

复合材料自动铺放CAD/CAM 软件技术

CAD/CAM Software Technology for Composites Automated Placement

南京航空航天大学 还大军 肖军 李勇



还大军

南京航空航天大学材料科学与技术学院博士研究生,主要从事先进复合材料自动化成型软件技术研究,发表论文数篇,获软件专利权4项、国防科技进步一等奖1项(2009年)。

自动铺放 CAD/CAM 技术概述

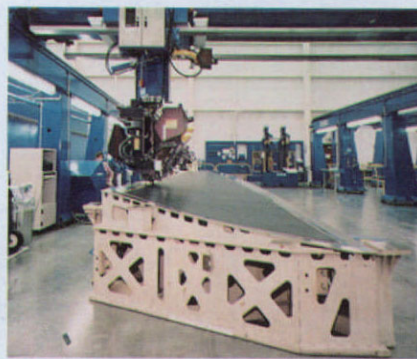
复合材料构件手工成型时,根据铺放形面特征和预浸带宽度经剪裁后通过手工铺叠到模具表面完成复合材料构件的成型制造,其生产效率低、废料率高、产品质量也难以保证。自动铺放技术(包括自动铺带技术和自动铺丝技术)利用专用铺放设备,采用数控技术,实现了铺叠的自动化

自动铺放 CAD/CAM 软件根据材料铺放工艺特性和构件外形特征,按照构件结构设计要求,依照铺放设备机器结构和工作模式,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。在满足设计要求的基础上,自动铺放 CAD/CAM 技术尽可能提高了铺放效率,保证了铺放质量,节约了材料,降低了制造成本。

和预浸带剪裁的自动化,突破了大型复合材料构件手工成型难以克服的瓶颈,具有高效、高质、高精度和高可靠性的优点,已广泛应用于大型飞机、运载火箭等各类航空航天飞行器中多种结构部件的制造,成为发达国家航空航天工业领域中大型复合材料构件的典型制造工艺(如图1所

示)。

自动铺放技术包括材料工艺技术、装备技术和 CAD/CAM 软件技术。CAD/CAM 技术主要指软件相关算法的研究和软件开发技术,包括轨迹规划技术、覆盖性分析技术、边界处理技术和后处理技术等4项关键技术。与传统机械加工不同,自动铺放



(a) 采用自动铺带技术制造的 B777 机翼



(b) 采用自动铺丝技术制造的 B787 后机身

图1 自动铺放技术在大型飞机上的应用

技术采用按设计方向逐层铺叠的增料加工模式,其CAD/CAM软件技术也不同于传统的CAD/CAM软件技术,传统的CAD/CAM软件主要利用计算机图形技术进行产品设计,生成可供数控系统执行的刀具加工运动轨迹及数控程序以完成产品的制造;自动铺放CAD/CAM软件根据材料铺放工艺特性和构件外形特征,按照构件结构设计要求,依照铺放设备机器结构和工作模式,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。在满足设计要求的基础上,自动铺放CAD/CAM技术尽可能提高了铺放效率,保证了铺放质量,节约了材料,降低了制造成本。根据自动铺放技术的工作模式和技术特点,自动铺放CAD/CAM软件必须满足以下特殊要求。

方向性要求:纤维铺放方向必须满足复合材料结构铺层设计方向。复合材料既是一种材料也是一种结构,其突出优点之一是性能的可设计性,不同的铺层方向与铺层形式可以形成不同性能的复合材料。因此,按结构工艺设计要求的纤维方向进行铺放是实现结构设计要求的基础,也是设计铺放轨迹规划算法的基本准则。

可铺性要求:铺放过程中预浸料不褶皱、不撕裂。自动铺放技术采用一定宽度的预浸带:自动铺带技术采用75/150/300mm等3种宽度的预浸带,自动铺丝技术采用3.2/6.4/12.7mm等3种宽度的窄带。预浸带可变形范围很小,复杂曲面铺叠时只能沿特定的轨迹,否则会导致褶皱或撕裂,继而影响构件的铺放质量,甚至导致铺放过程无法顺利进行(如图2所示)。在复杂曲面构件自动铺放轨迹规划时,其算法必须根据构件曲面外形综合考虑预浸带在铺放过程中的变形因素。

间隙质量要求:单层铺放时满足间隙容差设计要求,满覆盖、不重

叠。自动铺放时,由于构件形面的复杂性,按照一定算法求解所形成的铺放轨迹并不一定能保证铺放轨迹中心线间的距离保持恒定,间隙可能过小或过大,如不进行适当处理,将导致材料局部重叠或缺(如图3所示),从而降低制造精度,影响构件性能。

