

5-15-2020

## Design and Research on Semi-physical Simulation Test System of Aero Engine

Jingfeng Shen

*1. School of Mechanical engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; ;*

Chulei Li

*1. School of Mechanical engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; ;*

Dianliang Wu

*2. School of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China; ;*

Jiaxin Zhang

*3. Shanghai Jiang Heng Software Technology Co., Ltd, Shanghai 200120, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## Design and Research on Semi-physical Simulation Test System of Aero Engine

### Abstract

**Abstract:** Aiming at the high danger and difficulty of the operation in the aero-engine test, a *semi-physical simulation test system that integrates the functions of the test-run operation training, process analysis, simulation of the typical engine performance fault is proposed. Based on the fast response, accurate calculation and high human operation simulation of the engine digital model, the key problems of the research and implementation, such as the structural design of the distributed semi-physical simulation system, visualization of the calculation model of the engine subsystem and real-time visualization of the aero-engine test data displaying in the three-dimensional cave automatic virtual environment in the simulation test system are introduced.* It provides a theoretical and methodological basis for the application of the digital production in other fields.

### Keywords

aero-engine test, semi-physical simulation, performance computing model, 3D real-time visualization

### Recommended Citation

Shen Jingfeng, Li Chulei, Wu Dianliang, Zhang Jiaxin. Design and Research on Semi-physical Simulation Test System of Aero Engine[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(5): 808-816.

## 航空发动机半物理仿真试车系统的设计研究

沈景凤<sup>1</sup>, 李初蕾<sup>1</sup>, 武殿梁<sup>2</sup>, 张佳欣<sup>3</sup>(1. 上海理工大学机械工程学院, 上海 200093; 2. 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240;  
3. 上海江衡软件科技有限公司, 上海 200120)

**摘要:** 针对研发中航空发动机试车具有危险度高、操作难度大等问题, 应用增强现实技术, 设计了集试车操作培训、试车过程分析和典型性能故障模拟等功能于一体的半物理仿真试车系统。在分析发动机模型响应快速、计算准确和对人的操作高度仿真等特点的基础上, 系统介绍了异地分布式仿真系统架构设计、发动机系统计算模型可视化和三维视景系统试车数据 3D 实时可视化等关键问题的研究和实现方法, 为其他领域中数字化生产提供了理论和方法基础。

**关键词:** 航空发动机试车; 半物理仿真; 性能计算模型; 3D 实时可视化

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2020) 05-0808-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.18-0615

## Design and Research on Semi-physical Simulation Test System of Aero Engine

Shen Jingfeng<sup>1</sup>, Li Chulei<sup>1</sup>, Wu Dianliang<sup>2</sup>, Zhang Jiaxin<sup>3</sup>(1. School of Mechanical engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;  
2. School of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;  
3. Shanghai Jiang Heng Software Technology Co., Ltd, Shanghai 200120, China)

**Abstract:** Aiming at the high danger and difficulty of the operation in the aero-engine test, a semi-physical simulation test system that integrates the functions of the test-run operation training, process analysis, simulation of the typical engine performance fault is proposed. Based on the fast response, accurate calculation and high human operation simulation of the engine digital model, the key problems of the research and implementation, such as the structural design of the distributed semi-physical simulation system, visualization of the calculation model of the engine subsystem and real-time visualization of the aero-engine test data displaying in the three-dimensional cave automatic virtual environment in the simulation test system are introduced. It provides a theoretical and methodological basis for the application of the digital production in other fields.

**Keywords:** aero-engine test; semi-physical simulation; performance computing model; 3D real-time visualization

## 引言

航空发动机试车系统应用于发动机的研制过



收稿日期: 2018-09-15 修回日期: 2019-03-07;  
基金项目: 上海市科委项目 (1611110600, 15DZ1160900);  
作者简介: 沈景凤(1968-), 女, 安徽合肥, 博士, 副教授, 研究方向为 CAD、虚拟设计技术、机械优化设计。

程, 通过对不同工况下发动机的运行情况进行试验, 验证其设计的合理性, 同时对其系统参数和控制规律进行优化, 确保控制器和软硬件部分的运行稳定性。试车工艺流程一般包括发动机启动前准备、冷运转、启动、磨合运转、发动机加温和冷却运转等多项操作, 而这一系列操作需要经验丰富、技能娴熟的试车人员来完成。

<http://www.china-simulation.com>

半物理仿真即硬件在回路仿真, 通过把传感器和执行机构这些硬件设施连接到仿真回路, 再根据操控者的意愿对回路中的软硬件进行调控来完成试验。半物理仿真试验较好的克服了全物理试验成本高、风险大以及纯数值仿真精度和直观性较差的缺点, 为仿真试车系统提供了非常有利的工具<sup>[1]</sup>。

