

飞机开发技术的全新突破 ——基于模型的系统工程

Model-Based System Engineering for Aircraft Development

LMS 公司 李 庆



李 庆

法国 ENSAM 工程师、博士。主要从事系统建模和仿真研究,特别在机电液复杂系统的建模和仿真方面具有丰富的经验。完成国内外众多客户的系统仿真项目,包括法国雷诺公司、法国 BorgWarner 公司、德国西门子公司等。回国后先后负责主持并完成众多的液压及机电液系统方面的项目。现任 LMS China 战略发展总监。

飞机的开发经历了从物理样机驱动的开发流程到 CAD 驱动的开发流程的转变。然而,现在飞机设计面临新的问题:一方面是飞机系统本身越来越复杂,特别是随着多电飞机

基于模型的系统工程开发方法是飞机开发方法学上的全新突破,通过实施基于模型的系统工程,实现飞机整机的虚拟集成,建立“虚拟铁鸟”模型能够有效地改进现有设计流程,尤其是系统集成阶段的设计和评价方法,避免不必要的重复设计工作,减少整机物理试验的次数和成本。

的发展,智能控制系统的采用越来越多。这就使得在传统飞机的开发流程中如何有效地考虑机电一体化系统开发,特别是在开发阶段如何综合地考虑控制系统和受控对象的耦合成为开发的关键之一。另一方面是飞机开发的全球化使得来自不同地区不同研发部门或供应商的系统如何集成,特别是在设计的早期如何通过系统的集成确保飞机设计的成熟性是全球飞机开发面临的棘手问题。第一个问题就要求在飞机的开发过程中协调和同步物理系统与电控系统的开发以确保产品的质量;后一个问题就要求在横跨不同地区的部门之间无缝地共享产品方案、设计和分析以确保协同的工作。这两方面

问题的系统解决方案就是基于模型的系统工程,即通过应用模型来支持系统的需求定义、设计、分析、校核和验证,从概念设计阶段开始一直贯穿整个开发流程。基于模型的系统工程是系统工程的重要一环。可以根据系统需求定义的功能来设计用于性能分析的系统架构,根据该架构的定义,在设计的早期可以把物理系统的模型和控制系统的模型耦合起来建立机电一体化系统的系统模型,在系统模型基础上对整体方案进行分析和优化并完成各个子系统的性能指标设定。随后在子系统开发阶段中,通过建立子系统进一步细化的模型,一方面可以校核子系统的性能是否满足系统设计阶段定义的性能指

标;另一方面该子系统模型可以替代系统模型中的功能模型,从而可以在整个系统环境中对子系统进行优化。由于不同的部门都是在统一的架构下进行子系统的开发,因此来自于不同部门的子系统模型非常容易进行集成,完成系统的虚拟验证。在设计后期,随着不同部件或者子系统物理样机的出现,又可以将这些物理样机和虚拟的模型结合起来进行硬件在环仿真,加速物理试验的进程,如图1所示。

其多领域系统仿真集成平台 LMS Imagine.Lab AMESim 开发出了 LMS Imagine.Lab System Synthesis 和 LMS Imagine.Lab SysDM 从而使得 LMS Imagine.Lab 成为实现基于模型的系统工程开发方法的支撑平台,可用于飞机开发的每个阶段(从前期的概念设计分析、详细设计到产品验证)。

LMS Imagine.Lab AMESim 提供了一个完整的一维仿真平台,能对多领域智能系统进行建模和分析并预测其多学科专业的耦合性能。模型

AMESim 平台创建系统仿真模型。通过这些应用库创建仿真模型无需编写额外的代码,开发团队可以便捷、准确地建立涵盖多个领域的复杂系统模型,加速了模型的创建过程,从而释放出更多的有效工程时间以优化设计。LMS Imagine.Lab AMESim 应用库元件都经过完整的验证,由此确保了仿真结果的准确性和可靠性。LMS Imagine.Lab AMESim 为航空提供的解决方案包括:航空液压系统、飞行控制、地面负载、航空发动机装置、环境控制系统、机电元件、电气系统。

