

基于 SLM 的伺服系统多学科 联合仿真与设计优化平台

安林雪, 蒋孟龙, 黄玉平, 朱阳贞, 林 晨

(北京精密机电控制设备研究所, 北京 100076)

摘要: 针对航天伺服系统研制过程中存在的协同设计水平不高、设计流程不统一、数据与模型管理分散等问题, 以仿真生命周期管理 (SLM) 商业通用框架为基础定制开发了伺服系统多学科联合仿真与设计优化平台。通过对设计流程分析、流程定制、数据传递、模型管理等方面的研究与开发, 将仿真融入设计流程中, 实现了航天伺服系统的多学科协同建模与仿真、数据与模型的统一管理等功能, 提升了航天伺服系统协同设计水平。

关键词: 航天伺服系统; 多学科联合仿真平台; SLM

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 2096-4080 (2018) 06-0059-07

Multidisciplinary Co-simulation and Design Optimization Framework for Servo System based on SLM

AN Linxue, JIANG Menglong, HUANG Yuping, ZHU Yangzhen, LIN Chen

(Beijing Research Institute of Precise Mechatronics and Controls, Beijing 100076, China)

Abstract: A new simulation platform, based on the SLM (Simulation Lifecycle Management) commercial general framework, was developed to solve the deficiency of collaborative design, the inconsistency of design flow and the confusion of data management in the aerospace servo system development process. Through the research of the design process analysis, the process customization, the data transmission and the model management, the simulation process is successfully integrated into the development process. The proposed platform achieved the multidisciplinary collaborative modeling and simulation and data unified management, which improves the collaborative design ability of the aerospace servo system.

Key words: Aerospace servo system; Multidisciplinary co-simulation framework; SLM

0 引言

航天伺服系统是涉及控制、电磁、流体、机械、电力电子等多学科的复杂强耦合系统, 传统研制方法仍以串行设计为主, 随着设计指标要求的不断提高, 产品复杂度逐步提升, 而给定的生产周期却不断压缩, 对航天伺服系统传统设计方式和设计流程提出了新的挑战。

国际上针对复杂产品的研制方法一直在不断发展与改进, 从 20 世纪 50 年代以单领域为核心的独立应用阶段到 20 世纪 80 年代开始以一体化为核心的多领域并行协同应用阶段, 协同设计、协同仿真、协同优化越来越成为复杂产品设计必不可少的手段^[1]。如 20 世纪 80 年代在航空航天领域率先提出的 MDO (Multidisciplinary Design Optimization) 框架, 旨在通过集成 MDO 方法和学科分析

收稿日期: 2018-05-24; 修订日期: 2018-09-20

作者简介: 安林雪 (1984-), 女, 硕士, 主要研究方向为伺服系统多学科联合仿真技术。E-mail: alxdyx@163.com

模型实现多学科协同优化流程,提升设计优化效率,进而提高设计效率。近年来, Berends 等^[2]、Vankan 等^[3]、Daoud 等^[4]、Hwang 等^[5]针对 MDO 框架分别开展了相关研究。但是现有 MDO 框架主要围绕多学科优化方法开展,所涉及的分析模型简单、维度小,而复杂系统研制中所面对的问题却越来越难以依靠单一维度的模型和单一仿真系统去解决。1996年,美国国防部发布了针对建模仿真领域的通用技术框架,其中包括建模与仿真高层体系结构(High Level Architecture, HLA),它将具体的仿真功能实现、仿真运行管理和底层通信传输相分离,从而使各部分能够充分利用各自领域的先进技术^[6]。Hadj-Amor 等^[7]、Nägele 等^[8]针对 HLA 协议开展了相关研究。

国内在复杂系统研制方法方面也有一些相关研究,但未形成体系化、标准化,如柴旭东等^[9]围绕复杂产品多领域协同、分布式仿真等技术研究开发了复杂产品协同仿真平台(COSIM);龙腾等^[10]以探究飞行器产品中复杂的耦合关系、缩短设计周期、提高设计效率为目标,基于 ModelCenter 通用框架提出了模块化飞行器多学科集成设计平台;孙建勋等^[11]针对复杂产品中耦合关系、信息传递、异地异构设计、数据管理等问题,应用 Java 语言自主开发了飞行器总体多学科集成设计平台。

