

文章编号: 1674-8190(2023)02-152-08

5G技术在全机疲劳强度试验中的应用研究

刘冰, 张建锋, 牧彬

(中国飞机强度研究所 全尺寸飞机结构静力/疲劳航空科技重点实验室, 西安 710065)

摘要: 随着航空装备需求的不断发展, 新材料、新工艺不断涌现, 飞机结构强度试验与验证技术面临诸多新的挑战。作为网络化与智能化关键手段之一, 5G技术有利于推动强度试验技术的创新与变革。首先, 简要介绍当前全尺寸飞机结构强度试验技术现状及发展趋势, 同时深入研究全机强度试验未来发展需求, 提出基于5G技术的全机结构强度试验新模式; 然后, 基于5G技术在全机强度试验技术发展中的特点和优势, 构建试验核心场景与5G技术生态关联矩阵, 规划基于5G技术的典型试验场景; 最后, 以某型机疲劳强度试验为平台进行试验巡检和监测场景中基于5G技术的试验系统研制和应用验证。结果表明: 基于5G技术的智能化设施能够显著提升试验水平, 对全机强度试验智能化发展具有重要意义。

关键词: 疲劳试验; 全尺寸飞机; 5G技术; 损伤巡检; 智能化

中图分类号: V216.3

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2023.02.18

Application research on 5G technology in fatigue test of full-scale aircraft

LIU Bing, ZHANG Jianfeng, MU Bin

(Aviation Technology Key Laboratory of Full Scale Aircraft Structure Static and Fatigue Test, Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China)

Abstract: With the development of aircraft demand, and emerging of new material and new process, the test and validation technology of aircraft structure strength will also face new challenges. As the key measures of networking and intelligentization, 5G technology will promote the innovation and reform of strength test technology effectively. Firstly, the present situation and development trend of structural strength test technology for full-scale aircraft is introduced briefly, and one new idea of structure strength test for full-scale aircraft based on 5G technology is proposed through the research of the demand of full-scale aircraft strength test. Secondly, the incidence matrix of test and 5G technology is formulated through the analysis of advantages and features of 5G technology for strength test of aircraft, the typical test scenarios based on 5G technology are planned. Finally, the development and application of inspection and monitor system based on 5G technology is carried out for fatigue test of an aircraft. The results show that the intelligent facilities based on 5G technology can improve the level of test significantly, which is of important significance for intelligentization of test.

Key words: fatigue test; full-scale aircraft; 5G technology; damage inspection; intelligentization

收稿日期: 2022-06-12; 修回日期: 2022-10-23

通信作者: 刘冰, liubing20002000@163.com

引用格式: 刘冰, 张建锋, 牧彬. 5G技术在全机疲劳强度试验中的应用研究[J]. 航空工程进展, 2023, 14(2): 152-159.

LIU Bing, ZHANG Jianfeng, MU Bin. Application research on 5G technology in fatigue test of full-scale aircraft[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2023, 14(2): 152-159. (in Chinese)

0 引言

航空装备的研制作为整个航空产业的核心,主要包括设计、制造、试验和试飞四大环节,全尺寸飞机结构强度试验作为试验环节中最重要测试科目之一,对提高飞机结构设计效率和确保结构安全具有重要意义^[1]。作为一个庞大复杂的系统工程,全机强度试验涵盖静力、疲劳等试验项目,试验系统众多,数据类型繁杂。

为持续提升飞机强度试验的技术能力,国内外开展了大量研究,在全机强度试验整体方案^[2-3]、承载系统^[4]、支持系统^[5-6]、载荷处理^[7-8]、加载方案^[9-10]、试验控制^[11]及数据分析^[12-13]等领域取得了多项成果。随着飞机新型号的不断研制,对全机试验的周期和质量要求越来越高,试验全流程中数据的高效利用作为一种有效手段,可实现试验实时管控,进而满足试验的精准、可靠及高效实施等核心需求。

5G 技术作为新一代通讯技术,在海量数据高速通信领域有着无可比拟的优势,将 5G 无线通信应用到全机强度试验,可针对性提升试验各环节数据的采集和传输能力,加强试验飞机、各试验系统之间的信息传递与关联,服务于试验管控、设计、安装、实施及评估等流程,促进全机强度试验信息化、智能化发展。