航空发动机是一种高技术、长周期、大投入的高度协同复杂系统<sup>[2]</sup>, 研制过程广泛使用各类仿真技术<sup>[3]</sup>。目前航空发动机的功能与性能仿真已经大量应用<sup>[4]</sup>, 并具有一定的成熟度, 国内西北工业大学<sup>[4]</sup>、南京航空航天大学<sup>[5]</sup>、北京航空航天大学<sup>[6-7]</sup>、上海交大<sup>[8]</sup>、空军工程大学<sup>[9]</sup>等单位都对航空发动机虚拟仿真、半物理仿真有较长时间的研究, 并在一些航空发动机及控制系统的研发中得到应用<sup>[10]</sup>。

与航空发动机本体仿真不同的是, 航空发动机试车属于典型的人在回路仿真, 其仿真目标在于对人的培训和考核, 因此除了要求能对发动机模型响应快速、准确计算外, 还需要对人的操作进行高相似度仿真。国外已有较多的研究<sup>[11]</sup>, 并已开始投入使用; 国内航空发动机试车仿真方面的研究则相对较少, 且目前尚无应用。

结合真实试车的所有状况和试车操作回放的需求, 本文航空发动机半物理仿真试车系统集成成了航空发动机数字模型、控制系统数学模型、虚拟现实接口程序和数据采集模块, 可对真实的航空发动机试车过程进行仿真, 从而可用于发动机研发过程的试车操作培训、故障排除训练、试车过程分析等。除试车人员技能培训外, 借助现有的三维视景系统(CAVE), 该仿真平台也可以完成试车台工艺流程三维展示、真实试车过程的异地实时试车目击、典型发动机性能故障模拟、真实试车数据的全过程再现等功能。

本文主要对航空发动机半物理仿真试车系统的系统组成及影响该系统研发的关键问题主要包括航空发动机性能计算模型、航空发动机试车辅助子系统模型可视化和三维视景系统(CAVE)环境中

的航空发动机试车数据显示 3D 实时可视化问题进行介绍。

## 1 航空发动机半物理仿真试车系统

本系统为试车台操作人员提供与真实试车台操纵间高度相似的半物理虚拟仿真环境, 包括实物座椅、操纵台、操作杆、按钮、指示灯、数字显示屏, 以及虚拟的三维发动机展示模型、试车台辅助工艺系统的二维运行状态示意图等。

### 1.1 系统框架

航空发动机半物理仿真试车系统按功能层次划分, 可分为设备层、控制层、应用层和信息层四部分<sup>[12]</sup>。每一层完成一个明确定义的功能集合, 并按协议相互通讯。每层向上提供所需要的服务, 在完成本协议时使用下层提供的服务。各层相互独立, 层间的相互作用通过接口实现。只要保证层接口不变, 任何一层实现技术的变更均不影响其余各层。根据此功能层次结构, 以数据的流向为导向, 定义了航空发动机半物理仿真试车系统的整体框架, 如图 1 所示。

航空发动机半物理仿真系统按照数据流向划分框架可分为 3 大系统: 数据采集系统, 数据处理系统和数据显示系统。其中数据采集系统包含对 4 个子目标的试车信息的采集; 数据处理系统主要的载体是模拟试车台, 是发动机试车过程中交互操作和仿真计算的主要承担者, 主要组成包括: 计算机子系统、模拟操控装置、执行输出装置、中心控制器; 数据显示系统通过接收数据处理系统发动的数字信息, 通过二维或三维的方式将数据实时显示在 CAVE 系统中。整个系统以数据的处理为核心, 所有的交互方式都建立试车数据真实有效的前提下。

### 1.2 系统组成

航空发动机半物理仿真试车系统由软件和硬件两部分组成, 在现有的发动机、EEC 数学模型

基础上, 开发试车台数据采集控制软件, 实现对发动机启动、转速的实时控制和运行状态信息的采集。其操作与显示方式与真实试车台完全一致, 区别仅在于: 虚拟发动机模型代替真实发动机; 虚拟试车场景代替真实试车环境。其软硬件组成示意图 2 所示。

### 1.2.1 系统硬件组成

航空发动机半物理虚拟试车台系统硬件主要包括模拟试车台和三维视景(CAVE)显示系统。

#### (1) 模拟试车台

模拟试车台是发动机试车过程中交互操作和仿真计算的主要承担者, 包括试车的各种设置操作、试车过程中的发动机控制操作、发动机工作性能仿真计算和各种数据处理及结果输出。模拟试车台的主要组成包括: 计算机子系统、模拟操控装置、输出装置、中心控制子系统、模拟试车台结构。

