

文章编号: 1674-8190(2024)02-090-11

# 全尺寸飞行器地面振动试验数字化协同探索与实践

白春玉<sup>1,2,3</sup>, 梁森<sup>1,2</sup>, 宋巧治<sup>1,2</sup>

(1. 中国飞机强度研究所 强度与结构完整性全国重点实验室, 西安 710065)

(2. 中国飞机强度研究所 陕西省振动冲击与噪声重点实验室, 西安 710065)

(3. 中国飞机强度研究所 航空噪声与振动航空科技重点实验室, 西安 710065)

**摘要:** 全尺寸飞行器地面振动试验具有协调界面多、试验系统复杂、实施周期长、试验风险高等特点, 面向先进飞行器高效协同研制需求, 必须引入数字化手段提升物理试验能力。通过梳理传统模式飞行器地面振动试验流程, 剖析数字化协同试验要素, 从试验方案与实施流程的数字化、试验对象的数字化、试验系统的数字化等方面出发, 探索并初步构建全尺寸飞行器地面振动试验的数字化方案。指出当前数字化协同模式对降低试验风险、提高试验效率具有显著助益, 未来需要进一步推进数实融合仿真、应用平台开发, 以推动数字化成熟落地。

**关键词:** 全尺寸飞行器; 地面振动试验; 模态测试; 数字化试验; 并行协同

**中图分类号:** V216.2<sup>+1</sup>

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16615/j.cnki.1674-8190.2024.02.10

## Digital collaborative exploration and practice of ground vibration test for full-scale aircraft

BAI Chunyu<sup>1,2,3</sup>, LIANG Sen<sup>1,2</sup>, SONG Qiaozhi<sup>1,2</sup>

(1. National Key Laboratory of Strength and Structural Integrity, Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China)

(2. Shaanxi Province Key Laboratory of Aircraft Vibration, Impact and Noise, Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China)

(3. Laboratory of Aeronautical Acoustics and Dynamics, Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** The ground vibration test of full-scale aircraft has the characteristics of multiple coordination units, complex system, long implementation time and high risk. Facing the need of efficient development of advance aircraft, it is necessary to improve the capability of the test by introducing the digital means. In this paper, the flow of ground vibration test in traditional mode is summarized, the elements of digital test are analyzed, and the digital test programme is constructed preliminarily. It is pointed that the current digital collaboration model has significant benefits in reducing experimental risks and improving experimental efficiency. In the future, it is necessary to further promote the integration of digital and real simulation and application platform development to promote the mature implementation of digitalization.

**Key words:** full-scale aircraft; ground vibration test; modal test; digital test; parallel collaboration

收稿日期: 2023-02-04; 修回日期: 2023-05-29

基金项目: 工信部专项科研(MJZX-2023-SYSF-3X22)

通信作者: 白春玉(1984-), 男, 硕士, 高级工程师。E-mail: baichunyu2006@163.com

引用格式: 白春玉, 梁森, 宋巧治. 全尺寸飞行器地面振动试验数字化协同探索与实践[J]. 航空工程进展, 2024, 15(2): 90-100.

BAI Chunyu, LIANG Sen, SONG Qiaozhi. Digital collaborative exploration and practice of ground vibration test for full-scale aircraft[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2024, 15(2): 90-100. (in Chinese)

## 0 引言

基于业务过程的并行协同技术和数字化技术构成了现代先进飞行器研制的主体,其核心为运用数字技术改造传统的生产研制模式,实现装备产品研制技术、信息和资源等在协同环境下的有益集成,以促使传统飞行器研制模式发生根本性改变。近年来,国外波音、洛马、空客等公司在飞行器研制过程中大力推广数字化协同设计、智能化制造、基于数字化的协同管理等技术手段,较大幅度地缩短研制周期,提高研制质量<sup>[1-7]</sup>。如波音在787飞机研制中,推行基于模型的数字化定义(Model Based Definition,简称MBD)技术,在三维CAD实体模型上实现了并行设计、虚拟装配、试验分析等工作,达到了优化资源、节约成本、提质增效的目的<sup>[4]</sup>。

地面强度试验是先进飞行器研制的关键一环,在型号研制中扮演着极其重要的角色。随着飞行器研制全流程数字化的转变,地面强度试验数字化受到了航空航天领域的广泛重视。以波音、空客为代表的国外航空企业积极推进强度试验的数字化模式应用,加强飞机研制中试验的规划、过程管控和数字化协同,通过数字化协同试验设计、数实融合的试验实施、数字化试验流程管理等手段,达到提升试验效率,降低验证周期和成本的目的<sup>[8-9]</sup>。

我国飞行器研制正逐步向数字化模式转变,目前在设计和制造的数字化协同方面已取得了较大进展,如通过飞行器数字化协同技术——产品生命周期管理(Product Life-cycle Management,简称PLM),为飞行器研制全生命周期构建系统平台,并成功应用于ARJ21、C919等飞机研制<sup>[10]</sup>,该技术也支撑了系列运载火箭的高效生产及高密度发射<sup>[11]</sup>,数字化自动装配技术、5G技术作为飞机生产研制单位提质增效的重要手段,也被深入研究与应用<sup>[12-13]</sup>。我国地面强度试验虽已开展数字化转型,并构建了如试验协同平台(TPCP)等信息化管理手段,但仍未深度融入到数字化研制过程中,特别是在多元异构数据交互、试验方案数字设计、试验流程协同优化等方面仍有大量工作亟待开展,对飞行器强度试验进程带来了一定的制约。面向先进飞行器的高效率研制需求,传统的地面强度试验数字化水平已无法满足研制验证需求。

