

基于模型的系统工程在前起落架设计中的应用研究

中航工业信息技术中心金航数码科技有限责任公司 沈波 任金虎 许鸿杰 郑永乾

将基于模型的系统工程的方法应用于飞机前起落架的初步设计阶段，在需求分析阶段引进了 IBM 的 DOORS 软件进行需求管理及分析；在架构设计上采用 Rhapsody 进行功能与逻辑分析；采用 Modelica 语言进行多学科建模与分析以及系统架构的验证；引进达索系统工程工具 3DE，打通 MBSE 各工具之间的数据关系，验证从需求、功能、逻辑到物理设计的过程，实现需求的有效闭环；通过多专业协同联合仿真，对前起落架收放和着陆等典型场景进行静力及动力响应等分析。

一、引言

飞机系统设计是一个多学科、多专业的协同设计过程，这一过程具有以下三个特点。

(1) 飞机系统设计是一个从粗到细的过程，随着用户需求的提高，飞机系统设计全过程的工作量和费用消耗呈指数增长，未经充分的前期设计而过早进入工程设计阶段，将会带来巨大的成本和时间风险，而且也无法保证设计的快速收敛。

(2) 飞机系统设计是一个从耦合到解耦的过程，在工程设计阶段工作量最大，只有在工程设计阶段充分解决了各学科、各系统之间的冲突和矛盾实现并行工程，才能减少工程设计阶段的交叉和耦合，从而有利于工程设计的并行开展。

(3) 飞机系统设计过程是一个需要进行大量设计循环和迭代的过程。

针对飞机系统设计中的特点，在现有分散的设计手段基础上，形成一套高度集成、高度灵活和多层次的总体—分系统多学科协同设计和仿真验证模式，成为当前飞机系统研制面临的重要课题。综合分析，采用基于模型的系统工程

(MBSE: Model Based System Engineering) 的方法来进行飞机系统设计能很好的解决这个难题。

基于模型的系统工程是指“对系统工程活动中建模方法的正式化、规范化应用，以使建模方法支持系统要求，设计、分析、验证和确认等活动，这些活动从概念设计阶段开始，持续贯穿到设计开发以及后来的所有生命周期”。自从 2007 年，国际系统工程学会 (INCOSE) 在《系统工程 2020 年愿景》中，正式对 MBSE 进行定义以来，MBSE 在航空工业得到了快速发展，各单位进行了一系列研究。

航空工业成都飞机工业 (集团) 有限责任公司丁健等人研究了基于模型的系统工程在地面站研制中的应用；航空工业西安航空计算技术研究所的白洁等人研究了基于模型的系统工程在机载电子系统领域的应用；航空工业第一飞机设计研究院的葛立敏等人进行了基于模型的系统工程在航电系统设计中的应用研究；航空工业第一飞机设计研究院的葛立敏等人研究了基于模型的系统工程设计方法在 TCAS 中的应用；航空工业洪都的罗松等人研究了基于模型的系统工程应用于飞机概念设计探讨。

本文以飞机起落架为对象，进行了基于模型的系统工程分析与应用研究。打通 MBSE 各工具之间的数据关系，验证从需求、功能、逻辑到物理设计的过程，实现需求的有效闭环以及多专业协同联合仿真，为基于模型的系统工程建设提供支持。

二、MBSE 的总体架构

为了实现 DOORS、Rhapsody、Modelica 语言建模工具与 Dassault 系统工程工具的数据贯通，搭建如图 1 所示的基于 RFLP 框架的 MBSE 系统工程设计环境。

