

大型复合材料丝束铺放机关键部件结构分析*

Analysis of Key Component of Large Composites Fiber Placement Machine

北京航空制造工程研究所 杨会芳 李中凯 金 辉

[摘要] 对大型复合材料丝束铺放机关键部件进行了计算分析,对丝束铺放机的总体结构、网格划分及约束加载进行了介绍,详细分析了横梁和铺丝头在不同工作位置由于自重引起的丝束铺放机的变形以及变形对直线运动精度的影响。分析数据对丝束铺放机关键部件结构优化设计提供了理论依据,为横梁反变形设计提供了重要数据。

关键词: 丝束铺放机 关键部件 横梁 自重 变形 精度

[ABSTRACT] The key components of large composites fiber placement machine are calculated and analyzed. The overall structure of mesh and load constraints of fiber placement machine are introduced. The deformation and the deformation of linear motion accuracy are caused by the weight of the fiber placement machine when the beams and fiber placement head are in a different working position. Analysis of data on key components of fiber placement machine provides a theoretical basis for structural optimization, in particular, anti-deformation of beam design provides important data.

Keywords: Fiber placement machine Key component Beam Dead weight Deformation Accuracy

复合材料在飞机上的使用量日益增多。最新资料显示,世界各大航空制造公司复合材料使用量均呈现增长趋势。飞机用材正在由铝合金时代向复合材料时代迈进。

随着飞机结构尺寸的不断增大以及飞机复合材料使用量的不断增多,复合材料制造业已经成为飞机制造业的主要组成部分,用于复合材料构件制造的先进专用设备得到迅速发展和广泛应用。丝束铺放机在该设备领域具有举足轻重的地位,显著提高了复合材料生产效率和制件内部质量,降低了成本,使复合材料性能最优化和低成本并存成为可能。

丝束铺放机具有结构跨度大、行程长、运行速度快、

制造精度高、移动部件质量轻以及热、力影响复杂等特点,传统的机械进给系统设计、装配工艺和驱动方式难以实现丝束铺放工艺高速度、高精度的要求。本课题对丝束铺放机关键部件进行有限元计算,分析横梁和铺丝头在不同工作位置由于自重引起的丝束铺放机的变形以及变形对铺丝头 X 向与 Y 向直线运动精度的影响,为后续详细设计提供理论依据。

1 大型复合材料丝束铺放机总体结构

丝束铺放机总体结构为高架桥式龙门结构。2排立柱固定在地基上,每排立柱上安装2条 X 向导轨,横梁在导轨上作 X 方向运动,横滑板在横梁上作 Y 方向运动,垂滑枕在横滑板上作 Z 方向运动。

2 丝束铺放有限元网格划分及边界条件

丝束铺放机结构复杂,包含很多螺钉、螺母等标准件以及具有小孔、倒角特征,这些小建模特征使有限元网格划分变得非常困难,因此在导入有限元分析模块前要对几何模型进行简化处理。以横梁为例,图1为简化处理后的几何模型。图中 A 为 X 向滑块,横梁通过滑块与导轨配合,沿 X 向运动。 B 为 Y 向导轨,横滑板通过滑块与 Y 向导轨配合,沿 Y 向运动。

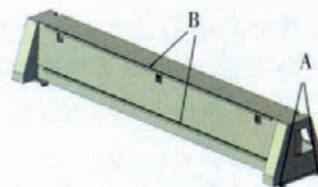


图1 横梁的CAE简化模型
Fig.1 CAE simplified model of beam

2.1 载荷及约束

丝束铺放机在静态分析时主要考虑2种载荷,即铺丝工作力和自重。铺丝工作力施加于铺丝头末端,自在ANSYS软件中通过准确定义材料密度自动施加。由于铺丝工作中铺丝力很小,与自重相比可以忽略不计,所以分析中只计算自重载荷。