因此,开展飞行器地面强度试验的数字化研究,具有重要的工程价值。

中国飞机强度研究所(简称强度所)在飞行器地面强度试验中进行了数字化的进一步探索实践,本文以飞行器地面振动试验为例,从传统模式飞行器地面振动试验的特点分析入手,剖析基于数字化协同的试验要素,并从试验方案与实施流程的数字化、试验对象的数字化、试验系统的数字化等三方面出发,探索并初步构建全尺寸飞行器地面振动试验的数字化协同模式,给出典型的应用案例。

## 1 地面振动试验流程剖析

飞行器地面振动试验是新型飞行器研制必须要进行的一项全尺寸地面强度试验,主要目的是测试飞行器的固有振动特性(包括模态频率、振型、阻尼及振型斜率等参数),为结构动力学模型修正、颤振分析、机载仪器选位及结构改进等提供依据<sup>[14-15]</sup>,是装备的服役安全和高动力学品质设计的重要支撑,典型的全机地面振动试验示意图如图1所示。

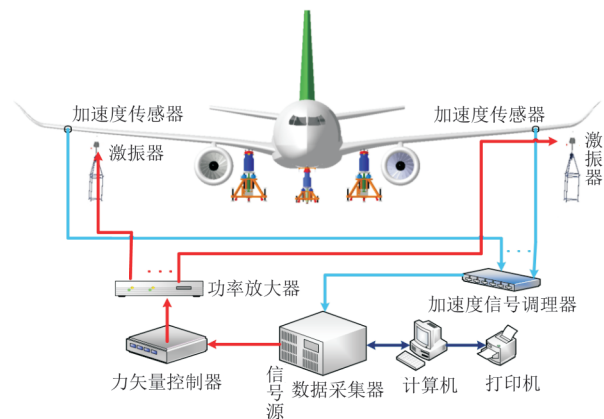


图1 全机地面振动试验示意图

Fig. 1 Ground vibration test of aircraft

地面振动试验通常在飞行器首飞前进行,测试对象为全状态飞行器。该试验作为飞行器首飞前最后一项整机级别的强度试验项目,具有协调界面接口多、试验系统复杂、试验实施周期长、试验风险高等特点。国内外均专门制定了相关标准和规范<sup>[16-18]</sup>,用以规范试验的实施。

按照试验的工作内容、性质和时序关系,飞行器地面振动试验可划分为试验立项、试验设计、试验前期准备、试验现场准备、试验实施和试验总结

等环节,如图 2 所示。

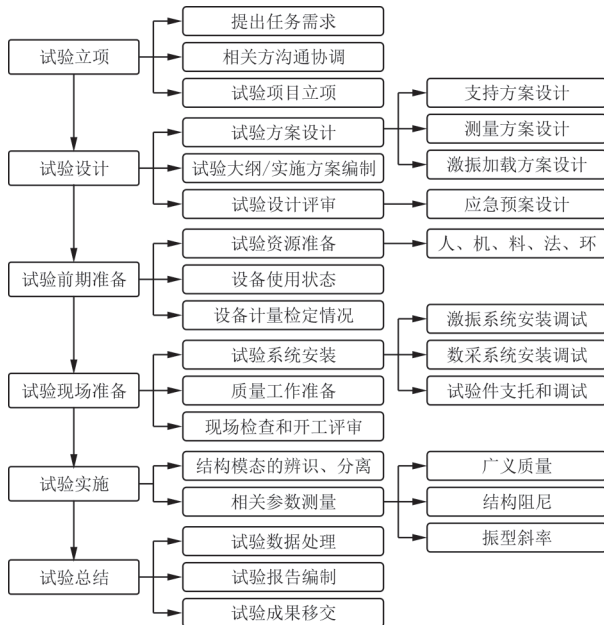


图 2 飞行器地面振动试验的实施流程  
Fig. 2 Implementation process of aircraft ground vibration test

各阶段的主要工作内容如下:

1) 试验立项:型号研制单位根据研制计划,提出试验任务需求,明确试验目的、试验工况、试验对象等信息,形成试验任务书及支撑文件,并交由试验方开展试验设计。

2) 试验设计:试验实施方以任务书等为输入,进行试验方案设计,如试验件支持方案、测量方案、激振加载方案等,形成试验大纲并进行评审。

3) 试验前期准备:主要为试验实施方进场前的准备工作,包括试验相关的人、机、料、法、环等资源准备,如试验设备的准备需充分考虑数据采集器及传感器的性能、状态及计量检定等情况。

4) 试验现场准备:试验人员进场后,开展激振系统和数据采集系统的安装和调试、试验件的支持以及试验系统联调检查等工作,同时,需完成试验前的相关质量工作准备,经现场检查和评审通过后,转入正式试验阶段。

5) 试验实施:根据试验任务书和试验大纲要求,按照既定的试验方法(如相位共振法、相位分离法)进行结构模态识别以及广义质量、阻尼、振型斜率等参数的测量。

6) 试验总结:试验实施方对试验数据进行处

理,并编制形成试验报告,经会签或评审后,提交至试验委托方。

在当前飞行器地面振动试验中,已融入了数字化协同工作理念,但鉴于现有试验工作模式及试验特点的限制,仍存在需要持续提升的地方。

### 1) 多源异构数据交互

由于试验各参与方在数据需求、数据管理和数据格式上的差异以及跨单位信息交互手段限制,各方通常采用文件传递及会议的形式进行信息交流,造成数据信息多源异构,并处于分散无序状态,带来诸如过程管控难、信息反馈慢和传递周期长等不足,该类矛盾贯穿于试验全周期,在试验立项和试验设计阶段尤为突出。