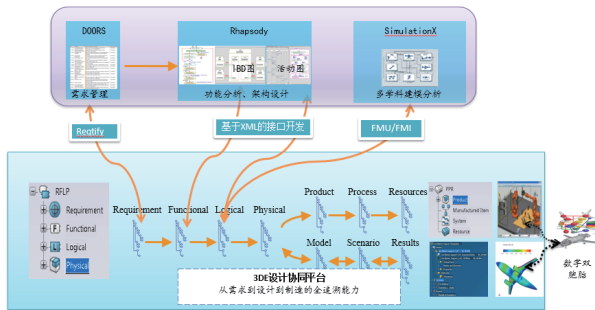


图 1 基于 RFLP 框架的 MBSE 系统工程设计环境

Dassault 系统工程方法论—基于 RFLP 模型的系统工程框架将需求 (Requirement)、功能 (Function)、逻辑架构 (Logical) 和物理产品 (Physical) 结合起来，使其组成一个统一的、不能孤立的集合体，实现了系统工程核心要素的完整表述，符合系统工程方法论。该框架实现参数、结构化数据、设计与仿真模型在业务过程中的传递，做到基于统一平台的业务流程协同。

三、MBSE 的应用及验证

1. 前起落架初步设计阶段的流程分析

本文选取前起落架为研究对象，其初步设计阶段流程如图 2 所示。

2. DOORS 中的需求导入达索 RFLP 框架

使用 IBM 需求管理软件 DOORS 对前起落架系统需求进行管理，工作界面如图 3 所示，主要体现为对需求文档进行结构化展示、实现需求条目的版本管理、基线管理、需求的权限管理等工作。

采用达索 REQTIFY 软件将 DOORS 中管理的前起落架系统需求条目捕获，同时导入到达索的需求管理模块中，

导入流程如图 4 所示。

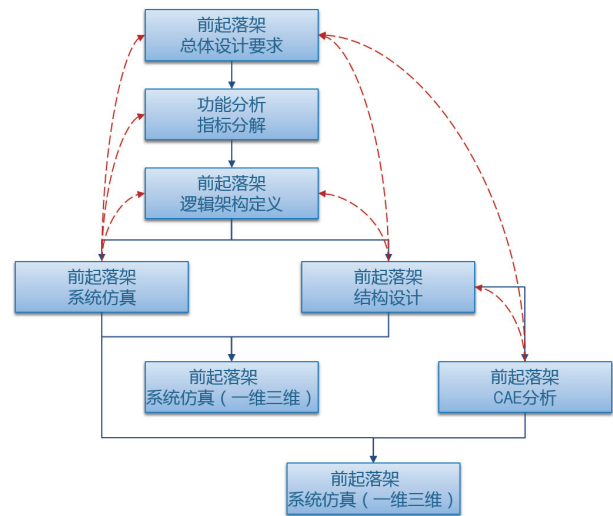


图 2 基于 RFLP 的前起落架优化迭代设计

图 3 DOORS 需求管理

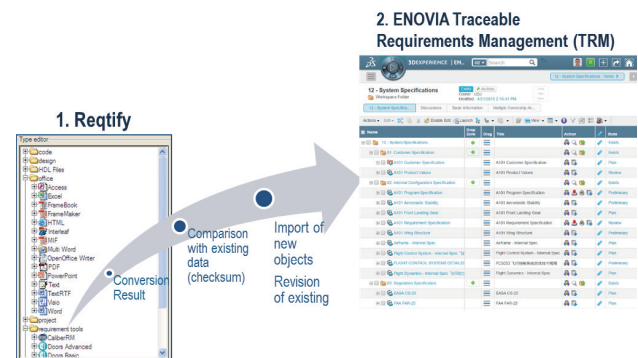


图 4 REQTIFY 导入条目化需求

在性能要求、设计约束等需求条目下添加参数，用以对指标和约束进行描述，如图 5 所示。同时这些参数可以向下面的功能分析、架构定义与仿真验证等过程中进行传递。

Name	Revision	Title	Content
  前起落架系统设计规范	1	前起落架系统设计规范	-
  前起落架功能要求	1	前起落架功能要求	-
   收放功能	A	收放功能	前起落架具备收起、放下功能。
  前起落架性能要求	1	前起落架性能要求	-
   收放时间	A	收放时间	前起落架在X秒内完成收放。
  前起落架接口要求	1		-
  前起落架六性要求	1	前起落架六性要求	-
  前起落架设计约束	1	前起落架设计约束	-
   重量	A	重量	前起落架系统重量不超过X Kg
   重量	A	重量	$1.0 < 1.0 < 2.0$
   轮心距离	A	轮心距离	前起落架轮胎中心距离某参考点距离不超过X mm。
   轮心距离	A	轮心距离	$1.0 < 1.0 < 2.0$