其中, 模拟操控装置包括油门控制杆以及各类按钮、旋钮、开关等装置, 均根据实际试车操作台

上的对应装置定制, 它们都能够产生对应的操作信号, 并与中心控制器连接, 通过操纵油门控制杆等实际操作装置真实仿真对航空发动机各工况下的运行状态。

#### (2) 三维视景(CAVE)系统

本系统将直接使用现有的三维视景(CAVE)虚拟现实系统进行试车过程的发动机状态显示、试车中心漫游、供油子系统状态显示、空气启动子系统状态显示和试车工艺流程显示。

如图 2 所示, 三维视景(CAVE)系统为典型的主从机架构, 主机通过局域网相连: 主机负责对外通信和交互操作, 它控制 3 台从机完成 3 个通道的显示输出。3 个从机(图形显示输出终端)分别负责左侧小屏幕、正面大屏幕输出和下面大屏幕输出。由于对外通信、交互操作只能在主机上进行, 因此上述的 5 种显示的设置与交互操作均需要在主机上进行, 从机上根据主机的指令来显示相关信息。因此, 对应的软件模块均需要是主从模式的, 主控端和显示端分别在主从机上运行。

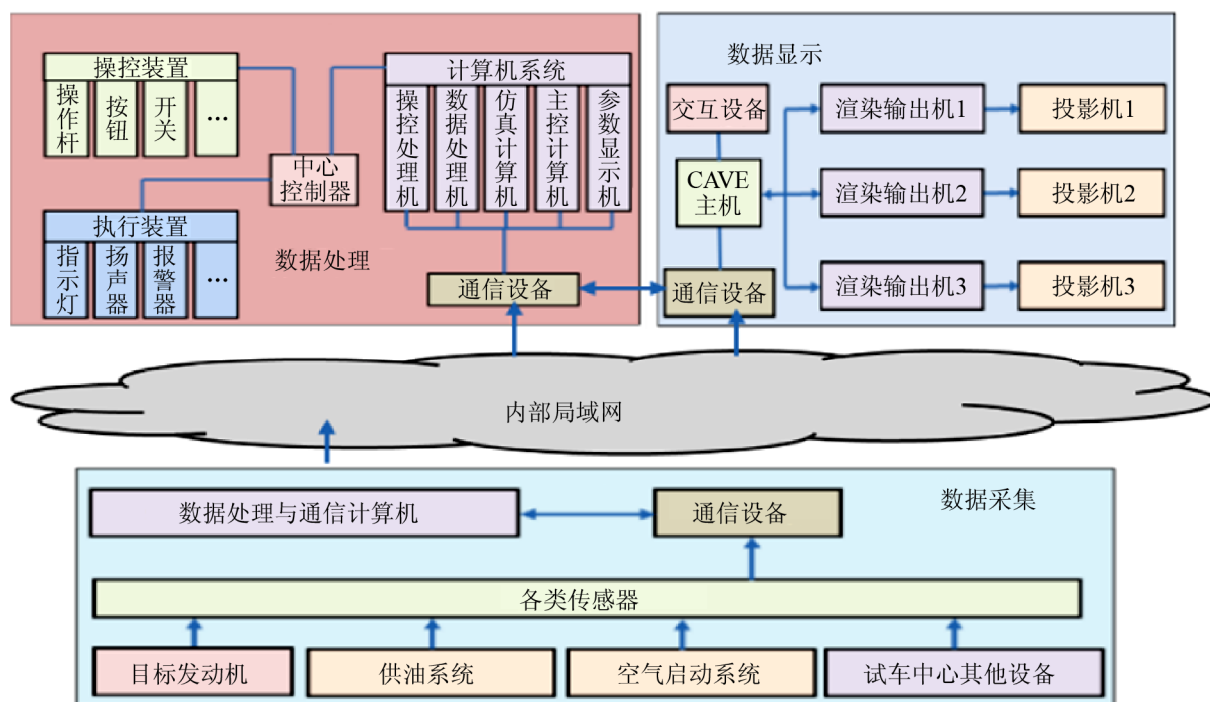


图 1 系统框架

Fig. 1 System framework

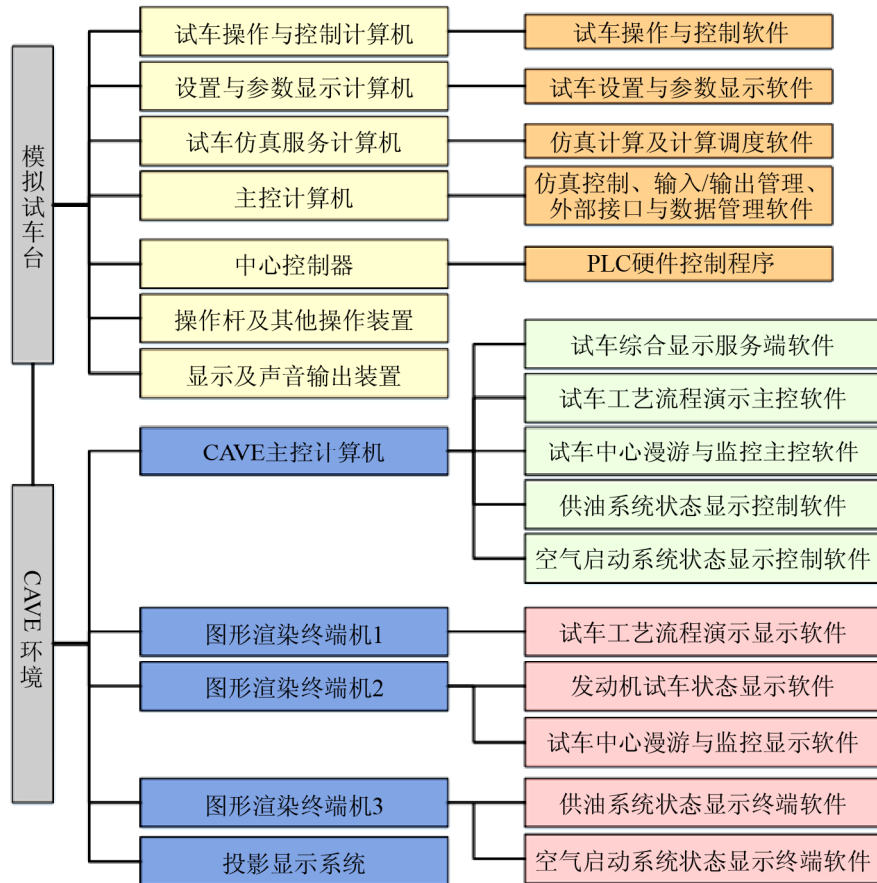


图 2 系统软硬件组成示意图

Fig. 2 Schematic diagram of system software and hardware composition

### 1.2.2 系统软件组成

发动机虚拟仿真软件主要包括试车台上运行的仿真操作和计算软件、三维视景(CAVE)系统上运行的显示与交互软件。

软件系统共包括 15 个模块, 分别运行于不同的硬件上。其中用于控制试车操作台上的操控与输出装置的是 PLC 硬件控制程序, 运行于中心 PLC 控制器上。

部分软件模块可以在同一个硬件上运行, 如仿真控制、输入输出管理、与真实试车台通信和试车数据管理 3 个模块均在主控计算机上运行; 三维视景(CAVE)系统的主机上则运行了所有从机管理模块, 以及一个综合现实服务端模块。试车设置和参数显示软件则包含 5 个子模块, 分别运行于试车操作台的 5 台计算上。