### 2) 试验方案数字设计

尽管飞行器地面振动试验融入了数字化协同理念,但主要以文档为载体的工作内容,试验设计与实施仍依赖于惯有经验和工作模式。在试验设计阶段,基于数字化试验对象、试验系统(加载/支托/测量系统等)的试验方案及试验场景优化,辅助工装数字化设计与生产,数字化试验流程优化等,尚缺乏成熟的方法与工具,以满足飞行器优质高效研制的需求。

### 3) 试验实施多方协同

地面振动试验实施具有多状态转换、多部门参与、多人员协同等特点,其具体实施过程中涉及设计、制造、试验、监管、场地等多单位及人员协调配合。如何实现多部门、多人员的高效协同运转,是地面振动试验数字化协同实施的重要内容。同时,地面振动试验与其他研制工作的并行规划及协同模式,也是飞行器研制的重点关注问题。

因此,面向先进飞行器高效协同研制需求,将数字化手段全面融入全机地面振动试验成为必然。

## 2 地面振动试验数字化协同要素识别

飞行器地面振动试验是一项大型全尺寸强度试验,其数字化协同要素涉及多个维度,如图 3~图 4 所示。

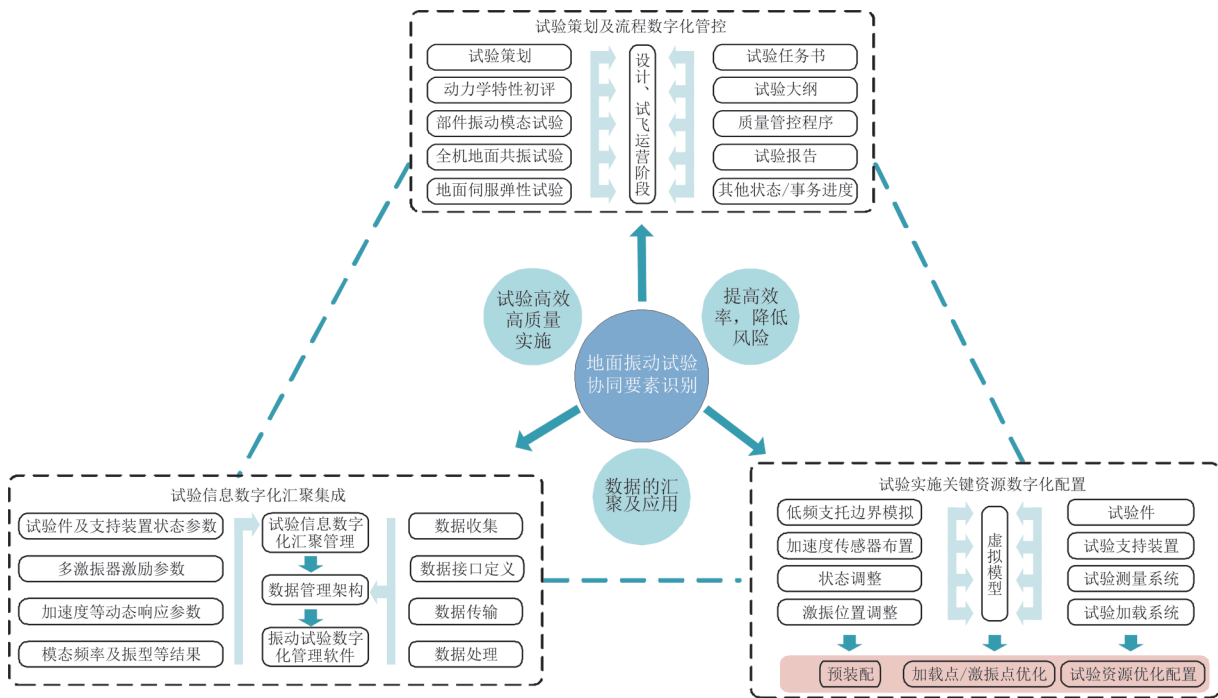


图 3 飞行器地面振动试验的协同要素识别

Fig. 3 Identification of cooperative elements in aircraft ground vibration test

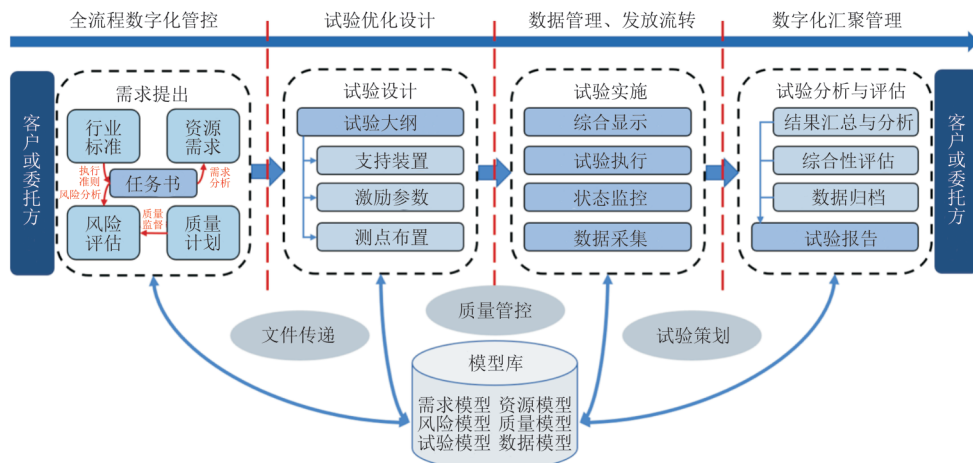


图 4 飞行器地面振动试验的协同要素

Fig. 4 Cooperative elements in aircraft ground vibration test

在试验策划及流程数字化管控方面,地面振动试验贯穿于型号研制全流程,其在型号立项阶段的协同策划极为重要。面向飞行器研制各参与方,需结合对飞行器结构动力学特性的基本评估和验证需求,针对性策划机翼、起落架等部件地面振动试验,并在型号完成总装制造后,策划开展全机地面共振及伺服弹性试验。因此,应从飞行器研制全周期出发,以试验—研制进度高效匹配、试验件高效利用为抓手,以各参与单位为协同对象,统筹布局地面振动试验。地面振动试验实施过程