作为先进的通信技术,国内外十分重视 5G 技术对产业升级、数字发展及科技创新的引领作用,美国发布了《5G 风险与机遇》等多份报告,并在其空军基地及飞机制造公司开展了较多 5G 技术研究和开发工作。同时 5G 技术作为信息互联的“高速公路”,是世界各国发展高新技术和保障国家安全的重要手段,美、欧、日、韩及东南亚等国家和地区均将其视为国家信息化发展的重要支撑^[14-16]。国内 5G 技术在相关政策支持下取得了较快发展,已在多个行业取得了成功应用^[17-20],在国防领域也组建了多个 5G 技术应用产业联盟。在航空装备研制领域,国内也针对机载、制造开展了基于 5G 技术相关研究^[21-22],但是研究范围和成果较少,尚未涉及试验领域。全机强度试验作为工业装备中最复杂的结构测试类项目,系统众多,数据标准不统一,整个流程场景较为分散,多系统间数据采集

还涉及时间同步等问题,与 5G 技术融合还存在诸多技术挑战。

针对上述技术挑战,本文探讨全机强度试验技术发展趋势和未来需求,提出 5G 技术赋能全机强度试验新模式,并基于试验全流程开展 5G 技术在试验中的关键应用匹配研究;针对全机强度试验中疲劳试验项目巡检和监控环节,基于某型飞机平台研制并验证相关试验系统。

1 全机强度试验技术未来需求

为了提高飞机的安全性、经济性、维护性、环保性等性能,降低直接运行成本,未来飞行器的发展将呈现超高速设计布局、设备系统高集成化和智能化以及大量使用新结构新材料等特点,会对研制过程中强度试验验证技术提出更高要求。全机强度试验的产品和核心成果就是试验数据,主要包括载荷、结构响应数据和健康监测数据,是飞机结构强度性能的重要指标。因此,全机强度试验必将在复杂环境载荷精准施加、复杂结构支持边界精准模拟、试验分布式控制、全状态响应采集、试验数据智能评估等领域开展持续研究,并基于各领域数据特征融合数字化技术,构建更加完善的试验技术体系。某大型客机全机强度试验系统如图 1 所示。

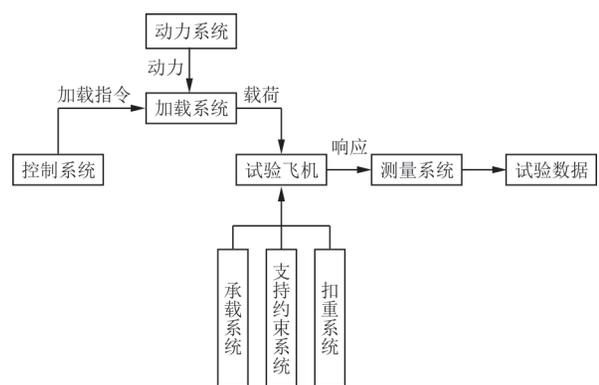


图 1 全机强度试验系统

Fig. 1 Strength test system of full-scale aircraft

目前,国外先进飞机的研制过程普遍采用数字化技术,在设计、制造、试验和试飞全流程已基本形成数字化模式。国内飞机数字化研制特别是试验环节仍处于起步阶段,5G 技术的领先为全机强度试验数字化发展提供了机遇,为加速试验数

据“采、传、算”提供了有效的技术手段。5G 技术在全机强度试验中的应用,首要解决的核心问题包括试验全状态数据采集难、实时反馈慢等难点。因此,如何实现试验大规模数据的高效、可靠传输共享,建立数字化协同的设计模式,赋能试验数据采集、智能评估将是全机强度试验的核心需求之一。

2 5G 技术在全机强度试验中的应用

2.1 全机强度试验新模式

针对航空装备研制领域,飞机强度试验中各类试验系统和结构响应数据的监控是核心,但是这些数据标准不一、规模大,同时存在复杂的电磁环节和紧凑的钢结构干扰。为实现多源数据的实时分析与应用,高效可靠的“采、传、算”必不可少,因此复杂试验环境下的试验网络覆盖、试验海量数据高速传输、多源试验数据传输时统等是必须突破的关键技术。

5G 技术的应用场景主要包括 eMBB、mMTC 和 URLLC,这几种特性覆盖了广连接、高带宽、低延时等传统应用需求,可以有效满足复杂工业环境下的各类设备系统之间数据高质量传输需求。通过 5G 试验专网的搭建,改造试验设备实施,研制基于 5G 网络传输的试验系统,通过 5G 无线网络实现多设备、多系统、多平台的无线互联、实时交互和状态定量感知。

