

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.06.036

基于数值模拟的大开口盒型 CFRP 结构吊装方案优化研究

李斌, 骆迎昕, 孙万琪, 郭越人

(中航西安飞机工业集团股份有限公司, 陕西 西安 710089)

摘要: 吊装设备的承重特殊性以及结构尺寸数据信息的大量性, 使得传统吊装设计方案的应用效果受限。因此研究在考虑吊装设备承重稳定性和结构基础上, 从万向轮、支撑柱、支撑臂、扩展板等方面设计机械设备吊装结构, 并借助钢缆加固和伸缩臂支撑来提高结构的稳定性。同时引入参数化设计思路设计吊装系统自动化方案以确定最优吊点位置。结果表明: 研究设计的机械吊装结构在接触面节点上的位移增幅变化较小, 吊装系统的力矩差均保持在 5% 以内, 轴杆受力均匀; 在实际应用过程中, 应注意吊点与结构连接处的应力变化情况。该机械吊装设计思路能为类似结构的吊装加强方案优化提供参考价值。

关键词: 大开口盒型 CFRP 结构; 吊装; 结构变形; 自动化; 抗剪力

中图分类号: TP271+.2 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2025)06-0196-04

Reserch of Lifting Scheme Optimization for Large Opening Box-shaped CFRP Structure Based on Numerical Simulation

LI Bin, LUO Yingxin, SUN Wanqi, GUO Yueren

(Avic Xi'an Aircraft Industry Group Company Ltd., Xi'an 710089, China)

Abstract: As the special load-bearing characteristics of lifting equipment and the large amount of structural dimension data information limit the application effect of traditional lifting design schemes, this study, based on the load-bearing stability and structural foundation of lifting equipment, designs mechanical equipment lifting structures in terms of universal wheels, support columns, support arms, and expansion plates etc., and uses with the steel cable reinforcement and telescopic arm support to improve the stability of the structure. Simultaneously parameterized design concepts are introduced to design automation solutions to lifting system for determining the optimal lifting point position. The results show that the displacement amplification of the designed mechanical lifting structure on the contact surface nodes is relatively small, and the torque difference of the lifting system is kept within 5%, with uniform force on the shaft. This mechanical lifting design concept can provide reference value for optimizing lifting reinforcement schemes for similar structures.

Keywords: large opening box type CFRP structure; lifting; structural deformation; automation; shear resistance

0 引言

碳纤维增强塑料 (carbon fiber reinforced polymer, CFRP) 作为一种高性能复合材料, 因其具有较好的耐高温、耐腐蚀、强度高等优点而被广泛应用于机械结构设计制造中, 但大型构件因其装配制造、设备检修等要求而使其复合材料不可避免会呈现大开口盒型结构^[1-2]。这类结构在实际工作中较容易出现结构变形, 且存在因单元数量过多而导致的吊装流程繁琐、效率低下问题^[3-4]。吊装机械设备在不同工作环境和结构类型下的受力情况较为复杂, 当盒型结构变形量超过允许阈值时, 会严重降低其承载性能与服役寿命^[5-6]。不同学者针对大开口盒型 CFRP 结构吊

装相关内容也进行了研究, 其中包玮琛^[7]对 SMA 纤维复合材料空心梁进行了自动化分析, 并借助 Newmark 积分法对模型进行求解, 结果发现, 该模型可有效反映空心梁自由端在不同温度下的响应情况, 并有效抑制振动。廖力等^[8]提出借助 CFRP 和球墨铸铁实现机械臂关节轻量化设计, 并在拓扑优化和正交分析帮助下创建动力学模型。结果表明, 该机械臂的最大变形和应力优化幅度均超过了 2%。詹迪雷等^[9]提出借助自适应控制仿真实验对钻削轴向力和 CFRP 制孔质量进行研究, 结果发现, 轴向力的智能调控能降低 CFRP 制孔缺陷。以往研究在进行大尺寸开口结构分析时, 较少从机械设计角度对吊装结构设计进行分析。因此, 本文提出一种机械结构设计思

