

# 飞机设计中仿真技术应用现状及发展趋势

## Application Status and Development Trend of Simulation Technology in Aircraft Design

西北工业大学 郑党党 刘更  
天津海金德石油工程技术有限公司 任俊俊  
中航工业第一飞机设计研究院 刘俊堂 吴颖



郑党党

西北工业大学博士研究生,现在中航工业第一飞机设计研究院工作,主要从事数字化设计、分析仿真和系统工程等方面研究。

随着计算机技术的迅速发展,仿真技术逐渐发展成熟。当前,飞机设计中的仿真技术应用体系在不同设计阶段均发挥着重要作用,但在仿真基础数据积累、仿真建模标准和多系统综合仿真等方面仍面临诸多挑战,需要重点加强仿真可信度评估、多系统虚拟集成仿真和多专业协同仿真平台等研究。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.23/24.068

分析和各种系统动态特性分析,从而实现设计早期验证,减少和简化物理试验,有效缩短研制周期,降低研制成本和提升飞机性能<sup>[2]</sup>。

### 仿真技术发展历程

仿真技术发展以 CAE 为代表,发展历程大致可以划分为 5 个阶段(图 1):第 1 阶段为“理论萌芽”,可追溯到 20 世纪 40 年代,数学家 Courant 尝试使用离散元方法解决圆柱体扭转问题,从而推动了有限元方法的产生和发展,并在结构力学领域得到了应用<sup>[3]</sup>;第 2 阶段为“工程探索”,从 20 世纪 60 年代到 70 年代,随着计算机技术的发展,在一些重大工程项目中,工程师尝试开发和使用

简单的有限元算法和程序进行工程计算,有限元应用逐渐由结构分析向其他领域拓展,成为解决连续介质问题的通用方法,最著名的是 NASA 开发的 Nastran 程序<sup>[4]</sup>;第 3 阶段为“快速发展”,20 世纪七八十年代,计算机硬件性能大幅提升使得大规模数值计算成为可能,MSC、ANSYS 等主流 CAE 软件厂商推出了一批大型商业化 CAE 软件,如 MSC.Nastran、MARC 等,其应用逐渐由线性分析拓展到非线性分析,由单物理场分析拓展到多物理场耦合分析<sup>[5-6]</sup>;第 4 阶段为“成长壮大”,从 20 世纪 90 年代到 21 世纪初,随着计算机图形处理技术的发展,原来单纯用于分析计算的软件逐渐拓展前置处理和后置处

仿真技术是以多种学科和理论为基础、以计算机及相关软件为工具、通过计算机建模和数值计算方法分析和解决实际问题的一门综合性技术<sup>[1]</sup>。在飞机设计中,广泛采用计算机辅助工程(Computer Aided Engineering, CAE)方法进行气动计算、强度/耐久性分析、多体动力学分析、振动/噪声分析、电磁分析、热

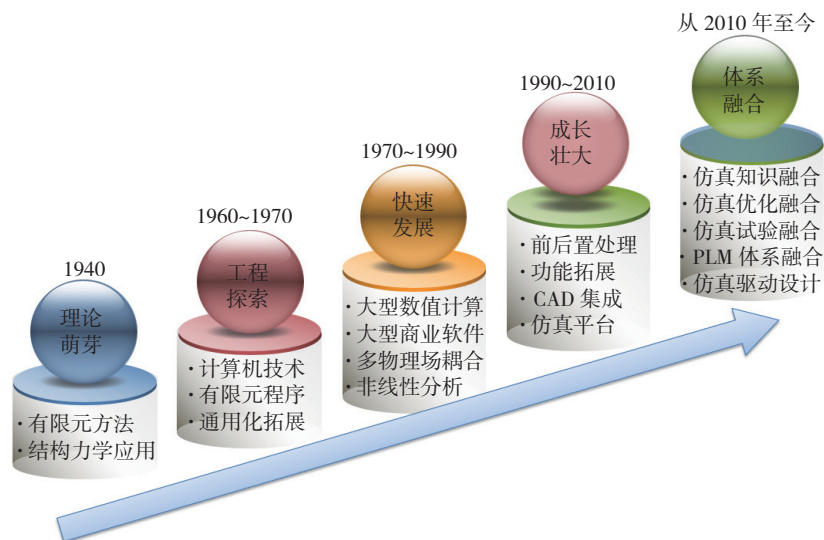


图1 仿真技术发展历程

理功能,从而使得原本需要经验丰富的专家才能完成的复杂建模工作变得更加简单<sup>[7-8]</sup>,出现了 MSC.Patran、HyperMesh 等前后置处理软件,许多 CAD 软件也开始拓展和集成仿真模块,行业内部出现了一些仿真平台,如 MSC 的 SimManager、安世亚太的 PERA、LMS 的 CAESim 和 DS 公司的 SLM 等,仿真技术应用群体和应用领域不断拓展<sup>[9]</sup>;第 5 阶段为“体系融合”,从 2010 年至今,仿真技术逐渐向综合化、集成化和融合化发展,更多关注 CAE 与企业整个 PLM 体系的融合,主流 CAE 软件厂商纷纷与 PLM 厂商强强联合,仿真技术应用逐渐向仿真驱动的一体化设计方向发展<sup>[10]</sup>。