5G 技术的赋能可为全机强度试验设计、安装、实施及评估等全流程的数据采集、判断、评估及数字化表征提供信息化支撑,打造全新的全机强度试验模式,推动强度试验向智能化方向发展。

全机强度试验新模式主要包括以下 4 个方面。

(1) 全机强度试验全状态的飞机结构响应实时感知;

(2) 基于神经网络及深度学习等人工智能手段,实现多维数据智能判断;

(3) 融合物理试验与虚拟试验结果,实现试验数据的实时对比分析、多层次评估;

(4) 实时展示试验件状态及各类结构响应关联数据,实现关键参数云图可视化展示。

2.2 基于 5G 技术的全机强度试验典型场景规划

5G 技术通过将三大特征与各行业的工作流程和需求深度结合,方可得到针对性的技术需求匹配,实现信息化赋能。基于 5G 技术的全机强度试验典型场景规划总体思路是解耦全机强度试验各个环节,通过对试验各场景中数据的无线传输需求分析,在全机强度试验管控、设计、安装、实施及评估等环节中针对性开展数据基于 5G 技术的“采、传、算”研究,实现 5G 技术与传统强度试验的融合。

高可靠的 5G 网络是全机强度试验各场景信息化能力提升的基础,在极复杂的试验环境下,通过建设一张覆盖室内、室外及试验现场所需的 5G 网络,并基于 5G 网络切片技术构建多个逻辑独立的虚拟网络,最终适应试验中各种特定的应用场景。

5G 网络大带宽:试验设计(协同设计模型数据)、试验实施(试验夹具协同安装、试验结构损伤巡检识别、远程监控、故障诊断及机器视觉形变测量数据)等环节都对试验模型、高清数据有着较高要求,数据量均达到千兆字节级别,通过高精度试验数字模型及数据的无线传输技术研究,可有效提升 20% 的试验设计及实施效率。

5G 网络低时延:试验评价环节(试验结构响应数据分布式采集、形变测量、多源数据融合分析、远程监控等应用)需要瞬间完成以保证试验安全,通过试验数据传输毫秒级的空口/端对端时延技术,将采集的数据实时高可靠传输至数据服务器,可提升 50% 的试验数据分析效率。

5G 网络广连接:实验室试验设施管控(设备设施数据)、试验安装(试验各类系统/夹具安装数据)及试验响应分布式测量都包含大规模的数据采集和定位任务,如实验室设施有上百种类型,通过 5G 环境下试验海量传感器泛在互联及精准定位技术研究,能够有效获取一定区域内多类型设备设施 and 大规模的试验系统数据,可提高 20% 的试验实施和智能决策效率。

基于上述分析,通过 5G 三大特征与全机强度

试验各环节数据采集、传输及应用需求分析,得到典型场景与5G技术匹配矩阵如表1所示。

表1 试验场景与5G技术匹配矩阵
Table 1 The matching matrix of test and 5G technology

5G特征试验场景	大带宽	低时延	广连接	网络架构
复杂环境下5G专网稳定覆盖				✓
实验室广物联及智能管控			✓	✓
试验多源数据融合与全状态监控	✓	✓		✓
试验协同设计/安装	✓			✓
试验机结构损伤巡检与识别	✓	✓		✓
试验远程监控与故障诊断	✓	✓		✓
机器视觉形变非接触测量	✓	✓		✓
分布式应变无线测量		✓	✓	✓

3 基于5G技术的全机强度试验典型系统研究及验证

以某型飞机全机疲劳强度试验为平台,开展5G技术在试验中的应用实践,进行试验现场5G试验专网搭建,并针对全机疲劳强度试验巡检和监测环节分别研制基于5G+AGV(自动导向车)的试验机损伤自动化巡检与智能识别及全机试验多源数据实时融合及全状态监测等系统,进行系统功能相关验证。

3.1 复杂试验环境5G网络搭建

5G网络信号的传输本质上是利用电磁波携带信息的能力,当信号质量变差、信噪比下降时,其传输速率将呈对数下降。相比其他5G应用场景,飞机强度试验环境较为苛刻,主要表现在:复杂、密集的承载结构以及实验设施对信号形成阴影衰落;飞机自身结构、各种材料对信号形成阴影衰落;人员走动时,人体对信号形成阴影衰落。此外大规模的试验数据上行传输,数据的高可靠实时采集也对网络提出了更高的要求。