中,基于试验的多状态转换、多部门参与、多人员协同等特点,还应进行试验工况、实施流程以及人员调配之间的协同优化设计,以实现科学高效的试验流程设计与实施。同时,伴随各个阶段试验的策划实施,涉及试验任务书、试验大纲和试验报告等文档资料的生成传递以及试验相关质量程序管控等具体工作,通过对全流程数字化管控,结合数据发放流转,可实现试验策划及流程事务进度、状态等事宜的及时准确传递,减少迭代返工,提升试验质量。

在试验信息数字化汇聚应用方面,由于地面振动试验策划实施周期长、技术输入来源广以及信息内容形式多,导致数据存在多源、异构等问题。将多源离散式试验信息进行数字化汇聚管理,是支撑试验分析、数据挖掘等工作的重要手段。应进行振动试验数据的使用场景和数字化汇集需求分析,从数据收集、数据接口定义、数据传输、数据处理等方面制定数据管理架构,通过开发振动试验的数字化管理软件平台进行数据的汇聚及应用。

在试验实施关键资源数字化配置方面,地面振动试验需要通过低频支持装置进行边界模拟,在全尺寸飞行器上布置数百甚至上千只传感器进行响应获取,面向不同试验工况,还需对试验件进行针对性状态和激振加载调整,这些工作均存在一定风险。通过构建试验件、试验支持装置、试验测量系统和试验加载系统的数字化模型,实施地面振动试验的数字化预分析工作,优化测量/激振/支托方案,可以有效支撑试验资源高效配置,规避试验设备间的干扰,以提高试验效率,降低试验风险。

### 3 全尺寸飞行器地面振动试验数字化构建与初探

基于飞行器地面振动试验实施流程剖析及协同要素识别,对数字化协同模式下的试验流程进行重构,如图5所示。

在完成委托方与试验方的初步协调后,由委托方向试验方进行信息及试验资源输入,包括试验件、测试需求信息以及试验对象模型等,并经试验方构建试验信息框架,转入试验方案设计阶段。基于试验相关系统及试验对象的数字化设计能力提升,试验方案设计由经验导向转变为数字设计模式,确保试验激振/测量/支托方案的可行性和实施流程的高效性,形成数字化实施方案,并上传至数字化试验协同平台,对试验实施流程进行资源协调、节点控制和质量管控。在试验数据测试方面,基于数字化试验对象,开展基于数据驱动的试验对象仿真模型高效修正迭代,对试验精度提升、试验数据深度应用和飞行器正向设计起到推进作用,是对传统的数据单向输出模式的重要变革。

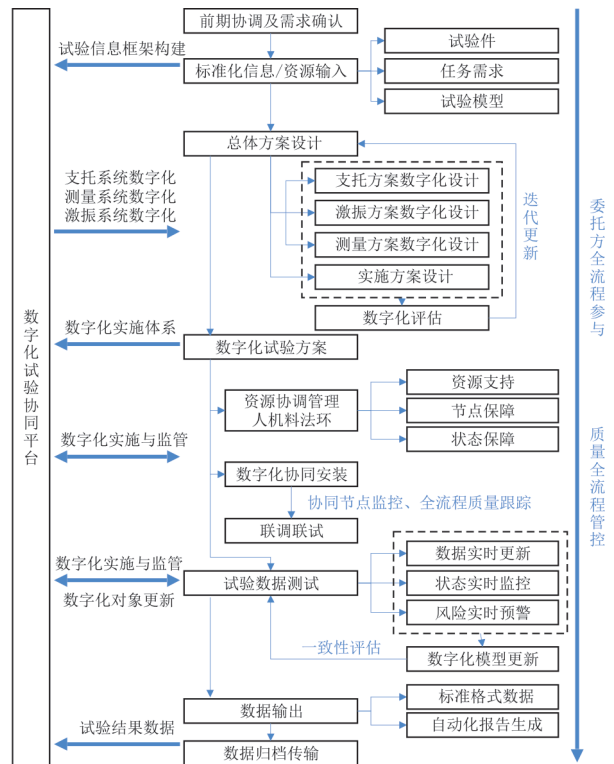


图5 数字化协同模式下地面振动试验流程

Fig. 5 Ground vibration test process under digital collaboration

基于上述构建的流程可以看出,试验方案与实施流程、试验对象及试验系统的数字化,是推动试验数字化实施的关键。

#### 3.1 试验方案与实施流程的数字化

在全尺寸飞行器地面振动试验设计阶段,试验件支持方案、测量方案和加载(激振)方案是关键环节和重点工作。以某型全尺寸火箭地面振动试验为例,为模拟飞行器在空中的自由一自由飞行状态,应通过满足支持频率和强度刚度要求的专用支持装置实施自由一自由边界模拟,需关注支持装置的支持频率、支持稳定性、适装性及附加效应等影响,支持方案设计主要涵盖弹簧系统力学特性分析、支持稳定性分析、虚拟装配干涉检查等。通过全要素(包含振动塔试验系统、低频支持弹簧系统、试验件等)三维模型构建,结合参数化模型(包含刚度参数、强度参数、稳定性参数等)计算分析,并通过对各子级火箭及振动塔开展数字化适配设计(如图6~图7所示),达到优化匹配试验要求等目的,确保了火箭与振动塔、辅助系统的精密匹配和成功实施。