## 飞机设计仿真技术应用现状

### 1 仿真技术应用体系

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,整个飞机的性能仿真包括整机级仿真和专业级仿真。专业级仿面向单个零组件或子系统,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、电磁仿真和系统仿真 4 类;整机级仿真面向整机或者多系统集成,需要多个专业协同工作,主要包括“虚拟集成飞机”仿真和

“虚拟铁鸟”仿真两部分。飞机设计仿真技术应用体系如图 2 所示。

(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)的仿真工作,常用仿真软件有 Fluent、CFX、CFD++、Fensap 和 CFL3D 等。

(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仿真工作,常用仿真软件有 MSC.Nastran、Abaqus、MSC.Fatigue 和 LMS.Motion 等。

(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隐身分析等,常用工具软件有 Ansoft、Visualyse Pro、EMC-A 和 FEKO 等。

(4)系统仿真主要包括功能逻辑分析、控制率仿真、系统或设备稳态\瞬态特性分析、能量综合仿真等,常用的工具软件有 Rhapsody、Simulink、AMESim、Dymola 和 Flowmaster 等。

(5)虚拟集成飞机主要面向飞机早期方案阶段,采用基于模型的方法对飞机结构、机载系统和机载软件等不同模块进行虚拟集成和仿真验证,充分考虑不同模块之间的交联耦合,通过整机全数字仿真实现对飞机总体架构的权衡分析和综合性能早期验证与优化。

(6)虚拟铁鸟主要面向工程研制阶段,通过构建统一的实时网络和总控台,连接各系统仿真试验台,并能够根据 C/S 型件交付状态实现软硬件的柔性替换,支撑整机级半物理仿真,简化、减少和辅助后期“铁鸟”试验等综合性试验。

### 2 飞机设计中仿真技术应用价值

仿真技术应用已经贯穿到整个飞机研制流程的各个阶段,且发挥着重要的作用。

(1)论证阶段。在论证阶段,基于仿真技术建立概念样机,开展关键性能指标和子系统的虚拟验证,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初步验证,从而“赢得”项目。

(2)方案阶段。在方案阶段,可以通过仿真进行多方案筛选和最终方案早期验证,同时在一些物理试验无法开展的极端工况下,可利用仿真

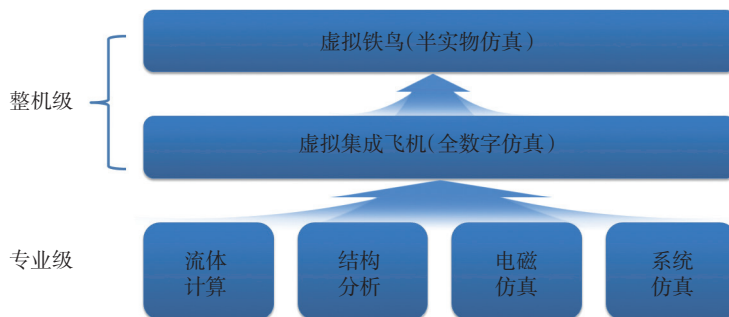


图2 飞机设计中仿真技术应用体系示意图

技术在更广阔的设计空间中进行探索,实现方案最优化,如飞机总体设计中往往采用 CFD 计算确定第一轮气动载荷输入,并在后续一些风洞试验无法开展的极端工况下用数值仿真进行验证,扩大设计探索范围。

(3)工程研制阶段。在工程研制阶段,仿真全面融入产品详细设计过程,包括各子系统和零部件设计,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,实现仿真驱动设计。另外,在工程研制阶段需要进行大量研发试验,通过仿真技术应用可简化和支撑研发阶段的物理试验。如通过仿真进行试验工况的初步筛选,减少试验车次;对试验件性能进行验证,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,从而确保试验一次成功。