针对上述需求结合5G自身特点,提出围绕试验件的高密度立体组网方案,在试验承载框架边缘处布置信号小站,制定试验现场信号小站立体式冗余覆盖和信号精准降干扰方案。试验现场共计布置36个信号小站,分布在四层试验框架上,保

证试验承载框架内80%空间到信号小站为直视径,同时信号源发射角度限制为 60° ,可有效降低相邻小站信号干扰20 dB。

基于上述方案,实现了复杂试验环境多遮挡情况下在满足多终端、多射频发射接受源及低干扰的网络深度覆盖,目前各系统数据传输稳定,试验数据上行速率均值110 Mb/s。试验承载框架5G信号小站布置如图2~图3所示。

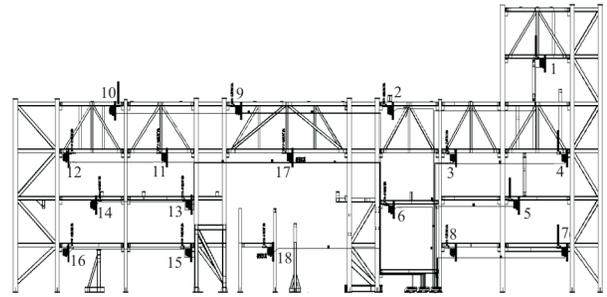


图2 试验区域5G小站安装位置示意图

Fig. 2 Location diagram of 5G signal station of test zone



图3 试验区域5G小站实景图

Fig. 3 The real image of 5G signal station of test zone

3.2 试验机损伤自动化巡检与智能识别系统

当前试验中飞机结构损伤检测以人工为主,存在检测精度不高、分散性大及部分关键结构不可达等问题,检测实时性不高。

针对上述需求开展相关研究,结合5G无线传输技术,制定针对飞机舱内结构自动化巡检方案,开展飞机结构损伤视觉检测、巡检路径规划与系统设计、损伤检测数据传输架构与数据运营平台、基于机器学习的损伤智能记忆与辨识等技术研

究,研制基于5G网络的试验机损伤自动化巡检与智能识别系统,开发视觉检测模块、巡检模块和损

伤识别模块,解决舱内结构实时检测及数据实时、高可靠无线传输问题,总体方案如图4所示。

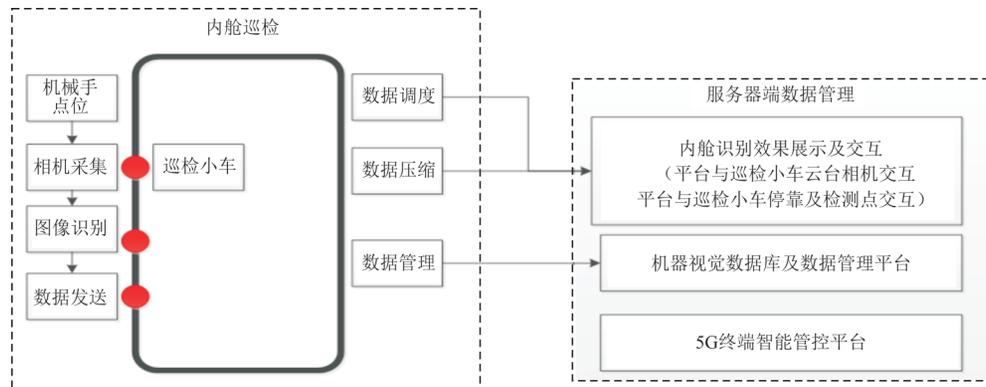


图4 基于5G的试验机损伤自动化巡检系统方案

Fig. 4 Automatic inspection system of damage for aircraft based on 5G technology

视觉检测模块设计:采用3D与2D超高分辨率相机组合方式,通过高清图像融合和高帧率的3D点云数据实现试验机结构损伤和形变检测,同时集成5G网络传输模块,依托5G的上行大带宽传输,实现检测图像及计算过程实时交互。视觉系统5G网络传输参数如表2所示。

