

DOI: 10.19416/j.cnki.1674-9804.2017.02.001

# 民用飞机虚拟集成试验技术研究

## The Technique Research on Virtual Integration Test for Civil Aircraft

陆清 吴双 / LU Qing WU Shuang

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

### 摘要:

民用飞机的传统试验测试验证工作面临诸多挑战,虚拟集成试验技术已经成为飞机系统试验与评价工作不可或缺的关键技术,是传统物理试验测试验证的有效补充。但当前我国民用飞机设计领域的虚拟集成试验技术发展并不成熟,提出虚拟集成试验技术应用设想,探讨虚拟集成试验技术在飞机研制过程的能力应用目标,从系统集成和功能应用的维度设想了全机虚拟集成试验整体框架组成,提出解决虚拟集成试验当前存在问题的关键技术,展望民用飞机虚拟集成试验技术的未来发展。

**关键词:** 虚拟集成试验;模型验证;模型集成;数据管理

**中图分类号:** V216

**文献标识码:** A

[Abstract] The traditional test verification work of civil aircraft is facing many challenges; the virtual test technology has become the key technology of aircraft system testing and evaluation work, which is an effective supplement to the traditional physical test and verification. But the current development of the virtual test technology of civil aircraft design field in our country is not very mature, this paper discussed the application goal of virtual test technology in aircraft development, from the dimension of system integration and the dimension of function application, the whole framework of virtual experiment is conceived, the key technologies to solve the current problems in virtual test are put forward, summarized the development path of civil aircraft virtual test system.

[Keywords] virtual test; model verification; model integration; data management

## 0 引言

随着高新技术的发展和应用,民用飞机的设计复杂度越来越高,系统间的耦合关系也变得越来越复杂,传统的物理试验测试验证方法越来越难以满足现代民用飞机研发验证试验评价工作的需要。一般情况下,常规的物理试验测试验证滞后于设计过程,当设计构型冻结后才能提供合适的物理试验环境,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;由于条件限制,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;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。<sup>[1]</sup>

为了解决物理试验的传统验证方法面临的难题,虚拟集成试验技术逐渐发展起来并得到越来越广泛的应用。通过利用各类 CAE 专业仿真分析软件、数字化的虚拟样机、半实物试验系统等手段,对产品的几何结构装配特性、可维修性、动力学特性、疲劳强度、振动、冲击、噪声等性能,以及飞行状态等参数进行模拟和计算,为物理试验提供重要的指导作用和技术支持。而物理试验结果又对虚拟集成试验的模型进行验证,经过模型验证后,虚拟集成试验将完成更为广泛、复杂的集成试验,为民用

飞机适航验证提供更强有力的支持与保障。本文将探讨虚拟集成试验技术体系在民用客机研发领域的应用。

## 1 虚拟集成试验技术概念及现状

民用飞机虚拟集成试验是指利用计算机建模仿真技术,将实际的多系统、多学科领域进行统一建模和协同集成仿真试验,是具备飞机级功能确认、性能仿真、技术指标验证、综合效能评估的一种试验方法。发展虚拟集成试验的目的绝不是代替物理试验,而是为了丰富试验测试方法,结合物理试验更好地为产品研发服务,缩短民用飞机型号研制周期和降低研制成本。

随着仿真技术的快速发展,虚拟集成试验技术已经成为飞机系统试验与评价工作的不可或缺的关键技术,是传统物理试验测试验证的有效补充。虚拟集成试验技术优势包括:①很多设计问题在缺乏物理试验验证条件前可以通过虚拟仿真分析的方式进行需求确认和验证,一些设计问题能够及时优化改进;②虚拟集成试验技术的投入相比物理试验的成本更小,效费比高;③针对不断变化的需求可提供快速灵活的解决方案,资源重复利用率高;④模拟极限试验环境,有效辅助物理试验的测试工作。

虚拟集成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,强调虚拟集成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,简称 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,将虚拟集成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。

## 2 民用飞机虚拟集成试验技术存在的问题

我国民用飞机设计领域当前的虚拟集成试验技术发展并不成熟,像民用飞机这样的复杂系统其仿真分析难度很高,牵涉到多学科多专业,应用场景繁多,建模标准规范、工程化应用、系统虚拟集成

