

文章编号: 1000 8055(2010)07-1659-05

液体火箭发动机虚拟试验技术的研究

段 娜¹, 张黎辉¹, 徐珊珊¹, 朱子环², 于海磊²

(1. 北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191;

2. 中国航天科技集团公司 航天推进技术研究院 北京航天试验技术研究所, 北京 100074)

摘 要: 设计了虚拟试验平台的框架结构, 开发了面向对象的映射型数据库系统, 分析了试验管理器模块的实现流程, 阐述了建模仿真模块、虚拟环境模块等关键功能模块的研制过程, 通过多种接口机制将多种技术集成为一个无缝计算机环境。最后, 举例进行说明, 并总结了虚拟试验技术应用到液体火箭发动机试验的优势。

关 键 词: 液体火箭发动机; 虚拟试验; 工程数据库; 面向对象; 层次结构

中图分类号: V434

文献标识码: A

Study on virtual test technology of liquid propellant engine

DUAN Na¹, ZHANG Lihui¹, XU Shanshan¹,

ZHU Zihuan², YU Haili²

(1. School of Astronautics,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

2. Beijing Institute of Aerospace Testing Technology,

Academy of Aerospace Propulsion Technology,

China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100074, China)

Abstract: The framework of the virtual test bed was designed. Objective/relationship mapping storage structure database system was developed, and the implementation flow of test management was analyzed. The development process of modeling and simulation module and virtual environment module was mainly explained. Then, the unique collaborative computing environment was developed via various interfaces, and the examples were given. At last, the advantages of applying virtual test in liquid rocket engine were concluded.

Key words: liquid rocket engine; virtual experiment; engineering database; oriented object; hierarchical structure

随着计算机仿真技术、数据库技术以及人机交互理论的发展, 虚拟试验技术^[1]已开始应用于各个领域: 军事、建筑设计等^[2]。它建立在精准的数学模型和试验数据的基础上, 需要完善的虚拟试验方案, 构建虚拟试验环境, 预测系统在各种复杂条件下的性能, 评估虚拟试验结果, 利用可视化技术显示试验结果, 实现大量数据和软件的集成。将虚拟试验技术应用到液体火箭发动机试验中,

在一定程度上得到和真实发动机点火相似的功能, 提高对物理过程的认识; 也可以增加试验数据样本, 减少真实点火次数, 节约大量热试车费用。

本文针对某液体火箭发动机地面试验台系统搭建了相应的虚拟试验平台, 并得到了应用, 可以集成管理发动机试验过程中的所有数据信息, 可以对发动机特性进行定性/定量模拟, 对工程实践能起到预示和指导作用, 是在热试车试验和数值

收稿日期: 2009 05 26; 修订日期: 2009 08 13

作者简介: 段娜 (1983-), 女, 河北保定人, 博士生, 主要从事推进系统虚拟试验方向的研究。E-mail: donnabuaa@163.com

仿真基础上的一种新发展,在技术集成上是一个创新,既对已有设计资源实现充分的共享,又通过对比分析实现设计过程的不断创新与优化。

1 发动机虚拟试验平台结构

本文设计的液体火箭发动机虚拟试验平台的结构示意图如图 1 所示.它包括 7 部分内容:①试验管理器模块;②试验对象仿真模块;③试验过程运行控制模块;④试验三维环境显示模块;⑤检模评估模块;⑥数据库管理系统;⑦系统集成接口机制。

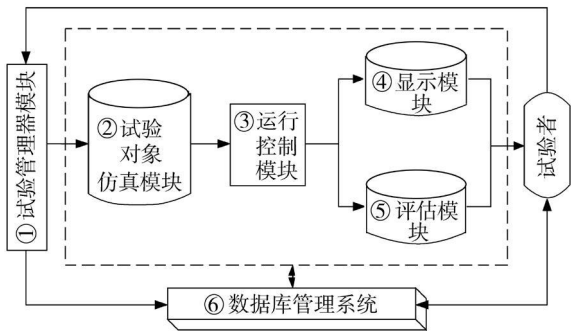


图 1 虚拟试验平台结构示意图

Fig. 1 Structural schematic plan of the virtual test bed

其中,试验对象仿真模块包括模型和算法两个独立部分,共同构成试验对象,是整个平台的核心部分;数据库系统承担着虚拟试验的信息管理,保证试验数据和参数的管理、传递和共享,是支撑虚拟试验的重要基础。