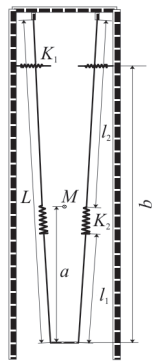
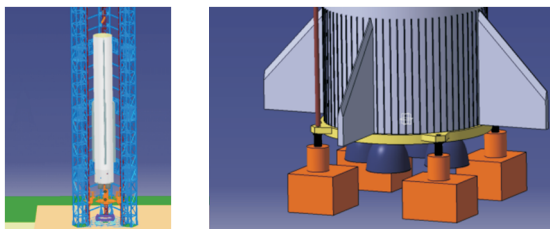


图 6 某火箭支持方案设计

Fig. 6 Scheme design of rocket support



(a) 整体视图

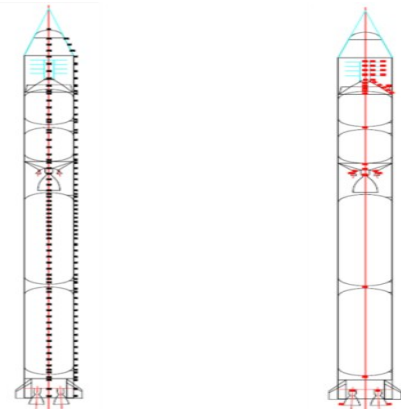
(b) 细节视图

图 7 某火箭装配干涉检查

Fig. 7 Interference check of a certain rocket

在测量及激振方案设计方面,开发测量点缩聚和优化程序,通过有效独立法、遗传算法、模拟退火算法等优化算法,对结构测量点和激振点位置开展缩聚和优化,在保证测试准确性前提下,实现某火箭测点数量由 800 余通道优化至 600 通道以内,提高试验效率,某火箭地面振动试验的测量点布置示意图如图 8 所示。除此之外,传统的模态动能法、有效独立一驱动点残值法以及 QR 分解法等优化方法<sup>[19-24]</sup>,也可应用于试验测点及激振点优

化,这些方法的实现也是后续软件扩展功能的发力之处。



(a) 外部测点分布

(b) 内部测点分布

图 8 某火箭地面振动试验测点布置示意图

Fig. 8 Distribution of measuring points for ground vibration test of a rocket

在试验实施流程数字化方面,开发强度试验并行协同工作平台(如图 9~图 10 所示),该平台面向全生命周期强度试验数字化管理需求,从试验信息输入,到试验设计及试验实施相关工作策划,再到试验结束后的数据管理提交等方面推行全流程数字化协同,同时,充分融入了试验配套资源管理、试验质量管控、试验相关的标准及程序文件管理等通用模块。通过对协同工作平台的应用,初步实现了试验信息的综合集聚和试验实施的过程管控,团队人员可根据权限便捷获取相关信息,提高了试验资源管理、试验人员协同调动、工作任务分配协作的效率。

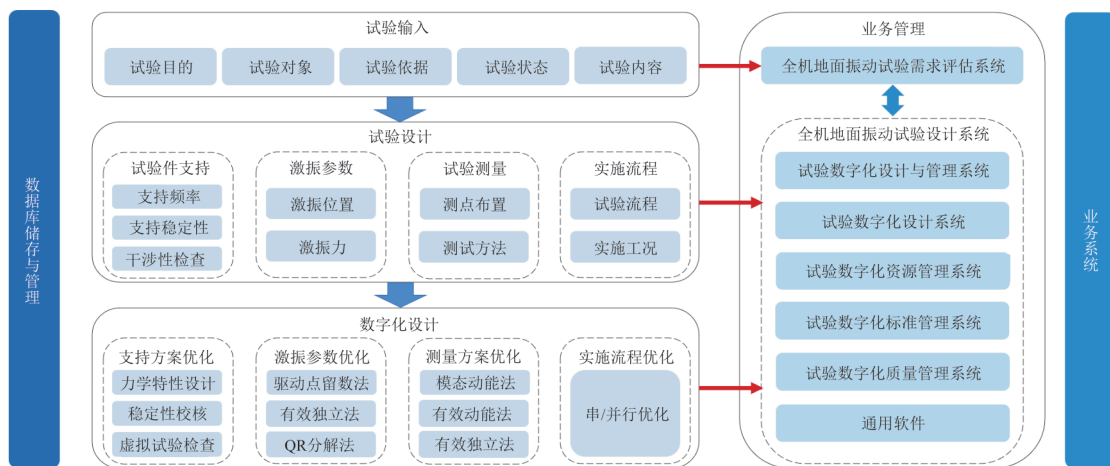


图 9 地面振动试验协同平台架构

Fig. 9 Architecture of cooperative platform for ground vibration test



图 10 强度试验并行协同工作平台

Fig. 10 Parallel cooperative work platform for strength test

### 3.2 试验对象的数字化

全尺寸数字振动试验对象向上承接结构动力学设计,向下支撑地面振动物理试验开展,是连接设计与试验的纽带,也是地面振动物理试验与数字化试验结合的基础。依据数字化试验对象的应用场景,可将数字化振动试验对象模型分为三维几何模型、动力学模型和试验数字模型。三维几何模型用于模型试验方案的考核验证,结合DMU等手段,有效避免试验件安装、支托、激振等过程中可能出现的适装性问题(如图11所示),还可对上述过程进行流程再造和工艺优化,获得最优的方案设计。试验数字模型是考虑试验测点布置方案、质量特性及响应显示等要求,在物理试验实施过程可直接应用的简化模型,可在试验现场进行试验数据可视化、支持频率及稳定性分析等工作。