能力、系统工程体系理念诸多方面存在很多问题,主要表现在以下方面:

1) 专业仿真软件种类多,模型通用性和重构性差。不同仿真计算环境的相互移植困难,模型资源不能被有效地重复利用。一些专业仿真工具对使用人员的门槛要求很高,并且因个人对工具的熟悉程度、使用方法和工程经验不同,往往造成分析结果差异很大。

2) 多系统模型集成能力不足。部门/专业内部处于单点技术和工具的“手工作坊”应用模式,具备局部问题的分析能力,但规范化程度和效率低下,专业间难以有效协同,缺乏多专业协同仿真条件,很难实现多学科性能的虚拟验证、综合分析和权衡优化。

3) 缺乏经验模型库的积累,模型资源、经验和知识共享不易实现。虚拟集成试验产生的数据没有进行统一的规划与管理,使得大量的经验没有得到积累,很多模型开发工作需要重复进行,产生数据的孤岛与因人而异的分析结果。

4) 仿真置信度衡量困难。虚拟集成试验技术的核心难题是仿真结果的可信度问题,仿真可信度取决于仿真模型、仿真输入数据(如载荷、边界条件、部件内部参数等)和仿真算法程序的可信度。供应商或设计部门因知识产权问题,不提供模型或不开放内部参数,工程试验数据积累不足,仿真可信度评估就会十分困难。

5) 缺乏统一工作流程、标准规范、接口标准。没有形成标准的流程来表明在产品研制的某个阶段应该实现怎样的目标,需求如何去确认和验证,在何时和何种程度应用仿真建模的手段去实现方案的权衡、系统的设计、架构的设计等。

## 3 民用飞机虚拟集成试验技术需求框架

针对我国民用飞机设计领域当前的虚拟集成试验技术面临的困难和挑战,本文提出虚拟集成试验技术应用需求设想,探讨虚拟集成试验技术应用在飞机研制流程的需求框架。

发展成熟的虚拟集成试验能力应用目标是实现飞机型号从立项论证到运营维护的全生命周期的应用能力,满足功能验证、性能分析、设计方案评估及优化、系统间交联接口确认、试验测试验证等需求,如图 1 所示。

