

大型复合材料铺丝机模态分析*

Modal Analysis of Large Composite Fiber Placement Machine

北京航空制造工程研究所 杨会芳 金辉 张永康 张省

[摘要] 对大型复合材料铺丝机的三维实体结构进行模态分析,发现结构薄弱环节,对结构刚性设计提供准确设计方案。

关键词: 有限元 铺丝机 模态分析 频率

[ABSTRACT] By modal analysis of three-dimensional solid structure of large composite fiber placement machine, the structural weaknesses are gotten. In addition, the analysis results provide the accurate design of structural rigidity.

Keywords: Finite element analysis Fiber placement machine Modal analysis Frequency

传统复合材料构件采用手工成型,生产效率低、废料高,产品质量难以保证。自动铺放技术利用专用铺放设备,实现了丝束铺放的自动化。国外复合材料铺丝机的研制开始于20世纪60年代,而国内主要依靠进口。随着大飞机对复合材料的需求日益增多,大型复合材料铺丝机的自主研制迫在眉睫。由于大型复合材料铺丝机在结构上无设计经验,前期的设计中结构性能分析尤其是模态分析显得非常重要。

模态分析是研究结构动力特性的一种近代方法,目的是通过计算固有频率和振型,对结构设计提供参考。当激振力频率接近某一固有频率时,结构将发生共振;若激振力频率不可改变,需通过改变结构设计使其固有频率避开激振频率。

本文以某型大型复合材料铺丝机为工程背景,采用UG软件建立该铺丝机的计算模型,通过有限元分析软件ANSYS进行模态分析,优化结构设计。

1 工程背景

铺丝机总体结构为高架桥式龙门结构,如图1所示,横梁悬挂铺丝头。铺丝机由立柱、横梁、直线导轨、横滑板、铺丝头、数控系统、伺服驱动、电气控制系统及辅助设备部分组成。

横梁部件重22t,在X向的运行速度为40m/min。

横滑板重2t,在Y向的运行速度为40m/min。垂滑枕重2.5t,在Z向的运行速度为40m/min。立柱采用上下钢板中间混凝土的混合结构,横梁、滑板为钢板焊接结构,铺丝头采用轻质铝合金材料制造。

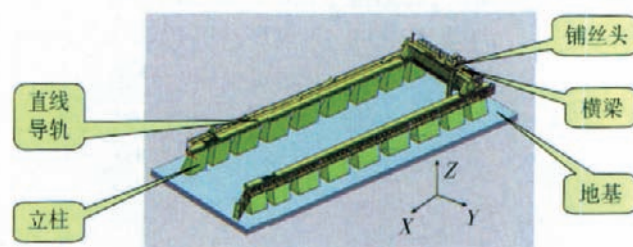


图1 铺丝机总体结构

Fig.1 Structure of fiber placement machine

2 模态分析

铺丝机整体结构跨度大、行程长、运行速度快、精度高、移动部件质量大,热、力影响情况复杂,各部件相互影响,频率分布密集。本文通过建立铺丝机的有限元分析模型,进行结构的振动特性分析,得到铺丝机的固有频率;并对前5阶频率进行分析,发现设备薄弱环节,为铺丝机的结构优化设计提供理论依据。

铺丝过程中,设备各部件之间存在位置间的相对运动,静力分析时可以对任意位置通过对运动部件间接触表面施加节点间的位移耦合建立边界条件来分析。这样做不会影响静力分析结果的准确性,因为静力分析中接触面间的相对滑动只是增加部件间的刚体位移,对变形和应力值没有影响,所以静力分析时不需考虑接触面间的相对滑动。

为较全面地了解铺丝机的固有频率分布,提取前100阶频率,对铺丝性能有较大影响的振型所代表的意义进行解析。

根据牛顿运动定律,系统的振动方程为:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{f(t)\}, \quad (1)$$

式中 $[M]$ 为质量矩阵, $[C]$ 为阻尼矩阵, $[K]$ 为刚度矩阵, $\{f(t)\}$ 为节点载荷矢量, $\{x\}$ 为位移矢量。当 $[M][C][K]$ 已知时,可求得一定激励 $\{f(t)\}$ 下的结构响应 $\{x(t)\}$,方程(1)两端经傅里叶变换,可得:

* 国家科技重大专项项目(2009ZX04004-111)资助。

$$(j\omega)^2 [M] \{X(\omega)\} + j\omega [C] \{X(\omega)\} + [K] \{X(\omega)\} = \{F(\omega)\}, \quad (2)$$

其中, $F(\omega)$ 和 $X(\omega)$ 分别为激振力 $\{f(t)\}$ 和位移响应矢量 $\{x(t)\}$ 的傅里叶变换:

$$\begin{cases} F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt, \\ X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \end{cases} \quad (3)$$

