

复合材料自动铺带控制及工艺关键技术分析

胡亮 刘志军 张超纲

西安向阳航天材料股份有限公司 陕西西安 710025

DOI: 10.12238/ems.v7i8.14714

[摘要] 随着复合材料在各领域的广泛应用,自动铺带技术作为其高效成型的关键手段备受关注。本文详细阐述了复合材料自动铺带的控制技术,包括数控系统、伺服控制等方面,深入分析了工艺关键技术,如预浸带输送、成型压力控制、工艺参数优化等,并对自动铺带技术的发展趋势进行了探讨,旨在为提高复合材料自动铺带质量与效率,推动该技术在更多领域的应用提供理论支持。

[关键词] 复合材料;自动铺带;控制技术;工艺关键技术

一、引言

随着对复合材料构件性能要求的不断提高以及构件尺寸的逐渐增大,传统手工铺叠方法已无法满足生产需求,自动铺带技术应运而生。自动铺带技术能够实现复合材料预浸带的自动化铺放,具有生产效率高、产品质量稳定、材料利用率高等优点,成为复合材料成型领域的研究热点与发展方向。然而,自动铺带过程涉及多学科知识与复杂的工艺控制,深入研究其控制及工艺关键技术对于提升自动铺带技术水平具有重要意义。

二、复合材料自动铺带控制技术

1、数控系统

数控系统是自动铺带机的关键部件,它完成对铺带机各个运动轴进行精确定位和同步协调控制的功能^[1]。目前国际上较有代表性的自动化程度较高的自动铺带机数控系统主要有西班牙 M-torres 公司基于 FANUC30i 系列数控系统最大控制轴数可达 11 个轴的 Torreslay-up 系统;法国 Forest-Line 公司基于 Siemens840D 平台开发的自动铺带控制系统等。以上两种数控系统均采用高性能计算机作为主控制器,并且具有良好的实时性和较强的处理能力及可靠性,能同时对多个运动轴进行插补并联运行,在铺头沿给定路径运动时可以保证其按预定轨迹行驶到指定位置从而达到最佳铺设效果来满足各种形状复杂曲面构件的铺带要求。

目前国内关于自动铺带机数控系统的研制工作起步较晚,整体技术水平还落后于发达国家同类产品,特别是对于一些关键指标比如定位精度和多轴协调性能还需要继续改进和完善。因此有必要加强研究运动控制相关的理论和技术问题,加强对运动控制算法的研究,优化数控系统硬件

结构,提高系统的开放性与可扩展性,以更好地适应不同用户的需求。

2、伺服系统设计

伺服系统是自动铺带机运动执行部件的重要组成部分,直接决定着铺带的质量和稳定程度,在整个自动铺带过程中需要精密地控制铺带头的运动速度、加速率及定位精度等指标^[1]。目前一般使用交流伺服电机作为动力源,并结合高精度滚珠丝杆、直线导轨等传动装置来完成钻头的平滑准确运动^[2]。

以某型自动铺带机为例,其 X、Y、Z 轴伺服电机通过联轴器与滚珠丝杠相连,将电机的旋转运动转化为直线运动,带动铺带头在三维空间内移动。为提高系统的响应速度与控制精度,采用了位置、速度、电流三环控制策略。将位置检测装置(如光栅尺)测得的实际位置送入位置环中的位置控制器,经过与数控系统给出的目标值相减得出偏差信号,再由位置控制器计算出对应的加减速和恒速时的线性或非线性的比例系数、积分时间常数及微分时间常数,并将此结果送给速度环;而速度环则是依据来自位置环的比例积分微分(PID)作用后的加减速以及恒速运动时的速度指令和电机编码器所测得的反馈实际速度之间的差值作为输入量,然后利用 PID 作用去调整电机的负载力矩,使电机按该速度要求匀速转动;电流环主要用于保护电机,对电机的电流进行实时监测与控制。通过三环控制,有效提高了伺服系统的动态性能与稳态精度,确保了自动铺带过程的顺利进行。

3、预浸带输送控制

铺带的质量很大程度上取决于预浸带输送系统的稳定程度,其基本结构包括:放卷部分、张力调节部分以及送进部

分。为避免在放卷过程中发生松弛现象或者由于过大的拉伸应变而导致预浸料破坏,要求在整个放卷过程中都处于一个适当的预紧状态下。为此采用具有减速器的力矩电动机作为动力源对预浸带进行驱动,并且利用张力传感器测得的实时张力数据反馈给控制系统,当张力控制系统收到目标张力信号后,对比当前张力值和目标张力值之间的差值来决定力矩电机输出轴上的转矩大小,从而实现对张力的有效调控,最终使得张力保持在一个相对稳定的范围之内,即实现了“恒张力”,以保证铺带过程的连续性与稳定性。