综上所述,通用 MDO 框架所配置的优化算法缺乏针对性,而基于 HLA 协议的分布式仿真平台对接口开发等自主研发要求较高,因此,本文研制了一款基于 SLM(Simulation Lifecycle Management)的伺服系统多学科联合仿真与设计优化平台。该平台以通用商业框架为基础,充分考虑当前航天伺服系统研制现状,通过集成各维度仿真模型和自主开发的多学科设计优化算法,定制规范化设计流程,将仿真融入到研制流程中,实现从单机设计、系统设计到模型校核、仿真验证等一系列流程的自动化,提高了航天伺服系统设计效率,缩短研制周期,同时对仿真模型与数据进行集中式统一管理,提高了知识复用率。

1 通用 MDO 框架选择

多学科联合仿真平台的开发有两种方案,一种是基于 HLA 的自主研发,一种是在商业通用 MDO 框架基础上定制开发。自主研发模式涉及大

量软件编程工作,平台的稳定性与可靠性难以保证。而商业通用 MDO 框架不仅具备成熟稳定的框架结构和功能,而且具备丰富的商业仿真分析软件集成接口。因此,选择以商业通用 MDO 框架为基础定制开发伺服系统多学科联合仿真与设计优化平台(以下简称“联合仿真平台”)。

目前商业通用 MDO 框架种类较多。综合考虑开发成本、兼容性、可扩展性等,选择 SLM 平台作为基本 MDO 框架基础。SLM 仿真生命周期管理平台通过对设计和仿真工具的集成,固化产品研制流程和经验,同时统一管理、设计仿真数据、任务及交付物,实现多专业、多部门、多人员协同设计仿真。虽然 SLM 平台已具备流程固化、仿真工具集成、多学科多领域协同设计等功能,但还需针对伺服系统,尤其航天伺服的研制特点和任务需求进行特别功能定制开发。

2 系统架构

联合仿真平台的系统架构如图 1 所示。

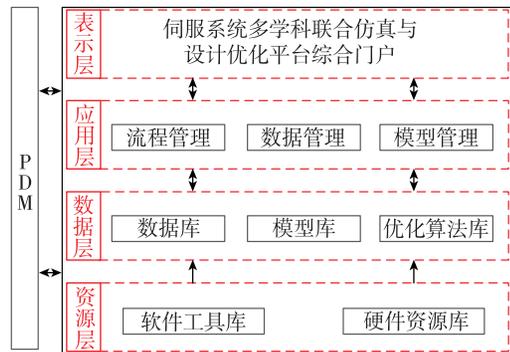


图 1 联合仿真平台系统架构示意图

Fig. 1 Diagram of system architecture of co-simulation framework

联合仿真平台以 B/S 架构为主,实现分布式仿真调度功能;辅以 C/S 架构,实现模型本地建模与上传。联合仿真平台结构分为四层,分别是表示层、应用层、数据层和资源层。表示层是联合仿真平台的支撑框架,提供操作界面;应用层是联合仿真平台的核心,通过对设计流程、数据及模型的协调管理为工程研制中单机设计、系统设计提供自动化流程;数据层主要是对设计、仿真、优化等过程中产生的各种数据进行统一存储与管理,提供数据接口,实现与 PDM(Product Data Management)等系统的连接;资源层包括软件工具库和硬件资源库,软件工具库是指单机与

系统设计过程中涉及的所有软件工具集合, 硬件资源库包括仿真工作站、磁盘阵列等硬件设施。硬件配置如图 2 所示。

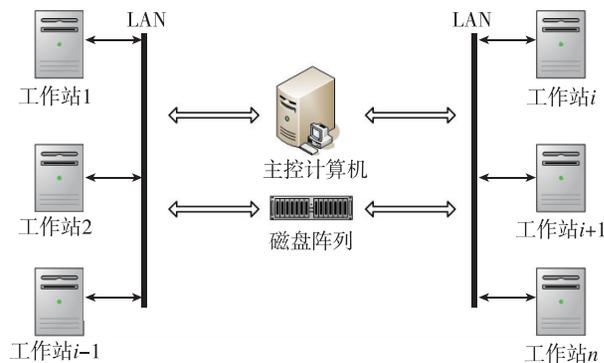


图 2 联合仿真平台硬件配置示意图

Fig. 2 Diagram of hardware configuration of co-simulation framework

联合仿真平台将融入仿真与优化的伺服系统设计流程划分为概念论证、方案设计与详细设计 3 个阶段。概念论证主要开展需求分析、概念设计与方案论证工作；方案设计主要是根据方案论证结果开展系统初步设计，包括单机初步设计和系统总体设计；详细设计则是在前一阶段初步设计方案基础上，对系统或单机的非线性环节、系统环境适应性能力等进行进一步改进与完善。

