

七自由度纤维铺丝样机研制

Development of the 7-DOF Fiber Placement Sample Machine

哈尔滨工业大学机电学院 富宏亚 邵忠喜



富宏亚

哈尔滨工业大学教授, 博士生导师, 主要从事纤维铺放技术, 复合材料缠绕成型技术和非标数控设备研制, 机床数控技术, 智能加工等方面的研究工作。

为提升我国复合材料制造技术水平, 纤维铺放技术与装备研制作为复合材料数字化生产线的重要组成部分, 已经列入我国的“飞机制造业数字化工程”指南。目前, 我国大飞机项目已经立项, 并明确为大型客机和大型军用运输机, 前期规划复合材料用量为 15%, 随着技术的发展和成熟, 复合材料用量将进一步扩大。纤维铺放技术是解决飞机复合材料零件制造的关键, 目前只有美、法、西班牙等少数几个西方国家掌握该技术的核心, 而西方国家对于高性能多自

自动纤维铺放技术是解决高强度、轻质复合材料机身和进气道等构件制造的关键技术, 该项技术综合了纤维缠绕和自动铺带技术的优点, 在航空、航天等高科技领域得到了广泛应用。本文设计了七自由度四丝束纤维铺丝机及其控制系统, 同时对丝束控制、铺丝轨迹规划和优化方法、设备的后置处理等关键技术进行了研究。

由度数控铺丝设备对我国实行禁运政策。因此, 我国有关部门应制定长期发展规划, 有计划、有组织、有系统地开展纤维铺放技术的研究工作, 有必要开展自动铺放设备、CAD/CAM、铺放工艺等关键技术的研究工作。为此, 哈尔滨工业大学在借鉴国外研究成果的基础上, 根据我国的实际国情, 研制了一台具有自主知识产权的小型七自由度纤维铺丝样机, 展开了轨迹规划、控制系统、铺丝头结构等多项专题研究, 为进一步研制大型飞机复合材料铺放设备奠定了基础。

七自由度铺丝机的总体结构

为了实现铺丝头的姿态调整, 特别是实现对管状曲面结构零件的铺

放工作, 通常需要 6~8 个自由度。因此本课题设计了七自由度的纤维铺丝装置, 其结构布局如图 1 所示, 铺丝头如图 2 所示。该纤维铺丝装置由手臂、主轴和纱架 3 部分组成。手臂部分属于 3P-3R 型机器人手臂, 由 3 个正交的移动坐标轴 (X 、 Y 、 Z 轴) 和带有 3 个转动坐标轴 (A 、 B 、 C 轴) 的球型手腕组成, 具有四束丝束控制和铺丝能力的铺丝头加装在手腕末端, 纱架上装有 4 个纱筒, 同时将丝束张力



图1 七自由度四丝束纤维铺丝机

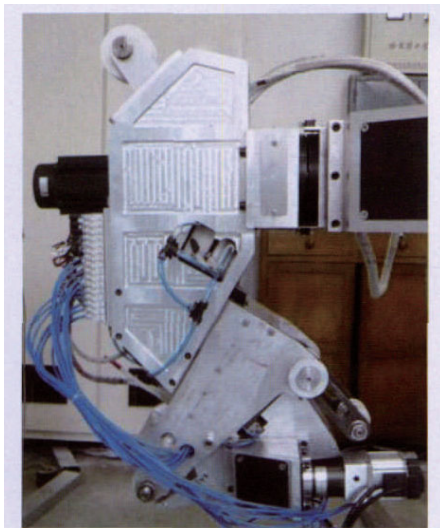


图2 铺丝头结构

控制在一定范围内。这种铺丝装置的结构设计方案利用了3P-3R型机器人手臂工作空间大、灵活度大的特点,提高了铺丝头在可达空间范围内的位姿控制能力,而主轴的旋转自由度为加工管状零件提供了可能性。

铺丝设备的丝束铺放功能主要由铺丝头完成,铺丝头的工作原理如图3所示,纤维丝束经导向轮、丝束分配系统进入铺丝头的丝束通道内,顺次经过丝束夹紧模块、丝束重送模块和丝束切断模块,在丝束集合模块中聚集成丝带,再被输送到压辊的下方,在加热模块和施压模块的作用下丝束被压紧到芯模表面或者芯模的铺层上。其中,各路丝束独立控制,在铺丝的过程中能够切断和重送任意一路丝束,这就可以通过增减丝束数量来调节丝带的宽度。丝带的最小增减量是单束丝束的宽度,同时通过调节带宽消除相邻丝束间的间隙和重

叠。任意丝束的独立重送与切断是通过控制铺丝头的夹紧模块、重送模块和切断模块而完成的。

铺丝控制系统

铺丝数控系统采用IPC加运动控制卡(PMAC)的开放式结构形式,如图4所示。PMAC的I/O控制包括两部分:一是机床各运动轴限位和回原点用行程开关控制;另一部分是用于丝束气路控制用的I/O,采用光电隔离输出电路通过PMAC的J9口控制外部电磁阀,其中丝束控制部分是铺丝控制系统软件的重要研究内容。