基于模型的系统工程依靠系统层次的模型来模拟新型智能产品整体的性能和特性,因为新型的智能往往存在机械、液压、气动、热以及电子/电气现象的复杂交互作用。这就需要加强横跨多个工程部门的协作,因为有些工程部门负责部件和子系统模型的开发,有些工程部门负责系统层次的模型。此外,这些系统层次的模型需要作为受控对象的模型进行共享以加速用于嵌入式软件开发的基于模型控制工程的进程。这样的协作需要拓宽到供应商,因为供应商在整个产品革新和开发过程中承担的责任越来越多。协同的基于模型的系统工程的实施取决于在产品开发流程中各相关方之间系统数据和模型的共享能力。

LMS Imagine.Lab System Data Management (SysDM) 是用于管理系统模型和数据的解决方案,最初针对 LMS Imagine.Lab AMESim 和其他系统仿真工具以支持协同的基于模型的系统工程。系统仿真数据和模型可以按照客户定义的信息模式进行组织,便于按照工程师分工相关的构架进行分类、查询和跟踪。“版本”管理使得数据的生命周期管理贯穿在整个产品开发周期过程中。在系统中的部件和子系统的多个描述可以通过“变型”管理来实现,允许系统

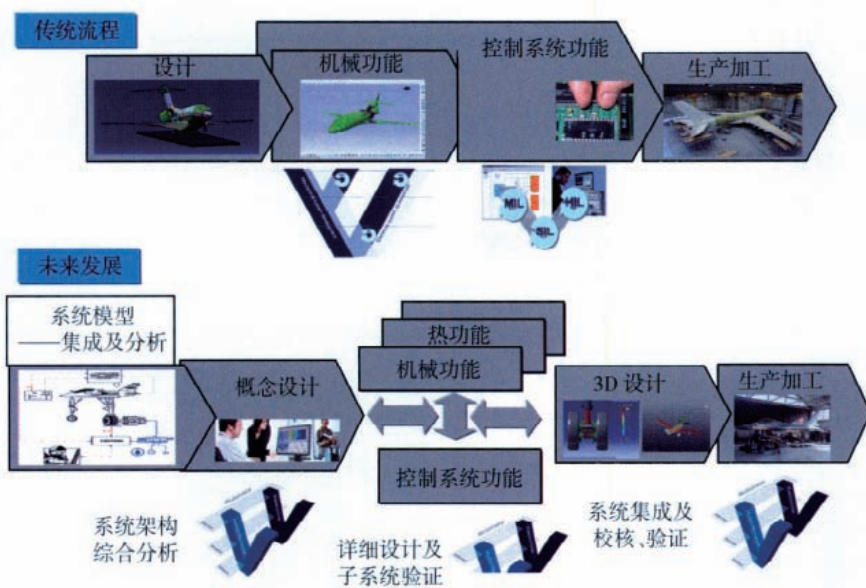


图1 传统开发流程向模型驱动开发流程转变

基于模型的系统工程开发方法中涉及到的关键技术包括:系统架构设计、多物理领域建模、集成的仿真计算环境、模型和数据的管理。作为测试和机电一体化仿真技术全球领先供应商, LMS 公司通过和全球领先的航空工业整机厂商紧密合作,开发了创新的、综合的解决方案 LMS Imagine.Lab 以支撑基于模型的系统工程开发方法,使飞机开发取得全新的突破。

基于模型的系统工程 开发平台 LMS Imagine.Lab

通过和航空工业全球领先的整机厂商紧密合作, LMS 公司基于

的元件由解析模型表示,描述了系统的液压、气动、电子、机械性能。用户可以使用一系列的经过验证的应用库,在 LMS Imagine.Lab AMESim 平台上创建系统仿真模型,这些应用库由来自不同物理领域的预先定义的元件模型组成。LMS Imagine.Lab AMESim 建立基于物理学的系统模型,并不要求完整的三维几何描述,这种方法保证 LMS Imagine.Lab AMESim 有能力在给出详细有效的 CAD 几何图纸前仿真智能系统性能。用户可以采用来自流体、热、机械、机电、动力传动等不同物理领域,预先定义并经过验证的元件所组成的大量应用库在 LMS Imagine.Lab

