

DOI: 10.7672/sjgs2026020132

碳纤维拉索幕墙在大型机场航站楼中的应用与智能监测技术研究*

刘沃升¹, 林忠和¹, 刘思慧², 汤顺雄¹, 梁海波¹, 王磊¹, 李苹¹

(1. 中国建筑第八工程局有限公司, 云南 昆明 650000;

2. 广西南宁天海测绘科技有限公司, 广西 南宁 530000)

[摘要] 针对大型机场航站楼幕墙建设中传统钢拉索自重、热变形显著、施工周期长等难题,以昆明长水国际机场为背景,研究碳纤维拉索幕墙系统工程应用。通过建立 BIM 模型进行施工全过程模拟与优化,采用三维可调支撑系统与屋顶吊装系统实现精准安装,引入自平衡分级张拉与三角形撑杆组保障索网稳定,并集成基于光纤光栅传感器与 CNN-LSTM 深度学习的数字化监测系统,对索力、变形与蠕变趋势进行实时预警。工程应用表明,相比传统钢拉索支撑系统,碳纤维拉索幕墙系统可降低自重,提升施工效率,抗风压性能达到 $\pm 6\text{kPa}$ 。

[关键词] 机场;智能建造;幕墙;拉索;碳纤维;张拉;监测;数字化

[中图分类号] TU248

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)02-0132-04

Research on Intelligent Monitoring Technology and Application of Carbon Fiber Cable Curtain Wall in Large Airport Terminals

LIU Wosheng¹, LIN Zhonghe¹, LIU Sihui², TANG Shunxiong¹, LIANG Haibo¹,
WANG Lei¹, LI Ping¹

(1. China State Construction Eighth Engineering Bureau Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650000, China;

2. Guangxi Nanning Tianhai Surveying and Mapping Technology Co., Ltd., Nanning, Guangxi 530000, China)

Abstract: In view of the problems of heavy weight, significant thermal deformation and long construction period of traditional steel cables in the curtain wall construction of large airport terminals, the engineering application of carbon fiber cable curtain wall system is studied based on Kunming Changshui International Airport. The whole process of construction is simulated and optimized by establishing BIM model. The three-dimensional adjustable support system and the roof hoisting system are used to achieve accurate installation. The self-balanced grading tension and triangular strut group are introduced to ensure the stability of the cable network. A digital monitoring system based on fiber grating sensor and CNN-LSTM deep learning is integrated to provide real-time warning of cable force, deformation and creep trend. The engineering application shows that compared with the traditional steel cable support system, the carbon fiber cable curtain wall system can reduce the self-weight, improve the construction efficiency, and the wind pressure resistance performance can reach $\pm 6\text{kPa}$.

Keywords: airports; intelligent construction; curtain wall; cable; carbon fiber; tensioning; monitoring; digitalization

0 引言

昆明长水国际机场作为中国西南地区的重要

门户,其 T2 航站楼项目于 2024 年 9 月正式开工,按满足年旅客吞吐量 9 500 万人次、货邮吞吐量 100 万 t 设计。该航站楼采用“大港湾双分叉”六指廊构型,建筑总面积 73 万 m^2 ,高 69.2m,其独特的建筑设计和大跨度空间对幕墙系统提出了极高要求。

传统机场幕墙常采用钢拉索支撑结构,但存在

* 中建八局局级重大项目研发课题(2025-03-02);云南省住房和城乡建设厅科研开发项目(K00000219)

[作者简介] 刘沃升,工程师,E-mail:314878207@qq.com

[收稿日期] 2025-10-12

一定的缺陷,如钢材自重较大,导致对大跨度结构适应性不足;钢索热膨胀系数高,温度变形可达碳纤维的 15 倍;耐腐蚀性差,在机场大雾湿度环境中需额外进行防护处理。本文基于昆明长水国际机场 T2 航站楼幕墙工程,提出涵盖参数化建模、精准安装、分级张拉、面板装配及数字化监测的全过程施工方法,重点解决了碳纤维索网在大跨度条件下的精准成型、不同材料热变形协调、复杂交通枢纽中的施工组织及长期性能保障等关键技术难题。本研究将 CNN-LSTM 深度学习模型应用于碳纤维索网蠕变趋势预测,为类似大型交通枢纽幕墙工程提供了理论依据和实践参考。