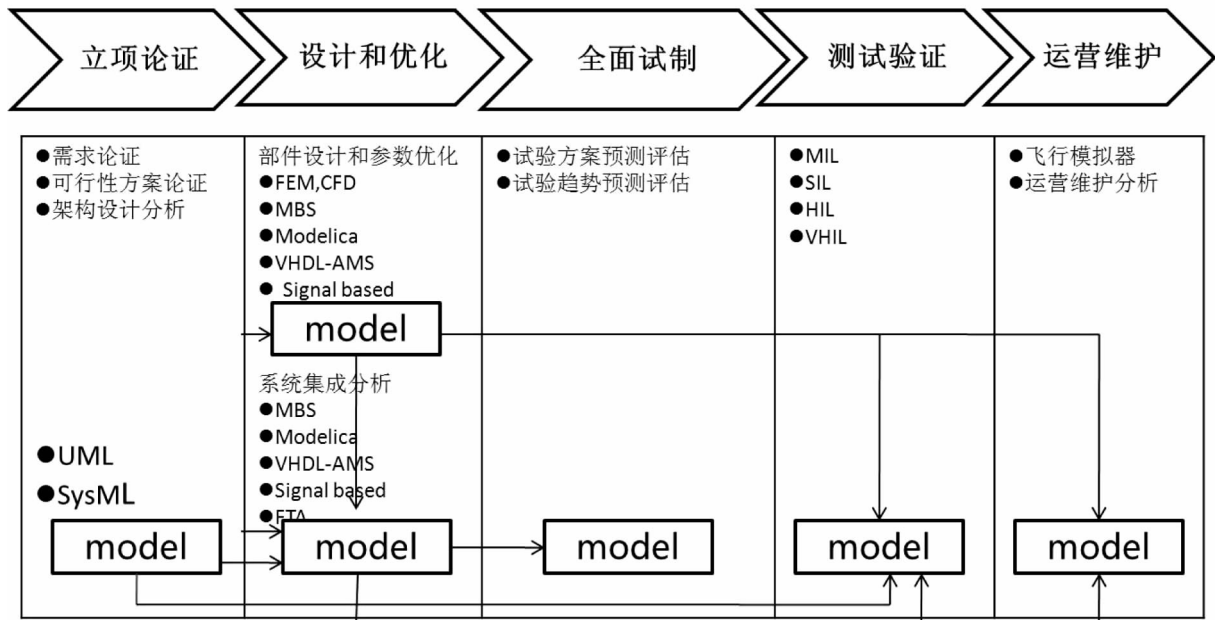


图1 虚拟集成试验覆盖产品生命周期

1) 论证阶段。在立项论证阶段,开展关键性能指标和子系统的虚拟验证,实现型号早期需求的确认,并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架构分析,支持方案可行性论证。

2) 设计和优化阶段。在方案初步设计阶段,通过虚拟仿真进行多方案筛选,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。

在方案详细设计及优化阶段,通过“设计-仿真”的反复迭代,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。

3) 全面试制阶段。需进行大量研发试验,可通过虚拟集成试验技术的应用有效减轻研发试验负担。如通过仿真进行试验工况的初步筛选,减少试验次数;对试验件性能进行提前验证,减少试验返工;对试验大纲和试验方案进行优化和评估,对试验趋势进行初步预测和评估,确保研发试验一次成功。

4) 测试验证阶段。早于物理综合集成试验开展虚拟综合集成试验,如当部分试验件暂时不具备试验条件时,通过模型在环、软件在环、硬件在环、虚拟人在环等测试手段辅助和支撑物理试验;模拟飞机真实运行场景环境,丰富飞机在地面模

拟试验、飞机在环试验、虚拟试飞等测试验证方法。

5) 运营维护阶段。通过飞行模拟器等可支持飞行员的培训和训练;飞机交付后在使用过程中可能出现各种危险飞行状态或功能故障,通过虚拟集成试验与物理试验相结合,复现故障和分析故障原因,确保飞机运营安全。

## 4 民用飞机虚拟集成试验的整体框架

民用飞机是由机体结构、机载系统及软件组成的复杂多学科系统,虚拟集成试验构成可从两个不同维度考虑。从系统集成的维度可分解为整机级虚拟集成试验和系统/部件级虚拟集成试验;从功能应用的维度可分解为功能样机和性能样机。

本文设想的全机虚拟集成试验整体框架如图2所示。

### 4.1 系统级虚拟集成试验

系统级虚拟集成试验面向系统内部的组件或子系统,由各个专业独立进行,按照不同学科大致可划分为流体计算、结构分析、电磁仿真和系统分析4类:

1) 流体计算,主要包括飞机的外流场计算、气动特性分析、防除冰分析、管道流动特性分析等涉及计算流体力学(CFD)。

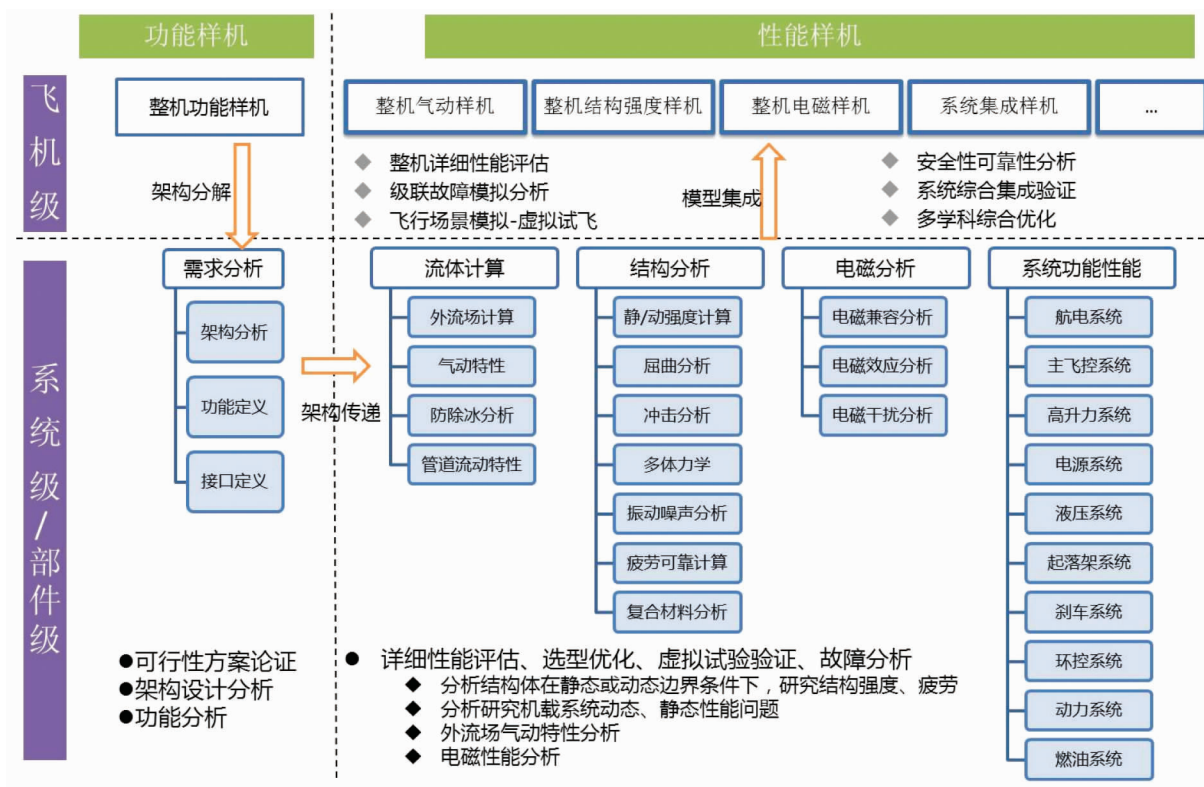


图2 全机虚拟集成试验矩阵

2) 结构分析主要包括结构静/动强度计算、屈曲分析、冲击(鸟撞/弹射)动力学分析、多体力学分析、振动噪声分析、疲劳可靠性计算、复合材料分析计算等涉及结构力学的工作。

3) 电磁仿真主要包括电磁兼容性分析、电磁效应分析和电磁抗干扰分析。

4) 系统仿真主要包括功能逻辑分析、控制律仿真、系统或设备稳态\瞬态特性分析、能量综合仿真等。

#### 4.2 整机级虚拟集成试验

整机级虚拟集成试验面向整机或者多系统集成,需要多个专业协同工作,利用各专业数学模型的集成得到全数字样机平台,可用于整机级的气动计算、结构强度分析、全机电磁分析、机载系统综合性能分析等。

整机级虚拟集成试验相对系统级虚拟集成试验的优势在于:

1) 在多专业、多学科、多领域模型集成环境下,单个系统模型与外界交互数据更加贴近实际,仿真计算结果更准确。

2) 整机级虚拟集成试验环境下,各系统的性能参数互为条件,互相影响,可以权衡分析整机综合

性能。

#### 4.3 功能样机与性能样机

按照国标 GB/T26100-2010 的定义:数字样机是对产品整机或具有独立功能的子系统的数字化描述。按照飞机型号的不同研制阶段需求,虚拟集成试验可分别依托功能样机和性能样机开展。功能样机和性能样机的主要区别:

1) 功能样机从应用视角描述产品的功能特征及其需求的符合程度,主要面向产品的需求分析和功能定义过程。在型号概念论证和早期方案阶段,用于飞机整机架构的分解和功能定义,分析不同模块之间的交联接口和耦合关系。

2) 性能样机从性能视角描述产品的多学科性能特征,面向产品研发过程分析。在型号详细设计阶段、试验验证阶段、运营维护阶段,用于飞机总体性能的分析、评估和权衡优化,支持飞机结构强度、刚度和稳定性分析,支持全机综合性能仿真和多学科优化,同时也可以开展虚拟试飞、安全性评估、飞行品质评估、故障模拟分析等。<sup>[2-3]</sup>

