

国内复合材料自动铺放技术发展

Development of Automated Placement Technology for Composite Material

华中科技大学机械科学与工程学院 黄文宗 孙容磊 张鹏 连海涛
中航工业哈尔滨飞机工业集团有限责任公司 李丽丽 刘艳伟

[摘要] 复合材料自动铺放技术主要包括自动铺带技术和自动铺丝技术。国内自动铺放技术起步较晚,目前研究的单位主要有南京航空航天大学、武汉理工大学、哈尔滨工业大学、天津工业大学、哈尔滨飞机工业集团有限责任公司、北京航空制造工程研究所、北京航空材料研究院、内蒙古工业大学和华中科技大学等。

关键词: 自动铺带 自动铺丝 复合材料 预浸料

[ABSTRACT] Automated placement technology (APT) for composite material mainly includes automated tape laying (ATL) and automated fiber placement (AFP). The study on APT is relatively late in China. At present, universities and enterprises that research on APT mainly include Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Wuhan University of Technology, Harbin Institute of Technology, Tianjin Polytechnic University, Harbin Aircraft Industrial Group Co., Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Inner Mongolia University of Technology, and Huazhong University of Science and Technology, etc.

Keywords: Automated tape laying (ATL) Automated fiber placement (AFP) Composite material Prepreg

先进树脂基复合材料具有轻质、高强度、高模量、抗疲劳、耐腐蚀、可设计性和工艺性好等特点,尤其适用于大型结构及整体结构,是理想的航空结构材料,在飞机上的用量日益增多,应用范围也从次承力结构(舱门、整流罩、安定面等)扩展到主承力结构(机翼、机身等),国外新一代飞机的复合材料用量占结构重量的24%~40%,A380超过20%,波音787达50%,目前,复合材料已成为新一代飞机机体的主体结构材料^[1]。

自动铺放技术是工业发达国家近30年来发展和广泛应用的自动化制造技术,包括自动铺带技术和自动铺丝(或称为纤维铺放)技术。这两项技术的共同优点是采用预浸料,并能实现自动化和数字化制造,高效高速。

自动铺放技术特别适用于大型复合材料结构件制造,在各类飞行器,尤其是大型飞机的结构制造中所占比重越来越大^[2]。

国内自动铺放技术研究起步较晚,南京航空航天大学“九五”期间率先开始调研自动铺放成型技术。武汉理工大学、哈尔滨工业大学、天津工业大学、哈尔滨飞机工业集团有限责任公司、北京航空制造工程研究所、北京航空材料研究院、内蒙古工业大学和华中科技大学等单位也先后在自动铺放技术领域进行了相关研究。

1 南京航空航天大学研究进展

1.1 自动铺丝技术

南京航空航天大学“九五”期间开始着手调研,在学校贷款、航空支撑预研、国家科技部863项目资助下,与上海万格复合材料有限公司合作完成了国内第一台八丝束预浸纱铺放试验系统、铺丝用精密低张力测控系统、铺丝开放式数控系统的研制和溶剂法专用预浸纱研究,开发了基于OpenGL的自动铺丝运动模拟设计与仿真软件和基于CATIA的自动铺丝CAD/CAM软件原型,形成了自动铺丝及装备技术储备^[2]。

2000年,潘全科^[3]等首先展开了对复合材料自动铺丝束机器人技术的研究;2001年,蔡自立^[4]等研究了七自由度复合材料自动铺丝机器人的控制系统;2002年,陈官海^[5]等进行了七轴自动铺丝机械手的铺放轨迹规划与研究;之后,钱钧等^[6-8]以复合材料构架式卫星三角接头为对象,在七轴自动铺丝机器人加工单元上开展了构件几何建模及自动铺丝轨迹规划的研究,并基于OpenGL进行了自动铺丝运动仿真验证,完成了SimJoint仿真软件;2003年,王庆华^[9]等基于UG对纤维铺放轨迹也进行了仿真研究;2004年,熊慧^[10]等进行了自动铺丝CAM技术的初步探索;2005年,许斌等^[11-13]基于CATIA二次开发平台CAA,以S进气道为例实现了自动铺丝过程的仿真,后来对加工过程中自动铺丝机构运动控制代码进行了求解;林福建等^[14-15]提出了一种基于STL文件格式的用于自由曲面零件铺丝束成型轨迹规划的方法,该方法使用三角面片进行拓扑,从而逼近自由曲面,按与参考轴线成固定角度的方法进行轨迹规