图 5 参数化需求的传递

3.Rhapsody 中模型导入达索 RFLP 框架

利用 Rhapsody 基于 SysML 模型对前起落架系统需求进行分析、设计, 在分析过程中, 形成用例图、活动图、BDD 图以及 IBD 图等一系列设计结果。通过 RFLP 框架与 Rhapsody 模型的融合, 实现活动图、IBD 图与 RFLP 框架的集成, 活动图导入到 RFLP 的功能节点, IBD 图导入到 RFLP 的逻辑节点。

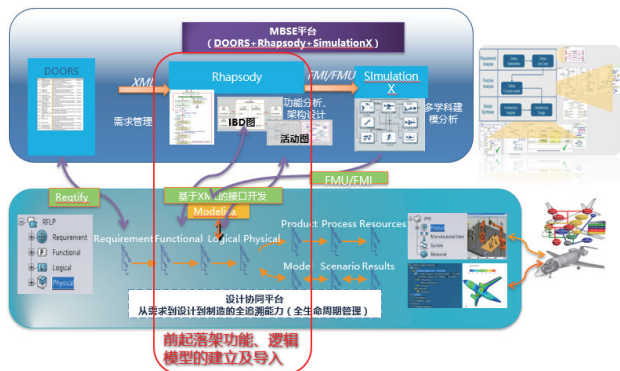


图 6 功能和逻辑模型的建立和导入

4. 基于系统工程驱动的物理设计

依据总体设计规范中规定的前起落架位置、重量指标、轮心位置、是否带外挂、强度与载荷等要求开展前起落架结构设计。

以轮心距离为例介绍需求导向的设计过程，整个设计过程如图 7 所示。

5. 系统工程驱动下的优化设计

达索 RFLP 框架采用多学科优化设计 (MDO) 方法, 如图 8 所示, 将前起落架设计规范、标准与经验, 以知识的

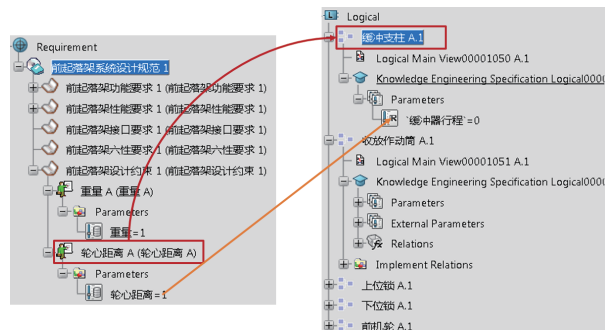


图 7 需求导向设计过程

形式融入到多学科的分析和优化模型的建立过程中,自动生成各学科分析模型,将各学科的分析模型和优化模型集成起来,实现各学科之间数据自动传递,按照定义的约束条件,驱动设计及仿真模型,自动修改设计参数,最终获得优化方案。