令 $[H(\omega)] = (-\omega^2 [M] + j\omega [C] + [K])^{-1}$,

则式(2)可简化为:

$$\{X(\omega)\} = [H(\omega)] \{F(\omega)\}. \quad (4)$$

通过对结构上的多点激振,在单一点测量其响应,即可得到传递函数矩阵的某行,进而计算出模态参数^[1]。

大型复合材料铺丝机即使经过有限元离散也具有很多自由度,但是,在研究振动系统的动力响应时一般只需要了解少数低阶频率与振型,有限元分析对大型特征值问题的求解一般通过迭代计算得到有限个低频值。

通过固有频率计算,可以发现结构刚性薄弱区域,因为发生低频振动的区域一般说明这一部位的刚度较低。所以,可以通过加强此区域的局部刚度使其达到提高整机动态性能的目的。设备原始结构的初阶固有频率为 28Hz,通过结构优化和局部刚度加强后初阶固有频率提高到 35Hz,使设备的动态性能得到显著提高。

通过对各阶振型分析,前 100 阶固有频率在 857Hz 范围内。表 1 列出了前 20 阶固有频率值。在前 100 阶频率中,大部分振型反映了铺丝机筋板的弯曲扭转及其组合变形。低阶固有频率直接反映了机床刚度薄弱区域,频率值越低其代表的振型方向的刚度越弱,因此通过模态分析可以提出结构刚度加强的准确方案。

表1 铺丝机整机设备的前20阶固有频率值一览表

模态阶数	频率值 /Hz	模态阶数	频率值 /Hz	模态阶数	频率值 /Hz	模态阶数	频率值 /Hz
1	35.105	6	69.182	11	103.65	16	123.28
2	42.372	7	72.825	12	107.55	17	126.82
3	50.140	8	89.046	13	108.65	18	133.15
4	66.852	9	89.487	14	119.39	19	144.70
5	68.517	10	99.232	15	122.62	20	146.63

铺丝机前 5 阶振型图如图 2~ 图 6 所示。

第 1 阶固有频率值为 35Hz,振型图反映了铺丝头沿 Z 向的上下振动,变形最敏感方向沿 Z 向,因此 Z 向作用的外力对该阶振型有影响,而铺丝力方向与该阶振

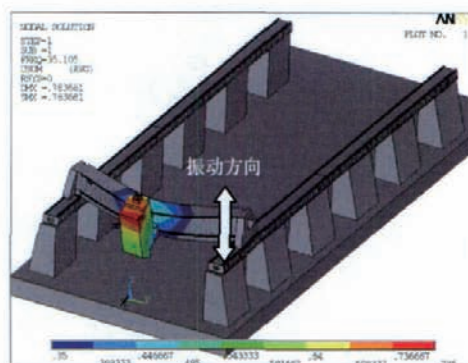


图2 第1阶振型图

Fig.2 First order vibration mode diagram

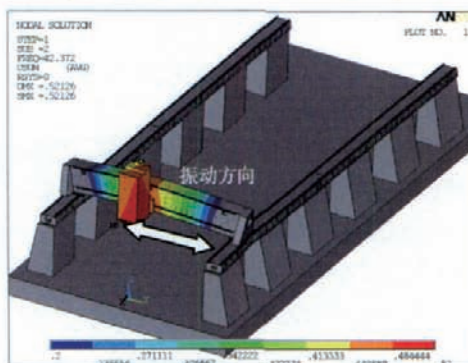


图3 第2阶振型图

Fig.3 Second order vibration mode diagram

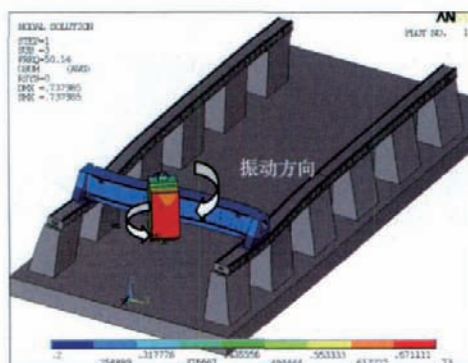


图4 第3阶振型图

Fig.4 Third order vibration mode diagram

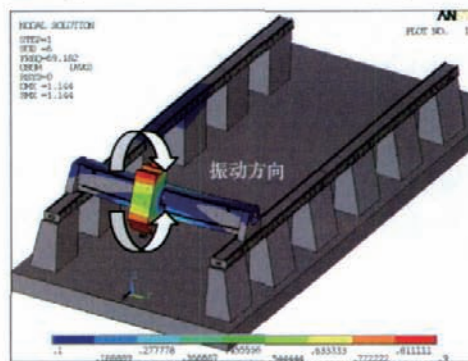


图5 第4阶振型图

Fig.5 Fourth order vibration mode diagram

(下转第 94 页)

