

航空发动机研发体系与高性能计算平台的集成方案

Integration Scheme of Aero Engine R&D System and High-Performance Computing Platform

■ 黄晨雨 柳文东 张鑫 侯永生 / 中国航发动力所

将航空发动机研发系统与高性能计算平台集成，构建符合航空发动机产品研发所需的多系统集成环境，可以提升高性能并行计算与资源调度能力。

为了使产品研发过程得到更好的管控，中国航发动力所建立了一系列的信息化系统作为基础支撑，由于系统建设有先后，存在异构逻辑数据的不同步。基于产品研发流程主线，所涉及的系统包括协同研制平台（PDM）、科研管控平台（PPM）、高性能计算平台（HPC）和集成研发系统等。在发动机设计、仿真过程中，有大量的气动分析、气动计算任务需要提交给高性能计算平台完成，因而要将产品的研发系统与高性能计算平台进行集成应用。

集成研发系统概述

航空发动机集成研发系统是通过信息化手段将设计活动中的技术流程、技术基础（方法工具、标准、工程数据库）、技术管理和团队管理等要素集成在一起，形成用于规范和指导与航空发动机产品研发相关的技术活动和管理活动的协同研发环境，解决航空发动机产品研发体系要素的碎片化问题，实现流程驱动、工具集成、知识嵌入和数据共享，全面规范高效地支撑产品自主研发能力和产品研发活动的开展。

航空发动机集成研发体系能够覆盖研发产品的全生命周期的设计、仿真，实现流畅的产品研发过程、项目团队的高效协同、跨系统和组织的技术状态管理、提升企业知识和资源的使用效率，实现由以结果管理为主向流程全过程管理转变、由以单纯数据管理为主向全面知识管理转变、由以分散研制为主向数字化协同研制转变、由分散的信息孤岛向统一的集成平台转变，从而帮助整合研制业务、转变创新流程，持续提高产品研发和创新的执行力。

集成研发体系主要应用于产品的设计阶段，通过建立设计流程标准化、设计规范嵌入化、设计应用集成化环境，支持知识驱动的创新性研发工作，促进系统功能和性能需求快速转化为物理方案，并进行高效的一致性评估。实现发动机设计信息的集成，是建立发动机集成平台的主要目的。集成研发系统就是以发动机设计流程为基本依据，在计算机系统中组织起协调的工作流和信息流，信息在跨专业、跨流程的传递中要遵守一定的格式标准，实现不同的应用之间的信息可以透

明平滑的访问和沟通，如图1所示。

高性能计算平台概述

航空发动机的设计过程涉及多学科，要进行大量模拟计算，常用的商业软件包括ANSYS、FLUENT、CFX、NUMAECA、ABAQUS、MSC、NASTRAN等，使用范围涉及全部计算机辅助工程（CAE）高性能运算，包括隐式有限元分析（IFEA）、显式有限元分析（EFEA）和计算流体力学（CFD）等，主要应用在空气系统、热分析、防冰、强度、碰撞、冲击等，这些软件的使用极大地提高了发动机的设计水平。

中国航发动力所通过高性能计算集群建设，有效地提升了这些软件的并行计算能力，快速地完成了发动机设计过程中所需大网格、宽自由度及多次迭代计算，极大地推进了发动机设计，满足多型号、多学科的计算需求，保障了发动机研制的顺利进行，如图2所示。