该丝束控制方法就是将丝束控制代码整合到运动控制代码(G代码)中,如图5所示。具体计算步骤如下:

(1) 计算铺丝轨迹点 e 的丝束控制信息(丝束①重送或者切断);

(2) 在铺丝运动的反方向找到轨迹曲线上的一点 d ,使得 d 点到 e 点的距离等于重送距离 L_r ,则 d 点就是 e 点铺丝的丝束控制位置;

(3) 将 d 位置与其他位置按铺丝方向进行排序,进行后置处理计算转换成G代码后,加入到运动控制代码中,同时增加丝束控制代码;

(4) 当进行丝束重送控制时,在 d 位置增加重送电机的运动控制代码。

纤维铺丝轨迹规划方法

为了提高铺丝工作效率,减少铺丝设备剪切纤维丝束的次数,达到满丝铺丝工时的最大化,提出了将等铺放角法和等距偏置法相结合,以曲线在曲面内的等距偏置法为核心的铺

放轨迹优化方法。

该优化方法详细描述如下(如图6):设铺放角范围是 $[(\phi - \Delta\phi), (\phi + \Delta\phi)]$, E_1, E_2 是模型曲面边界。设定初始纤维带边缘曲线的铺放角是 $(\phi - \Delta\phi)$,利用等铺放角法计算 C_1 。设定等距偏置的曲面距离是满丝铺放的纤维带宽度 w ,按给定的偏置方向 t_f 计算纤维带边缘曲线集 $\{C_i\}$ ($i=1\sim n$),其中 C_i 等距偏置得到 C_{i+1} 。铺放轨迹 c_i 由相邻带边缘曲线 C_i, C_{i+1} 的位置决定, c_i 到 C_i, C_{i+1} 的曲面距离是 $w/2$,此时纤维带丝束数量为满丝铺放丝数。在计算偏置曲线集 $\{C_i\}$ 的同时,检验 C_i 上轨迹点的铺放角是否满足铺放角范围 $[(\phi - \Delta\phi), (\phi + \Delta\phi)]$ 的要求,假设 C_{n+1} 不满足要求,则舍去 C_{n+1} ,得到带边缘曲线集 $\{C_i\}$ ($i=1\sim n$)。再由等铺放角法重新计算初始纤维带边缘曲线 C_1' , C_1' 与 C_n 的位置关系是: C_n 与 C_1' 在模型曲面上的最大曲面距离为 w 。继续按照等距偏置法计算曲线集 $\{C_i'\}$ ($i=1\sim n'$)。最后对曲线集 $\{C_i\}$ 与 $\{C_i'\}$ 的相交曲线进行修剪(如图中保留 C_n ,修剪 C_1'),保留部分(如图中剖面线区域)的带宽小于或等于 w ,此处需要计算纤维带丝束数量。再按照基于纤维带边缘曲线的轨迹规划方法计算铺放轨迹(图中 C_n 与 C_1' 之间的铺放轨迹 c_n)。以上是该优化方法的一个完整循环,如此循环直至计算完模型曲面的全部带边缘曲线和铺丝轨迹。

