI Yong, et al. Study on automated tape-laying technique for composites part I: natural path property analysis and calculation method[J]. Aerospace Materials and Technology, 2007(1): 40-43.

[28] 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 technique for composites—calculation method of tape-laying path on free-form surfaces[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(9): 1782-1787.

[29] 张振甫, 肖军, 吴海桥, 等. 复合材料锥壳 0° 铺层的自动铺放成型方法研究[J]. 宇航材料工艺, 2007(2): 55-57

ZHANG Zhenfu, XIAO Jun, WU Haiqiao, et al. Study on laminating method for 0° plies in composite conical shell manufactured by automated tape laying[J]. Aerospace Materials and Technology, 2007(2): 55-57.

[30] 李勇, 肖军, 还大军, 等. 复合材料锥壳螺旋向铺层自动铺带成型方法[J]. 宇航材料工艺, 2008(5): 8-11.

LI Yong, XIAO Jun, HUAN Dajun, et al. Laminating method of manufacturing spiral-path plies in composite conical shell by automated tape laying[J]. Aerospace Materials and Technology, 2008(5): 8-11.

[31] 邵冠军, 游有鹏, 熊慧. 自由曲面构件的纤维铺放路径规划[J]. 南京航空航天大学学报, 2005, 37(S): 144-148.

SHAO Guanjun, YOU Youpeng, XIONG Hui. Optimal fiber placement paths for free-form surface parts[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics, 2005, 37(S): 144-148.

[32] 还大军, 肖军, 李勇. 给定点纤维方向的自动铺丝轨迹规划算法[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2011, 35(3): 410-414.

HUAN Dajun, XIAO Jun, LI Yong. Trajectory generation algorithm for automated

fiber placement with given fiber orientations of key points[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2011, 35(3): 410-414.

[33] 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.

WANG Peiyuan. Research on fiber placement trajectory design algorithm for the free-form surface with given ply orientation information[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.

[34] 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 fiber placement trajectory design algorithm on meshed surface[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.

[35] Robotic Industry Association. Aerospace manufacturing on board with robots[EB/OL]. [2016-02-18]. https://www.robotics.org/content-detail.cfm/Industrial-Robotics-Industry-Insights/AerospaceManufacturing-on-Board-with-Robots/content_id/5960.

[36] SLOAN J. Orbital ATK complete automated composites inspection system[EB/OL]. [2015-10-23]. <https://www.compositesworld.com/news/ncdmm-ingersoll-orbital-atk-complete-automated-compositesinspection-system>.

通讯作者: 王显峰, E-mail: wangxf@nuaa.edu.cn.

Research Progress of Robot Automatic Placement Technology With High Efficiency

WANG Xianfeng¹, YAN Biao², XUE Ke¹, XIAO Jun¹

(1. College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Spacecraft Mechanism, Aerospace System Engineering Shanghai, Shanghai 201108, China)

[ABSTRACT] Robot-based automatic placement equipment can efficiently manufacture complex composite components, which has attracted great attention from the aerospace industry at home and abroad. According to the current research status of robotic efficient automatic placement, the development history of robotic automatic placement equipment is introduced. Meanwhile, the characteristics and development of the fiber placement head and robot are summarized. Besides, the related software technologies and applications at home and abroad are analyzed. Finally, the development trend of robotic automatic placement equipment to achieve more efficient placement is prospected.

Keywords: Robot; Automatic fiber placement; Composite material; Fiber placement head; Software (责编 李丹)