

基于工作流的液体火箭发动机 虚拟试验流程管理

段 娜¹, 朱子环¹, 于海磊¹, 张黎辉²

(1. 北京航天试验技术研究所, 北京 100074; 2. 北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191)

摘 要: 以液体火箭发动机虚拟试验为对象, 研究了数字化试验流程管理的解决方案。通过分析发动机虚拟试验流程, 建立了基于工作流的试验管理系统过程仿真模型, 提出了一个支撑整个试验管理系统的层次化体系架构。该架构为整个虚拟试验过程提供了统一的试验信息集成平台和应用服务环境。最后, 以试验准备阶段为例, 给出了该系统的一个集成应用, 介绍了基于图形管理系统的实现过程, 得到了过程中资源消耗优化的结论。所提出的液体火箭发动机虚拟试验流程管理体系为真实试验的资源优化提供了理论依据, 在航天领域的数字化试验方面进行了探索性研究。

关键词: 液体火箭发动机; 虚拟试验; 试验流程管理; 离散事件; 工作流

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2012) 03-0074-06

Workflow-based process management in virtual test of liquid rocket engine

DUAN Na¹, ZHU Zi-huan¹, YU Hai-lei¹, ZHANG Li-hui²

(1. Beijing Institute of Aerospace Testing Technology, Beijing 100074, China;

2. School of Astronautics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The digitalized test process management in the virtual test of liquid rocket engines is studied. By analyzing the virtual test process of such engines, the workflow-based process simulation model of test management system is established, and a hierarchical architecture is proposed to support the test process management system. The architecture provides a unified test information integrated platform and an application service environment for the entire virtual test process. Taking preparatory stage of the test as an example, the integrated application of the the management system is shown, and the implementation process based on graphics management system is introduced. A conclusion of optimized consumption of resources is achieved. The test process management system presented in this paper for the virtual test of liquid rocket engines can provide a theoretic foundation for resource uti-

收稿日期: 2011-11-17; 修回日期: 2012-02-06

作者简介: 段娜 (1983—), 女, 工程师, 研究领域为推进系统试验和仿真

lization in real test. It conduces to farther research in digitalized test process management in the field of space technology.

Keywords: liquid rocket engine; virtual experiment; test process management; discrete event; workflow

0 引言

随着信息技术的发展,为满足航天产品的研制需求,产品设计和生产的数字化已被广泛应用,例如波音-777和俄RD170等航天产品的研制都大量应用了数字化技术并取得了很好的效果,缩短了产品研制周期,降低了研制成本和风险。虚拟试验是产品数字化技术的应用之一,它的定义是:在构建的虚拟环境中采用数值仿真技术建立“试验对象”和“试验设备”,实现数字化的试验流程管理,完成对“试验对象”的操作流程,对试验过程进行动态模拟,“采集”试验结果,最后进行统计分析计算。数字化试验流程管理可以用来实现虚拟试验过程的跟踪、调度、监测和修正等功能,集成并统一管理试验的相关数据和信息,为试验人员提供操作指导及预警,同时对人员物资进行优化配置。因此,数字化流程管理是液体火箭发动机虚拟试验研究中最关键的部分。

在传统液体火箭发动机试验中,存在着大量需要凭经验做决策的现象,造成较大人力和物力的浪费。目前关于试验台仿真研究多集中在连续系统仿真方面,没有通过离散仿真研究对试验操作过程进行解析,对业务缺乏描述能力。文献[8]只侧重于试验数据信息的存储管理,文献[9]和[10]论述了流程管理,但是构造的是一个软件设计环境,对交互操作没有有效的控制机制。

为了满足液体火箭发动机试验流程仿真的要求,基于对以上文献的研究并结合其虚拟试验的特点,本文提出了基于工作流的液体火箭发动机数字化试验流程管理的体系结构(Digital test process management system, DTPMS),DTPMS是一种以信息系统为支撑,借助于集成化和系统化

的管理思想,以操作工序管理为基础,以动态提供试验进度和资源耗费情况信息为主要目标,以优化资源配置和节能降耗为根本宗旨,实现虚拟试验流程自动化的系统管理模式。

1 虚拟试验流程管理系统

液体火箭发动机试验(以下简称“液发试验”)过程的复杂性决定了其虚拟试验流程管理同样具有复杂性的特点,具体表现在:物理操作与化学反应同时存在于试验过程中;操作工序繁杂,需要多部门有序配合;试验场地与控制场地分散。所以,亟需建立一个集成化和系统化的液发试验流程管理平台。