通过集群系统的建立来开展各学科仿真应用计算，为动力所提供仿真研究及仿真应用的基础条件。

首先，提供并行计算能力和不

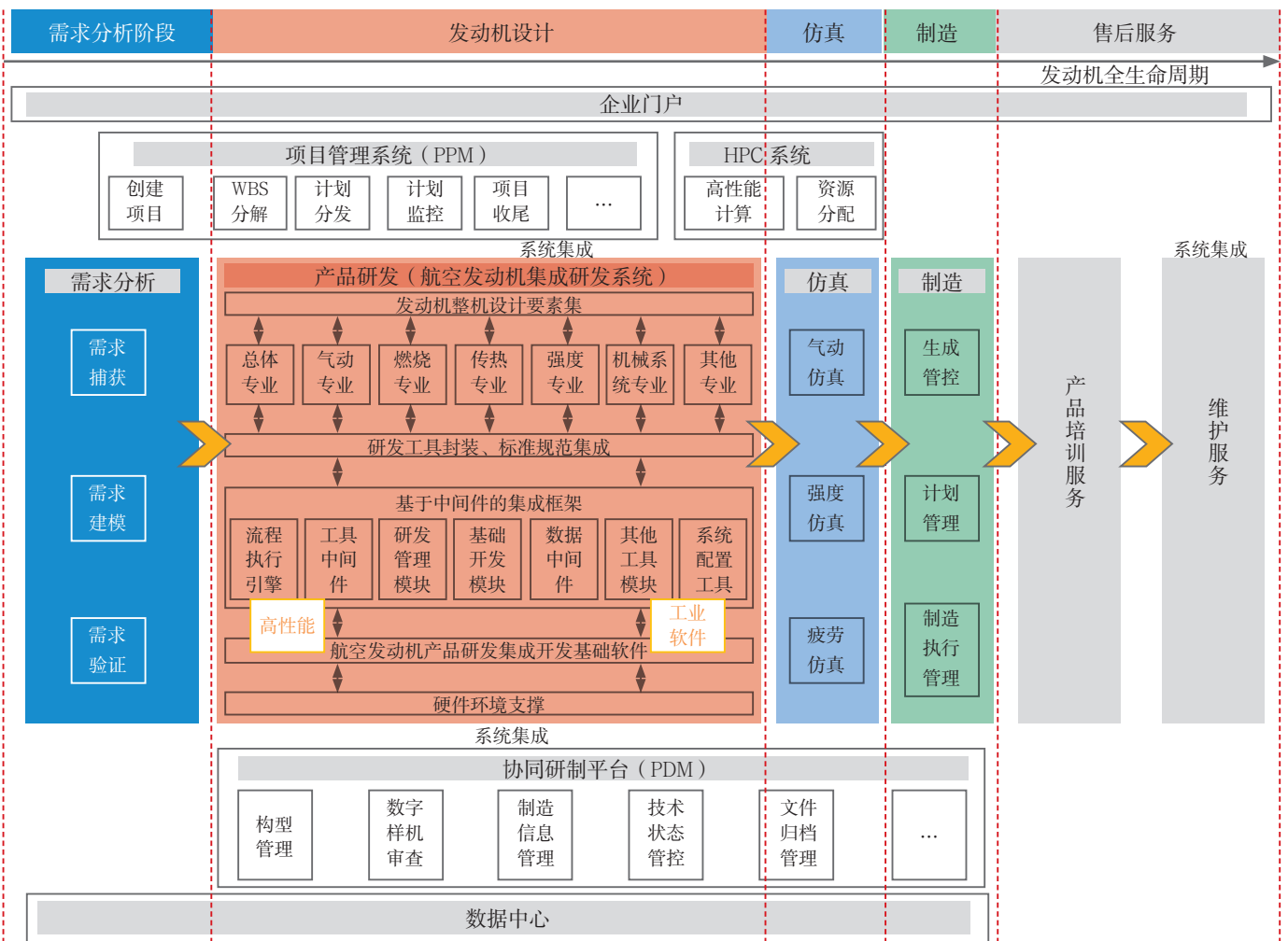


图1 集成研发系统定位

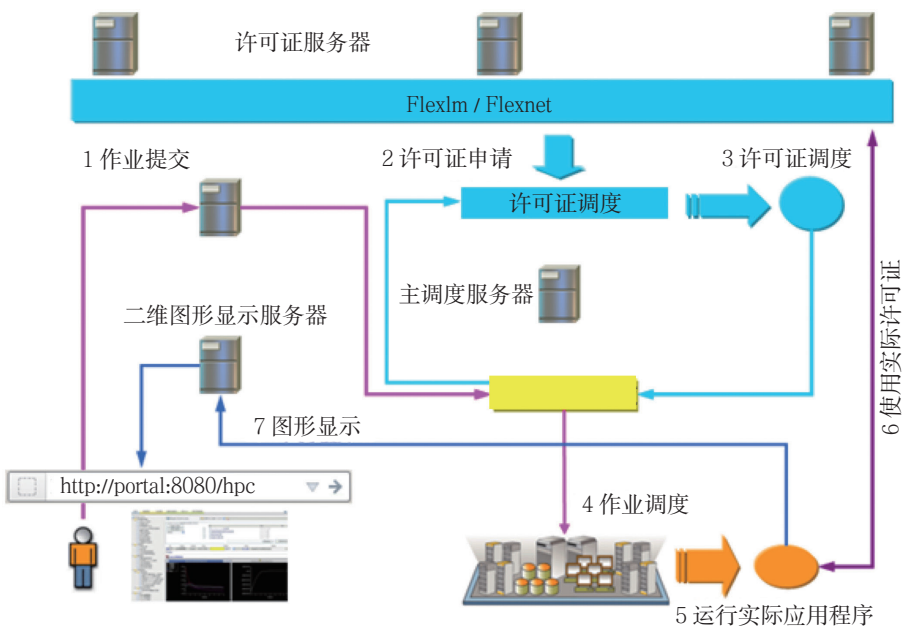


图2 高性能计算平台集群调度

同层级的计算能力，满足CFD软件对于内存和CPU的差异需求。

第二，提供强有力的负载均衡能力，保证计算集群的任务分配尽可能均匀，避免出现机器忙闲不均的现象。根据服务器的负载指标（如CPU利用率、可用内存数、I/O等），采取保护措施，避免因任务过多导致系统宕机现象。

第三，提供容错机制，计算集群具有良好的并发使用管理能力，实现节点故障托管机制，能够实现节点间计算资源的故障切换，保障单硬件故障不对作业任务产生影响。

最后，提供前后处理一体化与三维远程可视化能力，实现在集群

进行CFD计算的前后处理并与作业提交资源调度形成统一的计算管理平台，从而加快前后处理的速度。远程可视化协同，保障用户组在集群计算过程中及时分析并处理计算过程中遇到的所有问题，及时修订计算模型及优化网格划分。

系统集成方案