1 工程概况

昆明长水国际机场 T2 航站楼包括 1 个主航站楼和 4 个新建指廊,如图 1 所示。航站楼采用“大港湾双分叉”六指廊构型,地上 6 层,结构层次分明,分别设有国际出发层、国内混流层、国际到达夹层、国际到达层(站坪层)、国内到达层和 GTC(综合交通中心,是机场与城市衔接的重要纽带,各类交通方式汇聚于此实现无缝换乘)快速出发层。T2 航站楼与 GTC 一体化布局,集合了航空、地铁、高铁、社会车辆、公交车、网约车、出租车、巴士多元化交通模式,形成“机场+地铁+高铁+高速”立体交通换乘体系,其中国际到达层、国内到达层和地面交通中心快速出发层分别与 GTC 无缝衔接,助力实现“零换乘”。



图 1 昆明长水国际机场 T2 航站楼效果

Fig. 1 Effect of Kunming Changshui International Airport T2 Terminal

本项目幕墙工程主要包括主航站楼南北立面大跨度曲面幕墙系统,最大单跨跨度达 42.5m,幕墙总面积约 8.5 万 m^2 。工程所在地属于山原地区,地形地貌较平原地区更复杂,年温差变化大,基本风压为 0.8kN/ m^2 ,这些环境因素对幕墙结构耐腐蚀性、温度适应性及抗风压性能提出了极高要求。

2 施工重难点分析

1) 大跨度与轻量化矛盾。本项目建筑面积 73 万 m^2 ,高度 69.2m,幕墙系统面积 8.5 万 m^2 ,最大跨度 42.5m,传统钢拉索(密度 7.85g/ cm^3)方案在此跨度下自重产生的初始预应力占比过高,导致

材料强度利用率低,且对主体结构产生大附加荷载。经初步计算,采用钢拉索方案自重将超过 12kg/ m^2 ,而碳纤维拉索密度仅为 1.6g/ cm^3 ,抗拉强度 $\geq 2400\text{MPa}$,可有效降低自重,充分发挥其高强、轻质的优势,并解决其模量相对较低带来的刚度问题,是本工程的首要难点。本工程采用的碳纤维拉索性能与验收严格遵循 GB/T 35156—2017《结构用纤维增强复合材料拉索》的规定。

2) 地形与气候条件复杂。T2 航站楼地处山原地区,地形地貌复杂,航站区陆侧与空侧站坪存在较大高差。同时,该地区年温差较大,温差可达 -5~32 $^{\circ}\text{C}$,温度变化对碳纤维索力影响虽小,但对支撑钢结构影响显著,这种不同材料间的热变形差异须在施工中被考虑和补偿。

3) 施工组织复杂。机场运营区域施工空间受限,且 T2 航站楼与 GTC 一体化布局,涉及多种交通方式的接口协调,无法搭设满堂脚手架。在保证机场正常运行的前提下,实现高空、大跨度安全与高效作业是较大挑战。

4) 长期性能与安全监测要求高。碳纤维材料在长期荷载作用下的蠕变特性、在风荷载作用下的疲劳性能及整个索网体系的稳定性是核心问题,需建立能够实时感知、预警甚至预测结构健康状态的数字化监测系统,是保障工程长期安全运营的关键。

3 关键施工技术

3.1 基于 BIM 的全过程施工模拟与精准测量定位

3.1.1 参数化 BIM 模型构建

利用 Revit+Dynamo 平台创建了包含建筑几何信息、材料属性、荷载条件的参数化 BIM 模型,该模型不仅是可视化的三维图纸,更是后续分析、模拟和施工管理的数字底板。针对航站楼“大港湾双分叉”六指廊的复杂造型,模型细致地表达了双曲面幕墙的几何特征,为后续索网形态分析提供了精确基础,如图 2 所示。