航空发动机试车过程涉及到多种输入、多种计

算、多种结果, 仿真系统的硬件要能够模拟真实操作台来进行所有操作、产生所有的信号, 软件则需要处理所有数据、完成所有的计算、以预定方式显示结果。影响上述半物理仿真试车系统研发的关键问题主要包括航空发动机性能计算模型构建、航空发动机试车辅助子系统模型和三维视景系统(CAVE)环境中的航空发动机试车显示 3D 实时可视化。第 2 节将给出上述前两个关键问题的解决方法, 第 3 节将给出第 3 个关键问题的解决方法。

## 2 面向试车过程仿真的计算模型可视化

### 2.1 航空发动机性能计算模型<sup>[13]</sup>

发动机实时试车过程中要同时测量温度、压力、转速、振动、零部件受力等几百个性能参数。这些不同类型、不同位置的参数在仿真时由不同计



算模型在同一时间的输入参数的控制下计算出来。对于实际发动机来说,发动机的控制由专门的发动机控制系统负责,目前主要使用数字式发动机控制系统(FADEC)。从这一点看,发动机的计算模型也需要在 FADEC 模型管理下协同完成试车时的性能计算任务。

本文的目标发动机属于型号产品,仿真对象为该发动机设计模型,由于航空发动机试车过程中的真实发动机性能数据、真实气路数据和仿真数据的各性能参数之间有较强的相关性,且主成分拥有很大的条件数,其观测矩阵为病态矩阵,利用传统的压缩感知方法,就会对噪声非常敏感,在数据重构过程中主成分的一点点扰动都会对其他成分造成很大的偏差。本文在获取航空发动机试车数据时利用极大增量矩阵填充(PIMC)算法,针对条件数特别大的航空发动机传感器数据进行重构,通过对样本迭代计算得到子空间以及相关系数,用低秩子空间表述数据特征,实现数据缺值填充和降噪。并将 PIMC 算法和变异 AANN 模型应用于仿真数据和真实数据,实验结果证明本文模型适用于能够解决大数据下的航空发动机传感器数据在线重构,真实数据显示本文模型重构结果接近原始数据,仿真数据结果显示本文模型有一定的降噪效果,且稳定、快速。