集成研发系统主要作为基于流程的产品研发系统，需要基于实际产品研发流程的需要与其他系统进行集成化应用，最终实现各系统之间基于研发流程的逻辑和数据串通，打破孤岛现场。通过研发系统与高性能计算平台的集成可实现计算队列配置、任务提交、任务离线监控、

结果下载等功能。

在专业工具包界面进行参数输入和选择，可以合理调用远程计算资源或高性能计算环境，实现并行计算。在高性能平台计算过程中，可以在本地监控计算的过程，可以在计算完成后下载计算结果进行后处理，也可以调用高性能计算平台工具进行后处理并回传计算结果。

总体业务方案

对于计算量特别大的设计任务，可由集成研发系统基于设计任务绑定的工具模板推送设计仿真任务至高性能计算平台中进行计算，高性能计算平台接收任务以后，根据推送工具模板的ID从共享库下载对应工具模板并启动高性能服务运行。

高性能计算平台返回运行状态给集成研发系统，集成设计平台可查看计算结果并将计算结果、文件和报告下载至本地。

集成场景

在发动机系统设计过程中集成研发系统与高性能计算平台的集成场景如图3所示。

集成研发环境封装的计算量非常大的工具模板，可以通过提交作业上传模板到应用服务器，应用服务器反馈作业状态到作业管理器。应用服务器接收到计算任务后通过调度执行远程计算模板，计算模板调用高性能计算服务器上对应的工具软件进行计算，计算结果保存到数据空间。应用服务器提交高性能

