

基于轻量化 BIM 的高空台液压加载试验智能管控技术

彭 晋¹, 郭鹏飞², 刁昕宇², 赵万里², 郭迎清²

(1. 中国航发四川燃气涡轮研究院, 四川绵阳 621000; 2. 西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710129)

摘要: 为了使航空发动机高空模拟试车中的液压加载试验智能高效地运行, 完善并优化其试验平台, 提出一种基于轻量化建筑信息模型(BIM)的液压加载试验智能管控技术。建立了支持管控平台运行的高空台液压加载试验软硬件协同运行架构, 提出了基于 WebGL 的数据在 Web 端 3 维模型上实时展示的技术, 以提高试验操作人员对试验进行监测的直观性。所设计的智能管控平台同时集成了试验设置与试验操作、数据管理、试验过程分析、故障诊断分析等功能。结果表明: 所提出的基于轻量化 BIM 的智能管控技术可使试验操作人员直观、便捷、高效地进行试验流程管控、数据综合管理、设备健康状况分析, 提高了高空台液压加载系统试验的智能化、自动化水平。

关键词: 高空模拟试验; 液压加载系统; 智能管控; 轻量化建筑信息模型; Web 图形库; 航空发动机

中图分类号: V263.1+4

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2024.02.021

Intelligent Management and Control Technology for Hydraulic Loading System of Altitude Simulation Test Facility Based on Lightweight BIM

PENG Jin¹, GUO Peng-fei², DIAO Xin-yu², ZHAO Wan-li², GUO Ying-qing²

(1. AECC Sichuan Gas Turbine Establishment, Mianyang Sichuan 621700, China;

2. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: To enable the intelligent and efficient operation of hydraulic loading tests during an aeroengine altitude simulation test, and to improve and optimize its test platform, an intelligent management and control technology of the hydraulic loading system test based on lightweight BIM was proposed. The hardware and software collaborative operation architecture of the hydraulic loading test supporting the management and control platform was established, and the WebGL-based technology of real-time data display on the Web 3D models was proposed to improve the intuitiveness of test monitoring. The designed intelligent management and control platform integrates functions such as test setting and operation, data management, test process analysis, fault diagnosis analysis, etc. The results show that the proposed intelligent management and control technology based on lightweight BIM can make test operators intuitively, conveniently, and efficiently conduct test process management and control, comprehensive data management, and equipment health analysis, improving the intelligence and automation level of the hydraulic loading system of altitude simulation test facility.

Key words: altitude simulation test; hydraulic loading system; intelligent management and control; lightweight BIM; WebGL; aeroengine

0 引言

航空发动机高空台是模拟发动机空中飞行环境的地面试验设备, 对发动机研制起着至关重要的作用^[1-3]。液压加载系统作为高空台最典型的工艺系统之一, 用于模拟飞机液压泵的工作, 提取发动机的功率后测量发动机的各项参数, 并评估对发动机的影

响^[4]。在试验过程中, 操作人员通过液压加载试验管控平台设置试验条件与目标, 实时调节设备参数, 获取设备运行状况, 但管控平台界面功能简单, 数据查看方式不够直观, 没有展示设备工作报表的模块。随着发动机地面试验流程高效化、智能化、自动化的发展, 对液压加载系统管控平台的改进有重要的研究意义和实用价值。在 Web 端设计并展示的界面可以实

收稿日期: 2022-07-29 基金项目: 航空动力基础科研项目资助

作者简介: 彭晋(1987), 男, 硕士, 高级工程师。

引用格式: 彭晋, 郭鹏飞, 刁昕宇, 等. 基于轻量化 BIM 的高空台液压加载试验智能管控技术[J]. 航空发动机, 2024, 50(2): 153-158. PENG Jin, GUO Pengfei, DIAO Xinyu, et al. Intelligent management and control technology for hydraulic loading system of altitude simulation test facility based on lightweight BIM[J]. Aeroengine, 2024, 50(2): 153-158.