的模型随着不同开发阶段的功能以及不同的仿真目的变化而变化。基于角色的访问控制支持实施不同的协同 workflow。总之,它是知识积累和管理的基石,开发部门及其相关组织的基于模型的系统工程的具体应用。

LMS Imagine.Lab System Synthesis 用于系统架构的设计、系统模型的配置、仿真工况定义、后处理以及优化。通过该平台,可以根据在需求管理平台(例如 IBM DOORS)中的系统需求定义,来定义系统的架构(拓扑和连接性)。通过 LMS Imagine.Lab AMESim 可以建立部件或者系统的多物理学模型,这些模型以及相关的数据(包括来自 Simulink、Modelica 等模型和数据)通过 LMS Imagine.Lab SysDM 进行中央集中的管理。通过 LMS Imagine.Lab System Synthesis 可以把模型关联到系统架构的节点上,完成模型的配置从而形

成整体的系统模型。根据所定义的仿真工况, LMS Imagine.Lab System Synthesis 驱动仿真计算,取决于模型的来源,可以驱动单一求解器的计算,又可以驱动多个求解器之间的分布式共仿真计算。仿真的结果可以根据具体要求在 LMS Imagine.Lab System Synthesis 中定制输出,从而提到系统分析的效率。图 2 描述了 LMS 提供的基于模型的系统工程综合平台。

LMS Imagine.Lab System Synthesis 通过提供系统架构配置的多关联属性建模、多物理系统模型和相关控制模型的集成等功能来进行:

- 典型应用工况下的系统层次的性能评估和功能要求确定,明确不同子系统之间的相互关联的程度;
- 不同子系统对整机整体性能贡献的敏感性分析;
- 通过权衡各个子系统的性能要

求来仿真和优化整机的性能。

基于模型的系统工程的应用——“虚拟铁鸟”

整机系统集成是航空器研发过程中最重要的环节之一,其目的是通过集成各分系统,评估和验证整体性能,进行整体的调优和匹配,同时进行可靠性和故障模式分析。随着航空技术的快速发展和市场要求的不断提高,现有的系统集成评价方法已逐渐不能满足各种新机型项目的开发需求:

- (1) 整机系统集成一般在研发流程的后期即全机性能验证阶段进行,且一般通过各类地面和飞行试验进行,试验准备周期长、成本高;若发现问题则需要进行故障诊断和排查,修改设计方案,代价较大;统计表明,当前主要机型研发项目,如 Embraer170、A380、Boeing787 等机

