

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.11.008

# 民航飞机液压系统虚拟性能样机设计及应用研究\*

吴 双<sup>1</sup>, 马建平<sup>2</sup>

(1. 上海飞机设计研究院, 上海 201210; 2. 中航工业信息技术中心, 陕西 西安 710075)

**摘要:**为了解决民航飞机液压系统试验测试验证工作的诸多挑战,对虚拟试验技术在试验与评价工作的应用进行了研究,提出并研制了一种基于虚拟试验技术的民航飞机液压系统虚拟性能样机平台,描述了该平台整体架构、功能模块和虚拟仿真试验的工作流程。该平台具备液压系统模型开发、集成仿真、参数优化等功能,利用泵出口压力脉动仿真测试分析等试验初步验证了该系统的计算可信度。研究结果表明:该性能样机平台能够有效开展液压系统设计优化和虚拟试验验证,平台灵活性强,虚拟试验方法合理;通过前期研究,为进一步扩大后续应用范围奠定了很好的基础。

**关键词:**民航飞机; 液压系统; 虚拟性能样机; 模型; 仿真

中图分类号: TH137; TH39; TP242

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2017)11-1270-05

## Design and application of the virtual prototype of the hydraulic system of civil aircraft

WU Shuang<sup>1</sup>, MA Jian-ping<sup>2</sup>

(1. The Aircraft Research Institute of Shanghai, Shanghai 201210, China;

2. China Aviation Industry Technology Center, Xi'an 710075, China)

**Abstract:** In order to solve the many challenges of civil aircraft hydraulic system test verification work, the virtual test technology was investigated in the application of test and evaluation, a virtual property of civil aircraft hydraulic system prototype platform based on virtual test technology was developed, the overall architecture of the platform, function modules and the work flow of virtual simulation test were described. The platform has the function of hydraulic system model development, integrated simulation, parameter optimization. The calculation of system reliability was verified by the pump outlet pressure pulsation test analysis. The experimental results show that the performance of the prototype platform can effectively carry out optimization design of hydraulic system and the virtual test platform, the platform has strong flexibility, and virtual test method is reasonable; through previous research, which lay a good foundation for further expanding the application scope of the follow-up.

**Key words:** civil aircraft; hydraulic system; virtual prototype; model; simulation

## 0 引 言

民航飞机液压系统是支持飞机安全飞行、引导和进近的重要的动力系统,是飞机先进程度的一个重要标志,极大地影响到飞机的安全性、经济性。随着多电技术、材料技术、制造技术与控制技术的迅速发展,液

压系统的发展总的趋势是:低重量/小体积、高压化、分布式液压系统架构、高可靠性、冗余度配置、主动维护的故障诊断与健康管理和自增压油箱技术、智能泵源系统,并且系统及其设备的地面维护更加容易。

新技术的发展及应用,使得民机液压系统的设计越来越复杂、与其他机载系统的关联耦合程度越来越

收稿日期:2017-02-24

基金项目:工信部民用飞机专项科研资助项目(GX2013001)

作者简介:吴双(1981-),男,江西景德镇人,硕士,高级工程师,主要从事系统集成仿真方面的研究。Email:wushuang@comac.cc

高。传统的测试验证方法越来越难以满足当前试验验证评价的需求。总的来说,民机液压系统的测试验证工作面临如下挑战:

(1)使用越来越多的电子控制且日趋复杂,与不同系统之间的交联耦合越来越复杂,导致综合集成测试验证的技术难度提高,成本加大,某些极限试验条件的试验环境具有高危性;

(2)在传统的设计过程中,通常试验滞后于设计,一些设计缺陷往往在物理试验后才能发现,设计和试验的迭代周期长、成本高,严重拖延项目进度,造成项目风险较高;

(3)由于条件限制,液压系统的物理试验台试验能够分析的问题有限,无法完全模拟飞行包线内所有的飞行环境和飞行状态,一些安全隐患只有通过试飞甚至飞机运营后才能被发现,给飞机运营造成一定的潜在风险;