现多设备、轻量化、多维度、友好型、直观性强的人机交互效果,但在Web端进行的液压系统交互式可视化尚未得到深入研究^[5]。建筑信息模型(Building Information Modeling, BIM)被国际标准定义为“任何建筑对象的物理和功能特征的共享数字展示”^[6],凭借其可视化的协调性、模拟性、优化性等方面的优点,在建筑、水利、船舶等领域得到了广泛的应用,基于Web图形库(Web Graphics Library, WebGL)的BIM可以实现液压加载试验数据在3维模型上的实时展示、试验过程直观远程监控等功能^[7]。

国内外学者对此进行了相关研究。在高空台管控方面,黎凯等^[8]针对目前中国航空发动机高空台试验设备数据利用率不高、试验流程智能化管控水平不足的问题,提出了高空台试验设备智能管控平台的设计框架,总结了平台涉及的基线建模、数据库构建等关键技术;曹阳等^[9]设计并开发了发动机试验数据采集分析系统,实现了全参数高速记录和稳态数据的自动生成等功能;王风雨等^[10]分析了数据采集系统的缺陷,并结合监测系统的功能和技术要求,阐述了高空台试验安全监测系统的设计与实现。在轻量化BIM技术的研究与应用中,Zhang等^[11]设计了一个原型应用程序——BIM/GIS集成平台,可在统一环境中展示微观和宏观信息而无需转换标准或安装插件,并将其用于水利水电设备的数据3维可视化展示中。

本文运用基于WebGL的BIM技术,设计高空台液压加载试验智能管控平台,提高了高空台液压加载系统的智能化水平^[12]。

1 数据的3维可视化展示

1.1 软硬件协同运行架构

为了实现高空台液压加载系统设备与人机交互界面信息实时同步,将系统设备、底层算法与Web界面互相连接,使操作人员能够通过人机交互界面管控系统设备的工作,设计了高空台液压加载系统软硬件协同运行架构,如图1所示。高空台液压加载系统的硬件部分包括液压系统和测控系统。液压系统主要

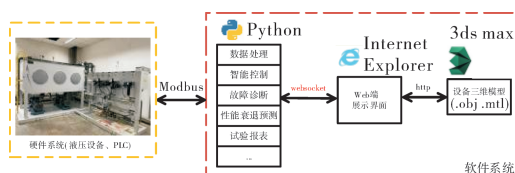


图1 高空台液压加载系统软硬件协同工作框架

由液压油源、地面液压泵、电磁溢流阀、管路、机载液压泵和电液比例阀等设备元件组成。测控系统则包括可编程逻辑控制器(Programmable Logic Controller, PLC)制器、比例放大器、压力传感器和涡轮流量计等测控单元。系统以压力、流量作为测控对象,形成具有反馈调节的闭环控制系统,最终实现液压加载系统精度提高、操作简化的目的。高空台液压加载系统的软件部分由Python服务器后端、Web端展示界面、3ds Max组成。Python服务器集成了高空台液压加载系统数据预处理、数学模型、智能控制、比例-积分-微分(Proportional-Integral-Derivative Control, PID)控制、故障诊断、健康报表生成等模块,作为算法执行模块与硬件系统和前端界面链接,从硬件系统PLC获取设备传感器数据,从而执行各个功能与算法,将传感器数据与各功能运行结果传递给Web展示界面供操作人员分析。Web展示界面作为人机交互的核心部件,将人工操作、Python服务器和3维模型集于一体,实现高效的试验操作和直观的信息展示。3ds Max作为3维建模的软件,其轻量级的高空台液压加载系统模型上传到Web端后可以进一步提高数据展示的直观性和便捷性。

在信息通信与传输方面,硬件系统通过Modbus协议将传感器数据传输给软件系统。在软件系统中,Python程序负责将收到的数据进行解析,实现数据处理、智能控制、故障诊断等功能并将各功能模块的输出通过Websocket协议传输给Web展示界面^[13]。WebSocket是一种在单个TCP连接上进行全双工通信的协议,使客户端和服务端之间的数据交换变得更加简单,允许服务端主动向客户端推送数据。在WebSocket API中,浏览器和服务端只需要完成1次握手,二者之间就直接可以创建持久性的连接,并进行双向数据传输,在高空台液压加载系统软件系统通信中使用Websocket可以保证数据传输的稳定性和实时性。Web端展示界面根据需求规则,对液压加载系统中的试验设备、试验部件、设备工艺流程进行可视化展示,生成可视化界面并接受操作人员的操作指令,对指令进行解析并通过Websocket协议驱动Python程序的运行。界面前端对接液压系统后台系统数据进行多维度的监控,实现液压加载系统设备可视化、管道可视化、工作过程可视化、功能可视化,最终进行液压加载系统实时数据展示、设备预警、实时监控,以达