丝束铺放机的有限元分析模型和约束条件如图2

* 国家科技重大专项项目(2009ZX04004-111)资助。

所示。丝束铺放机包括左右立柱、横梁、横滑板、垂滑枕和铺丝头 6 个部件,部件之间通过节点位移协调建立连接关系,实现力在各个部件之间的传递。将立柱底面在 X 、 Y 、 Z 方向固定,对横梁底部滑块与立柱上导轨建立 Y 、 Z 方向的节点位移耦合约束,消除 Y 、 Z 方向的刚性位移,在横梁底部滑块部位选取部分节点约束 X 方向,消除横梁 X 方向的刚性位移。对横滑板滑块与横梁导轨建立 X 、 Z 方向的节点位移耦合约束,消除横滑板 X 、 Z 方向的刚性位移,在横滑板和横梁 Y 方向丝杆驱动处选取部分节点耦合 Y 方向,消除横滑板 Y 方向的刚性位移;根据垂滑枕的运动情况,垂滑枕导轨与横滑板滑块接触部位建立 X 、 Y 方向的节点位移耦合约束,消除垂滑枕 X 、 Y 方向的刚性位移,在垂滑枕和横滑板 Z 方向重力平衡处选取部分节点建立 Z 方向的位移耦合约束,消除垂滑枕 Z 方向的刚性位移。

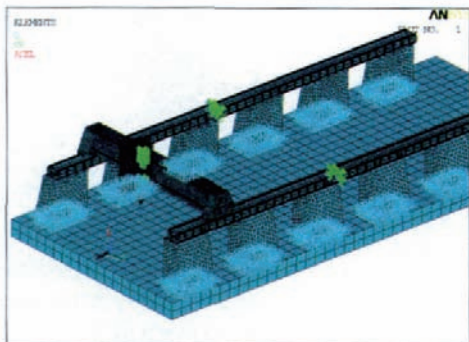


图2 铺丝机的有限元网格及约束条件
Fig.2 Finite element mesh and constraints of fiber placement machine

2.2 多工况条件下的有限元计算

横梁作 X 向运动时,铺丝头末端可能产生较大变形,对丝束铺放机 X 向运动直线度造成不利影响;横滑板在横梁上作 Y 向运动时,由于重力作用点不同,造成横梁弯曲程度不同,使 Y 向运动直线度与 X 向运动相对于工作台面的平行度随横滑板行程的变化而变化。

综合考虑多方因素影响,在横梁 X 向全行程内选定 5 个位置(I~V),如图 3 所示,经过有限元分析计算模拟出铺丝头末端的变形曲线。在横滑板 Y 向全行程内选定 5 个位置(I~V),如图 4 所示,经过有限元分析计算模拟出铺丝头末端的变形曲线,对 2 条变形曲线进行分析,得到自重引起的机床变形对几何精度的影响。

2.2.1 丝束铺放机有限元分析

自重致使横梁产生从中间向下的弯曲变形,同时由于垂滑枕与铺丝头重力影响,横梁产生沿 Y 轴的扭转变形。图 5 为铺丝设备整机变形云图,图 6 为为横梁变形云图,最大变形量在机床运动过程中会产生波动,影响