3 应用层开发

应用层是联合仿真平台的核心, 决定了联合仿真平台主要功能的可行性和实用性。设计仿真任务调用流程如图 3 所示, 任务流程模板是从以现有研制流程为基础定制开发的符合规范的设计仿真流程模板库中选取的; 而模型是从模型库中选取的。若模型库中没有所需模型, 则需首先进行模型上传操作, 即将模型的类型、属性、输入输出参数等信息及模型上传至模型库中。此外, 仿真开始前需明确模型间数据传递关系等。本节将着重对上述几个环节的实现进行详细阐述, 以说明应用层功能的实现途径与方法。

3.1 设计仿真流程定制

以机电伺服系统为例, 将其划分为电源、控制器、驱动器、电机和传动机构等 5 个单机。根据不同任务需求, 单机设计方式不尽相同。以某型号研制为例, 在方案设计初期, 电源、驱动器及传动机构(滚珠丝杠)的设计主要以选型为主,

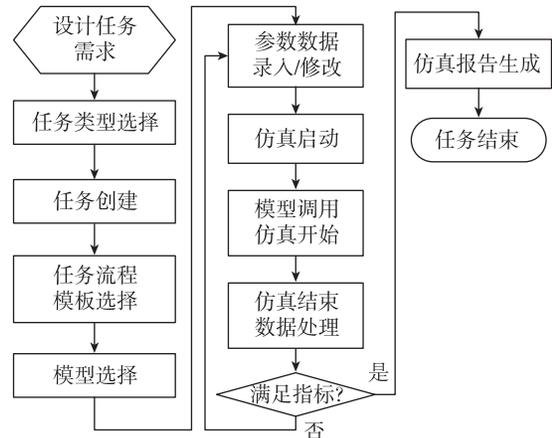


图 3 设计仿真任务调用流程图

Fig. 3 Diagram of design and simulation task

并利用经验模型核算关键指标; 控制算法通常在详细设计阶段才开展具体设计工作; 而电机则需根据指标要求进行电磁方案设计, 从而确定几何尺寸等设计参数。此外, 电机还需分别进行空载和带载试验以确认设计指标的满足情况。综上所述, 结合现有仿真分析手段, 将方案设计阶段的设计仿真流程划分为单机设计仿真、单机性能仿真和系统仿真。

如图 4 所示, 伺服系统单机设计仿真是针对单机部件开展功能性参数设计等任务时对应的仿真设计流程, 在设计仿真流程中, 通过仿真分析工具辅助设计师初步确定设计参数, 完成单机部件的初步设计方案。如电机设计过程中, 根据输出功率、输入电压、控制方式、转动惯量及空间尺寸等指标, 利用电机电磁仿真分析工具获取电机电磁方案及其初步几何尺寸。

伺服系统单机性能仿真是指利用单机部件的功能参数建立仿真模型开展性能仿真分析, 当仿真模型足够准确时, 单机部件性能仿真可替代部分性能验证试验, 即具备了虚拟试验能力。其中需注意设计参数与仿真参数的区别与转化。如电机空载虚拟试验中, 电机仿真模型参数包括定子相电阻、 dq 轴电感、力矩系数、转动惯量、极对数、摩擦系数等仿真参数, 这些参数并非电机设计参数。

伺服系统仿真对机电伺服系统设计方案的综合仿真验证, 对应实物系统的控制特性测试试验。伺服系统仿真中的模型参数主要由单机部件性能仿真参数构成, 当模型足够准确时, 系统控制特性仿真可指导系统总体设计。