#### 4.4 虚拟集成试验流程

虚拟集成试验总体流程如图3所示。虚拟集成

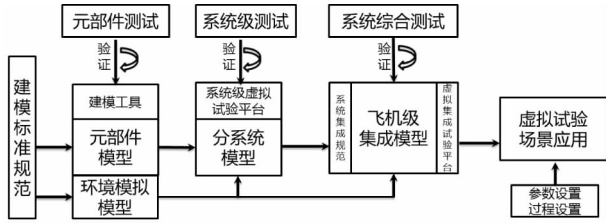


图3 虚拟集成试验总体流程

试验首先必须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,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,完成从元部件模型-分系统模型-飞机级集成模型的开发,通过与物理试验的比对、调校,不断优化虚拟试验模型计算精度,提高虚拟试验的可用性和置信度,根据场景应用需求,在虚拟集成试验平台开设虚拟试验科目。

## 5 虚拟集成试验的关键技术

民用飞机虚拟集成试验的关键技术包括模型验证技术、综合集成与协同技术、虚拟集成试验项目与数据管理技术、虚拟集成试验平台前/后处理技术和虚拟集成试验标准规范等。

### 5.1 模型验证技术

虚拟集成试验的计算结果与实际物理试验测试结果的逼近程度是评价虚拟集成试验结果准确性的重要指标。

模型验证技术研究虚拟集成试验模型的校验、验证和确认,即校核虚拟集成试验模型是否有效;验证模型试验结果是否信。模型验证技术需大量

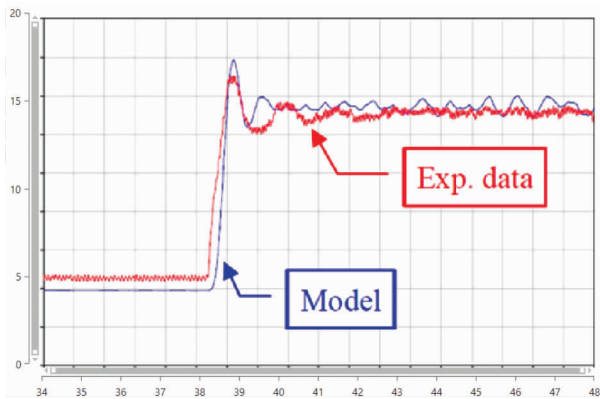


图4 试验数据校验仿真数据

的实际物理试验测试结果数据支撑。将实际物理试验测试结果数据与虚拟集成试验计算结果数据同平台对比分析,如图4所示,红色曲线表示试验数据,蓝色曲线表示仿真数据。根据误差值的大小,确认虚拟集成试验模型算法、参数取值、计算过程对某一特定虚拟集成试验是否可接受。

### 5.2 综合集成与协同技术

1) 架构设计。自顶向下的系统/分系统架构设计,定义清楚系统由哪些功能模块组成,模块之间的接口是什么样式,传输什么样的数据。功能模块对外的接口保持不变,内部可以选用不同的模型替换,确保了在产品研发的整个过程中,系统构架的一致性。

2) 多团队并行协同开发。分系统专业或部门之间基于统一架构并行开发各自系统模型,有助于保护分系统部门的知识产权,降低部门间协同的难度,确保产品协同设计的顺利进行。

3) 虚拟集成试验模型集成。由于各专业、各学科、各领域的专用建模软件种类繁多,部分专业建模软件不可替代,无法统一建模工具平台,给多系统模型集成和飞机级虚拟集成试验带来很大困难,需重点研究不同软件的模型集成和联合仿真技术,目前有两种主流思路:

a) 各专业仿真软件遵守统一接口规范封装模型。尽量按照统一的接口标准进行模型封装,如封装为 FMU 模型 (Functional mockup unit) 或 Matlab/Simulink 支持的 S-Function 模型,并提供参数变量说明、外部接口定义等模型封装规范,以集成到统一的仿真计算环境中。<sup>[4-5]</sup>

b) 多专用仿真软件协同仿真。不方便集成在统一的环境中进行仿真时,可以采用分布式联合仿真的形式进行,模型运行于各自的建模仿真软件中,按照制定的数据通讯规则交互计算数据。