航空发动机试车的性能计算模型是将发动机计算模型与 FADEC 模型集成形成一个完整的发动机性能计算模型,采用上述方法获取航空发动机试车过程的性能数据,并编译成“发动机控制系统软件全数字集成测试构型动态链接库”。

## 2.2 航空发动机试车辅助子系统模型可视化<sup>[14-15]</sup>

计算模型可用于试车过程中的参数计算,而计算结果参数会引发两类现象,一类是监控台上的参数变化,包括数据和图形,另一类为结果参数驱动子系统的 3D 模型来显示当前状态,例如液面位置过低,则因数值降低变化,温度变高导致发动机火焰颜色加深,并且亮度变高,透明度变高。所以问题的关键在于将第二类现象形成的效果图像直观地显示到三维视景(CAVE)系统中。

试车系统的辅助子系统主要包括燃油供油子系统和空气启动子系统,它们分别为发动机试车供应燃油和控制进气。本文根据上述 2 个子系统的运行原理图以及相关参数,使用 Simulink 建模工具构建子系统的功能模型。在窗口中添加模块,创建仿真系统,再在命令行中输入仿真指令(程序),得出仿真结果,其建模过程如图 3 所示。

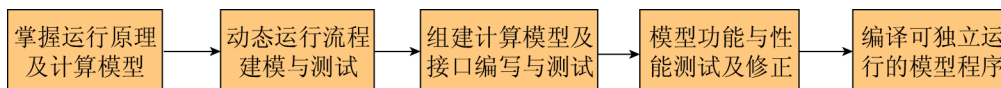
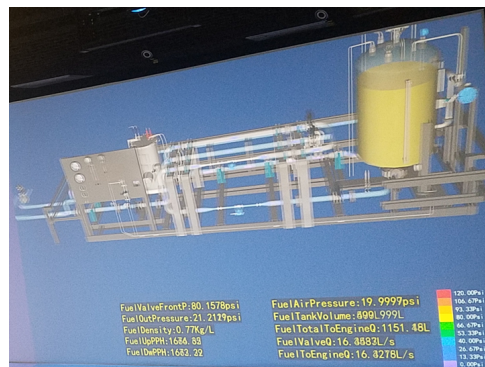


图 3 发动机试车辅助子系统建模过程

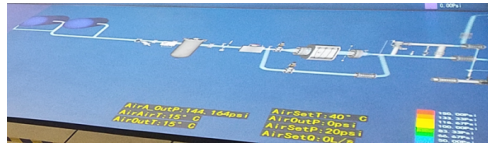
Fig. 3 Modeling process for auxiliary subsystem of engine commissioning

在创建好模型后,可以在 Matlab 中编译成独立的可执行程序,后续使用时不再需要 Matlab 环境支撑。

图 4 为子系统可视化结果,图 4(a)和(b)分别为燃油供油子系统和空气启动子系统的 3D 模型可视化结果,其中能够通过驱动粒子的运动和颜色改变,实现两个系统实际运行状态的三维动态展示。



(a) 燃油供油子系统可视化结果



(b) 空气启动子系统可视化结果

图 4 子系统可视化结果

Fig. 4 Visualization results of subsystems

### 3 航空发动机试车数据显示 3D 实时可视化

#### 3.1 三维视景系统(CAVE)环境下的试车实时可视化

试车过程 3D 综合显示软件运行于三维视景(CAVE)系统中,通过试车数据与 3D 模型融合可视化方法在三维视景(CAVE)系统中显示。三维视景(CAVE)系统由主服务器显示终端(主机)和渲染端

(从机)显示终端组成,其 3D 实时可视化显示框架如图 5 所示。

3D 数据场的实时可视化是一种较为复杂的数据处理,本文三维视景(CAVE)系统采用面向对象方法来描述各种仿真对象和组件,通过对象来实现数据与 3D 模型的融合;对于大规模 3D 数据场的可视化问题,使用二叉空间分割、多分辨率(LOD)表达和基于视锥运动的动态加载等方法来降低数据处理量,加快处理进程;标量场可视化采用动态生成云图和动态生成曲线等方法实现;矢量场可视化采用积分算法和粒子动态控制等方法实现。