划,并以 S 型进气道为例验证其可行性;2006 年,邵冠军等^[16-18]基于 UG 平台实现纤维铺放的 CAD/CAM 模块,基于 ANSYS 实现纤维铺放的 CAE 模块,以单向拉伸开孔平板和销栓挤压开孔平板为例,研究了 CAD/CAE/CAM 一体化的纤维铺放路径优化设计方法,提出了按构件主应力的方向和方向构造基于等距线和等分点的轨迹规划设想,但实际结构均以多向层合板形式出现,层合板中每一铺层的应力状态与刚度分配有关,不能预先设定,主应力方向与铺层纤维方向未必一致;龚长斌等^[19-20]采用 Denavit-Hartenberg 方法建立了七自由度铺丝机械手的运动学模型,采用拉格朗日方法推导了具有显示结构的动力学方程,并用 Matlab 进行了仿真,为多自由度铺丝机械手的控制奠定了一定的基础;周焱、安鲁陵等^[21-23]较为深入地研究了铺丝路径生成、丝束求取以及铺丝信息生成等 CAD 技术,提出了基于芯模中心轴线求得参考轴线,按与该参考轴线成固定角度的封闭曲面轨迹规划算法,并利用等距点的投影插值求出等距线,根据当前铺丝路径上各点与等距线的距离关系进行覆盖性分析,并基于 CATIA 的二次开发平台 CAA,设计了复合材料自动铺丝 CAD 模块;安鲁陵、杨玉岭^[24-25]等改进了铺丝逆运动学求解,提出了基于铺丝离散点位置的逆运动学求解方法,研究了基于实体布尔运算的碰撞干涉检测算法,基于 CATIA CAA 平台开发了碰撞干涉检测模块,对某型飞机进气道的铺放过程进行了仿真;2007 年,孔燕^[26]等设计了一种用于自动铺丝的八通道丝束张力测试系统;张旭坡^[27]等研制了溶液浸渍法预浸纱制备系统,并对其工艺特性进行了探索性研究。

之后,南航开始着重针对自动铺丝轨迹规划进行研究。目前,自动铺丝技术的研究主要集中在根据初始参考线在曲面上做等距平移进行轨迹规划和与某一参考轴线成固定角度进行轨迹规划。构造合适的初始参考线,建立适当的曲面平移方法和求取合适的参考轴线并构造曲面上与该参考轴线成固定角度的迭代格式成为了国内研究的热点。2007 年,党旭丹等^[28]提出基于测地线的自动铺丝平行等距轨迹规划算法,概念明晰但计算量甚大难以实际应用;2008 年,王念东等^[29]提出针对于管状构件的以母线为参考线的自动铺丝路径生成算法,利用分片圆切法求得关键点构造控制母线后,通过插值法求出所有控制母线作为参考轴线并按与参考轴线成固定角度的方法生成轨迹,并对可能出现的覆盖性分析问题进行了讨论,探索了覆盖性分析算法,并通过飞机 S 型进气道的应用验证了该算法的正确性与有效性;王小平等^[30]采用弧长参数进行开边曲面构件上的自动铺丝路径规划算法研究;2009 年,李善缘等^[31-32]提

出由一组数据点拟合样条曲线正交投影到铺放曲面作为初始参考线的方法;卢敏等^[33]提出借助等参线获取曲面信息并规划铺丝路径的方法,并提出了用弧长均分算法规划铺丝路径的方法,通过对飞机前机身形状的建模仿真,验证了该方法的可行性;2010 年,曾伟等^[34-36]以航天器常用的典型类回转体构件为研究对象,建立了基于解析方法的自动铺丝路径规划模型,同时提出了“轨迹中心扩展”和“中心基准内插”两种覆盖性分析方法,在软件开发方面,与其他人采用 CAA 不同的是,其采用的是 CATIA Automation 技术开发软件模块;朱丽君等^[37-38]提出了一种利用分段插值方法构造铺丝路径,实现了在自由曲面上按任意方向进行铺放的要求;2011 年,李燕元等^[39-40]提出了一种基于管道曲面广义螺旋线的铺丝路径生成算法与基于埃尔米特插值的铺丝路径局部修改算法,并在 OCC 平台上搭建了铺丝路径仿真软件;卢敏^[41]等提出了一种多层铺丝的路径生成算法用于自由型开曲面构件,同时提出了一种将空间曲线投影在芯模表面上的铺丝路径生成方法以用于成型圆筒状复合材料构件^[42],并且运用了投影的方法,对铺丝路径进行了基于主应力分布的优化设计,主要解决了在自由曲面构件上进行多层变角度铺丝的算法问题^[43];徐涛等^[44]对不可解析的类回转体构件中自动铺丝轨迹规划和覆盖性分析等相关研究作了一个很好的总结,并利用 CATIA Automation 技术在 VB 中开发了相应的软件模块,最后在 VC 中利用 OpenGL 完成了自动铺丝加工过程的可视化仿真,验证算法的有效性;王培源^[45]等开展了基于铺层承载信息的自由曲面自动铺丝轨迹规划和仿真研究,其算法可以实现基于单层承载信息的自由曲面变角度铺丝轨迹设计。熊文磊等^[46]根据测地线定义构造了一种基于网格化曲面的测地线新算法,提出了具有曲面自适应功能的铺放轨迹算法。