到提高系统智能化的目标。基于液压加载系统原理,采用 3ds Max 软件对其子系统元件进行标注,然后根据网络模型对建模部件进行适当修改并进行组装,得到液压加载系统的 3 维模型并将其导出为“.obj”3 维模型文件与“.mtl”材质文件。Web 端通过本地 http 协议读取该文件^[4],基于 WebGL 技术将 3 维模型导入 html5 框架中,设备与数据绑定后实现数据的 3 维可视化。

1.2 基于轻量化 BIM 的数据实时展示

为了使操作人员高空台液压加载系统试验过程中能直观地读取试验设备在当前工作条件下的阀位、流量、压力、温度等传感器数据,对原有 2 维数据展示界面(如图 2 所示)进行改进,引入 3 维模型,在 Web 端 3 维模型上实时展示各参数的数值。首先进行 3 维模型的搭建,然后使用 WebGL 实现试验数据的 3 维可视化展示。在试验过程中,高空台液压加载系统 PLC 将数据通过通信串口发送给 Python 服务器后端,后端进行原始数据的预处理。服务器通过 WebSocket 通信协议与界面前端进行数据交互,将处理后的试验数据实时发送给界面前端,前端将数据展示在 3 维模型中传感器对应的位置,从而使操作人员更加直观地读取试验过程中各传感器数据。

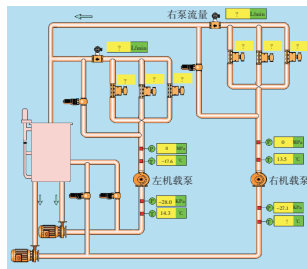


图 2 2 维数据展示界面

高空台液压加载系统的油路如图 3 所示。系统主要设备包括油箱、地面泵、机载液压泵、电液比例阀、电子放大器、冷却器、溢流阀等,除油箱和冷却器外,各部件均有左右 2 套,分别用来试验飞机上的 2 台

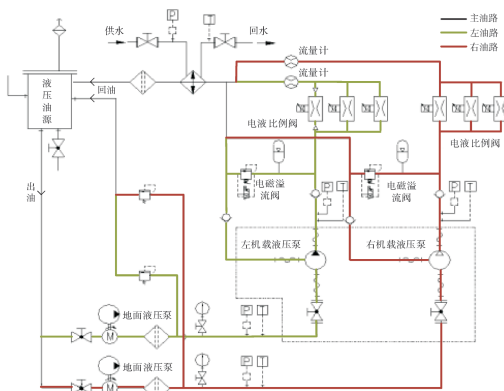


图 3 高空台液压加载系统油路

发动机。虚线框内的部分为机载设备,包括机载液压泵和开关阀门,高空台液压加载试验便是模拟机载泵提取发动机功率的过程并观测对发动机造成的影响。在工作时,地面泵为飞机机载泵提供充足的油源,机载泵为恒压泵,当比例阀开度小于预设值时泵后压力恒定。比例阀作为耗能部件和电子放大器配合使用,放大器根据输入信号向比例阀电磁铁提供适当电流。比例电磁铁将电流转换成作用在阀芯上的机械力并克服复位弹簧,随着电流的增大,电磁铁输出力增大,复位弹簧被压缩,于是阀芯开始移动,进而改变主阀芯的开口面积的大小,在压差一定的前提下,比例阀开口面积的变化直接引起阀进出口前后流量的变化,实现了对液压泵加载的目的。