渲染端(从机)子模块的“几何模型管理”包含两种功能:3D 几何模型管理和试车效果动态生成。模型与仿真数据融合即可生成试车可视化效果,其实现框图如图 6 所示。

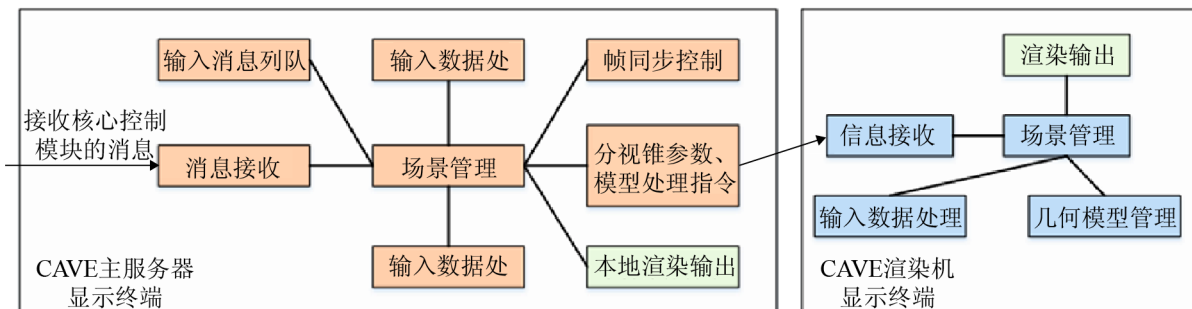


图 5 CAVE 环境中的 3D 实时可视化显示框架示意图

Fig. 5 Schematic diagram of 3D real-time visualization display in CAVE environment

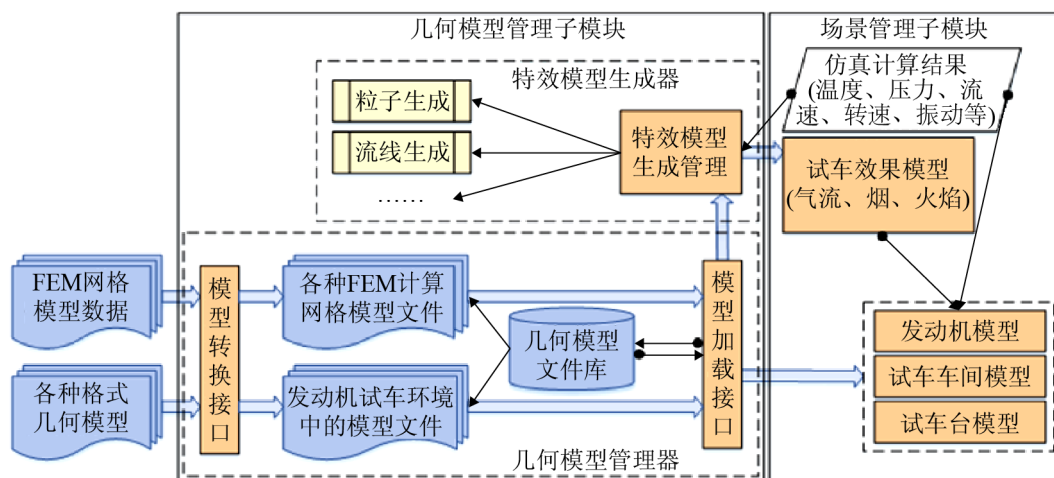


图 6 试车数据与 3D 模型融合可视化方法

Fig. 6 Visualization method for integration of trial data and 3D model



### 3.2 基于粒子系统的发动机火焰实可视化

本文发动机试车系统的喷火特效以粒子系统构成。在传统粒子系统理论的基础上,通过深入研究各种火焰模拟算法,采用了一种改进的粒子系统的火焰模型,如图 7 所示。

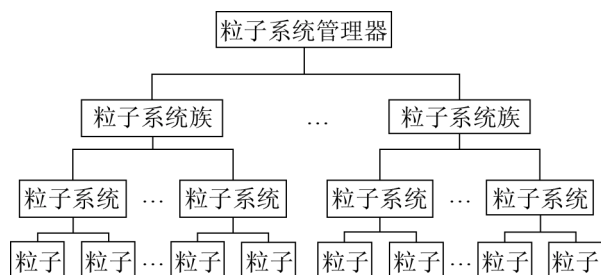
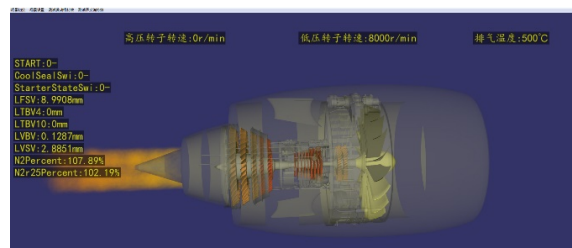


图 7 改进的粒子系统结构模型

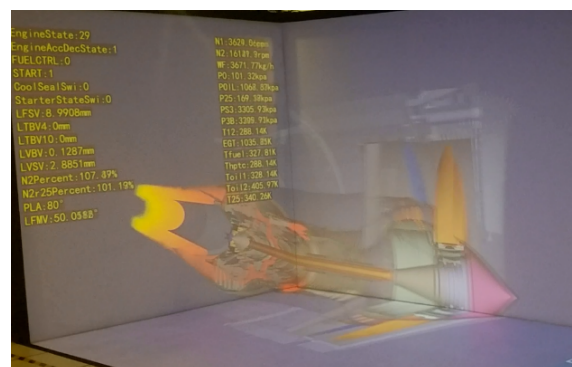
Fig. 7 Structure model of improved particle system