(4)民机液压系统设计过程中已经普遍采用仿真分析技术,但是主要都是针对部件和子系统级,例如导管结构强度有限元分析、机构运动学分析、流体仿真等,缺乏统一的仿真平台和技术途径对系统整合后的性能进行评估分析。

近年来,随着建模仿真技术的快速发展,以虚拟性能样机为标志的虚拟试验技术应用已经成为飞机系统试验与评价工作发展趋势,是解决上述问题的有效途径。虚拟试验技术在国际同行业,包括欧宇航、波音、空客、达索等航空巨擘都有了一定的应用,取得了较为显著的成果。欧宇航(EADS)提出飞机整机系统的建模仿真技术长期战略规划,强调虚拟试验整机系统仿真技术在产品周期中的核心地位;欧盟联合包括空客、达索航空在内的 50 多家企业发起 CRESCENDO 项目,投入性能样机(behavior digital mock-up, BDM)技术研究,解决飞机能量综合优化问题;波音公司的 Boeing787 系统综合试验室具备原型机建模仿真试验能力,将虚拟试验技术应用到型号试验测试中;其他航空巨头也积极投入该领域研究,相关研究具有广阔的前景<sup>[1-9]</sup>。

本研究将提出并研制一种基于虚拟试验技术的民航飞机液压系统虚拟性能样机平台。

## 1 研制目的

本研究所定义的液压系统虚拟性能样机是指包括性能指标、性能仿真模型、性能仿真结果等在内的液压系统功能/性能仿真平台。通过研制该虚拟性能样机,能够实现液压系统的功能验证、性能分析、设计方案评估及优化、系统间交联接口确认等。

基于仿真技术建立成熟的液压系统虚拟性能样机,有以下关键作用:

(1)在方案初步设计阶段,支持系统初步设计的确认和验证,可以通过仿真进行多方案筛选和最终方案早期验证,实现方案最优化;通过模型的执行和场景的分析找出遗漏、矛盾甚至错误的需求,评估设计更改带来的影响,实现方案设计的进一步优化;

(2)在方案详细设计阶段,通过“设计-仿真”的反复迭代,最终确定拓扑结构、几何形状、零部件尺寸和设备参数,测试交联系统功能的完备性、接口的正确性和控制逻辑的合理性,保证系统交联接口定义得到科学合理的确认;

(3)在试验验证阶段,可早于物理综合集成试验开展系统虚拟试验,有助于加快飞机研制过程中解决系统集成带来的技术问题的周期,丰富飞机系统功能、性能测试验证的手段,例如通过仿真进行试验参数的初步筛选,减少必要的物理试验次数;对试验趋势进行初步预测和评估,从而确保试验一次成功;

(4)支持下一个型号的概念论证,结合虚拟现实等技术实现对飞机概念及原理的虚拟展示和初步验证,实现早期需求的确认,支持可行性论证。

## 2 结构组成

液压系统虚拟性能样机的结构层次可主要分为 3 部分,分别为模型库系统、执行计算系统和应用展示系统,系统架构如图 1 所示。

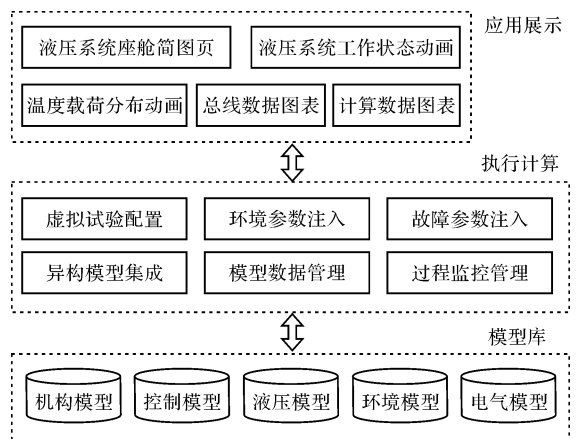


图 1 系统架构

### 2.1 模型库

建立液压系统的分层级模型库。模型库按照元件级、部件级、子系统级的分层次结构进行封装集成,模型组合结构与物理系统的实际构成之间应有严格的对应关系,层级结构模型封装集成如图 2 所示。