三、复合材料自动铺带工艺关键技术

1、预浸带切割技术

预浸带的切割是自动铺带的一个关键步骤,它的切削质量将直接关系到整个铺带的质量及生产率。自动铺带中使用的最普遍的一种方法就是超声波切割法(也称振荡式切割)^[3]。该方法利用了压电陶瓷的逆向效应,在外加激励信号的作用下,能够发出频率很高且很稳定的弹性振动,并由此带动工具头做高频低振幅的剪切动作来完成对材料的切割加工。超声发生器产生一定频段范围内的高频电信号,然后经过超声换能器转变为高频机械振动,接着又通过变幅杆放大部分后传送到超声切割刀具,从而使刀具作高频振动而达到切割目的。同时,为实现不同角度的切割需求,超声切割刀通常安装在可旋转的轴上,通过数控系统控制其旋转角度,与预浸带的送进运动合成所需的切割角度。

2、成型压力控制技术

成型压力直接影响复合材料铺层压实的质量,在自动铺带上,利用压辊把预浸带压实于模具表面上。适当的成型压力可以排出层间的气体,增加层间的结合强度并降低空隙率;而压力的大小又取决于多种因素的影响:压辊的材质及直径、硬度;铺带速度;预浸带的物理性能等。成型压力还与压力夹角(即压辊轴线与铺带方向之间的夹角)有关,其变化范围一般为 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 。若压力夹角较小,则压辊只对预浸带作垂向的压实作用,使预浸带得到较好的垂向压实;当压力夹角较大时,由于预浸带受到较大的横向应力的作用,致使它发生侧向滑移,从而降低了预浸带沿铺设方向上的平整度,所以要根据具体的铺层情况选择适当的压力夹角。此外,成型压力与铺放速率也密切相关。一般来说,铺放速率越快,所需的成型压力越大,以保证在相同时间内能够对预浸带进行充分压实。但过高的成型压力可能会导致预浸带过度变形

甚至损坏,因此需要通过试验或数值模拟等方法,针对不同的材料和工艺条件,优化成型压力与铺放速率的匹配关系。

3、工艺参数优化

铺放温度:由于是粘接式铺带,对非自粘型预浸带来说其黏性比较差,只有保持一定的温度才能使预浸带具有较好的黏性以利于上下两层间的粘贴;但是过高则有可能造成基体树脂老化而降低最终产品的力学性能^[4]。故必须严格控制铺放时的温度条件。可以通过设置热风循环系统或者红外线加热器来加热预浸带并由相应的温度检测元件测出实际温度并将该信号输入到控制器中以便于及时校准铺放时的温度。

卷轴张力:预浸带的上料及下料均是由一个固定的卷轴来进行完成。其中预浸带卷轴用来收储从供料架出来的预浸带且要保证在不切断的前提下能将每根纤维拉伸至最佳长度即达到所设定的预压量后才被切断下来送入切刀口。这样就需要对这个卷轴施加一定大小的张力从而防止断丝的情况发生以及确保纤维间没有较大的间隙便于下一步的铺带操作。同样当预浸带穿过切刀到达下一个工位的过程中也需要有一个适宜的张力作用在其上以免打滑导致无法正确进入下一道工序并且还要避免过度紧张而导致断裂。

4、铺带路径规划与优化

铺带路径规划对铺带效率及构件的质量有很大影响,对于平面型或筒形的模具(比如:平板、圆环),由于其曲率半径为无穷大,在铺带路径上可以任意取向进行铺放;而对于一些复杂的曲面构件来说,则必须根据曲面的几何外形以及铺层的设计要求来进行合理的铺带路径规划,并使预浸带紧贴于模具表面上,而且在铺放的过程中不能产生折痕、起皱、空隙过大的现象。目前常用于铺带路径规划的方法主要有以下几种:等距线法(Equidistancelinesmethod):这种方法就是在给定方向上的某一平面上绘制出若干条间距相等的等距离曲线,并将这些等距离曲线延伸到其他各个平面上,这样就构成了整个模具表面的一个网格系统,然后从这个网格中选取合适的路线即构成所要铺设的路径^[5]。这种铺带路径规划方法非常简便易行,但是当应用到比较复杂的曲面模具上就会存在某些不足之处。测地线法(Geodesiclinemethod):所谓测地线就是指连接两个点之间的曲线上长度最短的一段弧长,是由欧拉首先提出的。如果把一个物体放置在一个弯曲的曲面上的话,重心会沿着这条曲线移动,就可以利用这一性质来确定一条路径,使得这个物体在运动的过程中不会