### 5.3 虚拟集成试验项目与数据管理技术

1) 虚拟集成试验项目管理。包括信息管理、文件管理、流程与计划管理等。其中项目信息指试验名称、试验类型、试验负责人、试验时间、试验软硬件资源配置信息等;项目文件包括试验报告、试验大纲、试验方案、试验任务书、试验人员清单等;项目流程与计划管理规范分析任务签派、执行和节点监控等过程,实现试验任务的有效管理。

2) 虚拟集成试验模型管理。各专业封装完成

的虚拟集成试验仿真计算模型,所有模型文件可上传到服务器统一存储在模型数据库中,并由模型管理系统进行统一管理,可用于多系统集成的仿真测

试平台,如下图 5 所示。功能包括模型信息管理、模型文件管理、模型分类管理、模型版本管理、与其他系统的接口等。

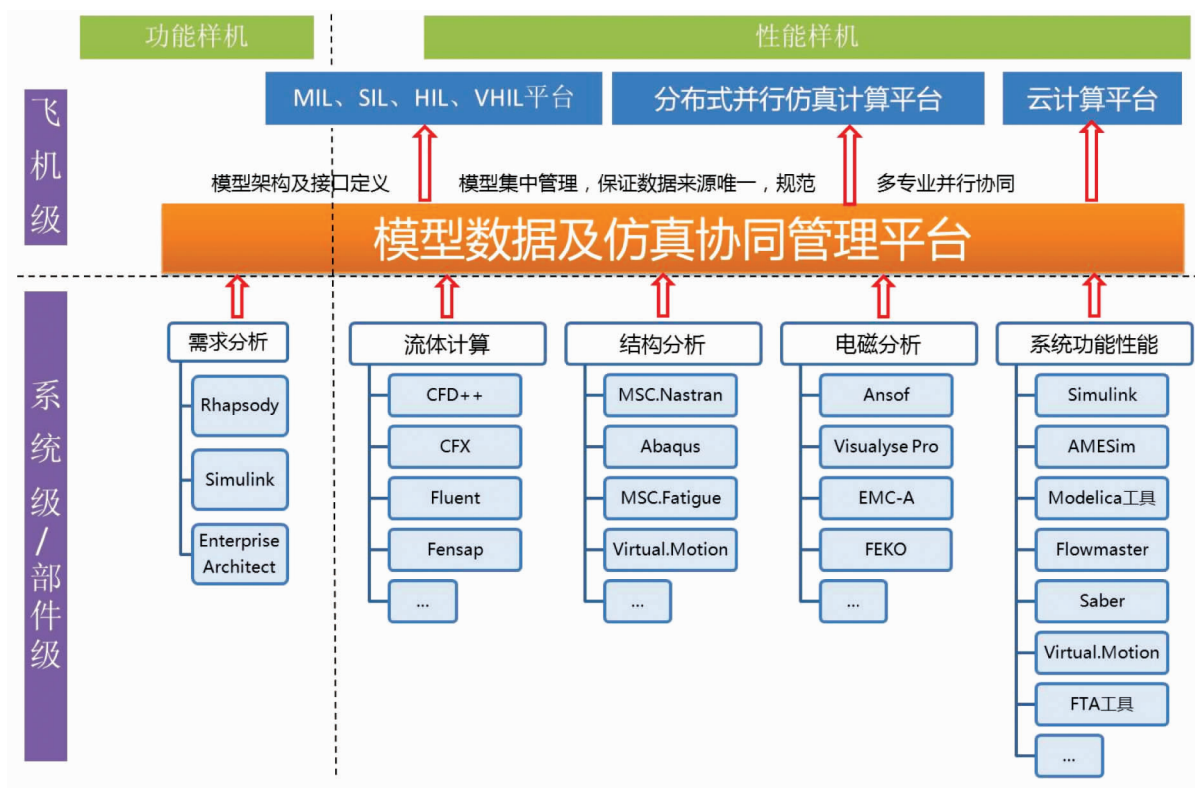


图 5 模型数据集中管理及应用

3) 虚拟集成试验数据管理。用于虚拟集成试验数据的储存以及数据查询和数据谱系管理等,并实现对虚拟集成试验数据进行基础、专业、综合的数据分析,高效地开展与物理试验数据的对比分析,以缩短分析和统计的时间。