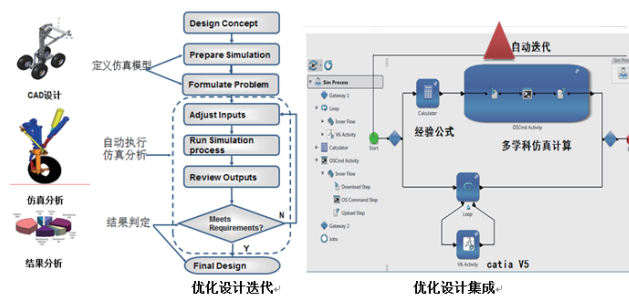


图 8 系统工程优化设计流程设计示意图

以前起落架收放性能需求为优化设计目标,对前起落架的作动筒外筒内径和活塞直径进行优化设计验证。具体优化过程如图9所示。

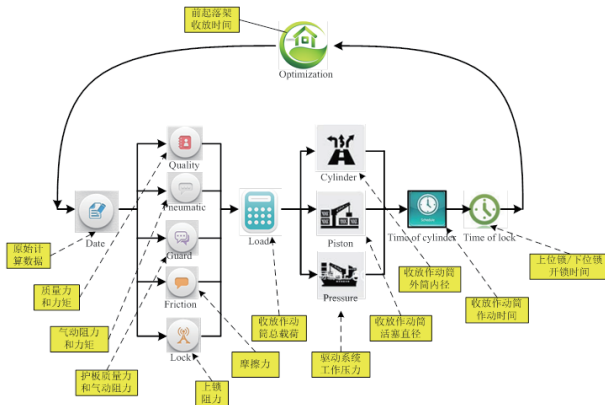


图 9 前起落架收放时间优化示意图

为了确保飞机起飞着陆安全且不致增加飞机收放机构的重量,必须合理地优化前起落架收放时间。前起落架收放

时间主要由开锁时间和收放作动筒作动时间组成，因开锁时间较短，故主要通过优化收放作动筒作动时间，使前起落架收放时间更加合理化。

影响收放作动筒作动时间主要因素是收放作动筒所承受的载荷，该载荷存在于前起落架收起或放下运动的全过程，因此在设计优化时要考虑前起落架收放运动的全过程。

在前起落架收放过程中，收放作动筒主要承受的载荷包括：收放前起落架时绕转轴转动部分的质量力；处在气流中的前起落架结构的迎面阻力；前护板联动的质量力和气动压力；前起落架机构铰链中的摩擦力；前起落架上锁力。

这些载荷可通过与所有其它载荷对前起落架旋转载矩的静力平衡条件及气动计算模型求得。主要的计算原始数据包括：飞机最大的起飞重量；飞机着陆设计重量；机翼面积；展弦比；前起落架收放时的速压；前起落架支柱重量；收放前起落架时的最大飞行速度等。

6. 前起落架多专业协同仿真

采用 Modelica 语言建模的方法建立由机械、液压、控制等组成的前起落架的 Modelica 模型，将该 Modelica 模型转换为标准的 FMU 模型，在完整 RFLP 定义基础上对收放系统和着陆系统 FMU 模型进行仿真，对前起落架总体性能进行仿真验证，如图 10 所示。

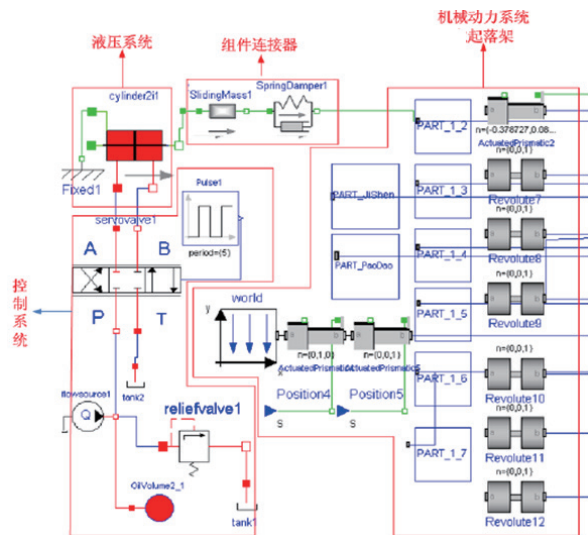


图 10 前起落架系统 FMU 模型在 RFLP 仿真示意图

四、结果分析及验证

1. 前起落架仿真结果分析

采用达索 RFLP 框架提供的联合仿真及多学科耦合分

析技术，对前起落架进行多体动力学、静力及动力响应等分析，为飞机收放和着陆过程等典型场景进行验证。采用该平台隐式求解器模块，求解前起落架系统级的非线性结构静力学问题；采用平台的显式求解器模块求解前起落架系统的瞬态动力冲击仿真。