Autodesk 3ds Max 相较于 Autodesk Inventor 等其他的 3 维建模软件更具模型的艺术性和可视性,不受设备尺寸指标的严格限制,而且可以方便进行材料、颜色、纹理、阴影等要素的设置。为了使这些要素在模型中得到充分体现,进而使 3 维模型更准确、更美观,高空台液压加载系统的 3 维建模选择 3ds Max 软件。建模过程包括 4 部分:模型整体框架搭建、系统内各部件的分析与建模、元件的精细建模和组装整合。在建模过程中,首先搭建 3 维模型框架,再依次搭建系统中的油箱、地面泵、液压泵等的精细模型,并为其创建好材质球,把材质球赋给模型以确定模型材质和颜色。对各模型的大小进行调整,移动、旋转元件到合适的位置并拼接组装。由于 WebGL 技术可承载的 3 维模型不能过于复杂,否则模型加载缓慢甚至无法加载,因此需要将 3 维模型轻量化,以提高其加载速度。完成轻量化处理后,对模型进行存储,由于 WebGL 基于 OpenGL ES 2.0,其对 3 维模型的描述方式与 OpenGL ES 2.0 类似,即通过多个三角面片来描述 3 维模型实体,而不是 3 维模型的几何体间的拓扑关系,所以在 3 维建模后使用三角面片的方式存储模型,浏览器可以根据三角面片 3 个顶点的坐标来确定三角面片的位置,从而绘制 3 维模型。

通过 WebGL 实现 Web 端读取 3 维模型的功能,操作人员开启界面时,Web 端会解析高空台液压加载系统 3 维模型文件,该文件为通过 3ds Max 软件对高空台加载系统进行 3 维建模后导出的“.obj”格式文件,是一个超过 300 MB 的 3 维模型文件,WebGL 通过对其解析可以获得模型的 3 维特征并进行缓存和调

用。在3维模型中的传感器附近展示传感器数据,刷新率为0.1 s。同时在界面上植入时间、加载谱的目标流量等数值,以便操作人员读取。基于轻量化BIM的数据3维可视化界面如图4所示。

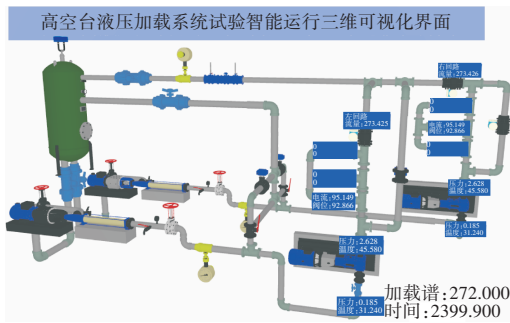


图4 数据的3维可视化展示界面

2 智能管控平台集成的功能

2.1 试验设置与试验操作

试验设置与试验操作界面使操作人员更方便快捷地对试验进行设置并对试验过程进行有效控制。该功能与界面分为试验预设模块和液压加载模块2部分。试验预设模块主要在高空台液压加载系统试验进行前,操作人员基于试验现状与试验目标对加载方式、加载谱和恒压大小进行选择。加载方式可以依据试验条件选择液压加载、直流电机加载和交流电机加载;加载谱在预设定的几种加载谱中依据试验要求进行选择;恒压的大小基于当前被试验的航空发动机特性进行选择。

液压加载模块主要是对先导油源、控制方式以及被控阀门及其阀位进行调节。在阀门的选择中,左右2套设备在3维模型中从上到下分别为左1阀、左2阀、左3阀和右1阀、右2阀、右3阀。比例阀的先导油源可以依据试验需求选择电磁溢流阀或先导泵。流量控制系统的控制方式可以选择智能控制、PID控制或手动调节。其中,智能控制和PID控制的运行程序在Python端,Python作为服务器运行控制器程序,给高空台液压加载系统PLC传输控制指令,同时将程序中的传感器信号和控制量信号传递至界面前端以进行显示。用户在完成试验设定后可以点击启动按钮来启动试验,硬件和软件系统会运行到试验结束并自动缓存数据,需要紧急停止试验时,点击停机按钮即可停止。

2.2 试验数据管理

高空台液压加载系统数据管理对于试验过程回

顾、设备性能与健康维护、试验方案设定等具有重要意义。随着工业互联网的快速发展,复杂工业系统数据库的作用越来越重要。试验数据管理具有对高空台液压加载系统的试验数据进行综合管理与利用的功能,便于试验操作人员对数据进行分析、挖掘,进行算法开发、试验回顾、设备维护等^[15]。试验数据管理功能分为数据存储和数据导入2个模块。