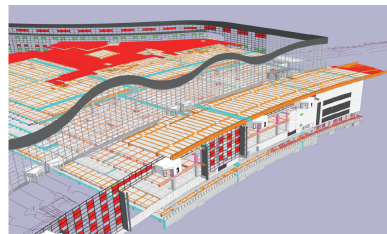


图 2 机场幕墙 BIM 模型

Fig. 2 BIM model of airport curtain wall

3.1.2 多工况施工仿真分析

将 BIM 模型导入有限元分析软件,模拟了施工全过程的多种工况,分析了 -20, 20, 50 $^{\circ}\text{C}$ 典型温度

场下的结构变形与应力分布,分析了 $0.8\text{kN}/\text{m}^2$ 风荷载作用下的受力性能,并分析了分级张拉过程中每步索力变化和形态演变。通过仿真分析提前发现了若干潜在干涉点和应力集中区域,优化了索网分格尺寸(最终确定为 $1.5\text{m}\times 1.5\text{m}$)和张拉顺序。

3.1.3 高精度三维测量放样

考虑到山原地区复杂地形条件,采用三维激光扫描+高精度全站仪的融合测量技术。首先,通过激光扫描获取已建成主体结构的点云模型,与设计 BIM 模型进行对比,复核土建偏差,如图 3,4 所示;然后,利用全站仪在现场放样出每个支撑点预埋件和索网锚固点的三维坐标,形成了精度达 $\pm 1.5\text{mm}$ 的控制网,为后续支撑结构和索网安装等复杂空间提供了精确基准。

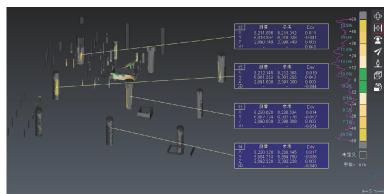


图 3 分项点云数据偏差

Fig. 3 Partial point cloud data deviation

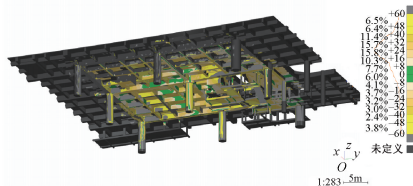


图 4 总体点云数据偏差(单位:mm)

Fig. 4 Overall point cloud data deviation(unit:mm)

3.2 支撑系统与碳纤维索网安装技术

3.2.1 三维可调支撑系统

为解决土建施工误差,创新性地设计了悬挑钢桁架+三维调节基座支撑系统。悬挑钢桁架根部与混凝土梁内预埋的不锈钢套筒可靠连接,悬挑长度控制在 6m 以内。在桁架端部设置三维调节基座,实现了水平向、竖向、进出向 $\pm 50\text{mm}$ 的调节量,吸收了前期土建误差,确保了支撑点位精准。

3.2.2 碳纤维索无损吊装工艺

为避免对脆性碳纤维索体造成刻痕或磨损,研发了专用吊装系统。在屋顶布置轨道式电动卷扬机,吊点间距严格控制在 8m 以内,以防止索体因自重产生过大挠曲。关键创新在于吊点处的超高性能混凝土(UHPC)支撑板和尼龙滑轮组,UHPC 具有极高的耐磨性和抗压强度,其上开设的索体定位槽道配合摩擦系数 ≤ 0.1 的尼龙滑轮,实现了索体

在吊装过程中的“软接触”与“零损伤”平移。

3.2.3 集成化防雷与抗风构造

昆明地区雷暴天气较多,防雷设计至关重要。在索网的关键节点处,嵌入式地安装了铜钨合金放电球作为防雷体系。铜钨合金具有高熔点、高导电性和耐电弧腐蚀性,当遭遇雷击时,放电球击穿空气间隙形成导电通路,将巨大电流通过引下线导入接地网(接地电阻经测试 $\leq 4\Omega$),从而保护了绝缘的碳纤维索体和幕墙面板。