动力学仿真模型主要用于试验中的数实结合过程,其一项重要内容是模型的动态迭代与修正,即通过与试验模型的数据交互,基于响应面法等动力学模型修正方法,实现动力学模型与真实物理试验的结果一致,并通过频率一致性检查、振型MAC或正交性检查完成模型修正结果检查,最终输出高精度动力学仿真模型。基于该思路可有效

协同试验与设计,从而提高试验数据应用效率。由于动力学模型和试验数字模型存在节点和自由度数量不匹配的问题,因此为了更好地实现数字化过程,需要进行有限元模型的缩聚处理,实现试验数字模型与动力学仿真模型的有机关联,常用的动态缩聚处理方式有Guyan缩聚法、IRS缩聚法、迭代IRS缩聚以及张德文法等<sup>[25-26]</sup>。目前,上述方式初步实现了数字化模型的构建,但在面向模型的高精度快速迭代更新与确认、数实结合运用以及专用软件工具开发方面仍需深入研究。

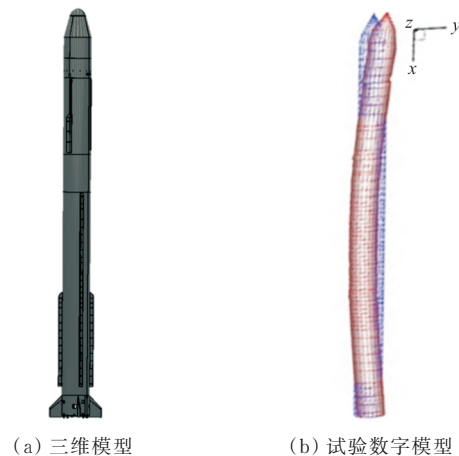


图 11 某火箭模型

Fig. 11 Rocket model

在数字化试验对象的应用层面,数实融合是必然发展方向。目前三维几何模型和试验数字模型在地面振动试验数字化实施过程中的应用结合较为成功。强度所研发的专用平台工具如图 12 所示,初步解决了飞行器地面振动试验数实融合实

施,集成了基于三维几何模型的预试验装配及仿真,基于试验数字模型的结构动特性测试,包括结构模态、振型、阻尼等参数的可视化/参数化测试及分析。目前在多个飞行器型号的地面振动试验中获得了应用。



图 12 地面振动模态测试软件

Fig. 12 Ground vibration mode test software

### 3.3 试验系统的数字化

地面振动试验系统主要由测试系统、激振系统和支持系统构成,如图 13 所示,强度所将地面振动试验系统进行了数字化构建,包括结构模型和参数化模型等,实现对试验系统资源的数字化集成,便于信息查询、状态确认和资源协调管理,并

可进一步拓展应用至地面振动虚拟试验及数实融合试验等领域,对数字化试验实施形成正向支撑。值得一提的是,虚拟试验作为近年来的重点发展方向,也需要以高保真动力学模型和试验系统数字化模型为支撑,可以作为重要的试验设计检验手段融入数字化试验设计中,协助开展地面振动试验正向设计。



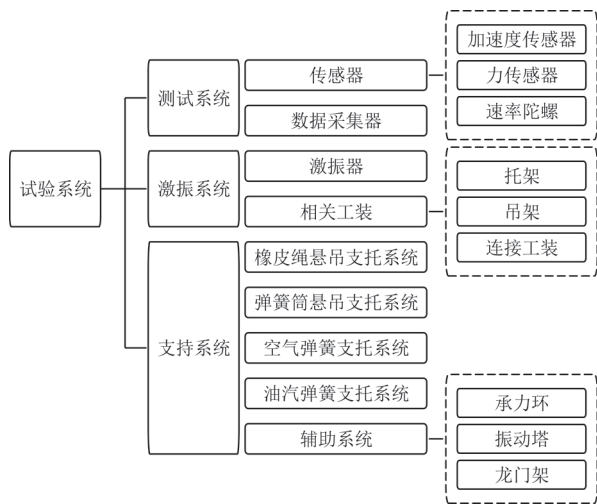


图 13 试验系统构成

Fig. 13 Composition of test system

测试系统主要包含加速度传感器、速率陀螺、力传感器及数据采集器等,如图 14 所示。其数字化构建主要包括基本的采集通道编码、灵敏度系数、频响范围、三维尺寸等物理信息以及计量时间、设备履历和允用条件等状态信息。激振系统主要包含激振器及相关工装(吊架/托架工装等),激振系统参数化模型主要包含激振推力、频率范围、位移、频响特性及信噪比等,托架/吊架参数化模型则主要包括其基础规格、承载能力、使用空间等内容,激振系统的结构模型如图 15 所示。

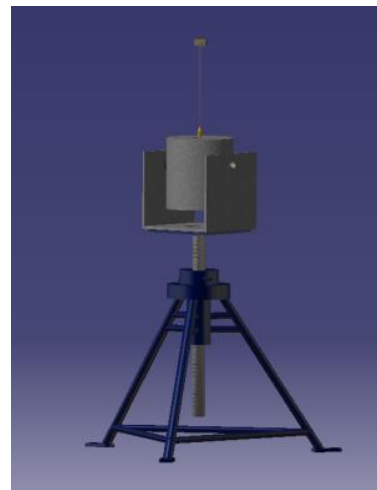


图 15 激振系统示意图

Fig. 15 Schematic diagram of excitation system

支持系统是地面振动试验的关键装置,根据支持方式的不同,可以分为橡皮绳悬吊支持、弹簧筒悬吊支持以及空气弹簧支持或油气弹簧支持等,针对地面振动试验对象的不同,可针对性选择适用的试验件支持方式,如大型飞机一般采用空气弹簧支持,无人机则采用橡皮绳悬吊支持更为便捷,而针对大中型火箭一般采用弹簧筒悬吊支持方式。