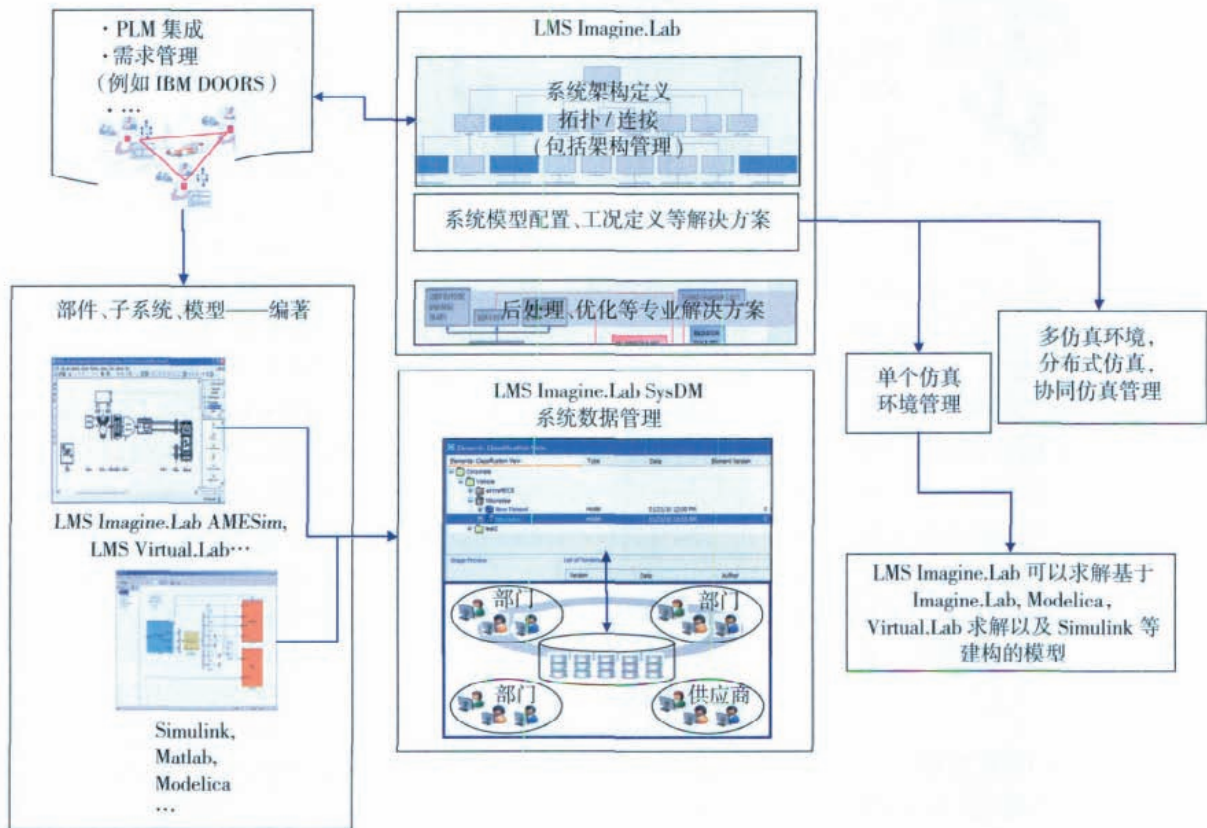


图2 LMS Imagine.Lab: 支持基于模型的系统工程 (MBSE) 设计平台

型,均在系统集成和整机验证过程中遇到较大的困难,使整个项目的开发流程和进度在系统集成阶段显著减缓。

(2) 物理试验自身有一定的局限性,例如:物理试验中无法完全模拟真实的飞行环境和飞行状态;物理试验较难考虑所有飞行工况,也比较难以表征系统软硬件的全部特征,难以获取更多信息等。

现有系统集成和全机性能验证方法的局限,迫使各航空厂商寻找效率更高、效果更好的技术途径,即通过基于模型的系统工程进行系统集成和虚拟整机(Virtual Integrated Aircraft)试验。虚拟飞机集成就是要通过整机全系统虚拟样机的建立,力图全面反映气动、机械、液压、电气、控制多学科子系统之间的复杂集成和耦合,通过虚拟仿真在整机洞察和获取的更多品质,包括电液系统控制作动性能、机械运动与飞行状态、结构应力、疲劳损伤以及复杂的力纷争问题、起落架性能、燃油与推进系统性能等,调优系统性能并优化系统设计。

针对当前国外航空制造商对整机多学科子系统集成需求,通过基于模型的系统工程开发平台 LMS Imagine.Lab 开放的架构和优异的集成能力,通过分布式方式整合不同的软件、硬件资源,以开放架构和共仿真技术(包括模型在环 MIL、软件在环 SIL 和硬件在环 HIL)集成基于不同软件建立的不同层次和不同形态的分系统模型,直至硬件和实物,形成可代表完整系统的“虚拟铁鸟”(Virtual Iron Bird),即功能化数字飞机(Behavioral Digital Aircraft)。

1 基于模型的系统工程的“虚拟铁鸟”实施

1.1 部件与子系统的多样化建模(Polymorphic Modeling)