(1) 前起落架多体动力学分析。在平台中，将前起落架三维模型自动转换为一维的 Modelica 模型，将各部件转换为 Modelica 的多体模块，系统自动提取部件的质量、质心和转动惯量等信息；将三维模型中的运动副转换为 Modelica 的平动和转动，根据系统的实际情况判断，向运动副上施加力或扭矩。通过多体动力学联合仿真，完成对前起落架运动协调性分析，计算前起落架连接部位的反作用力，为刚柔耦合输出了接触载荷，得到前起落架的多体仿真示意图，如图 11 所示。

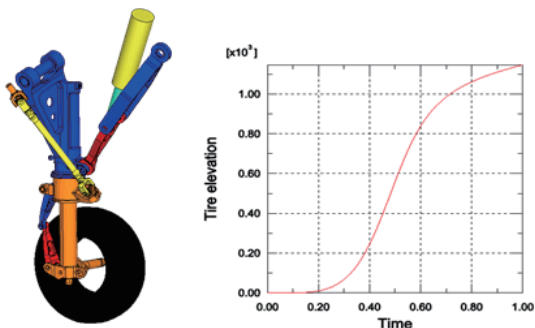


图 11 前起落架多体运动仿真示意图

(2) 前起落架静力分析。现阶段对前起落架进行的静力学分析，主要采用刚体分析提取部件间的作用力，再通过施加边界条件的方法，将部件间作用力作静载施加在部件上，分析过程繁琐。在达索 3DE 平台中，采用统一的模型进行机构—结构耦合分析，不需要导入导出部件间的作用力，能快速实现基于系统工程的多体与静力学联合、刚柔耦合分析，如图 12 所示。

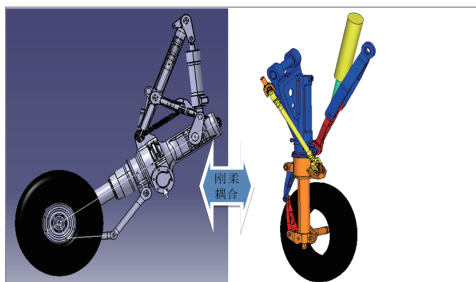


图 12 前起落架静力仿真示意图

(3) 前起落架模态分析及线性响应分析。采用高级隐式非线性有限元软件的求解器,验证工作中模态和瞬态响应分析,并求解前起落架结构的谐响应分析、频谱分析、随机振动分析与屈曲/失稳分析等,前起落架的模态分析及线性动力学响应情况,如图 13 所示。

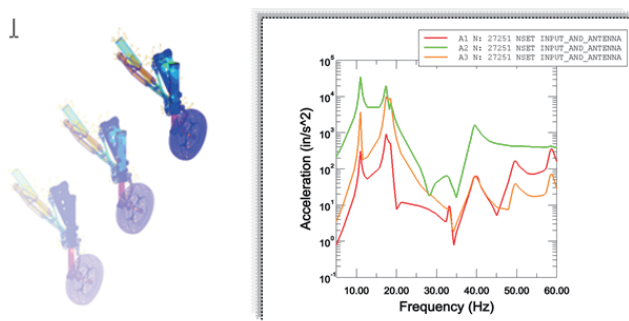


图 13 前起落架的模态分析及线性动力学响应

(4) 前起落架非线性冲击分析。

采用先进的非线性算法,通过达索 RFLP 框架,从需求出发,紧密联系系统工程方法、利用统一的数据模型进行前起落架的运动学、静力学、冲击响应等分析,处理前起落架收放和着陆过程中各种复杂的非线性问题,得到前起落架着陆过程中的非线性响应图,如图 14 所示。