发生折叠的现象。所以,在铺带路径规划的时候可以使用这样的思想来制定相应的规则从而得到符合要求的路径;最小能量法是通过建立能量模型,以能量最小化为目标来求解铺带路径,可有效避免预浸带在铺放过程中的局部变形。在实际应用中,往往需要综合运用多种方法,并结合优化算法对铺带路径进行优化。

四、自动铺带技术的发展趋势

1、设备智能化与自动化水平提升

未来的自动铺带机会向着更智能化及自动化的趋势发展,在自动铺带上集成各种传感器(例如:力觉传感器、压力传感器、温度传感器)来监控铺带过程并实施智能化控制。利用视觉传感器可以测量预浸带的铺放位置、间距以及是否存在搭接现象,并且如果出现上述问题则自动铺带机能自行调节铺带参数或者停机以防止不合格产品;利用压力传感器和温度传感器可以实时采集成型压力值和铺放时所处环境的温度信息,从而保证这些工艺参数处于可控状态。另外还可以采用人工智能(AI)的方法比如机器学习(Machine Learning),深度学习(Deep learning),让自动铺带机根据获取的数据来进行自我学习并且不断改进自己的生产工艺参数以及铺带路径等等,以此来提升产品的合格率以及工作效率。

2、适应复杂构件与新型材料的铺带需求

为满足各种复杂形状构件及新材料的铺带加工的需求,在现有基础上需进一步发展新的铺带方法和装备:一是提高铺带机具的灵活性和通用性,研制多关节机器人式铺带装置;二是针对不同功能要求的构件进行专门的研究,并结合不同的复合材料种类来选择合理的铺带工艺及相应的工艺参数。比如采用热塑性树脂作为基体时,由于它的固化过程不同于传统的热固性树脂,因此在使用上必须考虑如何才能获得良好的成形效果以及如何使铺层之间有很好的黏合强度等问题。另外,还应开展复合材料结构设计及其制造工艺一体化的设计工作。一方面根据所要制备产品的具体功能和技术要求(包括产品本身的物理机械特性和服役环境等)来进行产品总体方案的论证,另一方面通过合理的产品设计方案指导复合材料的最佳铺贴方式和顺序安排,从而达到充分发挥材料潜力的目的。

3、与其他先进制造技术的融合

未来,自动铺带技术将会和其他先进的制造技术比如增材制造和数字化制造相集成。自动铺带技术和增材制造结合

可以实现复合材料结构件的个性化定制:可以在重要的区域使用自动铺带设备来铺设高强度预浸料织物;而在次要的部位则使用增材制造设备来填满低密度或超轻质材料以达到所需的强度等级而减轻部件的质量。此外还可以实现基于数字化技术的全数字闭环管理。运用数字化建模对整个铺放过程进行模拟仿真,并且能够根据结果预先判断出可能存在的设计缺陷或者工艺上的不足之处并且及时调整,从而保证生产的顺利实施以及产品的最终品质。同时,通过数字化管理系统,实现生产数据的实时采集、分析与共享,提高生产管理效率,促进企业的智能化转型升级。

结论

通过对自动铺带控制技术,如数控系统、伺服系统、预浸带输送控制等,以及工艺关键技术,如预浸带切割、成型压力控制、工艺参数优化、铺带路径规划等的深入研究与不断创新,自动铺带技术在航空航天、汽车工业、新能源等众多领域得到了广泛应用。随着科技的不断进步,自动铺带技术将朝着设备智能化与自动化水平提升、适应复杂构件与新型材料铺带需求以及与其他先进制造技术融合的方向发展,为复合材料在更多领域的大规模应用提供强有力的技术支撑。

[参考文献]

- [1]李正顺.基于数字孪生的复合材料自动铺带系统设计[D].武汉大学,2024.
- [2]王显峰,段少华,唐珊珊,等.复合材料自动铺放技术在航空航天领域的研究进展[J].航空制造技术,2022,65(16):64-77.
- [3]王尧.复合材料自动铺放技术研究[J].中国设备工程,2020,(11):196-197.
- [4]张鹏,尹来容,仝永刚,等.基于间隙预测模型的自动铺带轨迹优化方法[J].机械工程学报,2024,60(05):296-316.
- [5]王犇,薛向晨,张栋梁,等.复合材料双曲率机身壁板制造自动化制造技术研究[J].中国高科技,2023,(03):66-69.

第一作者简介:胡亮,男,出生年:1987.12,汉族,籍贯:陕西省商洛市,学历:本科,职称:中级工程师,研究方向:复合材料成型工艺研究。