1.2 自动铺带技术

南京航空航天大学率先开始自动铺放技术的研究,于 2003 年起,与北京航空材料研究院联合开发自动铺带设备。

南京航空航天大学设计了具有 3 轴平移、双摆角运动的五轴台式龙门机械臂,研制了力矩电机收放步进电机驱动的预浸带输送,预浸带气动切割与超声辅助切割,主-辅压辊成型等技术。应用开放式数控系统技术开发出 5 轴联动,3 轴随动切割和温度与压力控制的自动铺带控制系统软硬件,实现了预浸带定位、剪裁、热压铺叠基本功能。根据微分几何理论证明了在可展曲面上“自然路径”与测地线的等价性,应用弧长展开变换方法构造了柱面铺带轨迹算法,进而开发了基于 AutoCAD 环境,具有机器代码生成等和自动铺带仿真

的自动编程软件,实现了给定形状、给定铺层构件的铺带轨迹生成与后置处理与加工指令生成。在此基础上,2005年研制成功国内第一台自动铺带原理样机,实现了自动铺带的基本功能。在自动铺带原理样机及工艺研究基础上,南京航空航天大学继续开发,设计了中型5轴龙门及与主轴联动的综合运动试验平台,完成了基于UMAC的多轴多任务开放式数控系统软硬件;研制预浸带双模式精确进给与张力控制技术;研制了分体压靴与弹性压辊组合施压及根据模具特征的压力自适应调节控制技术,实现了任意曲面自适应均匀加压及其精确控制;研制了5轴双超声切割系统技术,实现了复杂产品外廓预浸带切割;研制了预浸带缺陷激光监测技术,可以检测 $3\text{mm} \times 3\text{mm}$ 的夹杂,研制了基于预浸带各向异性折光和数字图像方法的预浸带铺叠间隙测控技术,识别精度达到 0.1mm ,实现了自动铺带在线质量检测与测控;以航空航天设计制造环境CATIA为平台,提出“自然路径”的直接计算方法,提高了铺带轨迹计算的精度和速度,达到国外同类自动铺带软件水平;并根据圆锥体的特殊性,在国际上首次提出了锥形体自动铺带方法;还根据弹塑性理论提出了基于预浸带有限变形的带隙容差分析新方法,提高了可铺性,实现了复杂曲面和外形构件的数字化设计。突破上述装备综合技术后,南京航空航天大学2007年研制成功国内第一台10轴中型自动铺带工程样机综合试验系统,可以实现 $3\text{m} \times 5\text{m}$ 小曲面自动铺带和 $\phi 1\text{m} \times 3\text{m}$ 筒段/锥壳自动铺带。除效率较低(试验系统)外,主要功能已接近国外自动铺带机水平。之后根据应用的需要,研制成功 $\phi 2.5\text{m} \times 12\text{m}$ 大型筒段专用自动铺带机及其软件,实现了筒段自动铺带的各种功能,大幅度提高了铺带效率^[47]。