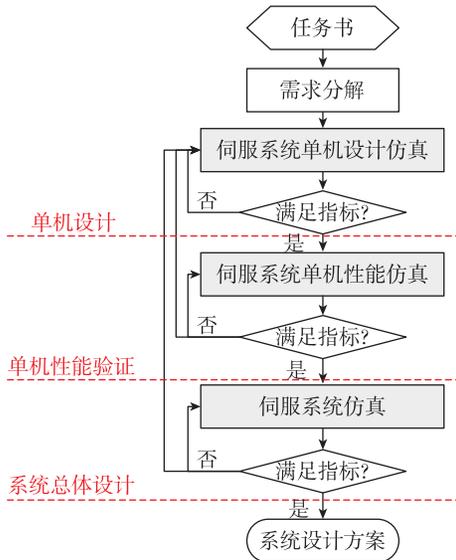


图 4 方案设计阶段设计流程示意图
Fig. 4 Process of scheme design stage

结合各单机的设计方式，在流程模板库中分别对各单机与系统建立单机设计仿真流程模板、单机性能仿真流程模板和系统仿真流程模板，如图 5 所示。

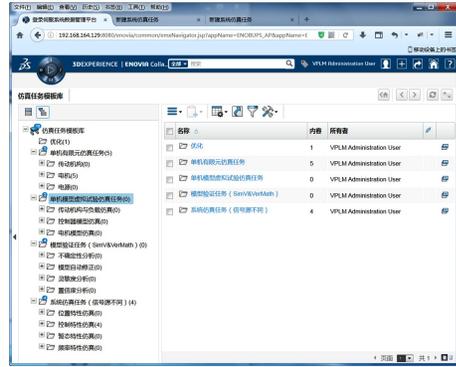


图 5 联合仿真平台中仿真流程模板库
Fig. 5 The simulation process template base in co-simulation framework

流程模板的作用是规范设计仿真流程，因此流程模板在定制时应确定该流程中数据的传递关系。以系统暂态特性仿真为例，其设计结构矩阵如图 6 所示，因此该仿真流程模板中应明确所含 8 个单机部件模型的名称和格式、每个模型的输入输出参数名称、各输入参数的来源模型及参数值、各输出参数的去向模型及参数接口等。

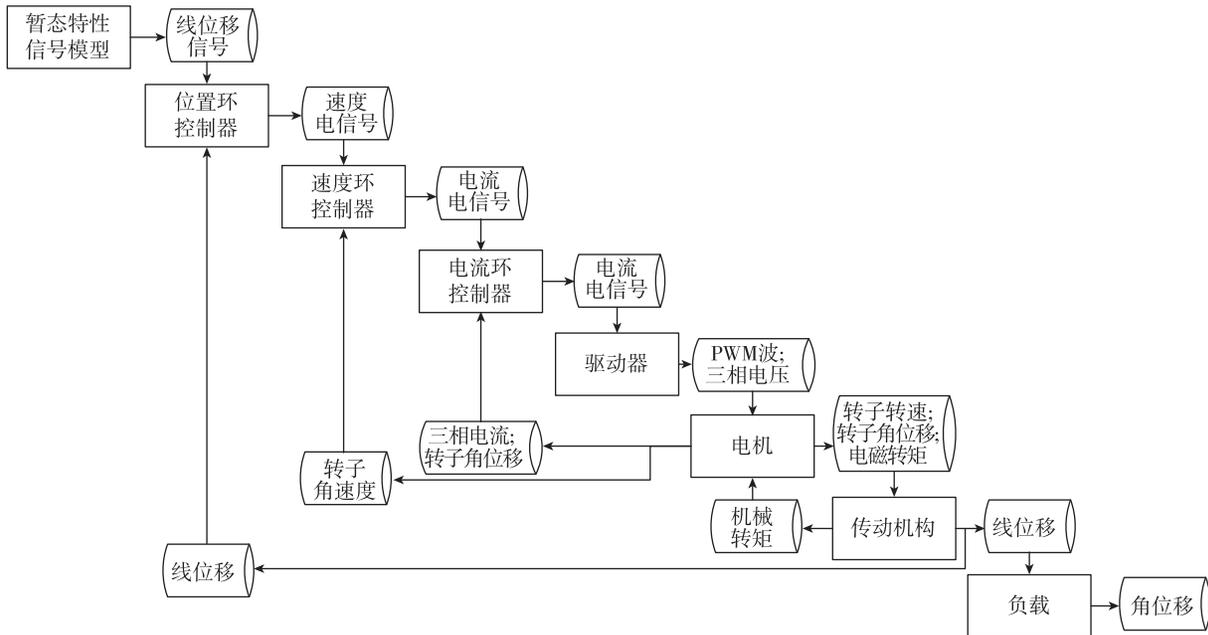


图 6 系统暂态特性仿真模型设计结构矩阵
Fig. 6 Design structure matrix of system step simulation model