经济性要求:在满足上述要求的基础上尽可能节约材料、降低成本,提高效率。根据铺放轨迹并按照铺放构件曲面边界特性进行预浸带边界形状规划,生成预浸带切割与预浸带输送(自动铺带)或丝束增减切断(自动铺丝)的特殊指令代码,同时根据铺叠顺序进行整合优化,降低成本,提高效率。如图4所示为自动铺带中预浸带切割示意图。

完善的自动铺放CAD/CAM软件主要包括如下几个功能模块,其软件流程图如图5所示:(1)轨迹规划:根据输入的预浸带(料)铺放工艺信息(如预浸带带宽、预浸带丝宽、横向最大可变性等)、构件外形曲面几何信息特性和机器特性信息(最大可铺放丝束数等),按照构件加工信息(如铺放方向、铺叠顺序和铺放层数等)建立相应的规划算法,生成自动铺放轨迹中心线;(2)覆盖性分析:根据输入的设计铺放间隙容差和相邻轨迹中心线在曲面上距离,构造相应的算法进行覆盖性判断与处理,完成带形切割或丝束增减判定,实现对模具的满铺叠;(3)边界处理:根据构件内外边界的几何信息和自动铺放设备的工作特性,建立相应的算法,完成预浸带的切割(自动铺带)或丝束增减(自动铺丝),以实现复合材料剪裁的自动化、数字化;(4)基于Fiber steer的结构优化:结合变刚度复合材料设计理论,采取连续变

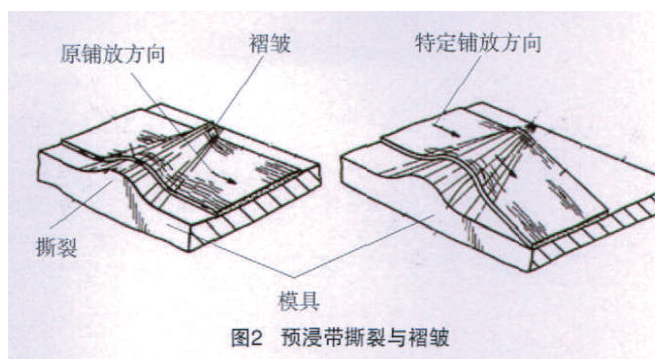


图2 预浸带撕裂与褶皱

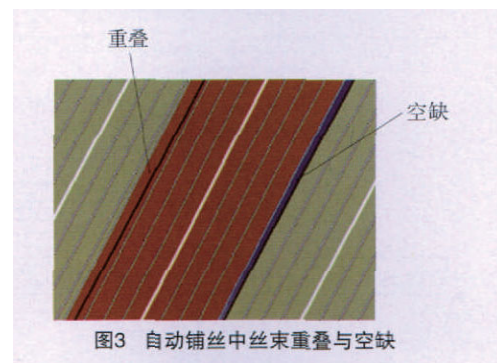


图3 自动铺丝中丝束重叠与空缺

角度铺放,满足构件在不同方向上的承载要求,实现按结构设计要求的纤维分布,充分发挥材料效率,进一步减轻结构重量,降低复合材料制造成本;(5)铺层仿真技术:由于铺放过程的复杂性,软件的人工交互不可或缺。提供一定设计规划中的人机交互,也是软件灵活性的重要体现。根据修改后的数据,采取相应的可视化技术,完成针对某铺层的轨迹及带形仿真,以便使用者对前述功能的有效性、正确性做出初步判断;(6)后置处理:根据铺放设备的机器特性和工作模式,将轨迹规划生成轨迹中心线离散数据、覆盖性分析所生成的丝束增减数据、边界处理所生成的预浸带切割(增减)数据通过坐标转换与坐标分解生成可供专用铺放设备进行生成的NC代码;(7)铺层代码合成:为了减少构件多层铺放过程中的无效过程,降低成本,提高铺放效率,将多个单层铺放的NC代码进行整合优化;(8)干涉与避碰检验:利用计算机三维图形技术,通过布尔运算判断机器是否干涉,通过对NC代码的调整(主要是人工交互)实现避碰;(9)加工仿真:根据前述步骤生