在某型全尺寸火箭地面振动试验中,火箭悬吊支持需要在专用的振动塔试验装置中完成,由于该试验涉及火箭吊装、火箭子级装配、大规模传感器及测试线缆布置等内容,在高度达到数十米的振动塔完成这些工作,存在较大的技术难度和安全风险。为保障物理试验的安全高效实施,构建火箭振动试验系统的数字化模型是十分必要的,主要包括振动塔、悬提弹簧筒、承力环、升降平台、底部顶升机构和顶部提升机构等,如图 16 所示。基于数字化模型,开展试验系统的虚拟装配、火箭吊装运动路径优化、传感器虚拟布置以及振动塔配套的升降平台、底部顶升机构和顶部提升机构等振动塔功能部件的功能模拟,实现数字化装配干涉检查、操作可达性预判等功能,降低了火箭地面振动物理试验的实施风险,试验周期由传统的 3 个月以上缩短至 2 个月,效率提升 30% 以上,确保了试验的优质高效完成。

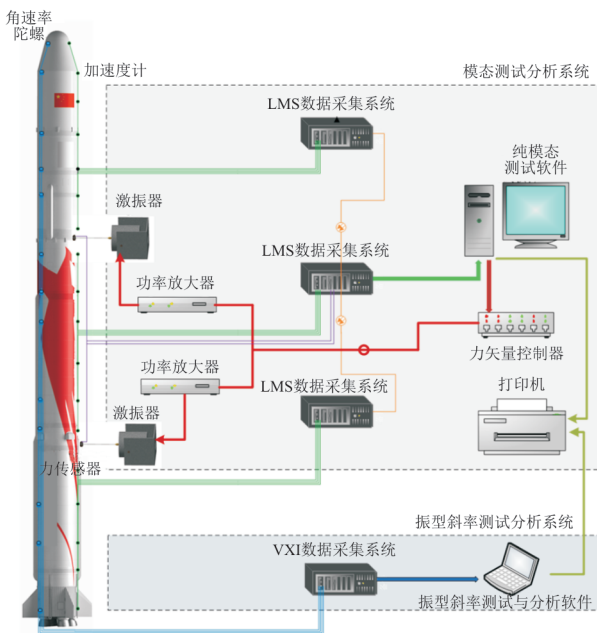
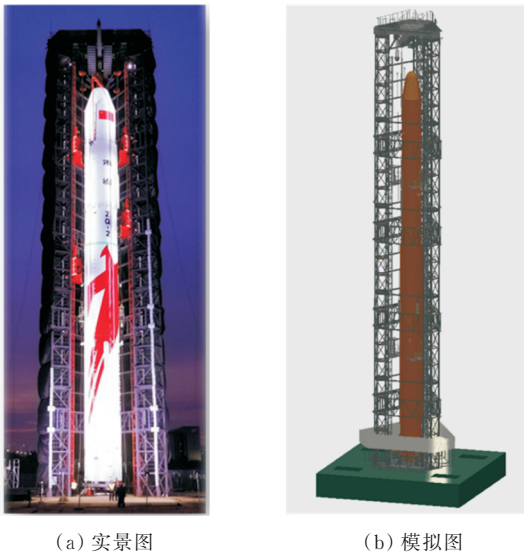


图 14 测试系统示意图

Fig. 14 Schematic diagram of the test system



(a) 实景图

(b) 模拟图

图 16 火箭振动试验系统

Fig. 16 Test system of rocket vibration

## 4 结束语

随着飞行器研制过程全要素智能生产线理念的持续推进,强度试验作为装备研制的关键一环,以数字化协同为典型特征的强度试验模式将在装备研制中发挥越来越重要的作用。

全尺寸飞行器地面振动试验因具有试验协调界面多、试验系统复杂、试验实施周期长、试验风险高等特点,在试验实施全周期推进数字化协同技术,是提升试验效率、降低试验风险、确保试验精度的有效手段。

本文以试验方案与实施流程、试验对象、试验系统数字化技术为依托,解析重构了数字化协同模式下的地面振动试验实施方案,并以某型全尺寸火箭地面振动试验为应用对象,初步实现了数字化协同试验实施,实践检验了该技术模式对试验高效率、低风险实施的正向作用。

当前飞行器地面振动试验数字化协同技术仍处于发展阶段,其作用效能和实施性仍有较大进步空间,未来仍需在基于试验数据的数实融合高性能仿真与快速评估、全流程地面强度试验协同设计、全要素数字化协同管理平台构建等方面持续深入,以进一步实现地面振动试验数字化协同技术的工程化推广和应用。

## 参考文献

- [1] ILLABCK J, SHOLBERG J. Application integration in the Boeing enterprise[C]// The 4th International Conference on