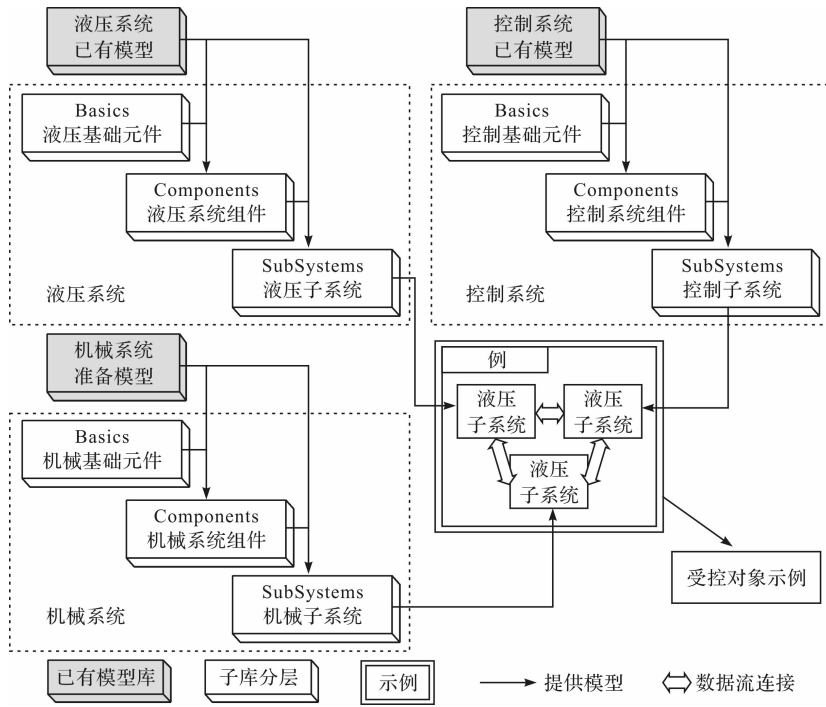


图2 层级结构模型封装集成

封装的模型可以简化使用人员的负担,直接从模型库中调用相应的模型即可开展虚拟仿真分析。预留外部数据接口后,模型内部改动也不会影响虚拟性能样机的整体架构。

开发和集成的模型包括:

(1) 液压系统元部件模型。发动机驱动泵、电动液压泵、防火切断阀、自增压油箱、油滤、蓄压器、能源转换装置、综合控制单元、系统安全阀、导管、压力传感器、温度传感器、流量传感器、活门及开关、油液介质等;

(2) 用户作动系统。升降舵,方向舵,副翼,后缘襟翼,前缘缝翼,扰流板,机轮刹车、起落架及舱门收放、前轮转弯系统;

(3) 电气接口。液压系统座舱仪表显示、液压系统座舱操纵面板、总线数据传输、强/弱电源供电等;

(4) 环境模型。环境温度、结构载荷、飞行剖面设置等。

### 2.2 执行计算系统

执行计算系统负责运行调度和信息处理工作,提供虚拟试验的配置、复合环境因子注入、故障参数注入、模型与数据管理、过程监控等诸多功能模块。该层采用模型驱动的架构,基于统一的综合管理软件进行管理,支持系统架构设计,支持多学科统一集成模型或异构模型联合仿真的方式进行计算工作:

(1) 从可用的模型库中配置多层次的系统模型,

创建系统架构配置,进行重复性或类似的虚拟试验任务时通过调用已存储的系统架构配置,提高使用效率;

(2) 定义系统模型之间连接端口和参数定义,设定环境因子、故障参数等;