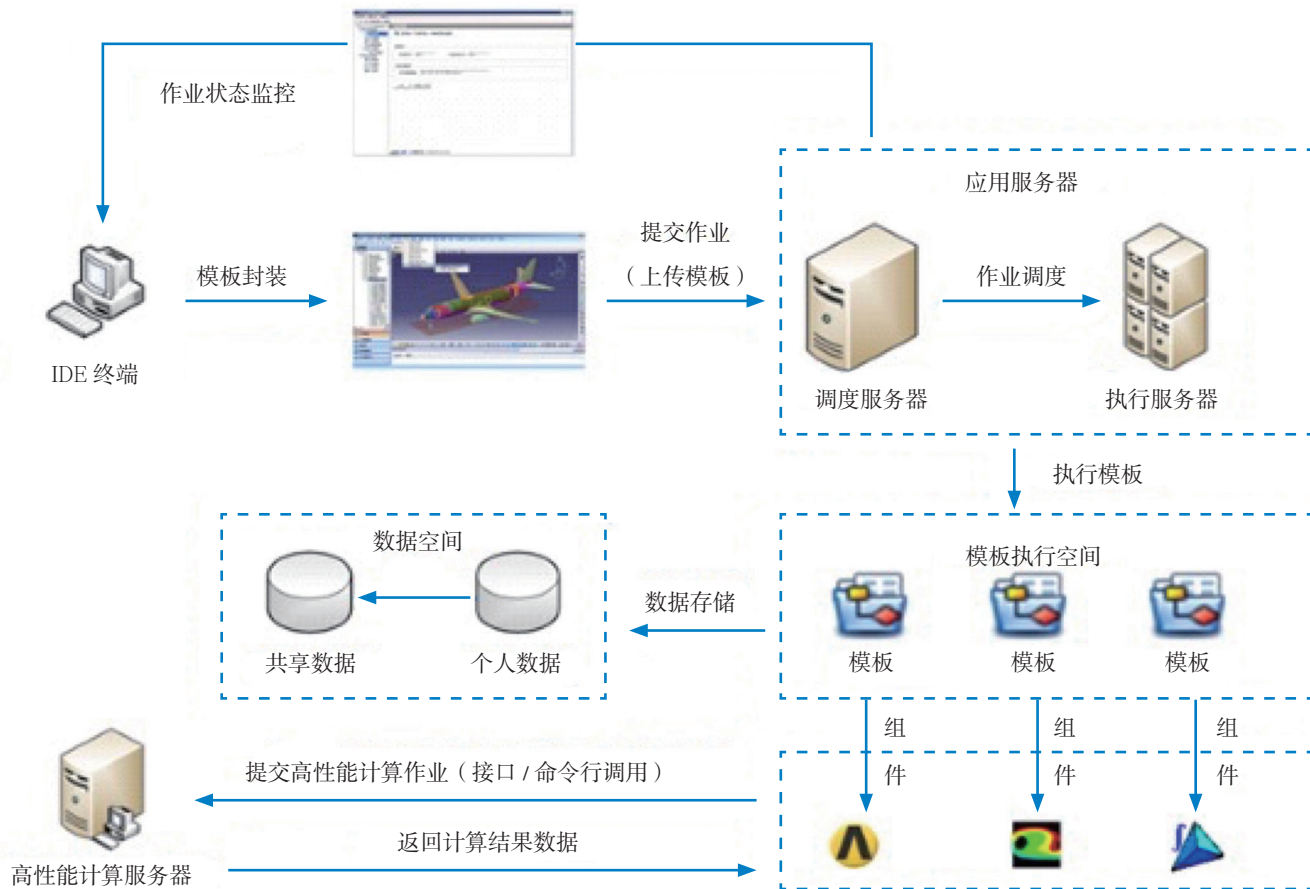


图3 研发系统与高性能计算平台的集成场景

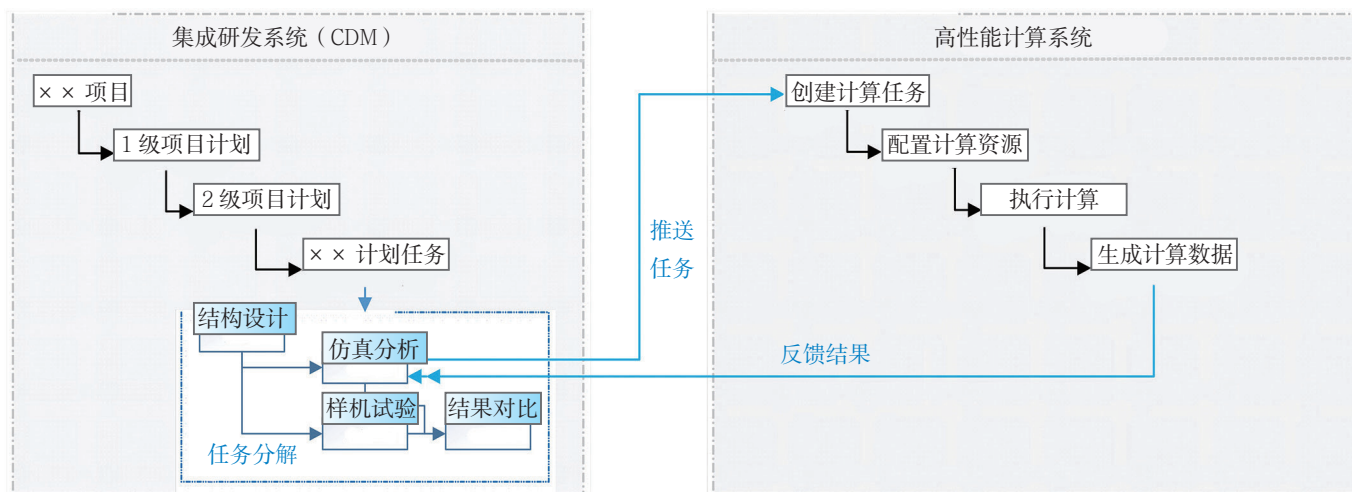


图4 业务流程

计算作业到高性能计算服务器，高性能计算服务器计算完成后，返回计算结果数据到应用服务器。

典型的业务场景如图4所示。

第一类，用户在CDM内完成设计计算工作后，提交数据至高性能平台进行设计计算。用户可以在CDM系统内打开HPC系统页面，查看作业进度以及获取作业结果信息。

第二类，由APP发起HPC计算作业。针对一些涉及到复杂计算的APP，可以通过定制开发，在APP中嵌入HPC操作，用户可以直接在客户端向HPC服务器上传文件并发起计算。以外涵强度寿命点计算APP为例，用户在外涵强度寿命点计算APP中点击【提交至HPC】按钮，根据当前登录人账号登陆HPC系统服务器。随后，批量上传当前APP工作文件夹下的def文件至HPC系统服务器。通过命令行的形式，逐个启动def文件的计算。记录每个计算的ID，并存储至APP运行环境中（用户客户端本地），并生成相应的计算批次记录。计算结束后，用户可以直接在IDE客户端下载之前发

起的HPC系统的计算结果。以外涵强度寿命点计算APP为例，用户在外涵强度寿命点计算APP中选择工况文件夹，点击【HPC计算结果获取】按钮，根据当前选择的工况批次，通过命令行在服务器中查询计算状态信息。根据计算状态信息的返回值，判断当前工况的相关计算是否执行完成。如果未完成，则在APP中提示用户“计算尚未完成”。如果已经完成，则将计算结果的res文件下载至当前工况文件夹下，弹窗提示用户下载结果。