液体火箭发动机试验流程是一个动态过程,要提高对这个动态过程的仿真可信度,其前提条件是建立准确的、完备的液发试验操作流程的物理模型。下面通过分析一般常温推进剂液发试验操作流程的特点,提出管理系统的模型体系并具体阐述该体系的构成。

1.1 试验流程分析

一个典型的虚拟液发试验的全生命周期操作流程包括以下5个部分:①制定虚拟试验方案;②搭建虚拟试验系统;③虚拟试验准备阶段;④虚拟试验过程阶段;⑤虚拟试验后处理阶段。全部流程如图1所示。从图中可以看出,这5个部分的内容具有如下特点:

1) 离散与连续事件仿真混杂。虚拟试验中,试验准备阶段和试验过程阶段中的每一个子过程的表示过程都是连续仿真,但是相互之间又是一个离散事件仿真。

2) 多部件耦合。当试验台系统中任一部件的状态发生变化时,都会影响其他部件,使其他部件的状态发生转移。

3) 状态唯一性。试验台任意部件在任一时刻的状态是唯一的，不可能同时处于2个状态内。

4) 流程复杂性。基本试验过程存在顺序结构、分支结构和合并结构且线路长、工序多。

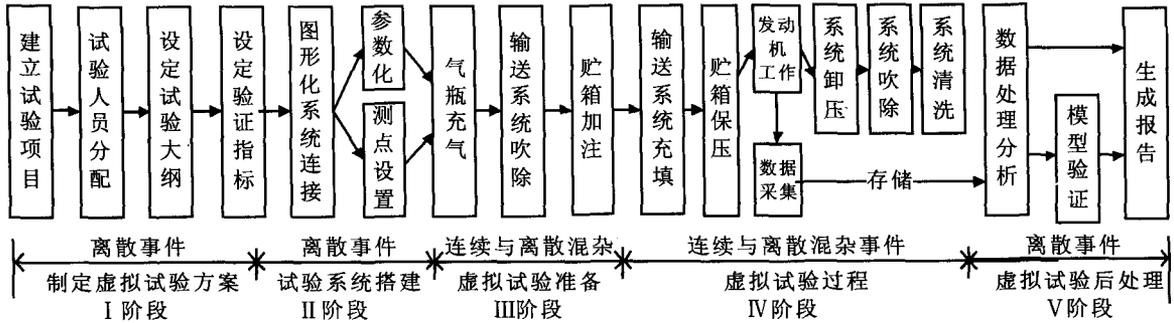


图1 液体火箭发动机虚拟试验全生命周期流程

Fig. 1 Whole lifecycle in virtual test process of liquid rocket engine

图1中，每一个试验操作动作由一个活动块表示，相互之间全都不是连续的，每次试验过程都由一连串试验操作动作连贯执行构成。所以，“过程性”成为这一体系的最大特征。同时，整个操作流程中既有连续型的特征又有离散型的特征，是一种半离散半连续型过程，对这类业务的仿真不仅仅要考虑离散事件间的数据传递与存储，还要提供完整的流程触发机制。

1.2 试验流程管理系统的体系结构

根据上述分析，选择 workflow 模型诠释这一动态过程。workflow 模型是对试验过程的抽象表示，它以过程模型为核心，包含了 workflow 执行所需要的所有信息。workflow 模型仿真就是利用离散事件驱动的仿真引擎模拟执行 workflow 模型中的各项活动，自动推进 workflow 实例。workflow 管理模型建立阶段的功能主要是完成试验操作过程的计算机化的定义，也就是完成该过程建模的任务。

在液体火箭发动机虚拟试验中，数据分为2种类型：静态数据和动态数据。静态数据包括：试验台系统连接关系、结构参数和性能设计参数等；动态数据包括操作动作序列和状态参数等。根据数据分类，提出基于 workflow 的数字试验流程管理系统的体系结构（DTPMS），见图2。

DTPMS 系统采用了3层结构：

静态实体层（I）负责搭建虚拟试验平台的静态连接结构并赋予其实体特征；

动态行为层（II）即 workflow 引擎，用于建立与管理虚拟试验流程的运行，负责搭建试验的操作流程，生成消息队列并对其进行语义解析，完成如初始条件、仿真周期、运行时间等参数的设置与修改以及一些管理功能如启动、运行、暂停、继续、终止、调速和恢复等；