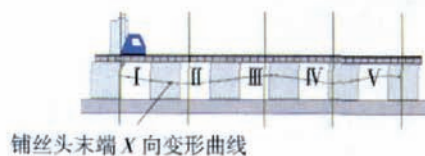


图3 横梁 X 向移动对几何精度的影响

Fig.3 Impact of beam X motion on geometric accuracy

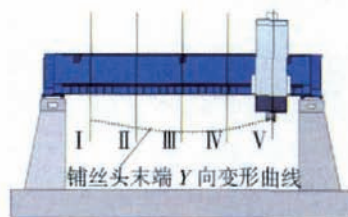


图4 横滑板 Y 向移动对几何精度的影响

Fig.4 Impact of cross slide Y motion on geometric accuracy

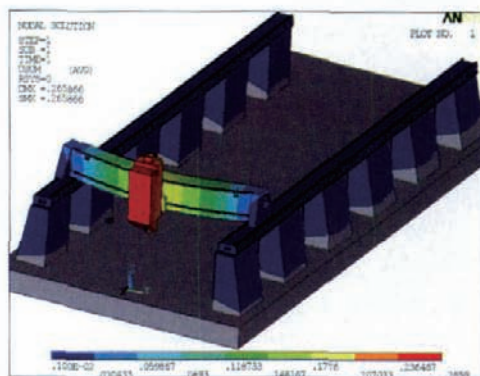


图5 铺丝设备整机变形云图

Fig.5 Deformation cloud of machine

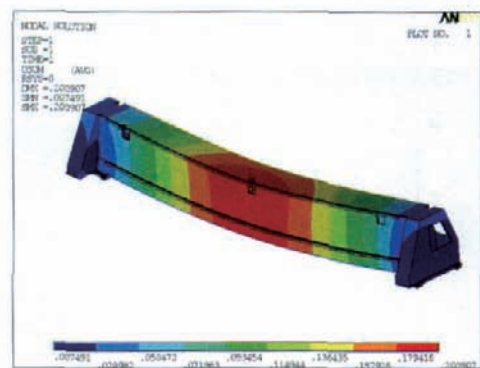


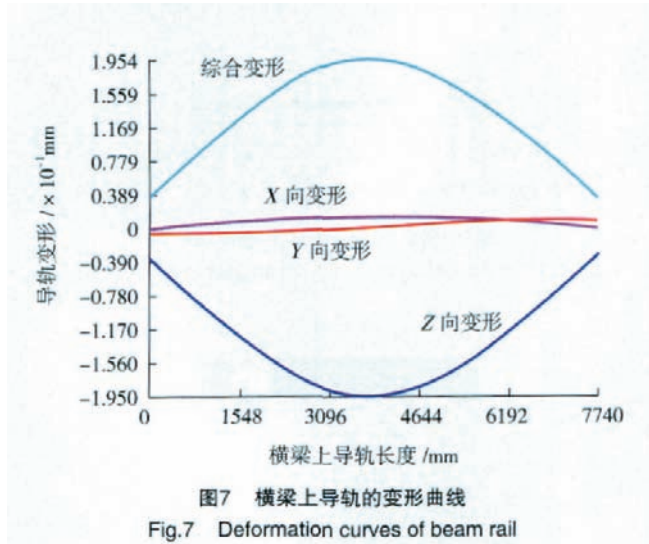
图6 横梁变形云图

Fig.6 Deformation cloud of beam

机床几何精度。图 7 为横梁上导轨的变形曲线,该曲线为横梁反变形设计提供重要理论数据。

2.2.2 丝束铺放机变形对几何精度的影响

对图 3 中的 5 个横梁位置进行分析,得到铺丝头末端点的 Y 向和 Z 向变形。以 X 向行程为横坐标,位移值为纵坐标,通过插值计算得到全行程内的 2 条变形曲



线。依据几何精度理论,由变形曲线值计算出自重影响下丝束铺放机 X 向运动时在 XZ 平面和 XY 平面的直线度。

同理,对图 4 中的 5 个滑板位置进行分析,得到铺丝头末端点的 X 向和 Z 向变形。以 Y 向行程为横坐标,位移值为纵坐标,通过插值计算得到 Y 向行程的 2 条变形曲线。由变形曲线值计算出自重影响下丝束铺放机在 Y 向运动时在 YZ 平面和 YX 平面的直线度。