(3) 创建预定义的仿真任务配置,如设置仿真算法、计算步长、运行周期等;

(4) 自动运行仿真任务,执行过程监控。

执行计算平台如图3所示。

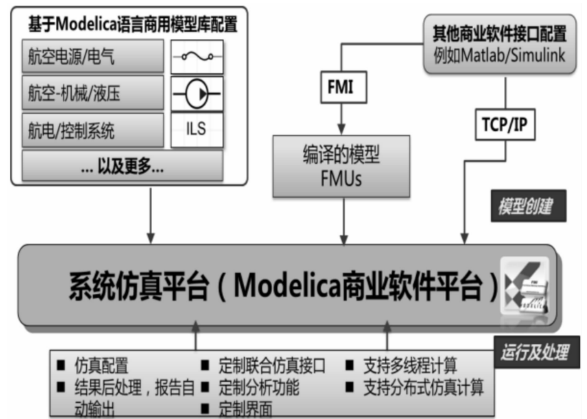


图3 执行计算平台

当进行多学科交联的复杂虚拟试验任务时,必然涉及不同仿真工具模型组合创建的系统模型的构建问题,需要提供专用工具提高系统集成效率。

(1) 多学科统一集成,在同一平台工具开发机、电、液模型,常用工具如 Simulink、Modelica 等<sup>[10-12]</sup>;

(2) 在不同开发工具里开发的异构模型数据交

互,可采用高层架构协议仿真 (high level architecture, HLA) 和 接口 协 议 (functional mock-up interface, FMI)<sup>[13-15]</sup> 两种 方 式。

### 2.3 应用展示系统

本研究开发人机交互界面。根据实际需要,能够快速完成虚拟试验科目的构建、参数设置、操作命令输入,具有可视化的参数配置、过程监控、数据分析以及分析报告模板生成等功能。

本研究通过数据可视化技术对试验数据进行分析,实现液压系统虚拟试验过程的回放跟踪。采用虚拟现实技术,实现试验过程可视化,逼真复现模拟试验过程,实现飞机管路系统在虚拟试验过程中的关键点压力、温度等参数及液压元附件如泵源、阀门、作动器状态的可视化,有利于仿真试验人员分析仿真过程中的问题。

参数设置界面如图 4 所示。

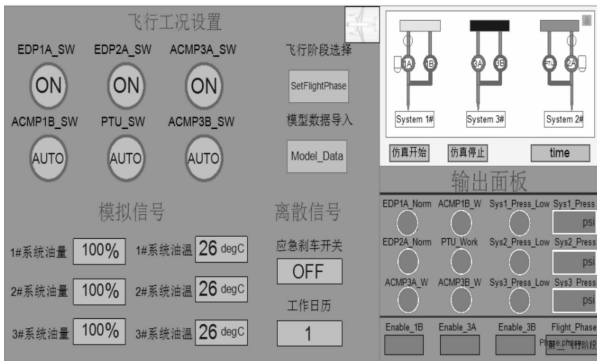


图 4 参数设置界面

数据仪表显示界面如图 5 所示。

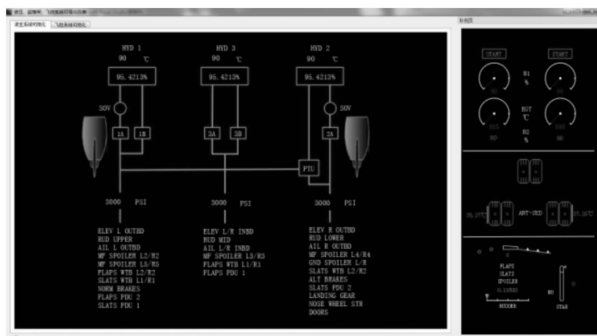


图 5 数据仪表显示界面

## 3 工作流程

本研究制定统一建模开发规范,以模型可重用、参数可配置为技术原则,运用自底向上的系统模型综合方法,按计划、分阶段地在相关学科专业领域协同开展模型知识的确认、抽取、组件化及测试验证,建立具有层次递归结构的模型库结构,通过架构设计和模型集