客户端（III）操作人员监控、交互控制和终端显示。

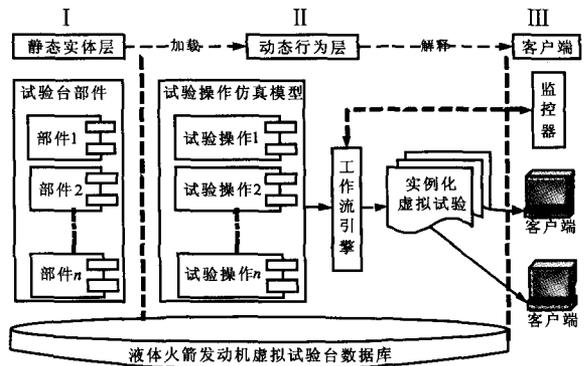


图2 数字化试验流程管理系统的体系结构

Fig. 2 Architecture of DTPMS

因为状态具有耦合性，试验台整个体系在每个过程中成为不可分割的整体。本文建立的工作流模型是单一对象对多种状态形式的，可表示为：Model=W (A, B, C)，其中，A 代表静态模型，B 代表动态模型，C 代表控制模型。

2 虚拟试验流程管理系统集成应用

液体火箭发动机虚拟试验管理系统的集成应用就是要实现试验理论阶段、试验准备阶段、试验进行阶段和试验总结阶段的各种业务流程的部分工作或全部工作的集成管理, 并提供流程设计、运行控制和监督功能, 其中的核心内容是 workflow 引擎的设计。

2.1 集成策略

为实现连续和离散事件混杂系统管理, 试验操作进程采用事件驱动的方式。因为是虚拟试验, 所以只关注对试验结果有影响的事件。事件图采用图形化的方式表示事件间的调度关系, 一个事件得到处理后会在条件满足时调度发生在未来的另一事件。每个操作动作程序都是一个没有载入对象和状态的通用程序, 保证了操作程序的可重用性。每一次的操作, 例如执行程序、数据

传输等都叫做一个任务, 由活动块表示。一系列连锁的活动块就表示为试验流程, 活动块之间通过边界数据单元进行状态更新。另外, 连续系统仿真为得到状态变量动态变化过程并由此分析系统性能。离散系统的仿真目的不是得到这些状态的具体变化, 而是得到系统中有关变量的统计信息, 因此需要有统计计数部件。

试验实例搭建的主要部分是 workflow 引擎, workflow 引擎的业务流程分为执行和监控 2 个部分, 见图 3 所示。

执行部分的工作是: 遍历每个状态活动图, 运行它, 当满足当前状态活动图的结束条件时, 依照遍历次序, 运行下一部件, 直到结束试验流程。与此同时, 所有这些操作的进程都要以消息的形式实时存储到 msgList 列表中, 供监控使用。监控部分的工作是: 实时读取 msgList 列表中的内容, 及时显示到平台表层, 使虚拟试验操作人员能实时监视到执行进程的状态。