位置、类型、大小等详细信息的能力。

表2 视觉系统5G网络参数

Table 2 5G network parameters of vision system

参数名称	像素	数据容量/Mb	相机数目	压缩数据/Mb	传输速度/(Mb·s ⁻¹)
2D相机	2 560×832	320	1	—	80
3D相机	5 430×3 648	480	2	32	32

巡检模块设计:巡检模块主要由巡检AGV小车、巡检导轨和供电系统组成,用于飞机舱内结构表面损伤自动化检测,具有1套六自由度机械臂,内舱导轨采用U型双导轨,可以支撑小车运动和检测站点定位,通过5G无线网络控制,具有可移动、柔性、高精度、高效率等特征,巡检模块具体实物如图5所示。



图5 试验损伤自动化巡检系统应用展示

Fig. 5 Application of automatic damage inspection system

损伤智能识别模块设计:采用深度学习Caffe架构开展损伤识别深度学习算法开发,包括layer层算法优化和模型结构裁剪,结合模型训练和预测提升算法效果。通过对不同损伤类型的各种形式信息进行处理/分类以及5G边缘技术,训练AGV巡检系统视觉检测模块,使得各类AGV巡检摄像头通过学习与记忆,逐步具有自动辨识损伤

基于某型飞机开展试验机损伤自动化巡检与智能识别系统的验证工作,试验中系统在滑轨上依据规划检测点位和路径开展巡检,验证内容包括无线通信效果、信号延时、结构定位、图片采集、云台监控、巡检速度、自主巡检安全可控及应急报警等功能,所述验证内容均取得成功,效果良好,通过了全轨道自主运行,可覆盖舱内80%的疲劳薄弱区域。此外系统可实现试验中舱内增压情况下结构的损伤实时检测和数据无线传输,每周巡检时间40 min,提升巡检效率50%,采用的高清视觉模块裂纹识别精度0.2 mm,可显著降低损伤漏检率。结构损伤自动化巡检运行控制界面如图6所示。

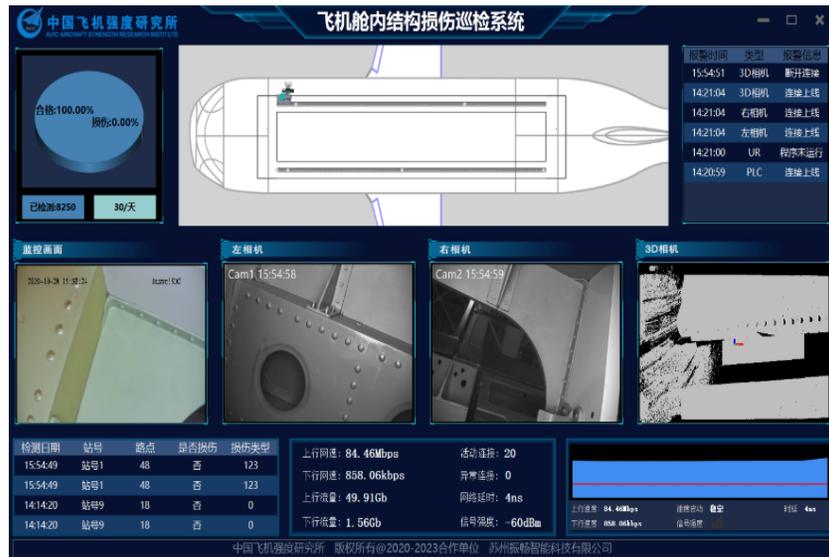


图 6 试验损伤自动化巡检系统控制界面

Fig. 6 Interface of automatic damage inspection system

3.3 全机试验多源数据实时融合及全状态监测系统

全机疲劳强度试验监测环节中试验数据源包括视频、力、位移、应变、气压等多种类型^[23],数据格式及数据传输标准不统一,只能独立监控和分析,监测效率和能力都亟需提升。

针对上述需求,基于实验室统一 5G 网络标准和低时延特征,以试验视频监控软件为基础平台,研制试验多源数据实时融合及全状态监测系统,解决多类型试验系统数据的融合和时域统一问题,实现试验控制系统、测量系统、监控系统和健康监测等测试系统数据的同步及可视化。

系统硬件主要包括视频存储平台、分析服务器、消息服务器、5G 相机等硬件设施,并通过与试验系统互联读取试验运行数据,系统软件则包括数据融合、全景拼接、模型关联及安全监控等,通过多相机视角融合和系统数据叠加,可实现实验室立体化监控覆盖。系统整体方案如图 7 所示,系统软件架构如图 8 所示。