时由于磨削过程中金刚石颗粒承受交变冲击应力的作用,使其产生疲劳裂纹或内部潜在裂纹和晶体缺陷的扩展,最终导致磨粒产生局部破碎,造成破碎磨损。

3 结论

(1)“以磨代铣”的加工方式实现对 C/E 复合材料的盲槽加工,能够有效地克服硬质合金铣刀铣削加工 C/E 复合材料所存在的纤维撕裂、毛刺及刀具磨损严重等问题。

(2)电镀金刚石工具磨削加工 C/E 复合材料盲槽时,最大磨削力随主轴转速的增加而减小,随加工深度、刀具进给量的增加而增加,提高主轴转速可以有效降低最大磨削力,有利于提高盲槽表面加工质量,减小刀具载荷,延长刀具寿命。

(3)相比硬质合金铣刀,电镀金刚石工具在磨削加工 C/E 复合材料盲槽过程中最大磨削力小、刀具磨损轻、刀具耐用度高,加工后的表面质量高,并且随刀具进给量、加工深度的变化,最大磨削力变化幅度小,故在满足一定的加工要求的前提下,可适当加大刀具进给量、加工深度,以提高加工效率。

参考文献

- [1] Jahanmir S, Ramulu M, Koshy P. Machining of ceramics and composites. New York: Marcel Dekker, Inc., 2000:267-293.
- [2] 李志强,樊锐,陈五一,等.纤维增强复合材料的机械加工技术.航空制造技术,2003,(12):34-37.
- [3] Kalla D, Twomey J. Committee Network (CN) force prediction model in milling of carbon fiber reinforced polymers. Intelligent Systems in Design and Manufacturing VI. 2005:54-55.
- [4] Ramulu M, Arola D, Colligan K. Preliminary investigation of effects on the surface integrity of fiber reinforced plastics. Engineering Systems Design and Analysis 2, ASME, 1994,2(64):93-101.
- [5] Hocheng H, Puw H Y, Huang Y. Preliminary study on milling of unidirectional carbon fiber-reinforced plastics. Composites Manufacturing, 1993,4(2):103-108.
- [6] Paulo D J, Pedro R. Damage and dimensional precision on milling carbon fiber-reinforced plastics using design experiments. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 160(2):160-167.
- [7] 张厚江,陈五一,陈鼎昌.碳纤维复合材料切削机理的研究.航空制造技术,2004,(7):57-59.
- [8] 盛贤君,刘勇,王克欣,等.碳纤维复合材料数控钻磨工艺及装备研究.制造技术与机床,2008,(8):92-95.
- [9] Tsao C C. Experimental study of drilling composite materials with step-core drill. Materials and Design, 2008, 29(9):1740-1744.
- [10] 马尔金 S.磨削技术理论与应用.蔡光起,巩亚东,宋贵亮,译.沈阳:东北大学出版社,2002.

(责编 小城)

(上接第 81 页)

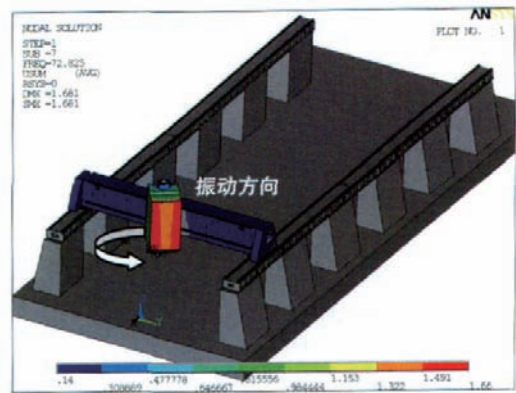


图6 第5阶振型图

Fig.6 Fifth order vibration mode diagram

型振动方向正好一致,所以铺丝力对该阶振型有激振的可能性。铺丝力变化频率应避开 35Hz 的频率范围。

第 2 阶固有频率值为 42Hz,振型图反映了铺丝头末端沿 Y 向的振动,变形最敏感方向沿 Y 向。铺丝过程中一般没有这方向的作用力。

第 3 阶固有频率值为 50Hz,振型图反映了横梁及铺丝头组合在 XY 平面内的扭转。铺丝过程中一般没有这方向的作用力。

第 4 阶固有频率值 69Hz,第 5 阶固有频率值 73Hz,为弯扭复合振动模态,加工中没有这方向的激振力。对于高阶模态,一般都不存在与振型一致的激振力,因此高阶模态发生共振的几率很小。

3 结束语

对整体机床进行模态分析,通过对各阶振型分析了解到,前 100 阶固有频率在 857Hz 范围内,其中大部分振型反映了机床筋板的弯曲扭转及其组合变形。低阶固有频率直接反映了机床刚性薄弱区域,频率值越低则其代表的振型方向的刚性越弱,因此通过模态分析可以提出加强结构刚性的准确方案,达到提高整机动态性能的目的。设备原始结构的初阶固有频率为 28Hz,通过局部刚性加强后初阶固有频率提高到 35Hz,使设备的动态性能得到显著提高。对于高阶模态,多为几个方向的复合振动,一般不存在与振型一致的激振力,因此高阶模态发生共振的几率很小。

参考文献

- [1] 曹数谦,张文德.振动结构模态分析.天津:天津大学出版社,2001.

(责编 侧卫)