铺丝轨迹的后置处理方法

由于铺丝设备加工零件方式的

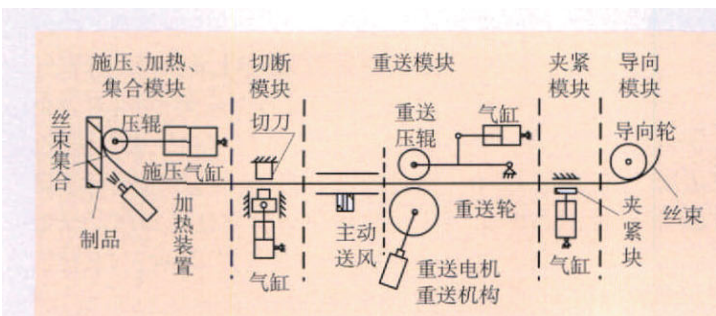


图3 铺丝头工作原理简图

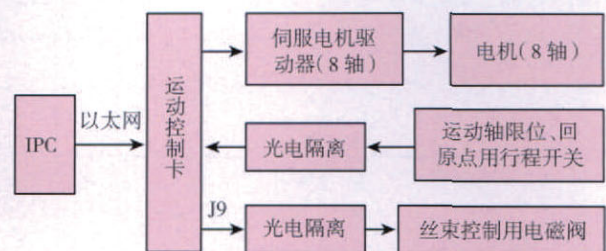


图4 铺丝机数控系统结构

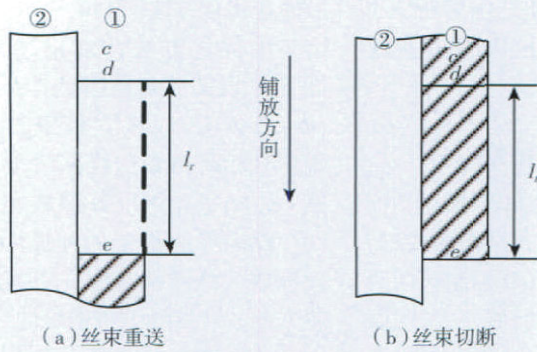


图5 丝束控制动作分析

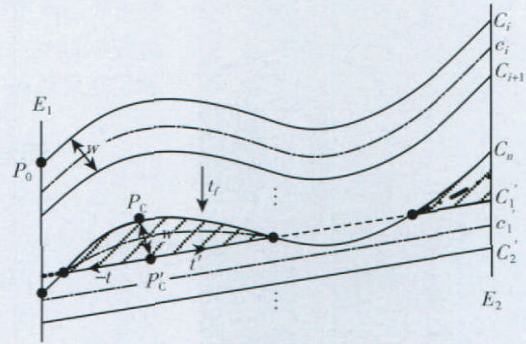


图6 铺丝轨迹优化方法

特殊性,并且运动轴数又多达7个,所以其后置处理方法与普通数控机床的后置处理方法不同。在详细分析装置结构的基础上,将该问题归结为七自由度冗余机器人的逆运动学问题。近年来,国内外在这方面有很多成功的经验:如美国的CESAR机器人的逆运动学采用雅可比矩阵分块的方法,简化了梯度投影法求雅可比矩阵的逆,减少了计算量;北京航空航天大学(BUAA-RR)型机器人,根据自身机构的特点采用了位姿分离方式,使七自由度逆运动学问题转换为三自由度广义逆运动学问题;另外几何方法分离出自由运动轴也是一种方法。此外,还有基于雅可比矩阵的梯度投影法,基于SVD分解的加权最小二乘法,逆运动学闭环求解方法等,但这些方法计算量比较大,而且都受到机器人本身结构的约束。

如图7所示,铺丝装置在轨迹点 p 处的铺丝运动由芯模主轴的旋转运动和手臂运动共同完成,所以铺丝方向 V 是两个运动方向的合成,包括主轴旋转运动的反方向 V_1 和手臂末端执行器(铺丝头压辊)运动方向 V_2 。经过以上分析,再引入机器人运动学

相关原理,采用位姿分离法研究七自由度铺丝装置的后置处理算法。分离芯模主轴旋转这个冗余自由度,将该冗余机构的运动轴分成主轴和手臂两部分进行后置处理算法分析。由于手臂部分是典型的3P-3R型串联机构,具有6个自由度,使七自由度冗余机构的逆运动学问题转化为六自由度非冗余机构的逆运动学问题,简化了后置处理算法。基于位姿分离法的七自由度铺丝装置的后置处理过程是:铺丝动作由主轴转动与铺丝头压辊运动共同完成,芯模坐标系下铺丝轨迹的位姿信息绕主轴轴线旋转一定角度后得到手臂末端的位姿,而这个旋转的角度就是主轴的转动量,再根据D-H法计算手臂部分各轴的运动量。

纤维铺丝试验

进行宽度为4mm的丝束铺丝试验,验证铺丝控制系统结构和控制方法的正确性,选择丝束增减控制独立于运动控制的方法,在直径为275mm的铝材质圆柱上实现了45°轨迹的丝束铺丝,工艺参数如表1所示,铺放结果如图8所示。

在铺丝过程中机床各轴运动位置正确、丝束增减位置准确、丝束张力稳定、控制系统运行稳定可靠,从而证明了运动控制方法、丝束增减控制方法、张力控

表1 铺丝试验的工艺参数

参数名称	参数值
铺放速度	0.02m/s
施压气缸压力	0.15Mpa
丝束控制模块的气缸压力	0.5Mpa
丝束加热温度	35~45℃
丝束张力	0.98N

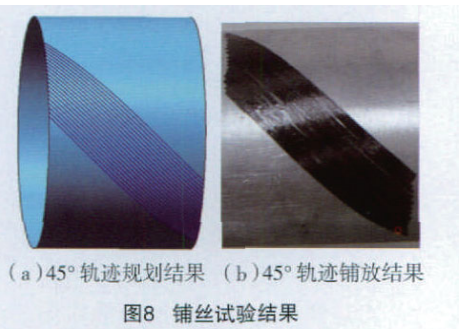


图8 铺丝试验结果

制方法的可行性。

结束语

自动纤维铺放技术是解决高强度、轻质复合材料机身和进气道等构件制造的关键技术,该项技术综合了纤维缠绕和自动铺带技术的优点,在航空、航天等高科技领域得到了广泛应用。本文设计了七自由度四丝束纤维铺丝机及其控制系统,同时对丝束控制、铺丝轨迹规划和优化方法、设备的后置处理等关键技术进行了研究。最终使用研究设备实现了丝束铺丝试验,在试验过程中控制系统稳定、各轴运动位置正确。

(责编 泰山)

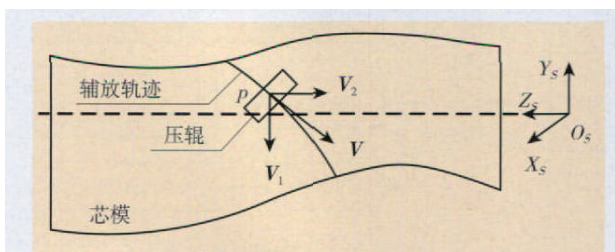


图7 后置处理算法分析