数据存储模块可对试验数据进行格式化存储。在试验结束后,服务器后端会基于Python的pandas第三方库将本次试验过程的全部采集数据以Dataframe数据格式缓存于后台。用户在试验后,在界面上录入操作人员的姓名和编号、试验日期、试验编号、保存路径、试验备注信息后,服务器后端会将试验数据以“.xls"格式存储在保存路径下。

数据查看模块主要用于对历史试验数据进行平台导入与分析。操作人员选择历史试验数据后,后端会导入该文件的数据,其数据类型为Dataframe,用户点击试验过程分析后平台会自动对试验过程中的流量控制过程进行提取并展示,供操作人员分析。同时,操作人员点击故障诊断分析后,平台会自动对该次试验进行故障诊断分析,并将分析报表显示在界面上供操作人员查看。操作人员可以将被选数据的“.jpg"格式图片进行存储,便于快速分析数据,也可以将数据存储为易于进行精细化分析的“.html"格式。

2.3 试验过程分析

为了使操作人员直观高效地对高空台液压加载系统试验过程中流量(被控量)变化过程进行分析,平台集成了试验过程分析与展示功能。流量的变化是由控制器指令决定的,高空台液压加载系统控制器可使用智能控制器和PID控制器,通常采用智能控制方法。该方法将开环模糊控制和闭环PID控制相结合,模糊控制的设计基于专家经验,具有智能控制的特征。该方法实现了又快又准的控制效果,智能控制原理如图5所示。

在试验设置与试验操作界面下,选择控制方式后,试验过程以此方法进行控制。试验结束后,智能管控平台将自动提取每次目标流量变化时真实流量的变化曲线和控制信号的变化曲线,并展示在试验过程分析界面,便于操作人员分析航空发动机液压加载模拟效果和控制器性能。在试验过程中加载阶段的试验过程分析如图6所示。

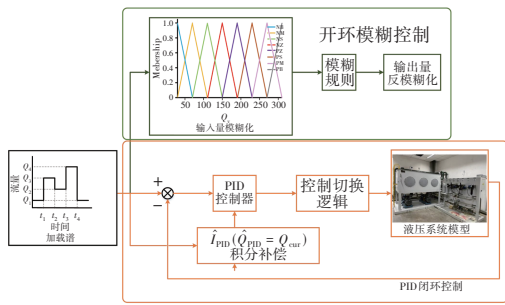


图5 智能控制原理

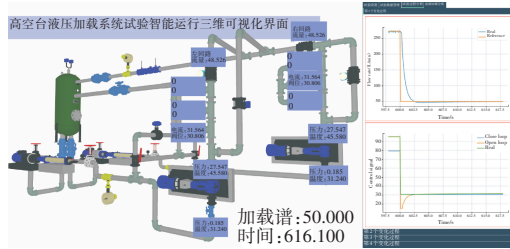


图6 加载阶段的试验过程分析

2.4 故障诊断分析

智能管控平台具备高空台液压加载系统试验的自动故障诊断功能,操作人员可在界面上获得故障诊断的分析报表。其中,故障诊断采用基于1维卷积神经网络的高空台液压加载系统故障诊断方法,其故障诊断架构如图7所示。

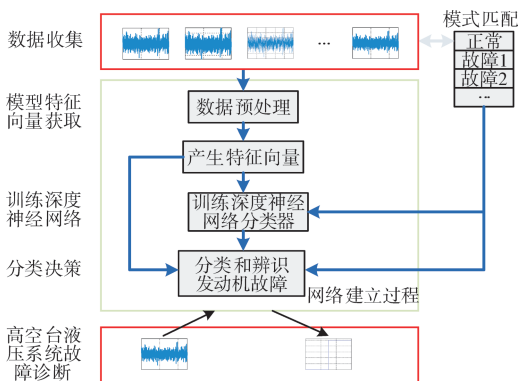
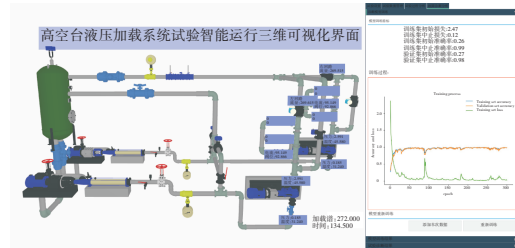