该粒子系统将传统的 3 层粒子系统扩展成 4 层粒子系统,进一步提高了粒子系统的可控性,新增加的一个粒子系统族层位于粒子系统管理器和粒子系统之间。其中,粒子类控制单个粒子的自身属性;粒子系统类控制速度场及各种外界环境因素对粒子造成的影响;粒子系统族集合各个属性相同粒子系统,并对他们的动态链表进行控制;粒子系统管理类控制粒子系统族的运转,确保内存的分配和释放,避免对死亡粒子系统的重新使用。该算法并非是基于物理燃烧的真正仿真,而是从中吸取必要的燃烧机理,在视觉效果上进行模拟,算法力求简单、高效,以满足真实试车过程实时显示的需要。

航空发动机运行时产生的火焰、气流等会带动温度、压力、振动和受力等多个参数发生实时变化,本系统应用上述的计算模型进行仿真计算,计算模块对喷火粒子进行实时计算,得到其位置、大小、颜色、状态和生命周期等,然后采用改进的粒子系统模拟真实火焰的运动,依次对火焰粒子进行粒子初始化、粒子属性更新和粒子消亡的绘制,并对发动机运行过程中的变化参数进行实时可视化显示。采用粒子系统的发动机火焰特效及参数模拟如图 8 所示。



(a) 发动机火焰微喷可视化模拟



(b) 发动机喷火可视化模拟剖切效果

图 8 发动机火焰特效及参数模拟

Fig. 8 Special effect of engine flame and parameter simulation

## 4 仿真应用

本文以一个实际的项目案例来验证系统的有效性和应用价值。本文设计方法已应用于上海科委 2015 年重大项目中航商发“航空发动机试车平台系统”,满足了当前和未来的试车、培训、科研排故和异地试验目击需求,实现了试验数字化、信息化技术的深度开发应用,并对其它发动机重要部件(压气机,涡轮,燃烧室)试验的全景仿真和培训提供了技术参考和经验积累,有效促进公司综合技术能力提升。

仿真试车主要分为试车准备、试车检查、开始试车、停止试车 4 个主要步骤。在开始试车后,其具体的试车仿真流程如下:启动三维视景(CAVE)系统,操作试车台油门杆系统,同时配合设置界面配置,并观察控制面板信息;试车人员通过操纵台上的机械式油门杆及实物按钮,驱动和控制发动机和试车台工艺系统模型,上述模型将大量状态参数通过预设的演示界面实时的显示在操纵台显示器上,同时驱动发动机和试车台三维视景(CAVE)系

统, 形成动态展示, 如火焰喷射, 转子旋转或燃油供应系统内部管道流动、压力和温度状态等。具体效果如图 9 所示。

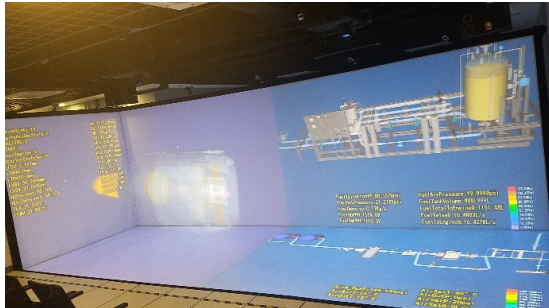


图 9 某型号航空发动机半物理试车三维视景显示  
Fig. 9 3D visualization of an aero-engine semi physical virtual trial run

图 9 显示的为某型号航空发动机正常工作状态下半物理试车三维视景, 其中正视屏幕上显示为当前状态下燃油供油子系统可视化结果及其数据显示, 俯视屏幕上显示当前状态下为空气启动子系统可视化结果及其数据显示, 左视屏幕上显示的为当前状态下航空发动机火焰的可视化结果及其数据显示。

该发动机半物理仿真系统能够真实的模拟试车环境, 基于现有 3 屏幕 5 通道三维视景(CAVE)系统, 该仿真系统的综合显示刷新率不低于 20 帧/s(立体模式)或 36 帧/s(非立体模式); 仿真操纵台的操作响应时间不大于 0.1 s; 持续工作时间不小于 16 h, 监控信号正确率达到 100%。

## 5 结论

本文研究基于发动机设计模型的试车半物理仿真系统的关键问题, 主要包括半物理仿真系统的软硬件组成与运行流程、发动机本体与子系统建模方法、三维视景(CAVE)环境中的试车数据与发动机及试车系统 3D 模型的融合显示。相关方法或方案都已经通过技术测试, 已经应用于正在研制的某型发动机试车半物理仿真系统。