第一作者简介: 李斌(1985—), 男, 陕西渭南人, 高级工程师, 硕士, 研究方向为飞机结构装配工艺, kgjdlbin@163.com。

路下的吊装系统自动化方案,其通过对吊点位置的选取、参数及约束条件设置来提高其作业施工的安全性,降低损伤风险,旨在为机械制造领域大型复合材料的制造应用提供可参考价值。

1 基于机械结构设计的吊装系统自动化方案

1.1 机械吊装结构设计

现有常规吊装技术是借助钢缆与机械设备来完成,钢缆的连接位置有限,处理吊装设备时存在较大的安全隐患。因此考虑到机械设备在吊运过程中极易发生晃动失稳情况,为了减少设备破坏情况,研究提出一种机械设备吊装结构,该结构包括底板、挡板、压杆、固定板等部分。其中底板上部左、右各固定有限位挡板,挡板后有用于铰接的U形压杆,板子之间借助螺栓进行固定,且底板上端中间位置还设有用于固定连接的立杆,能避免钢缆与机械设备之间的直接挤压而损坏。该吊装结构限位挡板表面开设有绕绳孔,定位插杆与卡板之间具有对应的定位插槽,U形压杆内侧壁固定有缓冲垫。图1为机械吊装结构示意图。

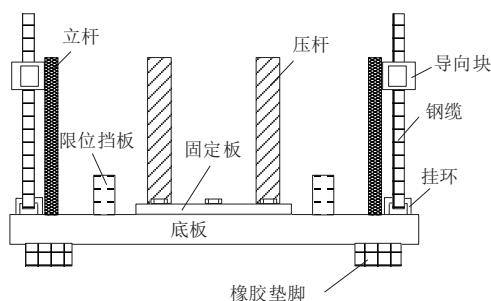


图1 机械吊装结构示意图

具体来看,在使用机械吊装结构时,将机械设备置于底板上端以及限位挡板之间,对设备的相对限位位置进行确定后,借助固定绳对机械设备进行绑固,翻转压杆使其与机械设备上侧压持。立杆杆壁固定有导向块,导向块开设有导向槽,随后让吊运钢缆穿过导向槽,借助导向滚轮进行限位夹持,使得同侧吊运钢缆在龙门架下得以固定。同时考虑到吊装结构底座的稳定性,研究对其底部设置万向轮、支撑柱、支撑臂等,用以避免吊装发生倾斜问题。底板下方的垫脚能提高装置的减震性能,且设有三角卡块和定位块用以实现不同导向块的连接,在保证结构稳固的同时也便于拆装^[10]。图2为吊装结构侧视连接及俯视结构示意图。

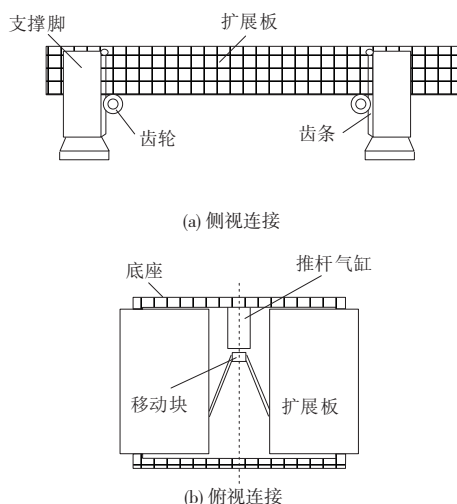


图2 吊装结构侧视及俯视连接结构示意图

底座顶部安装有支撑柱和支撑臂,支撑臂上的电机与钢丝绳挂钩相连,将底座横向滑动时的扩展板和推杆气缸输出轴的移动块进行连接,扩展板底部安装有支撑脚用以固定。扩展板顶部的导向槽可与导向块实现滑动连接,支撑柱外部固定有齿轮,其与齿条啮合,使得伺服电机可带动其转动,支撑臂上的伸缩臂能实现与钢丝绳的活动连接,推动电机带动伸缩臂进行伸缩,可实现吊装位置和距离的调整。与常规手段相比,该设计方案中的扩展板可以增加支撑范围,增强底座稳定性。