2007年,南航发表了3篇关于自动铺带技术研究的代表性研究论文^[48-50]:其中胡翠玲等^[48]通过微分几何原理验证了可展曲面上“自然路径”与测地线的等价性,并构造基于三角面片逼近法的求解格式,并在此基础上构造了一般曲面“自然路径”的算法格式;臧建峰等^[49]可展曲面上“自然路径”与测地线等价性为基础,应用沿弧长展开方法,研究了柱面上“自然路径”轨迹生成、铺带头轨迹坐标和姿态坐标的计算模型;还大军等^[50]研究了平面凸多边形构件的自动铺带加工指令和算法,并在AutoCAD平台上利用ObjectARX技术开发了相应的CAD/CAM软件;同年,张振甫等^[51-52]通过研究实现锥壳 0° 铺层的自动成型方式,设计了专用自动铺带头;王升等^[53-54]提出了一种基于测地坐标系的“自然路径”设计方法,并利用龙格-库塔法数值求解“自然路径”轨迹规划算法中两点间的测地线问题;刘林等^[55-56]开展了对国内第一台自动铺带样机数控系统的研究工作,

采用随动控制方式实现了自动铺带要求的最基本功能,并基于PMAC运动控制卡,对超声切刀随动切割控制技术进行了研究;2008年,文立伟等^[57]又针对某型号工程大型复合材料筒段成型,以通用缠绕机为平台研制了一种专用自动铺带机系统方案,构建了以西门子802C为主控制系统和以PMAC为从控制系统的主从式数控系统;渠涛、左龙彦等^[58-61]针对开孔圆筒段构件分别采用一步法和两步法进行研究,并基于OpenGL进行了自动铺带过程的可视化仿真;李勇等^[62]研究了两步法锥壳螺旋向铺带成型系统,采用直角梯形预浸带片的铺放方式实现锥壳的螺旋向铺叠;2009年,张建宝等^[63-66]开展了对预浸带输送系统的研究,采用模型参考自适应控制方式实现预浸带的精密控制,并提出一种与切带动作相结合的定位控制方案,设计了位置模式下的送带控制系统,同时也研究了自动铺带成型压力控制技术,提出了一种基于铺带轨迹控制点的分段调节铺带头成型压力的控制算法以及基于铺放速率变化的分阶段适应性调节成型压力的工艺参数控制策略,并采用UMAC控制系统设计相应的控制程序,最终实现了成型压力分阶段调节子控制系统的搭建;叶进等^[67-68]以南航自行研制的10轴龙门式自动铺带机为研究对象,对自动铺带CAM技术进行了研究和讨论,在VC上开发了铺带数控代码自动编程系统;罗海燕等^[69-70]受四边形网格化求解“自然路径”的启发,利用STL文件对自由曲面进行三角网格划分,并平移轨迹中心线形成参考线的方法处理“奇异点”问题;文立伟等^[71]开展了对大型筒段构件自动铺带成型轨迹规划的研究,开发了大型筒段复合材料构件的专用CAD/CAM软件;2010年,还大军等^[72-74]提出了基于弧长的复合材料自动铺带统一边界处理方法,并以飞机水平尾翼自动铺带应用背景,通过实际铺放验证了算法的有效性;2011年,余永波等^[75-76]开始进行自动铺带中红外加热技术的研究,建立了静止及运动状态下的红外加热控制方程,并通过两种状态下控制方程的对比,提出了红外辐射稳态因子概念,搭建了以速度为变量、温度为控制量、可编程控制器为控制核心的红外加热温度自动控制系统;赵增林等^[77-78]对5轴通用自动铺带机床进行改进,提出了6轴自动铺带机构型,并分析了改进机构在铺放双曲面时的可行性以及相对于5轴铺带机构型的优势;文立伟等^[79-80]对自动铺带超声切割的稳定性进行了研究;李琼华等^[81-83]开展了自动铺带铺放质量的研究,考察了铺放温度、铺放压力以及铺放速度对铺放质量的影响,同时也预测了铺带过程中各工艺参数对预浸带形变的影响;陈文等^[84]针对大型复合材料结构件铺放工艺特点,在充分考虑到复合材料铺放图像表面纹理特性的基础上,提出了一种利用图像

二维直方图的质心进行分割的方法,并且提出了一种通过滤波器的窗口角度来判断纹理方向的方法;2012年,李俊斐等^[85]根据柱面的结构特点,提出了面向柱面复合材料结构的自动铺带四轴联动成形方案,并以卧式自动铺带机为例进行了分析;钟小丹等^[86]基于制造工艺流程的成本模型,建立复合材料自动铺带工艺工时估算模型,采用 Delphi 语言和 SQL Service 数据库管理系统,通过 Visual Basic 语言对 CATIA 进行二次开发,开发了工时估算软件。