数据融合及监测系统中的数据融合模块可进行数据间关联构建和结构化存储,并将读入的试验运行数据与试验视频监控平台对接,依据试验机结构建立试验数据与视频监控数据的关联关系。系统可通过试验业务数据提取与融合,实现试验数据如加载系统、测量系统、监控系统和健康监测等测试系统的时域同步,具备全状态监控能力。试验数据融合流程如图 9 所示。

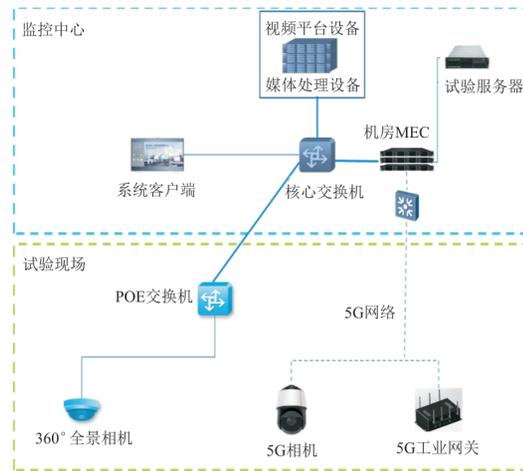


图 7 数据融合及监测系统整体方案

Fig. 7 The scheme of data fusion and monitoring system

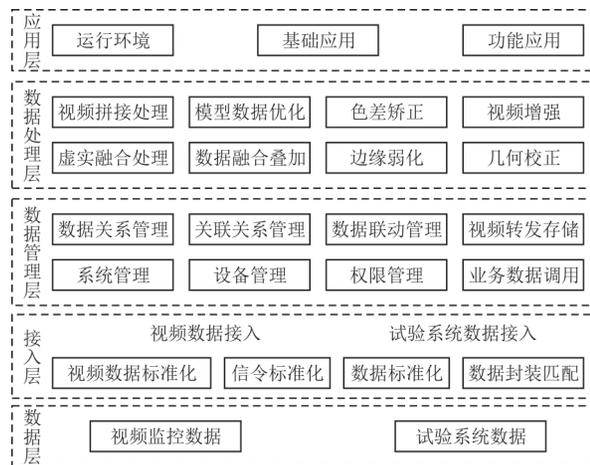


图 8 数据融合及监测系统软件架构

Fig. 8 The software architecture of data fusion and monitoring system

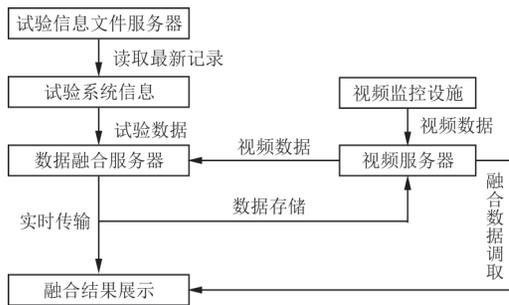


图 9 多源数据融合流程图

Fig. 9 The flow chart of multi-source data fusion

上述全机试验多源数据实时融合及全状态监测系统已应用于某型号全机疲劳强度试验中,基于实验室 5G 网络实现了试验运行数据和视频监控数据的标准化传输及实时融合可视化,初步具备了试验现场多状态的同步展示功能,其中视频监控图像覆盖了试验现场 80% 关键区域的监测,系统操作延时和运行数据展示延时均优于 1 s,显著提升了试验决策效率。此外系统可基于 5G 试验专网时域统一同步存储试验视频数据和试验运行数据,试验完成后可实时提取任一时刻试验现场全状态数据,提升了试验事后分析效率。试验现场系统监测软件画面如图 10 所示。

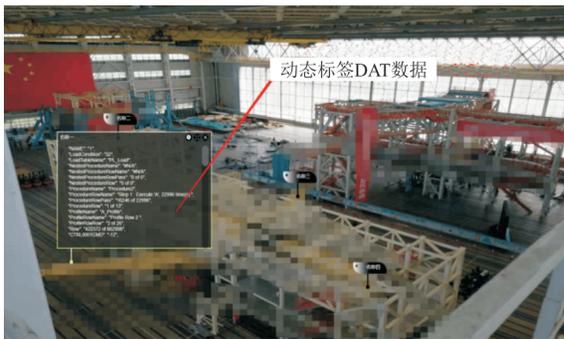


图 10 全机试验数据融合及监测系统画面

Fig. 10 The monitor and fusion effect of test data on full-scale aircraft

4 结 论

(1) 本文开展了 5G 技术在全机疲劳强度试验中的应用与验证,搭建了 5G 试验专网,突破了复杂试验环境 5G 网络覆盖、试验海量数据超级上行、多源试验数据 5G 传输时延等关键技术,为试验网络化发展奠定了坚实的基础。