文中提出的复杂仿真系统框架、数据与 3D 模型融合的实时可视化方法不但适用于本文提到的

半物理仿真系统, 还可用于其他领域。其中实时数据与 3D 模型融合可视化方法已经用于生产线运行过程实时监控。

## 参考文献:

- [1] 刘永文. 基于通用平台的系统建模和半物理仿真及其在舰船动力装置中的应用[D]. 上海: 上海交通大学, 2002.
- [2] Liu Yongwen. System Modeling and Semi-physical Simulation Based on General Platform and Its Application in Ship Power Plant[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2002.
- [3] 史妍妍, 王桂华, 刘庆东, 等. 基于需求的航空发动机研制过程分析[J]. 航空科学技术, 2017, 28(1): 48-53.
- [4] Shi Yanyan, Wang Guihua, Liu Qingdong, et al. Analysis of aeroengine development process based on demand[J]. Aerospace Science and Technology, 2017, 28(1): 48-53.
- [5] Naser L, Ilir D, Shpetim L. Modelling and Simulation of the Turbocharged Diesel Engine with Intercooler[J]. IFAC-Papers on Line (S2405-8963), 2016, 49(29): 237-242.
- [6] 江平, 时瑞军, 武一冰, 等. 航空发动机控制系统半物理仿真试验器设计[J]. 测控技术, 2012, 31(增 1): 68-71.
- [7] Jiang Ping, Shi Ruijun, Wu Yibing, et al. Design of Aero-engine Control System Semi Physical Simulation Tester[J]. Measurement and Control Technology, 2012, 31(S1): 68-71.
- [8] Chen G. Vibration Modelling and Verifications for Whole Aero-engine[J]. Journal of Sound and Vibration (S0022-460X), 2015, 349: 163-176.
- [9] Hu B, Huang Y, Wang F. FIA Method for LBO Limit Predictions of Aero-engine Combustors Based on FV Model[J]. Aerospace Science and Technology (S1270-9638), 2013, 28: 435-446.
- [10] 孙永侠, 王曦, 何皓, 等. 某型航空发动机半物理仿真平台研究[C]// 中国航空学会第十四届发动机自动控制专业学术交流会议论文集. 北京: 中国航空学会, 2008: 157-161.
- [11] Sun Yongxia, Wang Xi, He Ai, et al. Research on a Semi Physical Simulation Platform for an Aero Engine [C]// Proceedings of the 14th Academic Exchange Meeting on Engine Automatic Control of CAAC. Beijing: Chinese Academy of Aeronautics, 2008: 157-161.
- [12] 陈胜. FADEC 半实物仿真平台测控系统设计[J]. 微型

- 电脑应用, 2012, 28(12): 32-34.
- Chen Sheng. Design of Measurement and Control System for FADEC Hardware in the Loop Simulation Platform[J]. Microcomputer Application, 2012, 28(12): 32-34.
- [9] 杨伟, 蔡开龙. 航空发动机半实物仿真实验台优化设计[J]. 国外电子测量技术, 2006, 25(11): 41-43.
- Yang Wei, Cai Kailong. Optimization Design of Aero-engine Hardware in the Loop Simulation Experimental Platform[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2006, 25(11): 41-43.
- [10] 张磊, 黄金明. 三维规则数据场交互式可视化系统的研究与实现[J]. 科技信息, 2009(10): 25-26.
- Zhang Lei, Huang Jinming. Study and Implementation of Interactive Visualization System of 3D Regular Data Field[J]. Science and Technology Information, 2009(10): 25-26.
- [11] Sanghi V, Lakshmanan B K, Rajasekaran R. Aerothermal Model for Real-Time Digital Simulation of a Mixed-Flow Turbofan Engine[J]. Journal of Propulsion & Power (S0748-4658), 2015, 17(3): 629-635.
- [12] 刘德悟. 航空发动机测试可视化再现系统的开发与研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2008.
- Liu Dewu. Development and Research of Visualization Reproduction System for Aeroengine Test[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2008.
- [13] Liu Z, Li L, Ding Y, et al. Modeling and Control of an Air Supply System for a Heavy Duty PEMFC Engine[J]. International Journal of Hydrogen Energy (S0360-3199), 2016, 41(36): 16230-16239.
- [14] Wang C, Li Y G, Yang B Y. Transient Performance Simulation of Aircraft Engine Integrated with Fuel and Control Systems[J]. Applied Thermal Engineering (S1359-4311), 2017, 114: 1029-1037.
- [15] Wu Y, Liu M, Zheng W J, et al. Multiple-Point Adaptive Performance Simulation Tuned to Aeroengine Test-Bed Data[J]. Journal of Propulsion and Power (S0748-4658), 2015, 25(3): 635-641.