“虚拟铁鸟”是由零部件或子系统通过集成或组合而形成的整个系

统,而各零部件或子系统可以有不同的建模方式和模型表达形式,这取决于不同的分析阶段、分析目的和对分析精度的不同要求,同时考虑建模的方便性。例如,零部件或子系统的仿真模型,既可以是基于 3D 几何创建的 CAE 模型(例如 Virtual.Lab 多体动力学模型和有限元模型),也可以是通过物理元件数学建模方式形成的 1D 系统模型(例如 AMESim 液压系统模型),还可以是通过测试和参数辨识形成的可以代表系统外特性的功能模型(这种方式可以用一个数学模型和对应的一组参数表达系统的外特性而不关注其内在的物理参数);系统中的控制部分则可以通过“模型在环”方式建立其控制逻辑,或通过“软件在环”以及“硬件在环”方式建立真实的控制器。此外,还可以包含更加详细的控制电子元件模型等。典型的分系统实现方式包括:

(1) 航空飞行器的机械部分,包括飞控系统舵机与控制面操纵、起落架、舱门等,一般基于 Virtual.Lab Motion 等多体动力学软件建立,同时可以通过与有限元的结合,考虑刚柔耦合混合建模,部分零部件可作为柔性结构处理,如控制面、机身、起落架部件等;

(2) 包括液压、电气网络与电驱动、环境控制、燃油等系统,可基于 Imagine.Lab AMESim 等系统仿真软件建立,通过物理元件组合的动态建模方式建立这些分系统的模型;

(3) 控制律和控制策略可基于 Matlab/Simulink 或 AMESim 等建立,建立详细的控制算法模型。

1.2 模型与数据管理

通过 LMS Imagine.Lab SysDM 专门的模型与数据管理平台,用于管理“虚拟铁鸟”实施中的大量模型文件和数据,包括模型输入数据、中间过程数据和结果输出数据。由于“虚拟铁鸟”是飞机整机的虚拟集成,因此必然涉及到不同部门的协同工

作。根据飞机整机厂商的组织结构,在 LMS Imagine.Lab SysDM 中定义好对应的类(Classification),例如可以定义起落架、环控系统、飞控系统、发动机等类,在飞控系统类中又可以定义液压部件、控制器、机构等。通过分层的结构化类定义,一方面可以把“虚拟铁鸟”实施中的数据按照这些类来进行结构化的组织和管理。来自不同部门的专业工程师通过 Check-in,把自己的模型和数据存储在中央服务器中自己所在的类。对于集成工程师,又可以通过 Check-out 从中央服务器中来获取系统中需要的不同模型和数据(可以根据不同的属性信息快速地查找到自己所需要的数据)。随着项目的推进,LMS Imagine.Lab SysDM 自动地对模型和数据的版本和变形进行管理,确保专业工程师和集成工程师通过协调地工作。另一方面 LMS Imagine.Lab SysDM 根据类的定义来定义不同的访问权限,如图 3 所示,刹车系统负责人可以访问和审批所有刹车系统类下面的模型和数据;刹车部件设计工程师能够访问并修改刹车部件对应的模型和数据;刹车系统集成工程师可以访问所有部件的模型但是不能修改。所有“虚拟铁鸟”的模型和数据均按照这种方式有序地组织起来,确保项目的协同进行。

1.3 架构设计和集成的分析环境

(1) 架构设计与模型集成。

“虚拟铁鸟”的架构设计由 LMS Imagine.Lab System Synthesis 来定义,包括定义“虚拟铁鸟”的拓扑和连接关系,如图 4 所示。

不论是基于何种软件建立的分系统模型,都需要按照 LMS Imagine.Lab System Synthesis 定义的连接关系进行封装,定义与其他模块连接的接口和变量信息,从而可以在平台中进行集成。具体包括:

- 定义与其他分系统或模型连接的外部变量接口,包括输入变量和输

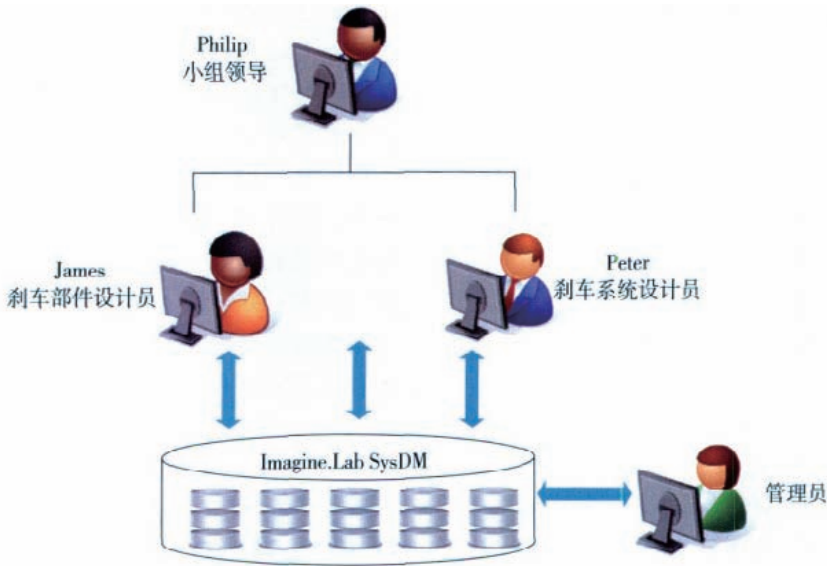


图3 LMS Imagine.Lab: 数据管理与共享架构

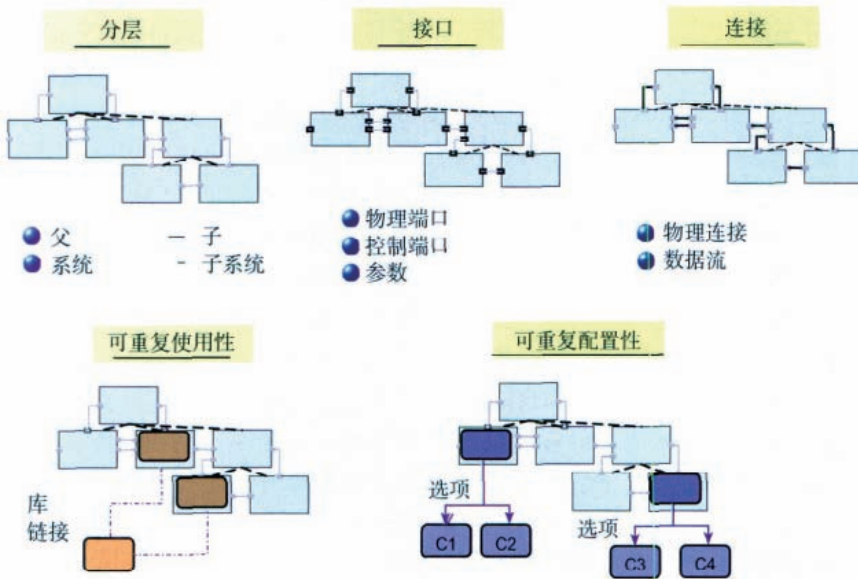


图4 LMS Imagine.Lab: 系统构架定义拓扑及连接关系

出变量,定义变量的数量和名称;

- 定义进行逻辑控制所需的逻辑控制参数,如可控制当前模块是处于激活状态还是失效状态的参变量;
- 定义分系统模型的整体参数,即哪些参数在“虚拟铁鸟”仿真中是允许用户进行设置和修改的。

以此标准进行封装的分系统模型,在“虚拟铁鸟”平台上表现为一个具有外部接口的模块,具有与外部其他系统进行信息和变量交互的接口,可以在LMS Imagine.Lab System Synthesis环境中进行连接和集成。

