

多学科系统级虚拟样机建模与仿真技术

MSC.Software 公司 PRC 技术部

摘要： 本文从当前产品设计过程对多学科联合仿真的需求出发，分析了产品协同设计对仿真技术三个层次的功能需求，并引出当前实现多学科集成仿真的一般方法。多学科联合仿真需要控制、机构、有限元等不同仿真环境的集成和数据交换，MSC.Software 提供最为系统和完整的多学科协同仿真开发环境，本文详细介绍了 MSC.Software 多学科系统级虚拟样机建模和仿真的解决方案，并给出了具体的实例。

关键词 MSC.Software VPD 多学科 虚拟样机 联合仿真 协同设计

1. 多学科联合仿真的需求

众所周知，现代产品的研发流程是多人团队、多学科领域的协同设计过程。在产品开发过程中，无论是系统级的方案原理设计，还是部件级的详细参数规格设计，都涉及到多个不同的子系统和相关学科领域，这些子系统都有自己特定的功能和独特的设计方法，而各子系统之间则具有交互耦合作用，共同组成完整的功能系统。

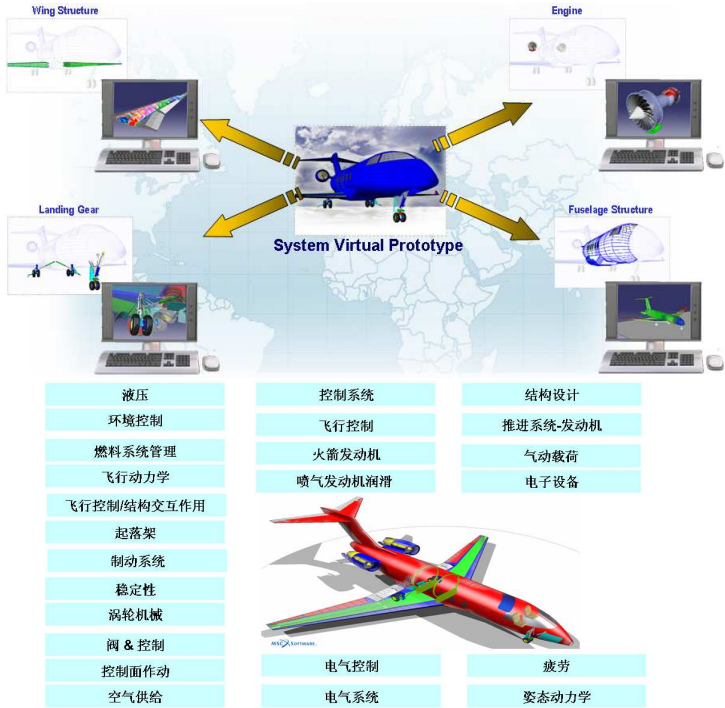


图 1 现代产品过程涉及多个子系统和相关学科领域

如何有效的协调各个子系统设计团队的工作，让团队之间达到信息共享、互通有无，并保证子系统的设计质量和整体性能，实现产品设计真正的一体化和协同化，从而提高设计效率，节省设计成本，缩短开发周期，这是一个非常重要的问题。