1.2 吊装系统自动化方案设计

大开口盒型吊装结构所包含的尺寸数据信息较多,研究借助参数化设计语言进行数值模拟,即引入有限元分析来对吊装设计进行自动化分析。吊装建模参数包括尺寸信息、单元材料、工况和载荷等内容^[11]。首先用 SolidWorks 三维软件完成零件的自动化建模,并借助应用程序完成零件工程图设计,并在 SolidWorks 环境中完成零件的自动装配。借助 APDL 语言进行几何建模,对吊装系统进行网格划分,借助接触单元模拟不同构件装配关系,如设备与吊轴之间的接触。其次设置边界条件和约束,关键在于解决吊钩对吊装以及吊索对吊装的约束^[12]。考虑到传统即吊即刚接的方案会使梁段内部产生较大的内力,致使杆件受损,因此研究在吊装过程中在梁段间设立临时连接装置,待加劲梁完全安装后进行固定刚接^[13]。研究以某连续钢箱梁悬索桥工程为研究对象,其主缆矢跨比值为 0.1,加劲梁高跨比值为 0.002,宽跨比值为 0.02,吊索顺桥之间的间距为

18 m。该工程梁段标准吊装质量为 250 t,每个梁端侧面在小于 10 m 范围内均布设一个吊点。

图 3 为连接结构的计算机辅助设计结构示意图。

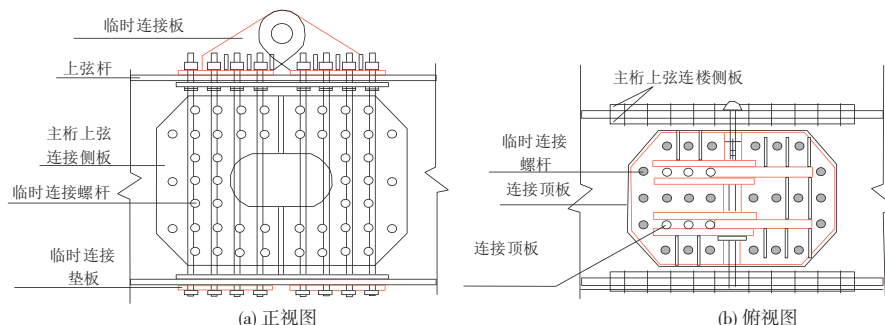


图 3 连接结构的计算机辅助设计结构示意图

在进行模型简化时,确定拉应力不大于复合材料抗拉极限时的位置即为最佳吊点位置,并在自动化模型设计时,将微观模型均质化的工程常数转换为复合材料单层板的刚度矩阵,设置复合材料为 T700 单向碳纤维层合板,铺层堆叠顺序为 $[0^\circ/45^\circ/-45^\circ/90^\circ]_s$,单层厚度为 0.125 mm,通过均质化计算公式计算得出复合材料强度^[14]。根据 T700 复合材料碳纤维与环氧树脂基体的材料属性,进行单层复合材料属性的计算,其中纤维材料的纵向弹性模量 E_1 和横向弹性模量 E_2 分别为 25 800 MPa 和 26 500 MPa,平面切变模量 G_{12} 为 29 200 MPa,两个方向 ν_{12} 、 ν_{23} 上的泊松比分别为 0.28 和 0.32,复合材料基体的弹性模量 E_m 、切变模量 G_m 和泊松比 ν_m 属性数值分别为 3 790 MPa、1 450 MPa 和 0.3,纤维体积分数比为 60%^[15]。借助 Ansys 软件对吊装方案进行分析,