负责系统集成的工程师按照系统的架构,从模型库中选择对应的分系统模型,完成系统模型的配置,形成完整的“虚拟铁鸟”模型(可以形成多种不同配置的“虚拟铁鸟”,从而进行不同设计方案的优化)。

(2) 逻辑事件与仿真情景设置。

在LMS Imagine.Lab System Synthesis中,通过逻辑控制实现仿真模式、场景、工况和流程的选择和设置,包括复杂的同步、时序、延时等控制过程,以及失效模式分析等;同样通过逻辑控制对不同仿真模式和场

景设置不同的模块集成和配置。

逻辑控制(Logical Event Scheduler Control)主要实现“虚拟铁鸟”仿真任务、模式、场景和工况的定义(Tasks & Missions Scheduling),在仿真开始之前或仿真过程中,通过逻辑控制可实现飞行器处于不同的模式和工况,如起飞、巡航、降落、滑行等,以及更复杂的工况,如图5所示。逻辑控制的另一作用是实现仿真过程中模型参数的变化。

在AMESim平台中,可以定制专门的“虚拟铁鸟”仿真界面,在界面中可以结合逻辑控制,开发类似于仪表盘(Dashboard)一样的飞行器工况和模式设置工具。

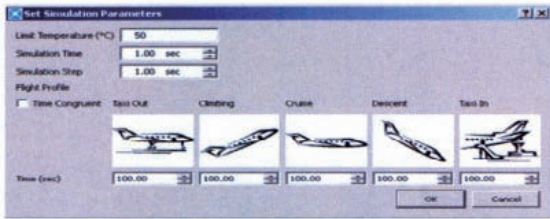
(3) 仿真运行。

LMS Imagine.Lab System Synthesis可以定制专门的“虚拟铁鸟”仿真环境。在“虚拟铁鸟”仿真环境中,可以在界面中设定仿真模式、场景和工况(如起飞、巡航、降落、滑行等不同飞行状态),定义必要的模型参数,如图6所示,设置仿真运行参数如运行时间、模型之间的通信步长等。

在定制的仿真环境中,所有的模式和参数设置都是在专门的界面下完成的,都是面向整个系统的,而无需对底层模型进行操作。此外,还可以定制专门的后处理工具,可以在后处理环境和界面中,快速获取定制的仿真结果,包括曲线、数值、动画等,这些仿真结果一般是整机分析所关心的指标。

2 实施“虚拟铁鸟”的作用和意义

“虚拟铁鸟”平台具备完整的虚拟试验环境和仿真能力,能够在虚拟试验环境中,像真实的物理试验一样,通过逻辑控制的设置和定义,选择不同的试验模式和试验工况,如起飞、平飞、降落以及复杂的失效工况。通过“虚拟铁鸟”试验,可以有效了解和洞悉整机性能,研究分系统和各学科之间的耦合,验证集成起来之后



Syst.	Status				Activation	
	EHA Ctrl.	EHA	HA ctrl.	HA	EHA	HA
1.	OK	OK	OK	OK	EHA.A	HA.P
2.	NOK	OK	OK	OK	EHA.P	HA.A
3.	NOK	OK	OK	NOK	EHA.P	HA.P