2 武汉理工大学研究进展

武汉理工大学对自动铺放成型的数控系统、成型机构和人机界面等进行研究工作,并在 Pro/E、Solidworks 和 OpenGL 软件平台上对其成型机理进行设计和仿真验证。

2003年,于传浩等^[87-88]对铺放头机构进行结构设计,徐再等^[89-90]利用 VC++ 6.0 及 PLC 设计其计算机控制系统;2005年,黄亚辉等^[91-92]设计了一台用于铺放圆锥体的八轴自动铺丝机,并利用 OpenGL 实现运动过程的仿真验证;2006年,曹德华等^[93-95]基于 Pro/E 设计了一种可以同时铺放 6 根纤维束的自动铺丝机,并对自动铺丝机进行了运动仿真及有限元分析;2007年,崔为勇等^[96-97]基于 Solidworks 设计了一种用于平面铺放的自动铺带头机构,在 COSMOSWorks 平台上进行了有限元分析,并利用 OpenGL 进行了仿真验证;吴猛等^[98-99]设计了相应的控制系统;2008年,刘辉^[100]等采用机器视觉技术,采用 VFW 检测系统进行自动铺丝机的铺放角度及间距的检测研究,并利用 MFC 及 OpenCV 设计了相应的检测程序;2010年,季晓丽等^[101-102]采用 DirectShow 检测系统进行自动铺带机间距的检测研究,分别基于 OpenCV 和 Matlab 进行了标定实现,最后利用 MFC 及 OpenCV 开发了检测系统,但由于所开发的检测系统是在图像处理的基础上开发的,因此只适用于第一层铺放,到第二层以后由于没有明显的色度差而难以检测;王普晟等^[103-104]设计了一种自动铺带超声波切割器及基于 PLC 和 VC 可视化界面的切割控制系统;李东海等^[105-106]利用 OpenGL 设计了一个虚拟自动铺丝机模型,并设计了参数化驱动仿真软件;文小军^[107]等基于 Pro/E 设计了两套风力发电叶片铺放机设备——卧式铺放机和龙门式铺放机,以 Pro/Mechanism 为平台进行了卧式铺放机的铺放过程仿真,并运用 Ansys 对铺放机的重要零部件进行了有限元分析;2011年,何林玲^[108]等针对飞机机翼铺放机设备作了与文小军类似的工作;乔珍珍等^[109]采用 PMAC 卡自带的 PEWIN32 执行软件,设计了六路纤维丝铺放靴控制系统;胡小立^[110]等基

于 Pro/E 对纤维丝铺放机构进行结构设计和运动仿真,并利用 ANSYS 针对铺放靴装置中的压紧靴头和滚珠丝杠螺母副中的丝杠结构进行有限元分析;2012年,余亮^[111]等利用 OpenGL 建立虚拟五轴铺放机三维模型,借助 VC++ 设计人机界面,并实现了铺放机各运动控制轴的虚拟联动运动算法,采用 VC++ 建立了虚拟数控模块,实现了数控代码的导入、编译、提取和处理等数控程序运行过程的虚拟,获得了纤维铺放数控代码的生产过程运动数据,并实现了运动和铺放轨迹的显示;刘明^[112]等在已有的关于构件复合材料成型铺层设计研究的基础上,确定了采用 45° 铺放角度分层分段铺放的方式,提出了铺放路径规划的可用算法以及切丝算法,并采用 IPC+PMAC 的开放式控制结构,搭建了简易的硬件控制平台,对提出的方法进行验证;王会会^[113]等基于 Pro/E 对纤维铺放机械手臂进行结构设计和运动仿真,并利用 ANSYS 针对机械手的大臂和小臂进行有限元分析;赵朋举^[114]等针对网格状芯模的碳纤维铺放头,基于 Pro/E 完成了多丝束纤维丝铺放头的结构设计和运动仿真,并利用 ANSYS 针对重送结构的精度进行有限元分析;周吉^[115]等主要针对七自由度四丝束铺放机器人的控制系统和轨迹规划方法进行了总结。

3 哈尔滨工业大学研究进展

哈尔滨工业大学暂未进行自动铺带机方面的研究,但对自动铺丝技术展开了一些研究。在原有的六轴缠绕机的基础上进行技术改造,研制并设计了一种 7 轴纤维铺放头,提出了相应的控制方案,并对数控铺放系统的后置处理算法进行了系统研究。