2 虚拟试验平台的研制

下面举例说明关键模块,如:数据库系统、建模仿真模块、试验管理器模块和虚拟环境模块的功能设计与研制.图 2 是本虚拟试验平台的总的调度界面。



图 2 总调度界面

Fig. 2 Interface of main scheduler

2.1 数据库系统模块的实现

以往,进行火箭发动机的仿真的研究工作中,普遍采用程序变量和数据文件的方式存储和管理仿真数据^[5],但要进行虚拟试验的话,仿真计算量增大,对可视化、智能化要求提高,并且同时要存储、管理大量真实地面试车试验数据,所以采用面向对象的方法进行大量各种形态数据的管理、处理任务应运而生。

本平台在结构化查询语言(structured query language,简称 SQL) Server 2000 关系数据库上开发出面向对象的工程数据库.对象(即系统和部件)数据进行关联映射,使得对象的数据存储结构会更清晰,更加易于对工程数据进行基本数据操作以及实现快速查询等功能。

数据结构举例如图 3 所示.整个数据库以“表_试验对象”为基准数据表展开,衍生其他数据表(例如:表_试验方案、表_试验环境、表_试验结果、表_评估结果).试验对象作为外部查询对象,各功能表以各自 ID 号为主键,存储在表_试验对象中。

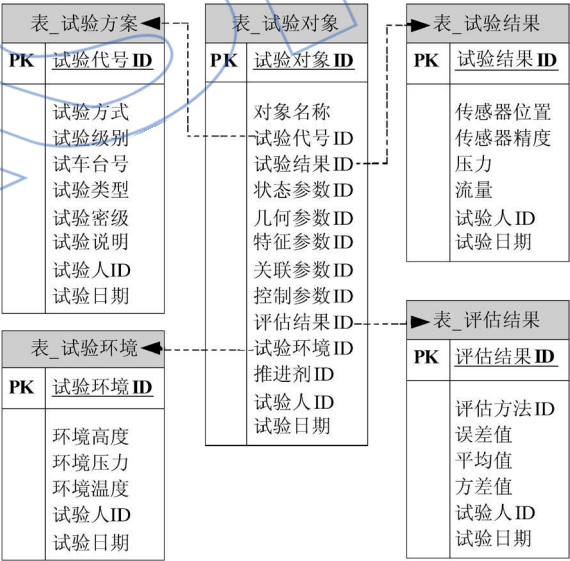


图 3 数据库结构图

Fig. 3 Structure chart of the database

2.2 建模仿真模块的实现

2.2.1 试验对象划分

本平台针对液体火箭发动机试验特点,把试验对象分为三类:①虚拟部件试验;②虚拟发动机单机或子系统试验;③动力系统试验.三类对象层层包含,所以,只需要采用面向对象的方法编写通用化、模块化的部件模块程序,就可以构建任意的不同层次的试验对象.每种部件为一个类模块,每

个类对应一个图标,如图 2 工具栏所示,典型种类的部件如贮箱、管路、阀门、喷注器、燃烧室、喷管等组成。

2. 2. 2 试验对象建模与接口

对不可压缩液体管流,管壁摩擦取唯象的准稳态描述方式,忽略管流中的轴向热传导,忽略壁面传热,采用分布式的特征有限元法,如图 4 所示,接口设置完全按照真实部件的物理接口设计,不需要增加专门用于连接的部件设置,是对以往研究工作的一个改进^[4],减少了计算量,更便于连接部件对象,更贴近实际物理现象。

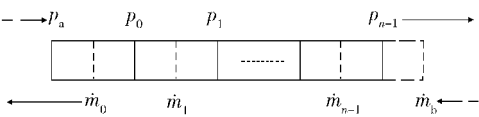


图 4 不可压液体管道
Fig. 4 Incompressible liquid pipe

上游边界 a 接口的输入参数为压力 p_a , 传出参数为流量 m_0 ; 下游边界 b 接口的输入为流量 m_b , 传出参数为压力 p_{n-1} 。

能量方程

$$\frac{dp_i}{dt} = \frac{1}{C_i}(\dot{m}_{i+1} - \dot{m}_i) + \varepsilon \frac{a}{A} \left(\frac{d\dot{m}_{i+1}}{dt} - \frac{d\dot{m}_i}{dt} \right)$$

$$C_i = \frac{\xi V_i}{\rho a^2}$$

动量方程

$$\frac{d\dot{m}_i}{dt} = \frac{1}{\lambda} \left(p_{i+1} - p_i - \frac{\xi}{\rho} \cdot \dot{m}_{i+1}^2 \right)$$