#### 5.4 虚拟集成试验平台前/后处理技术

1) 计算分析工具集成。虚拟集成试验的计算求解大部分由各类仿真工具完成,需研究解决工具软件在平台中的运行控制接口和数据交互接口。

2) 虚拟集成试验自动化测试技术。通过虚拟集成试验脚本配置,设置虚拟集成试验的输入输出参数、试验过程逻辑、边界条件、异常退出、试验流程的初始化参数、试验结束后需要分析的计算参数类型等。多工况虚拟集成试验时,进行多次不同输入、不同条件的试验工况配置,实现一次输入多组参数值,自动执行多次虚拟集成试验的操作,便于开展多工况下的虚拟集成试验结果对比,寻找最

优值。

3) 高性能分布式并行计算技术。多系统多学科模型集成计算量往往非常庞大,提供大规模分布式并行计算的能力,是高效开展虚拟集成试验的必要保障,需重点研究高性能计算集群与虚拟集成试验平台的计算数据接口以及软件调度管理接口。

4) 虚拟现实展示技术。基于虚拟现实技术的试验过程可视化主要解决试验过程逼真度的问题,利用先进的视觉、听觉、触觉模拟软件和硬件系统,构建具有高度沉浸感的虚拟集成试验环境。通过将试验系统虚拟化,逼真地模拟试验过程。<sup>[6]</sup>

#### 5.5 虚拟集成试验标准规范

建立模型开发规范、模型数据规范、多专业协同规范、并行计算接口规范、可视化数据通讯规范、虚拟集成试验平台软件开发标准、虚拟集成试验平台各系统接口规范等。

## 6 虚拟集成试验技术未来发展展望

目前虚拟集成试验技术正在快速发展,逐步成为与传统的物理试验验证技术并举的一种新的试验验证形式,通过关键技术的不断深入研究,解决当前虚拟集成试验技术面临的一些突出问题,构建飞机虚拟集成试验数字化应用平台,即可在当前的试验验证环节发挥重要作用。如通过虚拟集成试验的先期模拟为物理试验的开展提供支持,即仿真指导试验,通过真实的物理试验去验证修正仿真模型,高可靠性的虚拟集成试验可以用于模拟物理试验台难以模拟复现的飞行场景。虚拟集成试验将与物理试验在民用飞机的试验验证过程中起到相辅相成的作用,作为物理试验的辅助验证手段避免过试验或欠试验问题发生,降低物理试验风险。

未来发展成熟的虚拟集成试验技术可拓展与推广虚拟集成试验技术在飞机型号研制全过程的应用范围,可在民用飞机的不同研制阶段开展系统行为或状态的仿真分析,对飞机进行虚拟集成和仿真验证,实现对飞机总体架构的权衡分析和综合性能的验证与优化,发现前期设计问题并及时优化改进,保证产品本身设计方案的合理性,保证“一次设计正确”,大大减少在设计后期出现设计反复所产生的设计更改工作量,对于缩短型号研制周期和降低研制成本具有非常重要的意义,为提升民用飞机

型号研制的创新设计能力与研制效率带来实实在在的价值。

### 参考文献:

- [1] SAE International Group. A Guidelines for Development of Civil Aircraft and Systems[S]. ARP4754, 2010.
- [2] 熊光楞,等著. 协同仿真与虚拟样机技术[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [3] 郑党党,刘更,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, 23/24:68-70.
- [4] MODELISAR. Functional Mock-up Interface for Model Exchange. ITEA 2-07006 2010; 17-23.
- [5] Andersson C A J, Führer C. Import and Export of Functional Mock-up Units in Jmodelica. Org. [C]//The International Modelica Conference, Technical University, Dresden, 2011.
- [6] 胡叶楠,陈海东,等. 虚拟集成试验技术体系及其应用研究初探[C]//第13届中国系统仿真技术及其应用学术年会, 2003.

### 作者简介

陆清 男,1965.1,硕士。上海飞机设计研究院试验验证中心,研究员,主要负责试验验证科研管理工作。电话:(021)20864703,Email:luqing@comac.cc

吴双 男,1981.6,硕士。上海飞机设计研究院试验验证中心,高级工程师,主要负责系统集成仿真工作。电话:(021)20868682,Email:wushuang@comac.cc