2007年,韩振宇^[116-117]等在 6 轴缠绕机的基础上改进成 7 轴自动铺丝样机,以 S 形进气管道为对象,研究了纤维铺放路径规划,并开发了仿真系统;邵忠喜等^[118-119]利用平行投影定理,编制了实现铺放轨迹在网格单元共享顶点处良好衔接的程序;2008年,高坤^[120]等在 UG/Open Grip 平台上对自动铺丝路径规划进行了进一步的探索研究,提出了等距偏置算法,并以机翼和 S 型飞机进气道为例,验证了该方法的可行性;刘立新^[121]等重新设计了 4 路纤维铺放的铺放头,采用 IPC+UMAC+PLC,构成了开放式 8 轴控制 7 联动铺放设备数控系统;邵忠喜等^[122]在已知铺放芯模和铺放轨迹的基础上,对数控铺放设备后置处理算法进行了研究;2009年,邵忠喜^[123-129]等对丝束控制、铺放轨迹规划和优化方法、设备后置处理等关键技术进行了进一步研究;2010年,李恩刚^[130]等开发了基于 Turbo PMAC 的铺放机人机交互系统,利用 LabView 进行软件开发,并运用 UG/Open grip 二次开发工具实现了规划路径;朱洪

雷^[131]等进行了纤维张力控制系统的设计;2011年,邵忠喜等^[132]对丝束增减控制方法进行了研究,并在 PMAC 中编写了丝束增减控制程序;张凤强^[133]等设计了具有 8 路纤维剪切、压紧和重送功能的铺丝头并研制铺丝头实验台;2012 年,韩振宇^[134]等针对锥壳零件,提出了变角度自动铺丝轨迹规划算法,并推导出了锥壳零件上任变角度铺放路径及路径曲率的数学方程。

4 天津工业大学研究进展

天津工业大学以直升机 Z8F 的主旋翼大梁自动铺带为应用背景,开展自动铺放成型技术的研究工作。

2006 年,王朝纲^[135]等针对 Z8F 型飞机桨叶大梁成型要求,对大梁带铺放机的总体结构和控制系统进行了初步探索;2008 年,杨涛^[136-140]等在 Pro/E 平台上建立了大梁带铺放机的三维立体模型,并进行了运动仿真,同时采用 SIEMENS 840D 系统实现此铺带系统的插补运算和控制、龙门架移动和横梁移动的双边同步驱动等功能,PLC 实现铺放设备外围动作。

5 其他单位研究进展

哈尔滨飞机工业集团有限责任公司引进西班牙 M.Torres 公司自动铺带机,应用进口预浸料试验翼面的自动铺带工艺,并用国产预浸料开展了工程应用试验研究^[141]。2006 年,北京航空制造工程研究所启动了大型复合材料构件自动铺带设备的研制及应用研究项目,与 Forest-Line 公司合作,采用引进自动铺带头关键部件集成的技术路线研制翼面大型自动铺带机,该研究所自主开发了大型复合材料自动铺带专用设备,可以满足小曲率大型壁板类复合材料构件的制造^[142],并于国内首次采用两步法自动铺带技术成功研制出大尺寸壁板蒙皮,为大型复合材料翼面类构件自动化制造奠定了坚实的基础^[143]。北京航空材料研究院研制了基本满足自动铺带的预浸带和相关工艺,为航空应用奠定了基础^[144]。2009 年,内蒙古工业大学胡二乐等^[145]针对风机叶片自动铺丝成型设计铺放头,并基于 Pro/E 对各机构进行了实体建模。中国商用飞机公司引进辛辛那提公司的新型 CHARGER 龙门低轨复合材料自动铺带机,用于加工 C919 以及 C929 喷气式商务飞机的机翼、水平尾翼以及中央翼盒等零部件^[146]。华中科技大学主要针对自动铺带工艺技术展开相关探索。连海涛^[147-148]等设计了自动铺带工艺参数试验装置;张鹏等^[149]对自动铺带铺层贴合形成机理进行研究,从理论上推导了影响预浸料贴实效果的相关因素,并在不同的铺放速度和铺放压力下通过剥离试验对理论推导进行了试验验证;黄文宗^[150-153]等提出了一种新的铺放质量评分标准,并基于

响应曲面法对自动铺带工艺参数进行了分析与优化,分别得出了最佳铺放质量下和满足一定铺放质量的最大铺放速度下的工艺参数,同时将预浸料的粘性与铺覆性分别进行研究,提出了一种新的粘性和铺覆性的定量测量及表征方法,并分别研究了自动铺带铺放工艺参数对预浸料粘性和铺覆性的影响。