$$i = 0, \dots, n-1$$

式中 ξ 为小分段数时并联导纳的修正系数, ε 为阻尼修正系数, a 为声速。

过滤器部件代表着一些压降组件,由试验测量出流量与压降的关系模型,是最简单的模型形式,也是准确度较高的一种数学模型

$$\Delta p = \left(b_1 \frac{1}{Re} + b_2 \right) \rho V^2$$

式中 V 是流速, Re 是雷诺数, b_1 和 b_2 为实验测量资料。

如图 5 所示,过滤器压降模块的上游接口 a 的输入参数为管路或其他上游部件的输出参数

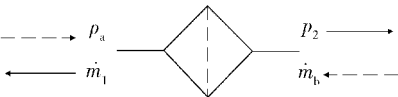


图 5 过滤器接口
Fig. 5 Filter interface

p_a , 输出参数为上游部件的 b 口的输入参数 m_1 。接口一致性好,从而保证了数据的通畅传递,增强了模块化结构的兼容性和通用性。

2. 2. 3 试验对象的组合求解

部件对象可以任意组建系统对象,拖拽工具栏中的部件图标,并按照物理流动顺序连接,就完成了对象设置,同时,自动生成表示连接关系的底层系统矩阵,作为计算时参数(流量、压力、温度等)传递的方向。然后由常微分方程组的求解算法统一求解由矩阵关系确定的试验对象,总共 $2(n-1)$ 个方程的数学模型组,最后得到各点的温度、压力、流量等关注值。

2. 3 试验管理器模块的实现

试验管理器模块功能实现如图 6 所示,过程是:选择试验方案,确定试验对象,调用相应的模型和算法,设置试验对象的参数,包括:控制参数、设计参数、环境参数、试验者信息等,最后进入运行过程控制模块,包括:起动、运行、继续、调速等,直至得到试验结果,并利用真实点火数据对试验结果进行评估计算。

粗箭头代表业务逻辑层(仿真程序等)与数据库的访问关系,即数据流走向,左边为被访问的数据库,右边为调用的程序流程。

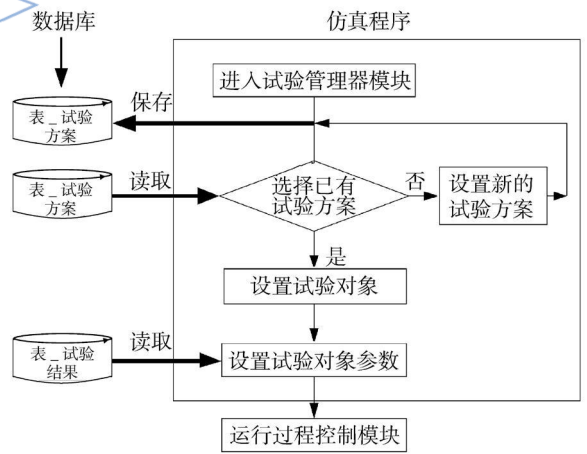


图 6 试验管理模块流程
Fig. 6 Flow of the test management

2. 4 虚拟环境模块的实现

虚拟试验的最大特点就是能进行三维环境的交互,所以搭建虚拟环境是关键技术。在进行虚拟试验时,首先设置环境等外部参数,给定温度、压力初始值,搭建系统,此时,用视图到实体的映射建立模型与实体之间的关系调用三维图形,仿真

结果实时传至三维显示, 就可以模拟因条件限制等原因而难以实现的场景。

本平台采用 3DS Max 对液体火箭发动机及各主要部件进行三维几何建模, 并与仿真程序建立关联, 将试验信息(温度、压力、流量) 映射到三维实体模型上, 就可以模拟因条件限制等原因而难以实现的场景。