(2) 基于 5G 试验专网,针对试验巡检和监测环节研制了基于 5G 技术的试验系统设施,相关设备有效解决了试验各类数据高可靠、无线采集、传

输和计算问题,提升了试验效率和安全,为 5G 技术与全机强度试验全流程融合发展提供一种有效的技术方案。

未来,基于 5G 技术的全机强度试验系统将会显著提升全机强度试验网络化水平,为结构强度试验与型号设计的协同能力提升提供技术支撑,助力传统的强度试验向面向航空装备全生命周期的强度试验数字孪生转变。

参 考 文 献

- [1] 中国飞机强度研究所. 航空结构强度技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2013.
Aircraft Strength Research Institute of China. Aircraft structure strength technology [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2013. (in Chinese)
- [2] 强宝平. 全尺寸飞机结构试验技术[J]. 航空科学技术, 2012(6): 10-13.
QIANG Baoping. Evaluation of full scale aircraft structure strength test technology [J]. Aeronautical Science & Technology, 2012(6): 10-13. (in Chinese).
- [3] 郑建军, 唐吉运, 王彬文. C919 飞机全机静力试验技术 [J]. 航空学报, 2019, 40(1): 210-221.
ZHENG Jianjun, TANG Jiyun, WANG Binwen. Static test technology for C919 full-scale aircraft structure [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019, 40(1): 210-221. (in Chinese)
- [4] 王育鹏, 裴连杰, 李秋龙, 等. 新一代战斗机全机地面强度试验技术[J]. 航空学报, 2020, 41(6): 342-354.
WANG Yupeng, PEI Lianjie, LI Qiulong, et al. Full-scale aircraft strength test technology of next generation fighter [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(6): 342-354. (in Chinese)
- [5] 刘冰. 大型飞机全机静力试验静定支持与约束技术及其应用[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(11): 286-291.
LIU Bing. Research and application of statically determinate support and restraint technology for static test on large aircraft [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(11): 286-291. (in Chinese)
- [6] 郭琼, 夏峰, 刘冰, 等. 全尺寸飞机结构静力试验约束点载荷计算及应用[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(19): 7934-7940.
GUO Qiong, XIA Feng, LIU Bing, et al. Calculation and application of restraint load in full-scale aircraft static test [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(19): 7934-7940. (in Chinese)
- [7] 刘冰, 张贇, 刘玮, 等. 基于误差控制的大展弦比机翼静强度试验载荷处理技术[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(30): 356-360.
LIU Bing, ZHANG Yun, LIU Wei, et al. Load process technology based on error control for static strength test of high-aspect ratio wing [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(30): 356-360. (in Chinese)