成协议,完成系统集成的工作,根据研制需求,在虚拟性能样机平台开设虚拟试验科目,通过与物理试验的对比、调校,不断优化虚拟试验模型设计,提高虚拟试验的可用性和置信度。

工作流程 4 虚拟试验结果评价如图 6 所示。

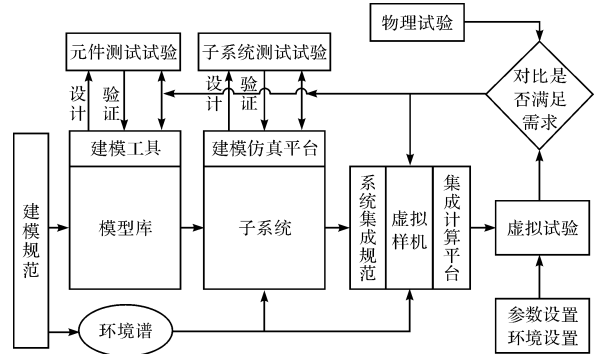


图 6 工作流程 4 虚拟试验结果评价

本研究参照物理试验,评价虚拟试验结果的准确性。如本文设计泵出口压力脉动仿真分析,与通过实际试验的数据对照,计算结果的极限误差不大于 4%,证明计算结果可信度较高,模型算法、参数取值、计算过程等接近实际情况,有利于通过虚拟试验的方式,在后续研究中找到可行的抑制压力脉动幅度的解决措施。

液压泵出口压力脉动测试数据如图 7 所示。

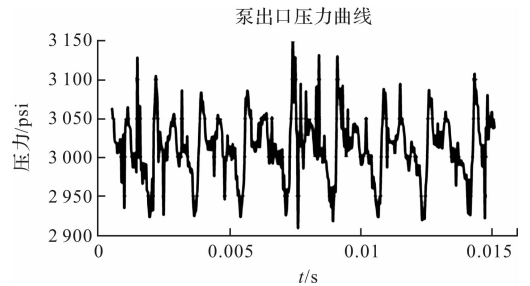


图 7 液压泵出口压力脉动测试数据

液压泵出口压力脉动仿真计算数据如图 8 所示。

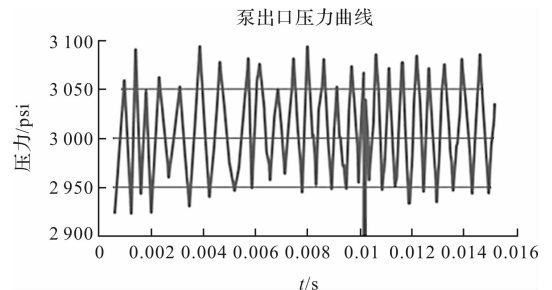


图 8 液压泵出口压力脉动仿真计算数据

## 5 虚拟性能样机应用

本研究中液压系统虚拟性能样机,参照机载液压

系统实际架构开发,考虑了液压系统与相关机载系统(含飞控系统、起落架系统、航电总线数据通讯等)交接口,具备飞行环境参数的设置能力,可模拟液压系统在空中、地面等各个运行阶段的工作场景,完成一系列虚拟测试验证。

该平台能够模拟仿真的试验科目包括:

(1) 液压系统虚拟试验分析。① 液压系统整体性能分析,由液压泵模型、管路模型、液压阀模型、控制系统模型、油箱模型、作动器模型等实现;② 液压系统热分析,由作动器热模型、液压泵热模型、散热器模型、环境温度模型等实现;③ 液压系统流量需求符合性分析,由作动器模型、油箱模型、蓄压器模型、管路模型等实现;④ 液压系统压力脉动分析,由泵源模型、液压管路模型、液压油模型等实现。