在幕墙面板与建筑主体结构之间竖向间隔 15m 设置了变截面钢立柱,柱顶安装了黏滞阻尼器(阻尼系数为 $2000(\text{kN}\cdot\text{s})/\text{m}$),通过流体节流耗能原理,有效耗散约 70% 的风振能量,大幅度降低了强风作用下幕墙振动幅度和噪声。

3.3 自平衡分级张拉与形态控制技术

3.3.1 自平衡张拉结构

在拉索平面交叉点设置了由中心刚性节点和 3 个方向撑杆组成的三角形撑杆组,该构造在几何上为不变体系,将索网平面受力转化为空间受力,显著提高了索网面外稳定性,有效抑制了在不对称荷载或局部损伤下的连续倒塌风险。

3.3.2 智能分级张拉工艺

采用“分阶段、交替、补偿性”的张拉策略,全程采用液压伺服穿心式千斤顶和光纤光栅传感器进行同步控制。分级张拉与过程监测是保证大跨度幕墙施工安全与精度的核心工艺,第一阶段对主承重索进行初步张拉至设计预张力值的 50% ,持荷 15min ,使索体内部纤维充分伸展并消除初期非弹性变形;第二阶段安装全部竖向稳定索后,采用对角、对称的顺序,将所有拉索交替张拉至设计预张力值的 75% ,使用激光测距仪实时监测索网跨中挠度,确保变形不大于跨度的 $1/300$;第三阶段将所有拉索整体张拉至设计预张力值的 105% ,并持荷 2h ,此超张拉过程旨在加速部分材料的徐变(蠕变),之后卸荷至设计预张力值,从而有效减少工程投入使用后的长期徐变量。在整个过程中严格控制相邻索段之间的索力差 $\leq 5\%$,节点位移差 $\leq 3\text{mm}$,保证了索网形态的均匀与平滑。

3.4 面板精准安装与数字化监测技术

3.4.1 夹具精调与面板安装

在张拉完成的索网上,采用激光投影仪投射出每块玻璃面板的分格线(精度 $\pm 0.5\text{mm}$)。安装时使用特制的四爪不锈钢夹具,并通过精密仪器将夹具的每个爪臂与索体的夹角调节至 $89^\circ \pm 0.5^\circ$,确保夹紧力垂直作用于索体,避免产生有害的横向弯矩。

面板安装采用真空吸盘车+六自由度机械臂+自平衡吊篮的人机协作模式,机械臂负责将面板(由真空吸盘车运输)粗定位至安装点附近,最后由吊篮内的工人进行微调,将面板四角的安装角码精准嵌入夹具的卡槽内。安装时预留竖向 2mm、横向 3mm 的变形余量,以适应结构在温度和风荷载作用下的微小变形。

3.4.2 全生命周期数字化监测系统

1)感知层。在约 30%的拉索节点处植入了光纤光栅传感器(量程 0~5 000 $\mu\epsilon$),形成了“智慧拉索”。该传感器以光信号为载体,抗电磁干扰能力强,耐久性好,可直接测量索体微应变,进而换算为索力。同时,在结构关键部位布置激光位移雷达网,非接触式地扫描构建整个幕墙曲面的实时变形图谱。

2)数据层与预警层。所有传感器数据通过物联网关汇集至云平台,平台的核心是基于 CNN-LSTM 的混合深度学习模型,CNN(卷积神经网络)用于提取传感器数据在空间维度上的特征,LSTM(长短期记忆网络)用于学习数据在时间维度上的长期规律。该模型通过对历史数据和实时数据的学习,能够高精度地预测索网在未来一段时间内的蠕变趋势和性能退化。当任何监测指标(索力、位移)或预测结果超过预设阈值时,系统会通过短信、邮件和平台告警中心自动发出预警,实现从“事后处理”到“事前预警”的转变。