3.2 模型与数据管理

为保证设计仿真结果的有效性与准确性，需对设计仿真模型和设计仿真数据进行统一管理。根据航天伺服系统在方案设计阶段的任务需求，

仿真模型多以一维数学模型为主，但对于电机需使用电磁模型，对于壳体类结构设计需使用三维几何模型。故联合仿真平台需定制开发针对一维数学模型、电磁模型、三维几何模型的集成接口。

虽然设计仿真模型的建模工具有很多种，但从模型成熟度考虑，可将设计仿真模型库划分为开发库、受控库和产品库 3 个类别，如图 7 所示。其中，开发库中的模型成熟度最低，属于验证校核阶段的模型；受控库中的模型成熟度中等，其基本功能模块已固定，允许修改部分参数值以匹配不同型号项目的仿真需求或同一型号中不同工况的仿真需求，并进行版本控制；产品库中的模型具有最高成熟度，其中的任何模块和参数值都不允许更改，每个模型都与一套参数值相匹配，与某个具体型号任务相关联。因此，在将模型与设计仿真流程相关联时，需结合当前设计仿真任务的需求，选取不同成熟度的模型。

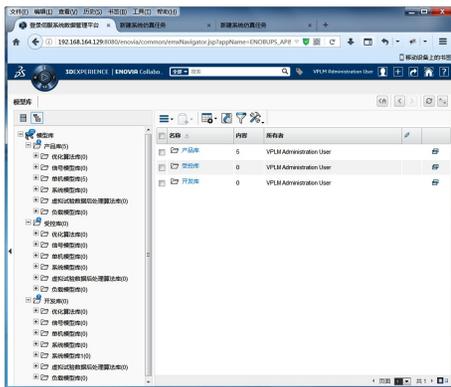


图 7 联合仿真平台中的模型库
Fig. 7 The model base in co-simulation framework

仿真数据包括仿真初始参数数据、仿真过程参数数据、仿真结果数据等，所有数据都基于某次仿真任务产生。在实现设计仿真流程调度功能时，需着重考虑仿真初始参数数据的传递方式和仿真结果数据的管理。

为提升设计流程中初始参数信息变更的灵活性，在联合仿真平台中引入参数表，即在定制开发时为每个设计仿真流程配置统一格式的参数表，表中按协议约定填写初始参数相关信息。在应用时，调用该设计仿真流程时，将同时读取相应参数表中数据，并将数据按一定格式展示在设计仿真任务创建界面上，当后续流程模板中某个模型增加了新的初始参数，则无需更改流程模板，而只要修改参数表即可，参数表格式如图 8 所示。

对于设计仿真流程中产生的仿真数据，联合仿真平台在每次新建任务时将开辟一个数据缓存空间，所有产生的数据都将按一定规则存储于该

A	B	C	E	F	G	H	I
1	模型名	参数组名	界面参数名	界面参数值	单位	文件模型名	文件参数名
2	TestB	控制参数_位置环PID	比例系数Kp	1	/	模型名/PID_pos	P
3			积分系数Ki	3	/	模型名/PID_pos	I
4	TestB	控制参数_速度环PID	比例系数Kp	2	/	模型名/PID_w	P
5			积分系数Ki	1	/	模型名/PID_w	I
6	TestB	控制参数_电流环PID_Id环	比例系数Kp	1	/	模型名/PID_id	P
7			积分系数Ki	1	/	模型名/PID_id	I
8	TestB	控制参数_电流环PID_Iq环	比例系数Kp	1	/	模型名/PID_iq	P
9			积分系数Ki	1	/	模型名/PID_iq	I
10	TestB	负载参数	负载质量	1	Kg/m ²	模型名/Load	J
11			力矩梯度	25*180/pi	/	模型名/Load	Kl
12			摩擦力矩	50	Nm	模型名/Load	Bl
13	TestB	信号参数	上升时间	0	s	模型名/Step	Time
14			初始值	0	Deg或mm	模型名/Step	Before
15			终止值	15	Deg或mm	模型名/Step	After
16	TestB	时间参数	仿真时长	1	s	模型名	StopTime