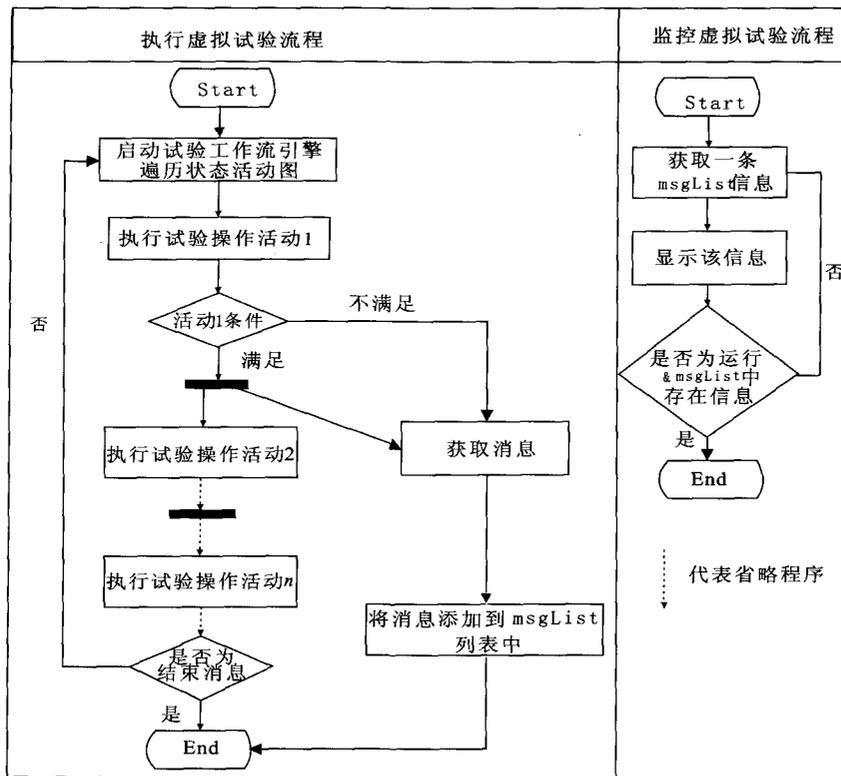


图 3 workflow 引擎的业务流程图

Fig. 3 Flow chart of workflow engine

实现上述集成策略，在保证试验过程的高效运转的同时能够最大程度上实现试验操作过程的重用，实现了试验操作过程逻辑与包含在部件单元应用中任务逻辑之间的分离，这种分离使得两种逻辑可以各自独立修改，而且同一个任务逻辑也能够不同的过程逻辑中实现重用。

2.2 算例

如图4所示，以虚拟试验准备阶段为例，应用上述策略创建试验实例。总调度界面主要包

括：虚拟试验操作流程树区；虚拟试验系统搭建区；数据库显示区和试验流程实例区共4个区域。

首先，通过图形化的方法调用模块化部件模型实体，搭建仿真试验台系统；其次，调用图形化的试验台所处的每个不同状态的仿真模型，在本例中有气瓶充气、舱内外吹除、贮箱加注和贮箱增压；再设置 workflow 引擎和控制参数，调试并监控；最后，得到仿真结果与时间特征集。

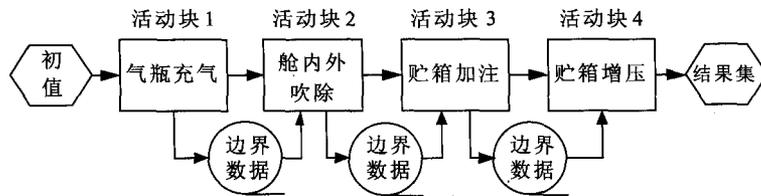


图4 准备阶段的实施流程

Fig. 4 Implement flow of preparatory stage

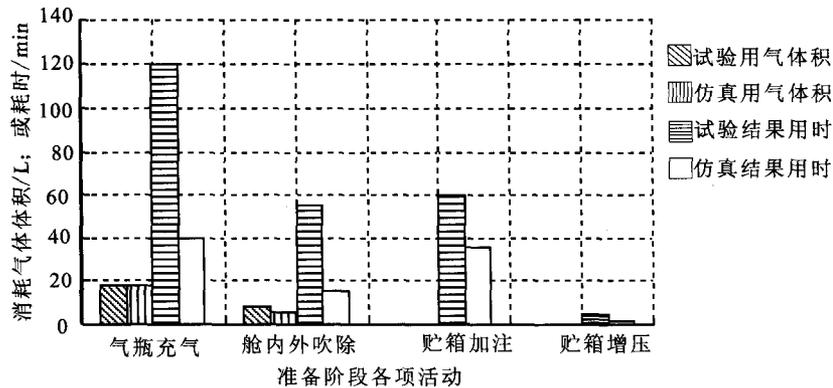


图5 试验和仿真中用气量和时间对比

Fig. 5 Comparison of consumption of gas and time in simulation and test

通过数值计算对传统流程准备阶段的用气量进行优化，结果如图5所示。图5数据显示，通过试验操作流程的仿真，由统计部件数可知需要比原本凭经验进行试验少得多的用气量，同时节省了时间，证明本研究所设计系统的有效性和实用性。

3 结论

确立了进行液体火箭发动机虚拟试验的一般

流程，将 workflow 的概念引入到虚拟试验流程管理中。采用以信息系统支撑的试验业务流程管理方式开发了基于图形的数字化试验管理系统 DTPMS，实现了试验流程的部分或整体在计算机应用环境下的自动化，使试验过程的内容、程序、方式与工作模式更加规范，加强了试验过程的管理、协调和监控，优化物资配置、节能降耗，为传统试验的改进提供了理论依据。另外，整个流程管理体系具有普适性，可以应用于其他领域的离散与连续事件混杂的仿真系统。