- [8] 王孟孟, 刘冰, 王高利. 大型飞机起落架载荷修正方法研究[J]. 应用力学学报, 2021, 38(2): 708-714.
WANG Mengmeng, LIU Bing, WANG Gaoli. Research on load modification method of large aircraft landing gear [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2021, 38(2): 708-714. (in Chinese)
- [9] 刘玮, 郑建军. 大型客机结构试验主起落架随动加载技术[J]. 航空科学技术, 2020(12): 42-47.
LIU Wei, ZHENG Jianjun. Self-adaptable loading technique for main landing gears in structural test of large airliner [J]. Aeronautical Science and Technology, 2020(12): 42-47. (in Chinese)
- [10] 刘玮, 滕青, 刘冰. 基于地板结构的机身双层双向加载技术[J]. 航空学报, 2018, 39(5): 136-143.
LIU Wei, TENG Qing, LIU Bing. Double-deck bi-direction loading technology based on airliner cabin floor structure [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(5): 136-143. (in Chinese)
- [11] 刘冰, 王孟孟, 郑建军, 等. 大型飞机主起落架连接区静力试验误差控制技术[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(10): 387-392.
LIU Bing, WANG Mengmeng, ZHENG Jianjun, et al. Error control technology of static test for the connection area of main landing gear based on large aircraft [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(10): 387-392. (in Chinese)
- [12] 杨凡. 基于有限元模型的管道动力学分析[J]. 航空科学技术, 2019(6): 39-44.
YANG Fan. Dynamics analysis of pipeline using finite element method [J]. Aeronautical Science and Technology, 2019(6): 39-44. (in Chinese)
- [13] 张赐宝, 李涛, 滕申科, 等. 基于应变响应叠加原理的飞行载荷测量建模研究[J]. 应用力学学报, 2018, 35(1): 22-27.
ZHANG Cibao, LI Tao, TENG Shenke, et al. Research on modeling of flight load measurement based on strain response superposition principle [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2018, 35(1): 22-27. (in Chinese)
- [14] 任泽平, 连一席, 陈栋熙. 5G时代: 新基建中美决战新一代信息技术[J]. 发展研究, 2020(8): 21-36.
REN Zeping, LIAN Yixi, CHEN Lixi. 5G era: new infrastructure China and the U. S. battle a new generation of information technology [J]. Development Research, 2020(8): 21-36. (in Chinese)
- [15] 刘畅. 东南亚国家发展5G技术的现状与前景[J]. 南亚东南亚研究, 2021(3): 61-67.
LIU Chang. Current situation and prospect of developing 5G technology in southeast Asia countries [J]. South and South-east Asian Studies, 2021(3): 61-67. (in Chinese)
- [16] 王丹娜. 5G之争: 军备竞赛、经济博弈亦或政治操纵[J]. 中国信息安全, 2019(2): 12-15.
WANG Danna. 5G battle: arms race, economic game or political manipulation [J]. China Information Security, 2019(2): 12-15. (in Chinese)
- [17] 王国法, 杜毅博. 煤矿智能化标准体系框架与建设思路[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(1): 1-9.
WANG Guofa, DU Yibo. Coal mine intelligent standard system framework and construction ideas [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(1): 1-9. (in Chinese)
- [18] 王毅, 陈启鑫, 张宁, 等. 5G通信与泛在电力物联网的融合: 应用分析与研究展望[J]. 电网技术, 2019, 43(5): 1575-1585.
WANG Yi, CHEN Qixin, ZHANG Ning, et al. Fusion of 5G communication and the ubiquitous electric Internet of Things: application analysis and research prospect [J]. Power System Technology, 2019, 43(5): 1575-1585. (in Chinese)
- [19] 史彦军, 韩俏梅, 沈卫明, 等. 智能制造场景的5G应用展望[J]. 中国机械工程, 2020, 31(2): 227-236.
SHI Yanjun, HAN Qiaomei, SHEN Weiming, et al. 5G application of Internet manufacturing scenarios [J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(2): 227-236. (in Chinese)
- [20] 张平, 陈昊. 面向5G的定位技术研究综述[J]. 北京邮电大学学报, 2018, 41(5): 1-12.
ZHANG Ping, CHEN Hao. A survey of positioning technology for 5G [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018, 41(5): 1-12. (in Chinese)
- [21] 刘海宁, 张少卿, 鄂思宇. 基于5G技术的航空机载平台无线通信应用研究[J]. 航空学报, 2021, 43(2): 459-467.
LIU Haining, ZHANG Shaoqing, E Siyu. Research on the application of wireless communication of aviation airborne platform based on 5G technology [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 43(2): 459-467. (in Chinese)
- [22] 张岚岚. 5G技术在航空制造领域的应用研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2019(3): 27-31.
ZHANG Lanlan. Research on application of 5G technology in aviation manufacturing [J]. Civil Aircraft Design and Research, 2019(3): 27-31. (in Chinese)
- [23] 夏峰, 牟珊珊. 并行试验管理技术在民用飞机全机疲劳试验中的应用[J]. 航空工程进展, 2019, 10(3): 389-395.
XIA Feng, MU Shanshan. Application of concurrent test management technique in full civil aircraft fatigue test [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10(3): 389-395. (in Chinese)

作者简介:

刘冰(1986—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:全尺寸飞机结构强度试验与验证。

张建锋(1975—),男,学士,研究员。主要研究方向:全尺寸飞机结构强度试验与验证。

牧彬(1989—),男,硕士,工程师。主要研究方向:全尺寸飞机结构强度试验与验证。

(编辑:丛艳娟)