6 结束语

我国大飞机工程已经立项,对自动铺放装备提出了迫切需要,而我国在自动铺放装备研制、生产和实际工业应用基本上还处于起步阶段,和国际先进水平存在有较大差距。复合材料规划用量初期要达到 15%,后期将随着材料与设计制造技术的成熟逐步扩大,最终的上限可能接近甚至超过现有波音 787 飞机的复合材料用量水平,自动铺放技术作为关键技术之一将会引起高度重视。

参 考 文 献

- [1] 姚俊,孙达,姚振强,等. 复合材料自动铺带技术现状与研究进展. 机械设计与研究, 2011, 27(4): 60-65.
- [2] 肖军,李勇,李建龙. 自动铺带技术在大型飞机复合材料结构件制造中的应用. 航空制造技术, 2008(1): 50-53.
- [3] 潘全科. 复合材料自动铺丝束机器人技术的研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2000.
- [4] 蔡自立. 七自由度复合材料自动铺丝束机器人控制系统研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2001.
- [5] 陈官海. 七轴自动铺丝束机械手铺放轨迹的规划与研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2002.
- [6] 钱钧,肖军,李勇. 构架式卫星接头自动铺丝的建模研究. 纤维复合材料, 2002(2): 3-5.
- [7] 钱钧. 构架式卫星接头自动铺丝仿真技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2003.
- [8] 钱钧,肖军,赵东标,等. 复合材料构架式卫星接头自动铺丝成型仿真研究. 宇航学报, 2004(6): 694-696.
- [9] 王庆华. 基于 UG 的自由曲面构件的纤维铺放轨迹的生成与仿真 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2003.
- [10] 熊慧. 自动铺丝束 CAM 技术的研究和开发 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2004.
- [11] 许斌,安鲁陵,肖军,等. 自动铺丝机运动控制信息的生成与仿真. 制造业自动化, 2005, 27(1): 1-4, 73.
- [12] 安鲁陵,许斌. 复合材料纤维铺放自动编程技术研究. 工程设计学报, 2005, 12(2): 80-84.
- [13] 许斌. 复合材料自动铺丝编程技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2005.
- [14] 林福建. 自动铺丝束成型的关键技术. 组合机床与自动化加工技术, 2005(3): 25-26.
- [15] 林福建. 自由型面复合材料零件铺丝束成型轨迹规划 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2005.
- [16] 邵冠军,游有鹏,熊慧. 自由曲面构件的纤维铺放路径规划. 南京航空航天大学学报, 2005, 37(z1): 144-148.

[17] 邵冠军,游有鹏,缪群华. 复合材料开孔层合板的纤维铺放路径优化设计. 玻璃钢/复合材料, 2006(4): 31-34.

[18] 邵冠军. 自动铺丝束 CAD/CAE/CAM 技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.

[19] 龚长斌,游有鹏. 自动铺丝束机器人逆运动学问题的解析法. 机械工程与自动化, 2006(1): 1-3.

[20] 龚长斌. 自动铺丝束机械手运动学动力学分析与优化 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.

[21] 周焱. 复合材料自动铺丝 CAD 技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.

[22] 周焱, 安鲁陵, 周来水. 复合材料自动铺丝路径生成技术研究. 航空精密制造技术, 2006, 42(2): 39-41.

[23] 安鲁陵, 周焱, 周来水. 复合材料纤维铺放路径规划与丝数求解. 航空学报, 2007, 28(3): 745-750.

[24] 安鲁陵, 杨玉岭, 肖军, 等. 复合材料纤维自动铺放过程碰撞干涉检测. 宇航材料工艺, 2007, 37(2): 51-54.

[25] 杨玉岭. 复合材料自动铺丝 CAM 技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.

[26] 孔燕. 八通道自动铺丝张力测控系统方案设计 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.

[27] 张旭坡. 自动铺丝预浸纱制备技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.

[28] 党旭丹, 肖军, 还大军. 自动铺丝平行等距轨迹规划算法实现. 武汉大学学报(理学版), 2007, 53(5): 613-616.

[29] 王念东, 刘毅, 肖军. 复合材料管状结构自动铺丝路径算法. 计算机辅助设计与图形学学报, 2008, 20(2): 228-233.

[30] 王小平, 安鲁陵, 张丽艳, 等. 基于弧长参数的开边自由曲面构件上纤维均匀覆盖 (英文). Chinese Journal of Aeronautics, 2008, 21: 571-577.