并对每个吊点按照实际情况进行模拟。其中梁单元、杆单元、非线性弹簧单元分别借助 Beam44, link10、combin39 单元进行模拟。同时对于该数值仿真模型中的大尺寸开口结构,采用三维实体网格 C3D8R 进行模型的离散,网格尺寸采用 5 mm 的种间距进行补种划分;吊点结构采用刚体单元对结构上的吊耳进行模拟,以限制吊点结构上表面的 6 个自由度^[16]。参数化部分,通过调用数据库参数,构建起吊装模型。

2 机械自动化吊装结构性能分析

碳纤维增强塑料对冲击和点载荷较为敏感,在吊装过程中,需保证吊装受力均匀,避免局部应力集中而导致材料破损。首先对所设计的设备吊装进行机械性能分析,其结果如图 4 所示。

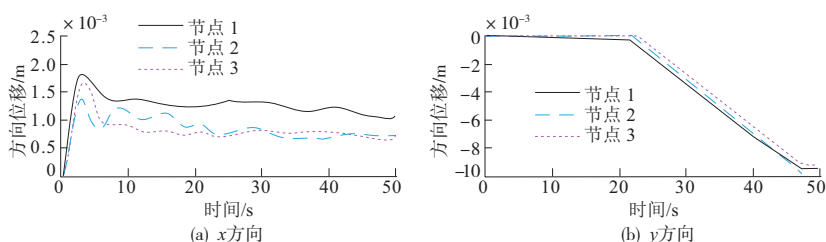


图 4 机械吊装设备的位移情况

图 4 中,所设计的吊装系统能有效减少其在维度方向上的位移。接触面上节点在 x 方向上的位移增幅变化较小,波峰位置大致位于 1.68×10^{-3} m,在 y 方向上的位移变化值在后期基本小于 0。上述结果表明,研究提出的设备能有效减少设备的位移,较为稳定。随后对本文提出的吊装结构应用前后的应力测试、稳定测试结果进行分析,效果如图 5 所示。

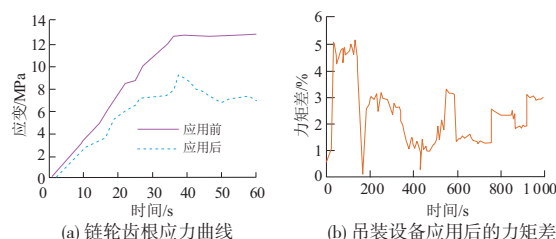


图 5 机械吊装结构设备的应用效果

图 5(a)中,应用设备前链轮齿根应力曲线值较高,最大值达到 13 MPa;而应用后的应力值显著下降并稳定为约 9 MPa,表明研究提出的吊装结构所承载的荷载能力有所提升。图 5(b)中,该吊装系统的力矩差均保持在 5%以内,平臂两侧的平衡性较好,能保证轴杆受力均匀,降低倾倒风险。随后设置吊点位置为 74.026 mm,对机械吊装结构自质量作用下的下板区域受力情况进行分析,结果如图 6 所示。

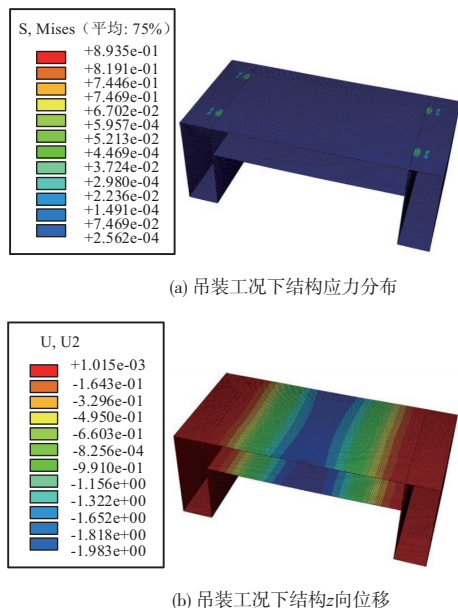


图 6 机械吊装结构自质量作用下的区域受力模拟情况

图 6 中,最优吊点位置为距 x 向端面 73.5 mm 处和距 y 向端面 82 mm 处,在该位置下的吊装工况最大位移为 1.983 mm,其变形主要集中于中部下层板,其中部始终处于弱约束状态,表明其受机械设备结构质量影响较大,可在今后加强对机械设备吊装时的受力分析。