图 8 仿真流程参数表
Fig. 8 Variable table of simulation process

空间，当仿真结束时，联合仿真平台将会在该缓存空间中按约定读取需要的结果数据，并以一定形式（如曲线图、列表等）展示在联合仿真平台界面中，方便仿真工程师及时看到仿真结果。此外，为方便调试阶段观察参数的更改对仿真结果的影响，联合仿真平台对每次设计仿真流程中进行的参数更改都记录并存储于数据库中。在调试控制算法时这个功能尤为重要。

4 应用实例

以方案设计阶段的应用为例。在方案设计任务列表中首先创建设计任务文件夹，以型号项目代码命名，如图 9 所示；然后在右侧界面选择“新建方案”，即在该型号项目下建立了一项设计仿真任务。在弹出的任务创建界面上填写设计仿真名称，该名称应能反映此仿真任务的主要目的，如图 10 所示。在该界面上选择仿真模板和所有相关仿真模型，同时确定仿真任务的密级。对于创建者、创建时间等基本信息则会根据当前登陆用户名和时间自动填写。当仿真流程模板与模型选定后，点击“解析”按钮，联合仿真平台自动读取与仿真流程模板相关联的参数表，将参数信息展示在当前界面上，其中的参数值可根据需求进行修改。

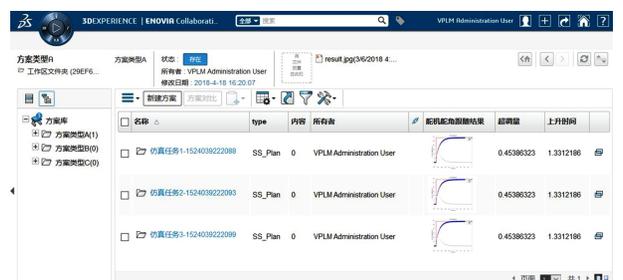


图 9 方案设计任务列表
Fig. 9 The task list of scheme design stage

当界面上的所有信息填写完整后，点击“执

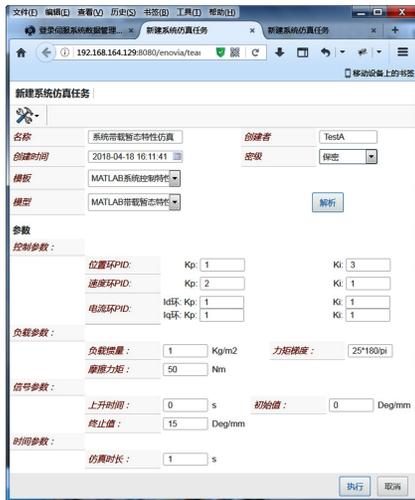


图 10 仿真任务创建界面

Fig. 10 The interface of simulation task creation

行”按钮，联合仿真平台将自动调用模型开始仿真。仿真结束后，根据不同仿真任务调用不同数据处理算法对仿真数据进行后处理。对于有曲线生成要求的仿真任务，曲线图将以缩略图的形式自动显示在仿真任务列表的右侧，如图9所示，方便仿真工程师即时打开曲线图初步评估仿真结果。

联合仿真平台也具备简单的指标比对功能，如对系统暂态特性仿真，当得到的超调量高于给定指标值，任务列表中右侧结果展示区将用红色提示数据超标。此外，对于同一个仿真任务，每次修改的仿真参数值都按一定规则保存，便于参数频繁调整时查看对应结果。当仿真结果满足指标要求后，在任务列表中点击“生成报告”，则对应仿真结果将直接以预定规则生成相应结果报告，便于报告的提交与归档。