[31] 李善缘, 王小平, 朱丽君. 复合材料铺丝成型中的路径规划. 宇航材料工艺, 2009, 39(2): 25-29, 41.

[32] 李善缘. 复合材料铺丝成型中的路径规划 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.

[33] 卢敏, 周来水, 王小平, 等. 锥形复合材料构件的铺丝路径规划与丝数求解. 宇航材料工艺, 2009, 39(6): 15-18.

[34] 曾伟. 复合材料自动铺丝轨迹规划与覆盖性分析研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.

[35] 曾伟, 肖军, 李勇, 等. 回转体自动铺丝轨迹规划与覆盖性分析. 航空学报, 2010, 31(1): 239-243.

[36] 曾伟, 肖军, 李勇, 等. 回转体自动铺丝轨迹规划与覆盖性分析. 武汉理工大学学报, 2009(21).

[37] 朱丽君, 王小平, 李燕元. 利用分段 G2 插值方法构造铺丝路径. 宇航材料工艺, 2010, 40(3): 18-22.

[38] 朱丽君. 复合材料的自动铺丝技术中的路径计算 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.

[39] 李燕元, 王小平, 王志国, 等. 管道曲面构件自动铺丝路径规划. 宇航材料工艺, 2010, 40(5): 27-32.

[40] 李燕元. 自动铺丝技术中具有修改机制的路径规划方法 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.

[41] 卢敏, 周来水, 安鲁陵, 等. 开曲面构件的多层铺丝路径生成算法. 南京航空航天大学学报, 2010, 42(6): 735-738.

[42] 卢敏, 周来水, 王小平, 等. 圆筒状构件的多层铺丝路径生成算法. 航空学报, 2011, 32(1): 181-186.

[43] 卢敏, 周来水, 王小平. 一种基于投影法的铺丝路径优化生成算法. 中国机械工程, 2011, 22(16): 1993-1996.

[44] 徐涛. 不可解析的类回转体自动铺丝轨迹规划的研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.

[45] 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.

本文有参考文献 153 篇, 因篇幅有限未能一一列出, 读者如有需要请与本刊编辑部联系。

(责编 杰一)

(上接第 79 页)

对高质量的程序, 在生产过程中设备运行顺畅, 轨迹光滑, 切矢连续, 角度没有突变, 压辊和模具接触点速度平稳, 工作的丝束在压辊宽度方向相对于接触点对称, 压辊是“拉”着丝束向前运动, 而不是“推”着丝束运动。这需要将软件、设备系统、零件融合考虑, 是综合、复杂的过程。

还有在零件上铺剪切孔, 或者由于曲面形状决定某些丝在一个轨迹的中间几处需要断开, 这时候后置处理要同时考虑对应丝束相应的 M 代码指令, 操作对应丝切纱、压纱、送纱及送纱距离 (最小铺丝长度)。这里要强调送纱最短距离对后置处理的影响, 从切纱点到压辊和模具压紧点之间有一段距离, 如图 17 所示, 距离 80mm, 当需要送纱时, 纱不会马上就被送到压辊下, 需要走 80mm 距离, 所以在到达零件边界 80mm 外就要开始送纱; 相反, 在离开边界或到达岛屿边界之前 80mm 就需要切断送纱。

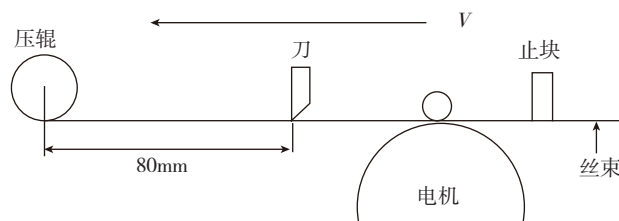


图17 AFP 铺丝机进给系统
Fig.17 AFP feed tow system

5 结束语

复合材料零件自动化制造是趋势, 如何结合设备、材料、模具和工艺要求, 生成高效、稳定、安全的程序代码是复合材料自动化生产的关键, 铺丝轨迹软件编程和铺丝零件制造过程虚拟仿真是制造工艺的必须环节。在铺丝轨迹编程时, 将制造工艺纳入轨迹规划中, 生成适合于生产的程序代码, 通过电脑的虚拟仿真检查, 模拟零件的整个铺丝过程, 确保设备人员的安全。

(责编 杰一)