3 结语

本文基于当前大开口盒型 CFRP 结构吊装需求,设计了机械设备吊装结构及自动化方案。结果表明,设计的机械吊装结构在接触面节点方向上的位移增幅变化较小,在 x 方向上的波峰位置大致位于 1.68×10^{-3} m,在 y 方向上的位移变化值在后期基本小于 0。系统所承载的荷载能力有所提升,且吊装系统的力矩差均保持在 5%以内,能保证轴杆受力均匀,降低了倾倒风险。基于数值简化模型的自动化分析手段能有效对机械吊装结构性能进行检验,加强对机械吊装结构设备的受力均匀关注以及复杂碰撞检测分析是今后研究的

重点。

参考文献:

- [1] 易茜,赵洋洋,唐家慧. 汽车 CFRP 结构件涂层去除机理研究[J]. 表面技术,2023,52(12):369-378,418.
- [2] 姜旭,毕凤阳,刘长喜,等. 基于响应曲面设计的短碳纤维增强塑料注塑成型工艺优化[J]. 合成树脂及塑料,2024,41(6):38-42.
- [3] 桂林景,李皓,周秩同,等. CFRP/合金构件抽芯铆接成型机制及钉套变形区参数优化[J]. 机床与液压,2024,52(17):176-184.
- [4] 陈静,莫莉花,房怡,等. 分层缺陷对 CFRP 层合板力学性能的影响[J]. 工程塑料应用,2024,52(4):122-127.
- [5] 姜国仙. 机械设备自动化制造过程资源优化调度方法设计[J]. 制造业自动化,2022,44(1):10-13,26.
- [6] 肖浩,纪晓宇,董奇峰,等. U 形节段梁自动化吊具设计与分析[J]. 起重运输机械,2023(6):43-49.
- [7] 包玮琛. SMA 纤维复合材料空心梁机械性能自动化建模分析[J]. 制造业自动化,2021,43(10):91-93,98.
- [8] 廖力,孟焯,张荣涛,等. 基于拓扑优化和正交分析的混合结构机械臂关节法兰设计[J]. 东华大学学报(自然科学版),2024,50(6):57-64.
- [9] 詹迪雷,李鹏南,邱新义,等. CFRP 制孔过程中轴向力自适应控制仿真及实验研究[J]. 机械科学与技术,2024,43(3):474-482.
- [10] 杨光,常晨曦. 伸缩臂吊在深海区墩台零星吊装中的应用技术[J]. 公路,2022,67(11):211-216.
- [11] 张振豪,李志强,王尧鸿,等. 沙漠砂混凝土框架结构的抗震性能有限元分析[J]. 石河子大学学报(自然科学版),2023,41(6):684-690.
- [12] 元振毅,魏方见,杨振朝,等. 低频振动刀具结构对 CFRP/TC4 叠层结构制孔质量影响[J]. 工具技术,2024,58(12):23-28.
- [13] SHI T N, LI Y L, QIU Y F, et al. Design and mechanical properties analysis of a novel CFRP tendons anchorage structure [J]. Alexandria Engineering Journal,2024,109:591-602.
- [14] 陆政,王力,邓文军,等. 小型履带变轨吊装车用碳纤维复材制备工艺优化[J]. 粘接,2024,51(11):85-87.
- [15] 张翀,崔惠泽,郭瑞鲁,等. 填料含量对高导热玻璃纤维增强环氧树脂复合材料性能的影响[J]. 绝缘材料,2024,57(11):93-97.
- [16] SOLIMAN E S M M. Modal and stress behavior for CFRP composite lifting lug [J]. World Journal of Engineering,2025,22(2):307-321.

收稿日期:2024-05-17