参考文献:

- [1] 陈海东, 沈重. 航天数字化应用技术的发展与趋势[J]. 导弹与航天运载技术, 2008 (3): 23-27.
- [2] JAMES M, BAROTH E, MELLINGER L, et al. Integrated virtual test bed for IVHM systems on 2nd generation RLV[C]// Proceedings of 2003 Aerospace Conference. [S.l.]: IEEE, 2003: 877-886.
- [3] RABELO Luis. The virtual test bed project[R]. [S.l.]: NASA/ASEE, 2002.
- [4] 郭霄峰 主编. 液体火箭发动机试验[M]. 北京: 宇航出版社, 1990.
- [5] 刘国球 主编. 液体火箭发动机原理[M]. 北京: 宇航出版社, 1993.
- [6] 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): 418-420.
- [7] 陈阳, 高芳, 张振鹏. 液体火箭发动机试验台贮箱增压系统模块化仿真[J]. 航空动力学报, 2005, 20(2): 339-344.
- [8] 陈震宇, 葛治美, 乔黎. 航空发动机整机试车试验流程管理系统[J]. 航空发动机, 2008, 34(3): 8-11.
- [9] WUJEK Brett, PATRICK N K, CHIANG Wei-shan. A workflow paradigm for flexible design process configuration in FIPER, AIAA-2000-4868 [C]// Proceedings of the 8th Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization. Reston, Va, USA: AIAA, 2000: 6-8.
- [10] WUJEK B A, RENAUD J E, BATILL S M. Design flow management and multidisciplinary design optimization in application to aircraft concept sizing, AIAA 96-0713[R]. USA: AIAA, 1996.
- [11] 范玉顺. workflow管理技术基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [12] 林海英, 王井然. 航空发动机故障报告、分析和纠正措施系统模型的构建 [J]. 航空动力学报, 2009, 24(5): 1166-1170.
- [13] CHI Sung-Do, LEE Ja-ok, KIM Young-Kwang. Discrete event modeling and simulation for traffic flow analysis[C]// Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Intelligent Systems for the 21st Century, Systems, Man and Cybernetics. [S.l.]: IEEE 1995, 1: 781-788.
- [14] CURRY T, BEHBAHANI A. Propulsion directorate/control and engine health management (CEHM): real-time turbofan engine simulation [C]// Proceedings of 2004 IEEE Aerospace Conference. [S.l.]: IEEE, 2004, 5: 3414-3423.
- [15] 孙诚, 王雪梅, 张艳红. 连接计算机并口的数据采集系统[J]. 电子设计工程, 2011, 19(16): 48-50.
- [16] GONZALEZ-CALLEROS J M, MARTINEZ-CARBALLIDO J, MUOZ-ARTEAGA J, et al. An iterative method to design traffic flow models [C]// Proceedings of 2009 Third International Conference on Digital Society. [S.l.]: IEEE, 2009: 277-282.
- [17] 肖俊旺, 夏静. 基于 LabVIEW 的火箭试验数据处理方法[J]. 电子设计工程, 2011, 19(4): 38-40.
- [18] TUCCI C L, LANG J H, TABORS R D, et al. A simulator of the manufacturing of induction motors [C]// Proceedings of 1991 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting on Digital Object Identifier. [S.l.]: IEEE, 1994: 1353-1359.
- [19] 姬俊锋, 吴进中, 马利亚, 等. 液体推进剂发动机试验多工况流量控制方法[J]. 火箭推进, 2011, 37(2): 71-75.
- [20] 胡海峰, 鲍福廷, 蔡强, 等. 液体姿控火箭发动机地面试验热结构分析 [J]. 航空动力学报, 2011, 26 (2): 442-447.
- [21] 赵万明, 王军钢. 液体火箭发动机试验负推力修正[J]. 火箭推进, 2010, 36(6): 56-62.
- [22] 王克昌. 液体火箭发动机试验数据处理与数据协调策略[J]. 火箭推进, 2002, 28(1): 1-6.
- [23] 郑力文, 孙晓乐. 线性调频信号数字脉冲压缩技术分析 [J]. 现代电子技术, 2011, 34(1): 39-42.
- [24] 何炳林, 张焕文, 梁柱扬, 等. 基于 ADS1252 的数据采集模块设计[J]. 现代电子技术, 2011, 34(13): 139-141.

(编辑: 陈红霞)