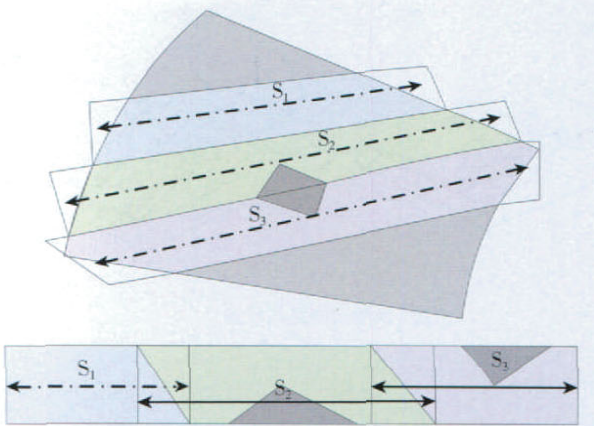


图4 自动铺带中预浸带切割示意图

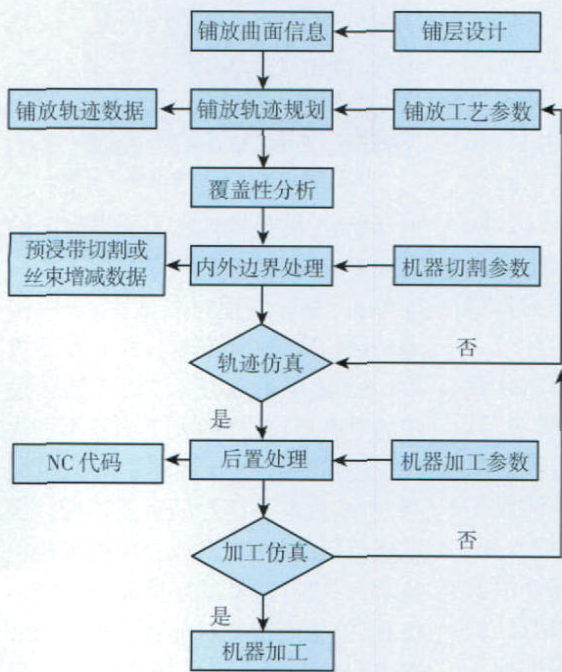


图5 自动铺放CAD/CAM软件基本流程图

成的NC代码,利用计算机三维图形技术对整个加工过程进行仿真,供使用者对所生产NC代码进行最终效验。

自动铺放 CAD/CAM 软件技术的发展

西方发达国家经过几十年的研究,特别是随着专业软件开发商的加入,已经开发了多套商用自动铺放CAD/CAM软件并形成了完备的复合材料设计制造解决方案。1987年,美国的H.W.Lewis等首次提出了“自然

路径”(Natural Path)的概念以保证预浸带在自动铺放过程中变形最小,建立了通过将 xoy 平面中获得的初始点和由铺放角度计算得到的初始方向投影到曲面,再利用多次投影进行近似求解“自然路径”的轨迹规划算法。在该专利的基础上,美国Cincinnati公司于1989年开发了ACES (Advanced Composites Environment Software)离线编程与仿真软件系统,ACES系统将“自然路径”算法应用于自动铺带,形成了用于自动铺带的ACRAPHATH模块和用于自动铺丝的ACRPLACE模块,具有CATIA V5模型数据的导入、轨迹规划、后置处理、加工仿真和NC代码生成等功能,并成功应用于长度为4.21m的美国V-22“鹞”式军用飞机后机身复合材料结构件的制造,通过轨迹优化减少劳动力53%,废料率降低了90%。随后,日本的N. Shinno等于

1991年提出了利用四边形网格化曲面,通过求解给定初始点和初始方向的测地线迭代算法进行轨迹规划,提高了“自然路径”轨迹规划算法的精度和效率。

此外,针对自动铺丝技术的特性,美国的Waldhart等提出了根据相邻铺层角度构造分段函数的方法求得初始参考线,再按初始参考线法线方向投影作等距平移得到参考线族进行自动铺丝轨迹规划的方法;Hale等在此基础上开展了以 0° 轨迹为基础构造分段曲线再拟合得到初始参

考线的研究工作;Shirinzaden等提出了利用特征平面与铺放曲面的交线作为初始参考线的方法。

目前,自动铺丝常见的轨迹规划方法包括:根据初始参考线在曲面上进行等距平移法(Parallel Path)、与某一参考轴线成固定角度规划法(Fixed Fiber Orientation Path)、针对回转体环向铺放的等距螺旋法(基于缠绕技术)和给定点纤维方向进行轨迹规划(基于变刚度铺放理论)等4种方法。

在上述算法的基础上,专业软件开发商结合自身软件产品与设备制造商联合开发了商用自动铺放CAD/CAM软件。如美国VISTAGY公司的FiberSIM软件(如图6所示)提供了多种复合材料设计制造解决方案。其中Tape Laying Interface模块用于自动铺带,Fiber Placement Interface模块用于自动铺丝。该软件可读取CATIA、UG、Pro/E等通用CAD/CAM/CAE软件文件中构件几何信息以及构件模具面、层位置和边界信息等,准确生成满足铺层边界要求的平面展开图样,根据设计要求自动生成NC加工代码文件,还可以完成复合材料部件的可制造性评估,精确模拟纤维的材料特性,完成复合材料部件的分析和设计,将层合板的设计信息与有限元分析软件和制造设备形成无缝连接,可实现设计制造过程一体化、自动化,降低制造成本。