4 实施效果与性能分析

4.1 质量与精度

实施过程中,经第三方检测,索网索力偏差控制在设计值的 $\pm 3\%$ 以内,满足规范要求;幕墙面板平整度及接缝宽度均 $< 1.5\text{mm}$,整体曲面平滑流畅,符合建筑审美要求。

4.2 工期与安全

由于取消满堂脚手架,采用模块化、机械化的安装工艺,总工期比传统钢索方案缩短约 32d,有效降低了因施工对机场运营造成的影响,整个施工过程中未发生安全事故。

4.3 性能验证

幕墙通过严格的物理性能测试,其抗风压性能达到 $\pm 6\text{kPa}$,保持完好无残余变形;水密性、气密性均达到国标最高等级。集成的数字化监测系统运行稳定,已成为该机场智慧运维平台的重要组成部分,为幕墙长期安全使用提供了坚实数据支撑。

5 结语

1)碳纤维拉索替代传统钢拉索,在大型机场航

站楼幕墙应用中具有显著技术优势,可降低结构自重,减少温度变形,并大幅度提高耐腐蚀性能。

2)提出的自平衡分级张拉工艺结合三角形撑杆组构造,有效保障了索网形态精准控制与稳定性,将索力偏差控制在 $\pm 3\%$ 以内,节点位移差 $\leq 3\text{mm}$ 。

3)集成化的数字化监测系统基于光纤光栅传感器与 CNN-LSTM 深度学习模型,实现了对幕墙系统索力、变形与蠕变趋势的实时监测与预测预警,为大型公共建筑幕墙全生命周期安全管理提供了解决方案。

参考文献:

- [1] 刘芝宾. 斜拉索防护的国内外发展近况[J]. 江西建材, 2016(15): 132.
LIU Z B. Recent development of stay cable protection at home and abroad[J]. Jiangxi building materials, 2016(15): 132.
- [2] 王安妮, 刘晓刚, 岳清瑞. 碳纤维复合材料拉索的锚固体系及服役性能研究进展[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(9): 45-54.
WANG A N, LIU X G, YUE Q R. Research progress of carbon fiber reinforced polymer composite cable: anchorage system and service performance [J]. Journal of building structures, 2022, 43(9): 45-54.
- [3] 朱万旭, 凌云翔, 刘鹏, 等. 玻璃幕墙外置式光纤光栅索力传感器的设计与应用[J]. 光通信技术, 2025, 49(5): 72-77.
ZHU W X, LING Y X, LIU P, et al. Design and application of external fiber Bragg grating cable force sensor for glass curtain wall [J]. Optical communication technology, 2025, 49(5): 72-77.
- [4] 潘宁, 朱茂茂, 黄亮, 等. BIM 技术在碳纤维立面索膜结构深化设计与施工中的应用[J]. 土木建筑工程信息技术, 2024, 16(2): 59-63.
PAN N, ZHU M M, HUANG L, et al. Application of BIM technology in the deepening design and construction of carbon fiber facade cable membrane structure [J]. Journal of information technology in civil engineering and architecture, 2024, 16(2): 59-63.
- [5] 王钧. BIM 数字化施工技术在交通枢纽工程中的应用研究[J]. 施工技术(中英文), 2025, 54(10): 12-16.
WANG J. Research on application of BIM digital construction technology in transportation hub project [J]. Construction technology, 2025, 54(10): 12-16.
- [6] 姚山, 杨忠平, 葛文杰, 等. 超高性能混凝土工作及力学性能分析[J]. 建筑结构, 2023, 53(2): 142-147.
YAO S, YANG Z P, GE W J, et al. Analysis on working and mechanical properties of ultra-high performance concrete [J]. Building structure, 2023, 53(2): 142-147.
- [7] 陈建康. 超高性能混凝土(UHPC)力学性能研究进展[J]. 中国科学:物理学 天文学, 2024, 54(5): 148-167.
CHEN J K. Advances in the mechanical properties of ultra-high performance concrete (UHPC) [J]. Scientia sinica (physica, mechanica & astronomica), 2024, 54(5): 148-167.