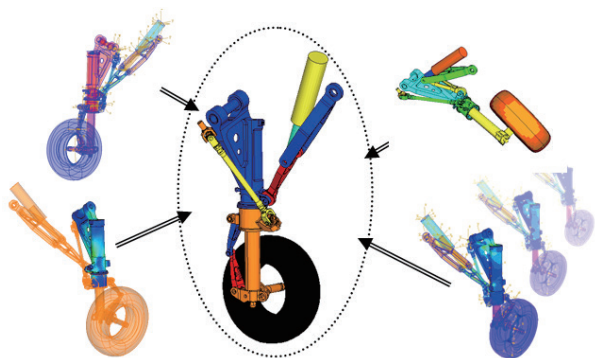


图 14 前起落架着陆过程中非线性响应分析

2. 需求的闭环验证

在平台中,需求工程师基于需求设计视图展开工作并将设计要求传递给下游专业,而设计工程师基于设计视图从上游专业获得的设计输入进行设计,并将设计结果传递给仿真工程师,由仿真工程师与结构工程师进行协同工作,由此形成需求的闭环。需求闭环验证示意图,如图 15 所示。

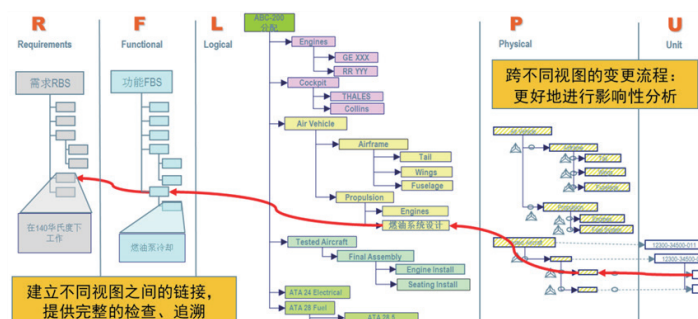


图 15 需求闭环验证示意图

(1) 性能仿真过程的影响性分析。采用达索 3DE 平台的数据谱系追踪功能,以数据谱系图形的方式记录前起落架分析业务数据之间的关联关系。前起落架性能仿真结果的数据挖掘流程如图 16 所示。

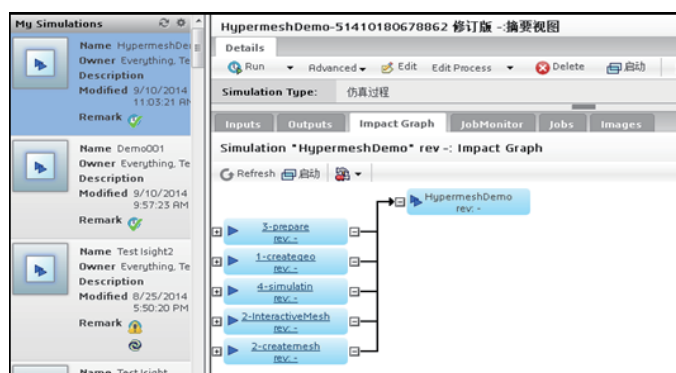


图 16 性能仿真过程影响分析示意图

当前起落架计算活动对应的输入参数(如参数化的需求)、参考文档及模型(接口模型等模型文件)的状态发生变更时,可以自动分析影响关系,并通过影像图的形式来提示后续受到影响的设计活动,如图 17 所示。

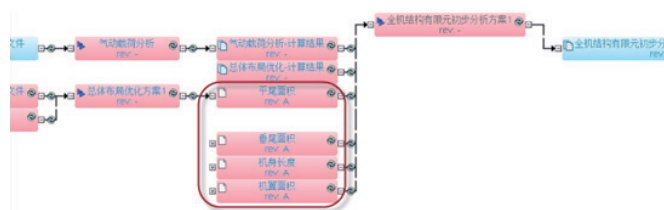


图 17 性能分析的数据传递关系图

(2) 仿真结果分析与决策支持。利用平台对性能仿真结果分析、数据挖掘等功能,迅速有效地从众多分析中找到前起落架最符合设计要求的,性能最好的方案。性能仿真结果的数据挖掘流程,如图 18 所示。