美国CGTech公司在原有数控加工仿真软件VERICUT的基础上开发了独立于CNC机床环境的自动铺带和自动铺丝的离线NC编程及仿真软件VCP & VCS(VERICUT Composite Programming and Simulation)软件,该软件可读取CAD文件中的曲面模型和铺层边界信息,生成铺放轨迹,整合单层轨迹,进行铺层顺序优化。生成NC代码,同时提供了通用CAD/CAM软件接口,能实现CATIA、UG、MasterCAM等软件的嵌入运行。AFPT/Koeirit公司即采用该软件用于

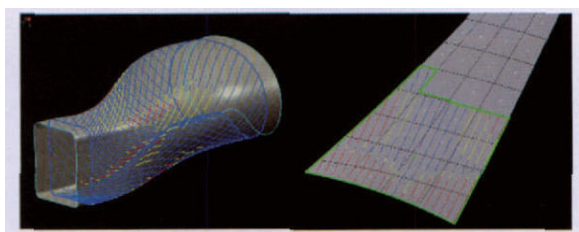


图6 美国VISTAGY公司FiberSIM软件运行效果图

热塑性铺带系统的开发。

2004年,空中客车公司(AIRBUS)与法国纯粹和应用数学中心(CIMPA)以航空航天领域广泛采用的CAITA V5软件为平台,基于CATIA CAA V5技术联合开发了自动铺带CAD/CAM的TapeLay软件。该软件可直接集成到CAITA V5系列软件中,包括自动铺带CAD部分的Tape Generation模块和CAM部分的Tape Manufacturing模块。Tape Generation模块直接获取CATIA CPD(Composite Design)模块的铺层设计数据,完成铺层展开、轨迹规划、带形切割设计、实时三维仿真等步骤;Tape Manufacturing模块则主要针对法国Forest Line公司的一步法铺带机、两步法铺带机和双工位铺带机生成相应的加工NC代码。该软件已成功应用于法国Rafale战斗机机翼蒙皮的制造,西班牙M-Torres公司也采用了该软件用于自动铺放设备的开发,美国Ingersoll公司则开发了同样基于CATIA CAA V5技术的自动铺丝CAD/CAM软件ICPS(Ingersoll Composite Programming System)软件。

国内自动铺放CAD/CAM软件技术的研究现状

由于相关技术封锁,加之缺乏相应的工艺技术和装备条件,国内目前尚未拥有商用的自动铺放CAD/CAM软件,相关技术仍处于积极探索研究之中。目前,报道可见的自动铺放CAD/CAM技术研究主要集中在轨迹规划和加工仿真的基础理论,对于自动铺放CAD/CAM技术后续模块功能及整体设计的研究鲜有报道。

南京航空航天大学从平面、可展曲面简单复合材料构件的自动铺带入手,积极开展自动铺放研究工作。如胡翠玲等通过微分几何原理证明了可展曲面上“自然路

径”与测地线的等价性;臧建峰等在此基础上研究了平面、简单可展曲面(如圆柱、圆锥面)的自动铺带问题,研究分析了自动铺带工艺过程并基于AutoCAD通用CAD平台完成了自动铺带CAD/CAM软件开发的探索工作;渠涛等开展了开孔圆柱两步法自动铺带轨迹规划和仿真的探索工作;王升等针对自动铺带“自然路径”规划算法数学模型和近似计算误差分析等问题中,提出了基于测地坐标系的“自然路径”轨迹规划方法并利用龙格—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;罗海燕等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。

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。如李善缘等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;党旭丹等开展了基于测地线的平行等距规划算法的研究工作,提出利用测地线偏移初始参考线,概念明晰但计算量甚大难以实际应用;林福建等探索了利用三角面片进行曲面离散、按与参考轴线成固定角度的方法进行轨迹规划;王念东等研究了管状构件的规划方法,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;周焱等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;邵冠军等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。

自动铺放CAD/CAM软件技术的展望

自动铺放CAD/CAM软件技术是实现复合材料构件自动化制造的关键技术,软件功能将直接影响复合材料构件的制造效率和产品质量,材料工艺技术和装备技术研究的深入对自动铺放CAD/CAM软件技术提出了更高的要求。研究面向自动铺放技术的复合材料结构设计方法已成为自动铺放CAD/CAM软件技术的研究热点:针对采用自动铺放技术制造复合材料结构所带来的结构变刚度的特征,开展自动铺放复合材料变刚度理论、自动铺放复合材料结构优化设计及其轨迹规划设计算法的研究工作,进一步发挥材料效率,降低复合材料构件的成本。利用通有限元分析软件进行二次开发,将自动铺放CAD/CAM软件与复合材料自动铺放性能评价结合起来,实现自动铺放CAD/CAM/CAE一体化,充分发挥复合材料结构功能一体化和设计制造一体化的特点,也将是今后研究的重点。

(责编 泰山)