(2) 系统交联分析。① 与飞控系统的虚拟交联,由飞控液压作动器接口模型、飞控系统本体模型实现;② 与航电系统的虚拟交联,由航电总线通讯接口模型、航电数据处理单元模型实现;③ 与起落架系统的虚拟交联,由起落架液压阀接口模型、起落架系统本体模型实现。

## 6 结束语

本研究描述了液压系统虚拟性能样机的基本构成和 workflow,分析了该虚拟性能样机技术在民航飞机液压系统的设计优化和试验验证方面的应用前景,通过测试案例的计算结果对比了物理试验结果的符合性,初步验证了液压系统虚拟性能样机平台的计算结果的可信度,具备液压系统的管路脉动抑制、液压系统散热分析、液压系统故障模拟、液压系统用户流量需求分析等应用能力。随着研究的深入推进,该平台的后续应用范围将不断扩大。

### 参考文献 (References):

[1] LANDI A, NICHOLSON M. ARP4754A/ED-79A- guidelines for development of civil aircraft and systems[J]. **SAE International Journal of Aerospace**, 2011, 4(2): 871-879.

[2] ESTEFAN J A. Survey of model-based systems engineering (MBSE) methodologies [J]. **Jet Propulsion**, 2008 (25): 1-70.

[3] DUMAS X. Supporting a multi-formalism model driven development process with model transformation, a topcased implementation [C]. *Proceedings of 4 International Congress on Embedded Real-Time Systems*, Toulouse: [s. n.], 2008.

[4] ZHANG D W, BELMON L, ZHANG L. Application of high quality physical modeling in research and development of space manipulator [C]. *Proceedings of 14th International Space Conference of Pacific-basin Societies*, Xian: [s. n.], 2014.

[5] MIOTTO P, BREGER L, SARGENT R. Simulation and flight software development using model-based design with Matlab and Uml Tools [C]. *AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference*, Minneapolis: [AIAA], 2012.

[6] ANDERSSON H, HERZOG E, JOHANSSON G, et al. Experience from introducing unified modeling language/systems modeling language at Saab Aerosystems [J]. **Systems Engineering**, 2010, 13(4): 369-380.

[7] ANDERSSON H. Aircraft systems modeling: model based systems engineering in avionics design and aircraft simulation [M]. Stockholm: Linköping University Electronic Press, 2009.

[8] 郑党党, 刘看旺, 刘俊堂. 飞机性能样机技术及体系研究 [J]. *航空科学技术*, 2015(3): 5-9.

[9] 郑党党, 刘 更, 任俊俊, 等. 飞机设计中仿真技术应用现状及发展趋势 [J]. *航空制造技术*, 2015, 493(23): 68-70.

[10] FRITZSON P. Principles of object-oriented modeling and simulation with modelica 2. 1 [M]. New York: John Wiley & Sons, 2010.

[11] 朱德泉. 基于联合仿真的机电液一体化系统优化设计方法研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学自动化学院, 2012.

[12] 刘 敏. 基于 modelica 的多领域物理系统建模平台的研究与开发 [D]. 武汉: 华中科技大学机械科学与工程学院, 2005.

[13] ITEA2-07006. Functional mock-up interface for model exchange [M]. Europe: MODELISAR, 2010.

[14] ANDERSSON C, ÅKESSON J, FÜHRER C, et al. Import and export of functional mock-up Units in Jmodelica. erg [D]. Sweden: Department of Automatic Control, Lund University, 2011.

[15] 熊光楞. 协同仿真与虚拟样机技术 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

[编辑: 李 辉]

### 本文引用格式:

吴 双, 马建平. 民航飞机液压系统虚拟性能样机设计及应用研究 [J]. *机电工程*, 2017, 34(11): 1270-1274.

WU Shuang, MA Jianping. Design and application of the virtual prototype of the hydraulic system of civil aircraft [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2017, 34(11): 1270-1274.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>