数据集成方案

集成研发环境封装的计算量非常大的工具模板，可以通过提交作业上传模板到应用服务器，应用服务器反馈作业状态到作业管理器。应用服务器接收到计算任务后通过调度执行远程计算模板，计算模板调用高性能计算服务器上对应的工具软件进行计算，计算结果保存到数据空间。应用服务器提交高性能计算作业到高性能计算服务器，高性能计算服务器计算完成后，返回计算结果数据到应用服务器。

在集成研发系统将仿真分析任务推送至高性能计算平台，包括模型、任务信息等同步推送至高性能计算平台。集成研发系统封装的计算量非常大的工具模板，可以通过提交作业上传模板到应用服务器，应用服务器反馈作业状态到作业管理器。应用服务器接收到计算任务后通过调度执行远程计算模板，计算模板调用高性能计算服务器上对应的工具软件进行计算。计算结果保存到数据空间。应用服务器提交高性能计算作业到高性能计算服务器，高性能计算服务器计算完成后，返回计算结果数据到应用服务器。

结束语

中国航发动力所通过开展研发系统与高性能计算平台的集成，实现了基于研发流程的数据联通以及资源的合理应用，实现了核心研发系统的互联互通，加速了统一的集成研发环境的建设。

航空动力

（黄晨雨、中国航发沈阳发动机研究所，工程师，主要从事航空发动机信息化建设）