(1) X 向运动的直线度。

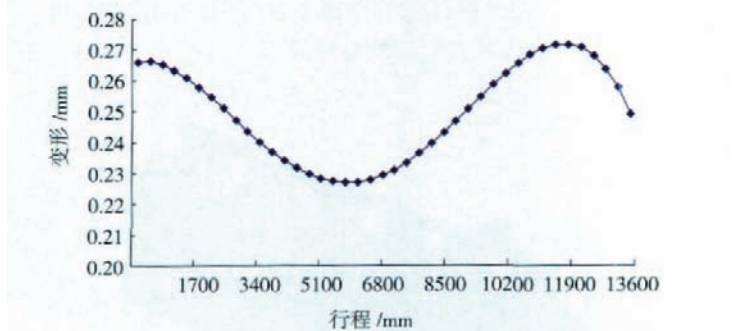
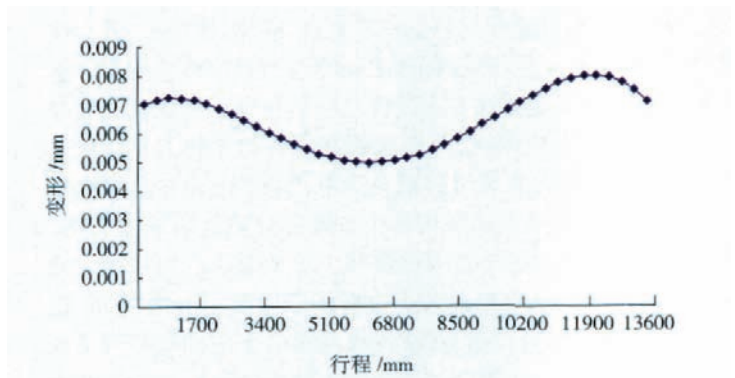
表 1 为根据有限元方法计算得到的横梁各位置铺丝头末端 Y 向和 Z 向变形。图 8 为铺丝头末端 Y 向变形随横梁位置的变化曲线。

表1 铺丝头Y/Z变形计算值

位置序号	X 向坐标 /mm	Y 向变形 /mm	Z 向变形 /mm
I	0	0.007	0.266
II	3400	0.006	0.240
III	6800	0.005	0.229
IV	10200	0.007	0.262
V	13600	0.007	0.249

从图 8 可以看出, Y 向变形曲线为近似“M”形,曲线的最大斜率在 11900~13600mm 内,若直线度在最大变形斜率处得到满足,在其他位置也能够得到满足。经计算, X 向移动直线度的计算值为 0.00021/1000,远小于直线度的允许值,可见自重变形对 XZ 平面纵向移动的直线度影响很小。

图 9 为铺丝头末端 Z 向变形随横梁位置的变化曲线。计算表明,自重变形对 XY 平面 X 向移动的直线度影响较大,1000mm 直线度计算值为 0.0106/1000,满足



设计允许值 0.015/1000 的要求。

(2) Y 向移动的直线度。

表 2 为有限元方法计算得到的横滑板各位置铺丝头末端 X 向和 Z 向变形。图 10 为铺丝头末端 X 向变形随横滑板位置的变化曲线。

表2 铺丝头X/Z变形计算值

位置序号	Y 向坐标 /mm	X 向变形 /mm	Z 向变形 /mm
I	0	0.0254	0.1548
II	1490	0.0321	0.2403
III	2980	0.0460	0.2632
IV	4470	0.0323	0.2414
V	5960	0.0264	0.1022

横滑板在 5960mm 行程内铺丝头末端的 X 向最大变形为 0.046mm,最小变形为 0.022mm, X 向变形曲线的最大斜率在 745~1490mm 内。自重变形对 YZ 平面 Y 向移动的直线度影响较大,1000mm 直线度计算值为

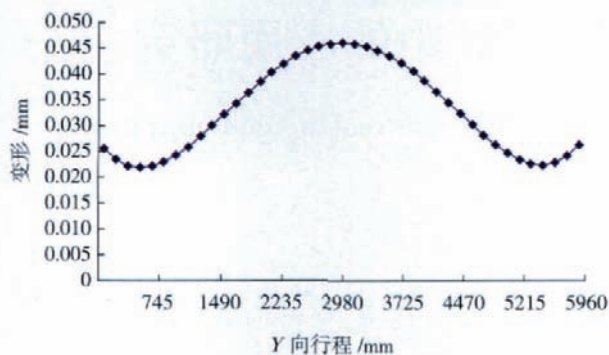


图10 铺丝头末端X向变形随横滑板位置的变化曲线
Fig.10 Variation curve of X deformation of fiber placement head end with horizontal skateboarding

0.0135mm,与设计允许值 0.015/1000 的要求已经非常接近。

图 11 为铺丝头末端 Z 向变形随滑板位置的变化曲线。变形曲线近似弓形,当横滑板移动到横梁中间位置时,铺丝头末端的变形最大。这一变形曲线对横梁反变形设计提供了帮助。