### 3 仿真技术应用面临的挑战

仿真技术在飞机设计中的作用越来越凸显。随着飞机复杂度、性能指标不断提升及应用范围的不断拓展,仿真技术应用面临许多突出问题:(1)飞机研制中迫切需要大量采用仿真技术简化和替代物理试验,缩短研制周期和降低研制成本,由于仿真试验基础数据积累薄弱、仿真建模标准缺失等问题,仿真的可信度难以保证,仿真工作无法正式纳入飞机研制流程;(2)飞机系统向综合化、集成化发展,使得电气、液压、环控、动力和燃油等不同系统之间的交联耦合越来越复杂,当前的仿真需要从单一物理系统仿真向多物理系统综合仿真转变,这涉及到不同系统建模语言和工具的数据交换标准问题;(3)飞机的性能仿真是一个多专业协同工作过程,需要通过各种仿真单点技术工具和业务过程的全面整合和仿真技术应用过程的规范化、体系化管理,使各类分析仿真业务紧密融合、各种单点技术工具有效集成、不

同专业工程人员及供应商全面协同,从而有效提升分析仿真技术体系化应用的效率和规范化程度<sup>[11]</sup>。

## 仿真技术发展趋势

经过数十年的发展和应用验证,仿真技术本身的理论和算法已经趋于稳定,国内主机单位在仿真硬件、软件等“硬性”能力方面与国外差距不大,未来发展趋势主要体现在建设模式、应用水平和体系创新上,要由当前“碎片化”投资向体系化建设转变、由单点应用向系统集成转变、由部门“孤岛式”向专业协同式转变、由手工作坊式向平台规范化转变,重点发展方向包含以下方面。

### 1 仿真基础资源库建设及仿真可信度评估与提升

随着仿真技术在飞机设计中发挥的作用越来越显著,将仿真工作纳入飞机研制流程已成为研发人员的共识,其核心涉及仿真可信度问题。仿真可信度取决于仿真模型、仿真输入数据(载荷、边界条件等)和仿真算法程序的可信度<sup>[12-13]</sup>。长期以来,国内侧重于仿真技术应用研究,在历史仿真和试验数据积累、仿真基础资源库、仿真经验知识与建模规范等方面积累不够,工程中实际用到的仿真基础模型主要来自国外供应商,大量自研的仿真算法难以有效利用,从而使得工程仿真可信度评估和提升十分困难<sup>[14]</sup>。未来要加强仿真基础资源库建设,坚持“以我为主”,在历史仿真和试验数据积累基础上,综合运用虚实混合的方法构建一套工程可用的仿真基础资源库,并将成熟度管理方法引入到仿真模型管理方面,建立一套多层次、多精度、多尺度的仿真模型管理方法和行业建模规范,在此基础上建立面向飞机设计的仿真可信度评估体系<sup>[15]</sup>。

### 2 多系统虚拟集成仿真与多学科优化

当前仿真技术应用主要局限在

单一专业或系统内部,多系统以及全机结构、系统综合验证主要依靠后期“铁鸟”等物理试验<sup>[16-17]</sup>。随着飞机复杂度的大幅提升,工程领域更多关注多系统联合仿真和多学科优化,尤其对于主机院所,将来需要全面推进“虚拟集成飞机”(VIA)和“虚拟铁鸟”(VIB)体系建设,加强多领域系统联合仿真接口、基于模型的系统综合仿真等技术研究,注重数字仿真与半实物仿真及虚拟仿真与优化设计的融合,实现整机多学科性能的虚拟验证、综合分析和权衡优化<sup>[18]</sup>。

### 3 多专业协同仿真平台

国内在仿真技术应用方面,主要还是部门/专业内部单点技术和工具的“手工作坊”应用模式<sup>[19]</sup>,规范化程度和效率低下,专业间难以有效协同,仿真数据、经验和知识难以共享和积累<sup>[20]</sup>。未来需要通过构建统一开放的多专业协同仿真平台,支撑研制各阶段、各专业、各种类型分析仿真任务的流程管理,多轮次、多方案、多工况仿真数据的工程化管理,各种商用及自研分析仿真软件的集成化应用和大规模高性能计算,同时仿真平台要充分考虑与企业整个 PLM 体系的融合,实现“需求-设计-仿真-试验”的全流程贯通和数据融合,实现对仿真领域单点技术工具的全面整合和企业级协同仿真<sup>[21]</sup>。

## 结束语

虚拟仿真技术发展带动了工程研发手段创新,仿真在飞机研制各阶段得到广泛应用,并发挥了重要作用。但随着飞机复杂度的大幅提升以及仿真技术应用不断深入,当前仿真技术及应用体系的“碎片化”建设、“单点式”应用和“粗放式”管理模式已严重束缚飞机数字化设计水平的提升,国内外仿真技术差距已经不再是软硬件工具,而是仿真技术的应用模式和管理模式。将来要系统规划

(下转第 131 页)