3 虚拟试验平台的应用

图 7 给出了将应用的算例液体火箭发动机的系统图, 其数学模型是由一组非线性微分方程和代数方程构成的。

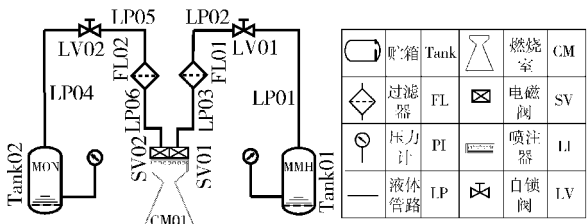


图 7 系统图
Fig. 7 System diagram

把工具栏中的部件图标拖拽并按照物理流动顺序连接, 得到系统矩阵, 如图 8 所示。

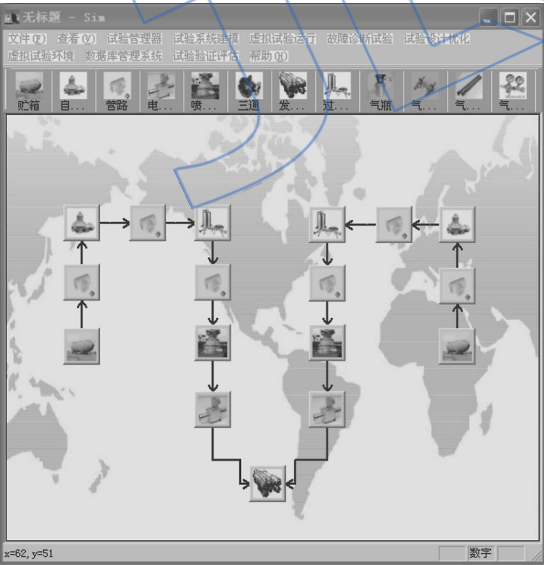


图 8 搭建系统
Fig. 8 Set diagram

结果如图 9~ 图 11 所示. 图 9 给出了贮箱的计算结果, 贮箱压力呈阶梯状下降, 与此同时, 流量随着电磁阀的开关时序变化, 在给定的响应时

间内, 流量做出了相应的变化, 可以证明程序的可行性. 图 10 是部件过滤器的仿真结果. 图 11 是电磁阀前压力的试验与仿真结果的对比, 总体趋势一致, 证明了程序的准确性。

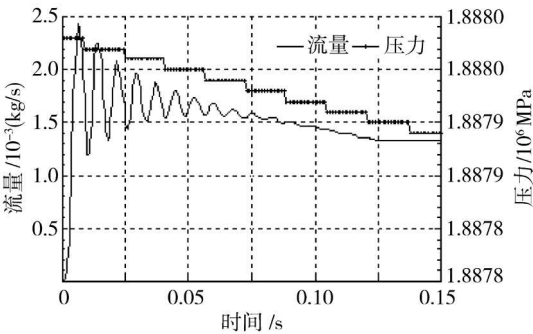


图 9 贮箱
Fig. 9 Tank

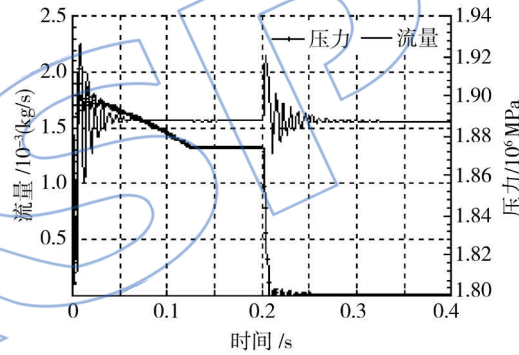


图 10 过滤器
Fig. 10 Filter

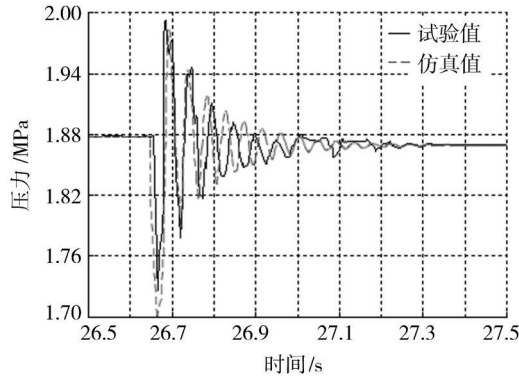


图 11 电磁阀前压力对比
Fig. 11 Comparison of pressure before solenoid valve

如图 12 所示, 三维环境显示了发动机点火的工作过程, 管路充填过程由管路中颜色变化表示, 贮箱的液体的流动可以由液面位置的变化表示, 脉冲效果由发动机火焰效果渲染表示, 另外, 可以

在任意位置添加流量、压力测量计, 显示当前位置的数值结果。

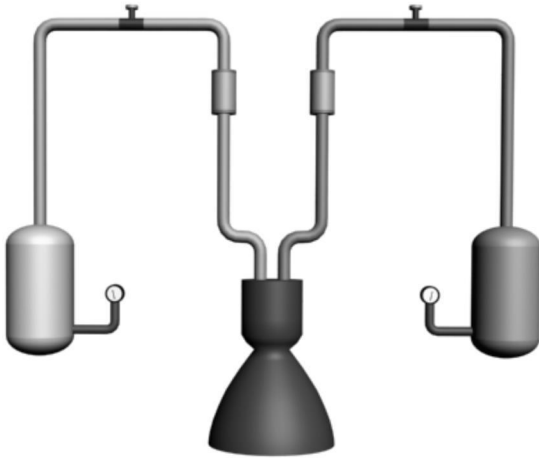


图 12 3D 模型

Fig. 12 Three dimensional model

4 结 论

液体火箭发动机虚拟试验并不是一个全新的技术, 而是一种新方法, 它通过多种接口机制, 将多种计算机技术应用到发动机虚拟试验中来, 建成了一个集数值仿真、评估验证、数据库系统、三维演示以及流程控制于一体的无缝计算机环境。