5 结论

围绕航天伺服系统设计阶段设计流程不统一、模型管理分散、协同设计水平有限等问题，以SLM平台为基础框架，针对航天伺服系统中各单机部件与系统的实际设计流程，充分考虑设计仿真过程中数据传递方式、模型成熟度要求等任务需求，开发了基于SLM的伺服系统多学科联合仿真与设计优化平台。该平台确保了设计仿真数据和模型的有效管理，设计仿真效率明显提升，协同设计能力也有了一定程度的提高。

2015年国务院发布《中国制造2025》，其中明确指出：两化深度融合为主线，智能制造为突破口。随后提出了智慧院所的概念。中航工业集团

信息技术中心首席顾问宁振波认为，智慧院所包含3个要素，即“知识重用、知识推动和知识共享”，其核心集成则包括知识工程与管理和信息化研发与信息管理的集成^[12]。基于SLM的伺服系统多学科联合仿真与设计优化平台正是数字化研发与信息化管理集成的一个实例，但仍存在较大差距，主要体现在如下3个方面：

1) 建立的需求分析模型与需求分析流程还不完善。这主要是因为目前的设计流程仍未真正的由逆向设计转变到正向设计。

2) 部署范围仍有较大局限性，导致设计仿真流程的应用范围只限于个别仿真工程师，未能真正融入型号项目的研制生产中。

3) 设计阶段的数据未能与生产阶段的数据相连通。三维模型不能直接应用于生产制造，设计与生产两条线，产品状况无法追溯。

综上，今后将针对航天伺服系统建立较完善的需求分析流程，将需求分析模型与其他阶段模型相关联，实现基于模型的设计；将联合仿真平台与特定PDM系统相连接，实现更广范围的部署与应用；同时打通设计与生产的数据通路，实现基于模型的制造，推动航天智能制造的不断发展。

参考文献

- [1] 范文慧, 刘博元. 复杂产品数字化协同设计技术发展[J]. 航空制造技术, 2013, 423(3): 44-46.
- [2] Berends J T P J, Tooren M J L V. Multi-agent task environment framework to support multidisciplinary design and optimization [J]. Journal of Aerospace Information Systems, 2013, 10(6): 258-267.
- [3] Vankan W, Laban M. A SPINE ware-based computational design engine for integrated multidisciplinary aircraft design [J]. 9th AIAA Multidisciplinary Analysis and Optimization, 2002: 431-441.
- [4] Daoud F, Deinert S, Maierl R. Integrated multidisciplinary aircraft design process supported by a decentral MDO framework [C]. 16th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2015.
- [5] Hwang J, Lee Y D, Cutler J. Large-scale MDO of a small satellite using a novel framework for the solution of coupled Systems and their derivatives [C]. 54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, American Institute of

- Aeronautics and Astronautics, 2013.
- [6] 迟刚, 王树宗. HLA 仿真技术综述 [J]. 计算机仿真, 2004, 21 (7): 1-3, 184-185.
- [7] Hadj-Amor H J, Soriano T. A contribution for virtual prototyping of mechatronic systems based on real-time distributed high level architecture [J]. Computing and Information Science in Engineering, 2012, 212 (1): 014502.
- [8] Nägele T, Hooman J. Co-simulation of cyber-physical systems using HLA [C]. 7th Annual Computing and Communication Workshop and Conference, 2017.
- [9] 柴旭东, 李伯虎, 熊光楞, 等. 复杂产品协同仿真平台的研究与实现 [J]. 计算机集成制造系统-CIMS, 2002, 8 (7): 580-584.
- [10] 龙腾, 刘莉, 朱华光, 等. 模块化飞行器多学科集成设计平台研究 [J]. 系统仿真学报, 2010, 22 (10): 2311-2315+2325.
- [11] 孙建勋, 张立强, 陈建江, 等. 飞行器总体多学科集成设计平台 [J]. 计算机基础制造系统, 2012, 18 (1): 1-8.
- [12] 宁振波. 智能制造新概念 [EB/OL]. <http://www.robot-fangan.com/news/show.php?itemid=1547>.

引用格式: 安林雪, 蒋孟龙, 黄玉平, 等. 基于 SLM 的伺服系统多学科联合仿真与设计优化平台[J]. 宇航总体技术, 2018, 2 (6): 59-65.

Citation: An L X, Jiang M L, Huang Y P, et al. Multidisciplinary co-simulation and design optimization framework for servo system based on SLM [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2018, 2 (6): 59-65.