图7 液压加载系统故障诊断架构

高空台液压加载系统故障诊断分析功能与界面由3个模块组成:诊断模型训练、模型诊断结果、试验诊断结果。

故障诊断分析界面如图8所示。诊断模型训练的主要功能为展示和计算当前服务器后端存储的诊断模型训练过程和训练结果指标,如图8(a)所示。其训练过程展示了模型训练过程中训练集损失随训练回合数的变化过程,以及训练集和验证集分类准确率随训练回合数的变化过程。训练的指标包括训练集初始损失、训练集终止损失、训练集初始准确率、训练

集终止准确率、验证集初始准确率、验证集中止准确率。



(a) 故诊断模型训练模块展示界面



(b) 故障诊断模型训练 结果展示界面 (c) 故障试验诊断结果 展示界面

图8 故障诊断分析界面

同时,在一次试验结束后,操作人员可以通过“添加本次数据”来更新故障诊断数据库。通过“重新训练”即可在Python服务器后端调用模型训练文件来重新训练故障诊断模型并保存训练与验证结果。这样设计一方面更加充分地利用了高空台液压加载试验中产生的传感器数据,挖掘数据的潜在价值并应用于故障诊断,充分利用了基于数据驱动的故障诊断方法的优势;另一方面,通过更新故障诊断模型,使其适应设备退化、工况变化等情况,一定程度上体现了管控平台的智能性。

模型训练结果展示模块(图8(b))用来展示当前服务器后台训练好的诊断模型在验证集上的验证结果。高空台液压加载系统故障诊断数据库按照7:3的方法分为训练集和验证集,其中验证集用来评价训练的深度学习神经网络模型对故障的识别能力,每次更新故障诊断数据库,验证集也会发生变化。模型训练结果模块展示的内容包括验证集指标和验证集热力图。其中验证集指标包括6种健康状态对应的诊断精确率和诊断召回率。同时,采用热力图的方式来展示训练好的模型在验证集上的分类情况,以便操作人员对模型的诊断能力进行进一步分析。

一次试验结束或导入历史试验数据后,智能管控

平台会使用试验数据对系统设备进行故障诊断。故障诊断结果界面(图9(c))用来展示该次试验的诊断结果。界面上分别展示试验过程中每秒对系统进行诊断的诊断结果统计表和散点分布图。统计表展示了在试验过程中,诊断模型在每秒对高空台液压加载系统的健康状态分类结果的数值统计,诊断次数为诊断结果为健康状态的次数。当诊断结果为健康状态的次数占比超过90%时,认为高空台液压加载系统处于健康状况(无故障发生)。诊断结果的散点分布图展示了中试验过程的每秒中模型诊断液压加载系统处于健康状态的概率,这样展示更能直观地体现高空台液压加载系统在本次试验中的健康程度。

3 结论

(1)所提出的包含硬件系统 PLC、Python 服务器后端和 Web 界面前端的软硬件协同运行架构,实现了操作人员对试验过程中实时信息获取和管控,提高了试验的效率。

(2)所提出的基于轻量化 BIM 的高空台液压加载试验数据实时展示技术,使用 3ds Max 搭建设备 3 维模型,采用 WebGL 技术实现在 Web 端 3 维模型上实时展示传感器数据的功能,使操作人员更直观地监测试验运行情况。

(3)所搭建的高空台液压加载试验智能管控平台集成了数据的 3 维可视化、试验设置与试验操作、试验数据管理、试验过程分析和故障诊断分析功能,可以使操作人员直观地监控试验过程,对系统的设备和试验状况进行管控,高效地进行数据管理与数据分析,深度挖掘数据潜在的价值,便捷直观地读取试验过程和故障诊断分析报表。该管控平台提高了高空台液压加载试验的效率和安全性,以及智能化和自动化水平。

参考文献:

- [1] 侯敏杰. 高空模拟试验技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2014: 1-4.
HOU Minjie. Altitude simulation test technology[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2014: 1-4. (in Chinese)
- [2] 张俊杰, 蒋平, 田金虎, 等. 基于 F100 发动机试验的美国高空模拟试验鉴定体系研究[C]//第三届体系工程学术会议论文集——复杂系统与体系工程管理. 广东珠海: 国防科技大学系统工程学院, 2021: 135-139.
ZHANG Junjie, JIANG Ping, TIAN Jinhui, et al. Research on American altitude simulation test evaluation system based on F100 engine test [C]//Proceedings of the Third Academic Conference on Systems Engineering - Complex Systems and Systems Engineering Management. Zhuhai Guangdong: School of Systems Engineering, National University of Defense Technology, 2021: 135-139. (in Chinese)
- [3] 黄劲东. 航空发动机试验验证体系建设[J]. 航空动力, 2021(3): 57-63.
HUANG Jindong. Construction of aeroengine test verification system[J]. Aviation Power, 2021(3): 57-63 (in Chinese)
- [4] Luminas J K, Boytsov J F. Aero-propulsion environmental test facility [R]. ASME 98-GT-555.
- [5] Shahzad F, Sheltami T R, Shakshuki E M, et al. A review of latest web tools and libraries for state-of-the-art visualization[J]. Procedia Computer Science, 2016, 98: 100-106.
- [6] ISO. Building information modeling — information delivery manual — part 1: methodology and format: ISO 29481-1: 2010 (E) [S]. Geneva: ISO, 2010: 1-34.
- [7] Zhou X, Wang J, Guo M, et al. Cross-platform online visualization system for open BIM based on WebGL[J]. Multimedia Tools and Applications, 2019, 78(20): 28575-28590.
- [8] 黎凯, 郭迎清, 赵万里, 等. 高空台试验设备管控平台构建技术研究[J]. 航空计算技术, 2022, 52(1): 96-100.
LI Kai, GUO Yingqing, ZHAO Wanli, et al. Research on construction technology of control platform for altitude test facility[J]. Aeronautical Computing Technology, 2022, 52(1): 96-100. (in Chinese)
- [9] 曹阳, 李文峰, 陈震宇, 等. 航空发动机试验数据采集分析系统设计与实现[J]. 航空发动机, 2010, 36(6): 36-38.
CAO Yang, LI Wenfeng, CHEN Zhenyu, et al. Design and implementation of aeroengine test data acquisition and analysis system [J]. Aeroengine, 2010, 36(6): 36-38. (in Chinese)
- [10] 王风雨, 蒋东翔, 周明, 等. 航空发动机高空试验台状态监测系统[J]. 航空发动机, 2000(1): 36-40.
WANG Fengyu, JIANG Dongxiang, ZHOU Ming, et al. Condition monitoring system of aeroengine altitude simulation test facility[J]. Aeroengine, 2000(1): 36-40. (in Chinese)
- [11] Zhang S, Hou D, Wang C, et al. Integrating and managing BIM in 3D web-based GIS for hydraulic and hydropower engineering projects[J]. Automation in Construction, 2020, 112: 103114.
- [12] 王海峰, 王宏亮. 航空装备保障智能化发展认识与探讨[J]. 测控技术, 2020, 39(12): 1-9, 27.
WANG Haifeng, WANG Hongliang. Understanding and discussion on intelligent development of aviation equipment support[J]. Measurement and Control Technology, 2020, 39(12): 1-9, 27. (in Chinese)
- [13] Rahmatulloh A, Darmawan I, Gunawan R. Performance analysis of data transmission on WebSocket for real-time communication[C]//2019 16th International Conference on Quality in Research (QIR): International Symposium on Electrical and Computer Engineering. Padang: IEEE, 2019: 1-5.
- [14] Staicu C A, Schoepe D, Balliu M, et al. An empirical study of information flows in real-world javascript[C]//Proceedings of the 14th ACM SIGSAC Workshop on Programming Languages and Analysis for Security. New York: Association for Computing Machinery, 2019: 45-59.
- [15] 文维阳, 陈震宇, 曹阳, 等. 航空发动机试验数据管理系统设计[J]. 航空发动机, 2021, 47(3): 97-102.
WEN Weiyang, CHEN Zhenyu, CAO Yang, et al. Design of data management system in aeroengine test[J]. Aeroengine, 2021, 47(3): 97-102. (in Chinese)

(编辑: 刘静)