本虚拟平台基于液体发动机地面试验台系统, 可以综合管理和利用发动机的各种参数、仿真结果和历史试车结果; 因为试验过程的仿真模型经过真实试车结果的验证和修正, 所以本虚拟试验平台能较准确迅速地反映下一代发动机产品试验特性; 又因为本平台有三维虚拟显示, 可以更直观、更有效的观测试验效果, 具有虚拟试验视景功能, 可以在一定程度上取代或减少真实点火试验, 避免了真实点火伴随的爆炸危险和巨大噪声, 同时节约了成本。

本文对液体火箭发动机虚拟试验平台的应用技术进行了初步研究, 主要实现了虚拟试验技术的系统集成特性。在以后的工作中, 可以把更为复杂的模型和先进的方法融入到整个平台中来, 细化各个工作过程模型, 进一步推广应用范围。

参考文献:

- [1] James M L, Baroth E, Mellinger L, et al. Integrated virtual test bed for IVHM systems on 2nd generation RL V[R]. IEEEAC Paper 1311, 2002.
- [2] Rabelo L. The virtual test bed project[R]. NASA/ASEE

Summer Faculty Fellowship Program, 2003.

- [3] 闫少光, 门昱, 周斌文, 等. 卫星真空热试验数据库的设计与实现[J]. 航天器环境工程, 2006, 23(4): 201-204.
YAN Shaoguang, MEN Yu, ZHOU Binwen, et al. The design and implement on database of satellite vacuum test argent system [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2006, 23(4): 201-204. (in Chinese)
- [4] 张育林, 刘昆, 程谋森. 液体火箭发动机动力学理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [5] 刘昆, 张育林, 程谋森. 液体火箭发动机系统瞬变过程模块化建模与仿真[J]. 推进技术, 2003, 24(5): 401-405.
LIU Kun, ZHANG Yulin, CHENG Mousen. Modularization modeling and simulation for the transients of liquid propellant rocket engines[J]. Journal of Propulsion Technology, 2003, 24(5): 401-405. (in Chinese)
- [6] 颜庆津. 数值分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2001.
- [7] 杨东梅, 朱胜缘, 路伟成. Open GL 与 3DS Studio MAX 结合实现三维仿真[J]. 电子学报, 2004, 31(2): 33-35.
YANG Donghai, ZHU Shengyuan, LU Weicheng. Three dimensional simulation by open GL and 3DS studio MAX [J]. Journal of Electron, 2004, 31(2): 33-35. (in Chinese)
- [8] 李家文, 张黎辉, 张振鹏. 液体火箭发动机数值模拟的计算模型建立方法[J]. 推进技术, 2002, 23(5): 363-365.
LI Jiawen, ZHANG Lihui, ZHANG Zhenpeng. Method for calculation model establishment in liquid propellant rocket engine numerical simulation [J]. Journal of Propulsion Technology, 2002, 23(5): 363-365. (in Chinese)
- [9] 高芳, 陈阳, 张振鹏. 液体火箭发动机实验台液路系统工作过程仿真[J]. 航空动力学报, 2006, 21(2): 417-420.
GAO Fang, CHEN Yang, ZHANG Zhenpeng. Fault simulation and analysis of the FLPRE test-bed fluid system[J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(2): 417-420. (in Chinese)
- [10] 刘昆, 张育林. 液体推进系统充填过程的有限元状态变量模型[J]. 推进技术, 2001, 22(1): 19-21.
LIU Kun, ZHANG Yulin. Finite element state variable models for the priming process of feed lines [J]. Journal of Propulsion Technology, 2001, 22(1): 19-21. (in Chinese)
- [11] 黄卫东, 朱恒伟, 王克昌, 等. 液体火箭发动机静态仿真通用模块化方法[J]. 航空动力学报, 1998, 13(1): 53-56.
HUANG Weidong, ZHU Hengwei, WANG Kechang, et al. General modularize approach of liquid rocket engine static simulation [J]. Journal of Aerospace Power, 1998, 13(1): 53-56. (in Chinese)
- [12] 杨雪, 张振鹏, 杨思锋. 基于 AHP 的液体火箭发动机地面试验监测参数的选取方法研究[J]. 航空动力学报, 2006, 21(3): 615-620.
YANG Xue, ZHANG Zhenpeng, YANG Sifeng. Study of monitoring parameter selection based on AHP for LRE in ground test [J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(3): 615-620. (in Chinese)