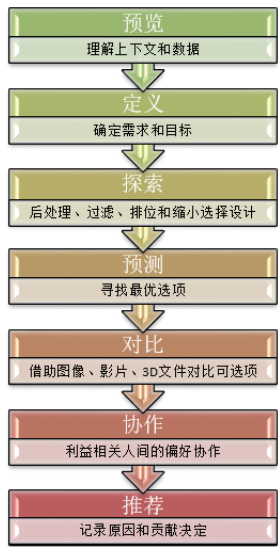


图 18 性能仿真结果的数据挖掘流程

利用平台浏览数据、对比数据，从大量数据中进行挖掘、筛选，为前起落架系统提供多种有效的数据挖掘方法。结果分析与决策支持，如图 19 所示。

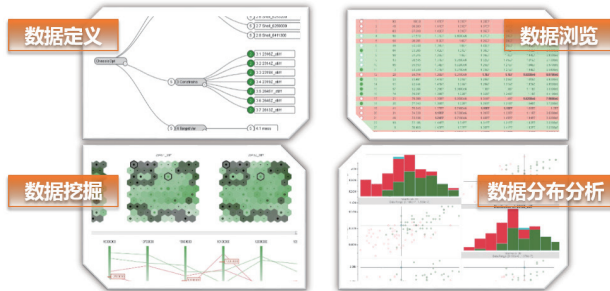


图 19 结果分析与决策支持

(3) 仿真结果对需求的闭环验证。基于前起落架一维仿真与三维仿真的协同仿真（多体动力学、静力学及动力学仿真等）结果，在平台中完成仿真结果与前起落架设计需求的对比和验证，实现需求闭环验证，其过程如图 20 所示。

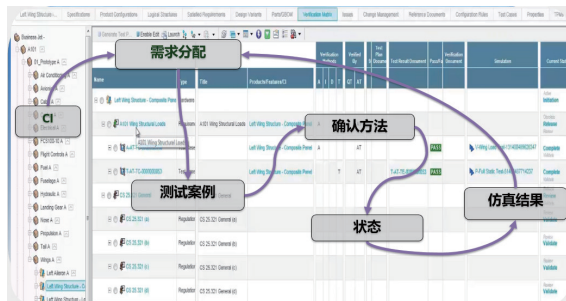


图 20 需求闭环验证示意图

五、结语

本文采用基于模型的系统工程的方法，对飞机前起落架的初级设计阶段进行分析、应用研究，实现了 DOORS、Rhapsody、Modelica 语言建模工具与 Dassault 系统工程工具的数据贯通。从飞机的起飞、着陆等应用场景出发，在多个专业协同仿真的基础上，对前起落架性能进行仿真分析；研究了前起落架强度、刚度与冲击等性能，实现了对需求闭环的有效验证。为基于模型的系统工程的方法在飞机系统设计过程中提供了一种新的应用实施手段，同时为基于模型的系统工程建设提供支持。IM

机械工业信息研究院《智能制造》杂志社 领取新闻记者证人员名单公示

根据新闻出版广电总局《新闻记者证管理办法》等要求，我单位已对本年度申领记者证人员的资格进行了严格审核，现将领取新闻记者证、通过审核的人员名单进行公示。

姓名：朱辉杰

职务：副主编

部门：编辑部

《智能制造》杂志社电话：010-68993880

机械工业信息研究院业务管理：010-88379978

《智能制造》杂志社邮箱：imchina@idnovo.com.cn

机械工业信息研究院《智能制造》杂志社

2018 年 1 月 10 日