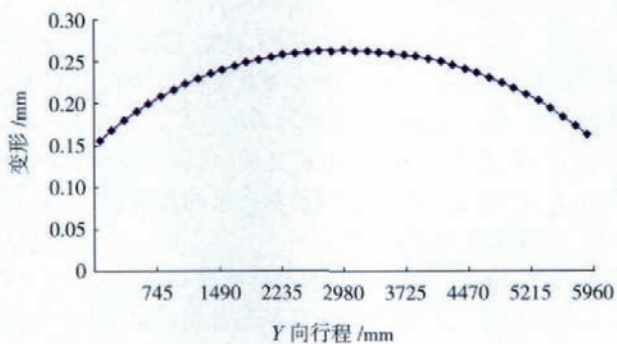


图11 铺丝头末端Z向变形随横滑板位置的变化曲线
Fig.11 Variation curve of Z deformation of fiber placement head end with horizontal skateboarding

计算表明,由自重变形引起的 XY 平面 Y 向移动的直线度的计算值为 0.068mm,比 YZ 平面 Y 向移动的直线度的计算值 0.0135mm 大很多,不能满足设计允许值 0.02/1000 的要求,经过多次的方案优化,该项指标降低到了 0.017mm,满足了设计要求。

3 结论

通过详细计算分析得出以下结论。

(1) 自重变形对 XY 平面内 X 向移动的直线度影响较大,1000mm 直线度计算值为 0.0106mm,满足设计允许值 0.015/1000 的要求;对 XZ 平面 X 向移动的直线度影响很小。

(2) 自重变形对 YZ 平面内 Y 向移动的直线度影响

较大,1000mm 直线度计算值为 0.0135mm,满足设计允许值 0.015/1000 的要求。

(3) 自重变形对 XY 平面内 Y 向移动的直线度的计算值为 0.068mm,远大于设计要求的 0.02/1000 指标,经过多次的方案优化,该项指标降低到 0.017mm,满足设计要求。

研究为大型复合材料丝束铺放机关键部件结构优化设计提供了理论依据,尤其是为横梁反变形设计提供了重要数据,为实现丝束铺放机的高速度、高精度特性提供了理论保障。

(责编 良辰)

(上接第 55 页)

致。同时通过图表反映出来的零件确切的数控机床占用时间,可以为后续工艺技术优化、生产进度安排以及工时定额提供有效的数据资源,并具有一定的指导意义。

3 结束语

飞机翼盒梁间肋研制标准化应用针对工程技术人员在研制过程中的每一个环节、每一个岗位,以充分利用资源、提高加工效率为根本核心,制定细而又细的科学化、数量化的标准。通过严格按照标准实施,将复杂、繁琐的事情变得简单、有序,从而达到提高质量和效率的目的。

标准化研制流程是一个从简单到复杂再到简单的转变过程,其中的复杂意味着严谨、周密、明晰,而不是无序、杂乱、模糊。通过对翼盒梁间肋研制流程标准化操作,可以清楚地看出流程标准化是使业务化繁为简的有效工具。文中提及的翼盒梁间肋研制过程中,通过对流程标准化的应用,使零件最终变形得到有效控制,生产过程中因人为干预因素造成的零件超差及报废等质量事故减少;加工效率大幅度提高;零件表面质量好,表面残留得到较好地控制,减少了钳工工作量。

总之,流程标准化的巨大优势就是可以迅速地进行学习和复制,不管是谁只要按这个标准进行操作,就可以得到合格的产品和用户的满意,并且可以极大地提高效率。所以,流程标准化的应用是提高管理和运营效率的有力武器,标准化流程有助于研制工作的顺利运行。

参考文献

- [1] 徐翔. 现代企业业务流程标准化操作手册. 企业管理出版社, 2006.
- [2] 刘强 郇极. 航天航空制造与现代数控技术及装备. 中国制造业信息化, 2005(3): 64-66.

(责编 小颖)