图5 LMS Imagine.Lab: 逻辑控制

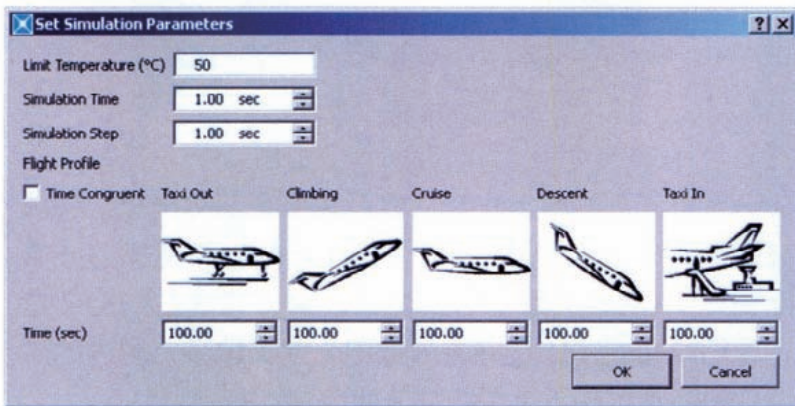


图6 LMS Imagine.Lab: 设置仿真运行参数

种工况下航空飞行器的整体性能,并考虑分系统之间的耦合。

- 观察飞机的姿态、航迹;
- 研究各系统能耗等;
- 多学科综合优化。

(4)通过丰富的仿真结果对各分系统集成到整机级之后的性能进行深入研究,包括:

- 研究飞控系统控制

(1)将整机方案验证从在线型的(On-Line)完全的物理试验转至离线型的(Off-Line)虚拟试验,或者在线的硬件在环(HIL)仿真,在集成的虚拟环境下分析、评价和优化整机级性能和设计方案,并考虑子系统和多学科之间的耦合作用。

(2)将整机系统集成提前,从早期设计阶段即开始进行系统集成与验证,从而在原有V字型设计周期的前端引入一个新的V字设计循环。设计早期系统集成的介入,可有效提高系统成熟度,避免50%左右的重复设计工作。

(3)在设计验证阶段通过整机虚拟试验可分析整机性能和方案,减少物理试验的次数和成本。

(4)显著提高系统设计成熟度,避免重复设计过程,减少物理试验的次数和成本,缩短开发周期。此外可分析物理测试难以进行的工况。

(5)“虚拟铁鸟”与物理试验紧密结合,互为补充,可形成完整的整机系统验证方法体系,并逐步实现基于整机建模和仿真分析的虚拟认证。

结束语

本文阐述了基于模型的系统工程开发方法的基本概念。作为测试和机电一体化仿真全球领先的供应商LMS公司开发了LMS Imagine.Lab平台,包括多领域系统建模平台AMESim、系统模型和数据管理工具SysDM以及架构设计、配置、仿真综合环境System Synthesis,用于支撑基于模型的系统工程开发方法的实施。基于模型的系统工程开发方法是飞机开发方法学上的全新突破,通过实施基于模型的系统工程,实现飞机整机的虚拟集成,建立“虚拟铁鸟”模型能够有效地改进现有设计流程,尤其是系统集成阶段的设计和评价方法,避免不必要的重复设计工作,减少整机物理试验的次数和成本。

(责编 小城)

的分系统是否能够达到整体的要求,此外还可以为物理试验做大量的准备工作,如了解重要的载荷工况等。

2.1 实施“虚拟铁鸟”的作用

“虚拟铁鸟”本质上是系统级的集成式仿真,是“基于模型的系统工程”。通过“虚拟铁鸟”仿真可以实现的功能包括:

(1)在早期设计阶段进行设计需求与设计方案的定义、细化和验证。

(2)为控制器开发和控制律设计提供详细而真实的整机级被控对象模型。

(3)系统综合与系统级虚拟测试。将不同类型、不同学科和不同软件的系统模型整合到一个平台上,实现了整机数字样机建模,通过仿真模式、场景和工况的设置,可以研究各

律和控制策略设计效果,包括:

- 研究飞控系统电液作动器的作动能力,结合3D模型研究气动载荷作用、结构柔性、力纷争等复杂问题;

- 研究起落架的收放、转弯、制动、缓冲等子系统,并考虑其结构柔性的影响;

- 研究液压系统流量、油压、温度等特性及其变化,可考虑液压系统的复杂非线性问题,如流体可压缩性、流态变化、气穴、压力脉动等;

- 研究机械部件的结构柔性、结构动强度和疲劳耐久性。

2.2 实施“虚拟铁鸟”的意义

“虚拟铁鸟”平台的建立,能够有效地改进现有设计流程,尤其是系统集成阶段的设计和评价方法,避免不必要的重复设计工作,减少整机物理试验的次数和成本。