- Enterprise Distributed Object Computing. Washington, D. C., USA: IEEE, 2000: 4-12.
- [2] PARDESSUS T. Concurrent engineering development and practices for aircraft design at airbus[C]// The 24th Congress of International Council of the Aeronautical Sciences. Bonn, Germany: International Council of the Aeronautical Sciences, 2004: 1-9.
- [3] GLENDE W L. The Boeing 777: a look back[R]. USA: NASA, 1998.
- [4] BARRATT J, DOWD K. A new airplane for a new world: the Boeing 787 dreamliner[J]. Design Management Review, 2006, 17(4): 25-30.
- [5] QUINTANA V, RIVEST L, PELLERIN R, et al. Will model-based definition replace engineering drawings throughout the product lifecycle? A global perspective from aerospace industry[J]. Computers in Industry, 2010, 61(5): 497-508.
- [6] ALEMANNI M, DESTEFANIS F, VEZZETTI E. Model-based definition design in the product lifecycle management scenario[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 54(1/4): 1-14.
- [7] 徐根红. 飞机工装数字化定义与流程控制技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- XU Genhong. Technique research of digital definition and process control for aircraft tooling[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014. (in Chinese)
- [8] PEETERS B, HENDRIX W, DEBILLE J, et al. Modern solutions for ground vibration testing of large aircraft[J]. Sound and Vibration, 2009, 43(1): 8-15.
- [9] FARGETTE P, GLOTH G, SINAPIUS M, et al. Task for improvement in ground vibration test of large aircraft[C]// IFASD 2001 International Forum on Aeroelasticity and Structure. USA: IFASD, 2001: 1-7.
- [10] 梁可. 数字化协同制造平台在 C919 研制过程中的应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- LIANG Ke. Research on the application of digital collaborative manufacturing platform in the development of C919[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [11] 金志强, 南燕, 魏东明. CZ3A 系列运载火箭高密度发射及组批生产管理创新(下)[J]. 航天工业管理, 2010(2): 13-16.
- JIN Zhiqiang, NAN Yan, WEI Dongming. Management innovation of CZ3A series rocket high-frequency launch and batch production[J]. Aerospace Industry Management, 2010(2): 13-16. (in Chinese)
- [12] 王彬. 飞机大部件数字化自动对接装配技术研究[J]. 航空工程进展, 2013, 4(1): 134-138.
- WANG Bin. Research on digital automatic assembly technology of aircraft structural parts[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2013, 4(1): 134-138. (in Chinese)
- [13] 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 re-

- search of 5G technology for fatigue test of full-scale aircraft [J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2023, 14(2): 152-159. (in Chinese)
- [14] 《飞机设计手册》总编委会. 飞机设计手册: 第九册[M]. 北京: 航空工业出版社, 2001.  
General Editorial Board of *Aircraft Design Manual*. Aircraft design manual: Vol. 9 [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2001. (in Chinese)
- [15] 孙侠生. 飞机结构强度新技术[M]. 北京: 航空工业出版社. 2017.  
SUN Xiasheng. New technology of aircraft structure strength [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2017. (in Chinese)
- [16] 国家国防科技工业局. 导弹与运载火箭模态试验方法: QJ 3285A—2018[S]. 北京: 国家国防科技工业局, 2018.  
State Administration of Science, Technology and Industry for National Defense. Modal test method for missile and launch vehicles: QJ 3285A—2018 [S]. Beijing: State Administration of Science, Technology and Industry for National Defense, 2018. (in Chinese)
- [17] 中华人民共和国航空工业部. 飞机地面振动试验标准: HB 5861—1984[S]. 北京: 中华人民共和国航空工业部, 1984.  
Ministry of Aviation Industry. Standard for aircraft ground vibration test: HB 5861—1984 [S]. Beijing: Ministry of Aviation Industry, 1984. (in Chinese)
- [18] 中华人民共和国工业和信息化部. 民用飞机地面振动试验通用要求: HB 8466—2014[S]. 北京: 中华人民共和国工业和信息化部, 2014.  
Ministry of Industry and Information Technology. General requirement for civil airplane ground vibration test: HB 8466—2014[S]. Beijing: Ministry of Industry and Information Technology, 2014. (in Chinese)
- [19] 赵俊, 聂振华, 马宏伟. 拱结构模态测试中传感器优化配置[J]. *振动、测试与诊断*, 2011(2): 217-222.  
ZHAO Jun, NIE Zhenhua, MA Hongwei. Sensor placement optimization for modal test of arch structure[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2011(2): 217-222. (in Chinese)
- [20] 刘伟, 高维成, 李惠, 等. 基于有效独立的改进传感器优化布置方法研究[J]. *振动与冲击*, 2013, 32(6): 54-62.  
LIU Wei, GAO Weicheng, LI Hui, et al. Improved optimal sensor placement methods based on effective independence [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013, 32(6): 54-62. (in Chinese)
- [21] 潘安, 彭珍瑞, 殷红, 等. 模态试验传感器优化布置的松弛序列法[J]. *传感器与微系统*, 2015, 34(12): 59-61.  
PAN An, PENG Zhenrui, YIN Hong, et al. Sequential algorithm with relaxation for optimal placement of sensor in modal test [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2015, 34(12): 59-61. (in Chinese)
- [22] 赵文明, 宁平春. 加工中心模态试验激振点与响应点的布置研究[J]. *机械工程与自动化*, 2016(3): 73-75.  
ZHAO Wenming, NING Pingchun. Arrangement of excitation points and response points on machining center in modal test [J]. *Mechanical Engineering & Automation*, 2016(3): 73-75. (in Chinese)
- [23] 白向贺. 数控机床模态实验的激励点选择和响应测点布置优化[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.  
BAI Xianghe. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of engineering [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
- [24] 张凯, 王桂录. 结合振型对铸件激振参数的优化[J]. *成组技术与生产现代化*, 2011, 28(4): 44-46.  
ZHANG Kai, WANG Guilu. Optimization of the excitation parameters to casting combining modes [J]. *Group Technology & Production Modernization*, 2011, 28(4): 44-46. (in Chinese)
- [25] 高永海. 基于参数优化的模型简化研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.  
GAO Yonghai. The investigation of model simplification based on parameter optimization [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [26] 张弛. 基于Guyan法的有限元模型缩聚技术研究[J]. *装备制造技术*, 2013(1): 153-154.  
ZHANG Chi. Finite elements reduction based on Guyan method [J]. *Equipment Manufacturing Technology*, 2013(1): 153-154. (in Chinese)

(编辑:丛艳娟)