为了达到上述目标，我们必须满足以下三个层次的需求：

第一，具备各子系统和各学科领域有效的集成仿真工具，从而保证各子系统的设计水准和可靠性；

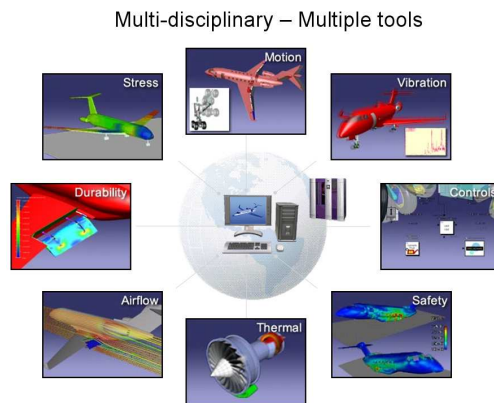


图 2 各学科领域的不同设计工具

第二，能够实现各仿真工具之间的无缝集成和数据交换，在统一架构下实现模型整合；

第三，为了能够协调和管理各设计团队，以及在设计过程中产生的大量数据，实现资源优化配置，还必须具有仿真数据和流程的管理平台，实现各学科领域的真正协同仿真。

2. 多学科协同仿真的一般实现方法

目前较为通用和流行的实现多学科集成仿真的方法主要包括以下三种：

2.1 联合仿真式（Co-Simulation）

联合仿真式是目前较为通用，也是使用最多的一种数据交换方式，其数据交换原理如图 3 所示，两个不同仿真工具之间通过 TCP/IP 等方式实现数据交换和调用。

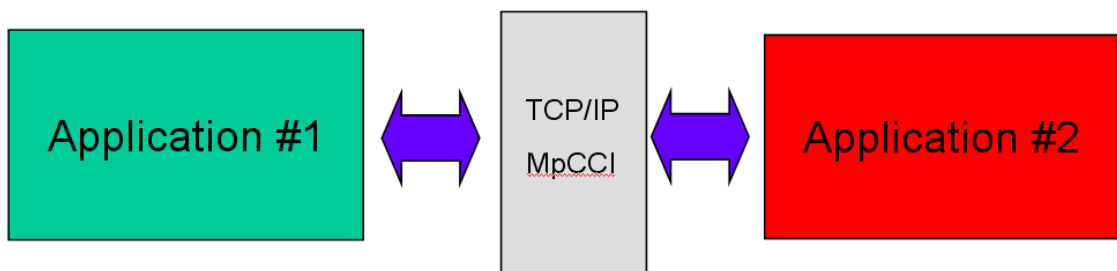


图 3 联合仿真式的基本原理

当两个不同仿真工具之间通过联合仿真方式建立连接后，其中一者所包含的模型可以将自己计算的结果作为系统输入指令传递给另一者所建立的模型，这种指令包括力、力矩、驱动等典型信号，后者的模型在该指令的作用下所产生的响应量，如位移、速度、加速度等，又可以反馈给前者的模型，这样，模型信息和仿真数据就可以在两者之间双向传递。

联合仿真方式的典型应用有：多体动力学与控制系统（如车辆控制）、结构与气动载荷（如飞行动力学分析），等等。这是一种最为容易建立和实现的集成仿真方式，具有很强的普适性，但局限在于难以处理刚性系统，对系统资源占用较多，某些情况可能速度较慢。

2.2 模型转换式（Model Transfer）

模型转换式的原理如图 4 所示。其主要原理是将其中一个工具的模型转化为特定格式的包含模型信息的数据文件，供另一个工具中的模型调用，从而实现信息交互。典型的数据格式如用于刚弹耦合分析的模态中性文件（mnf），在该文件中包含采用[M]、[K]、[ξ]和振型矩阵表示的弹性体信息；用于控制机构一体化仿真以及其它仿真的动态链接库文件（dll），该文件中包含采用变量表示的函数信息。

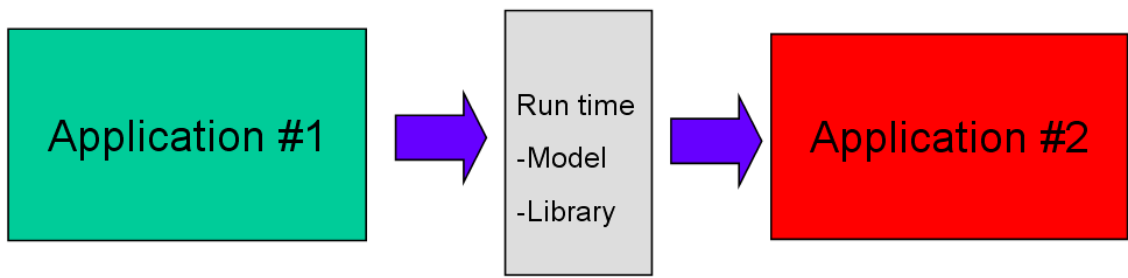


图 4 模型转化式的基本原理

模型转化式的典型应用有：控制、电液与机构一体化仿真（如飞机操纵面），有限元与多体机构（如刚弹耦合机械系统），等等。这种方式的特点在于求解速度快，对系统资源占用较少，稳定性好，并且模型建立后便于重复使用，而局限则在于需要定义特定数据格式的文件，通用性稍差。

2.3 求解器集成式（Solver Convergence）

求解器集成式的基本原理是实现两个不同工具之间的求解器代码集成，从而实现在其中一个仿真环境中对另一个仿真工具的求解器调用，如图 5 所示。

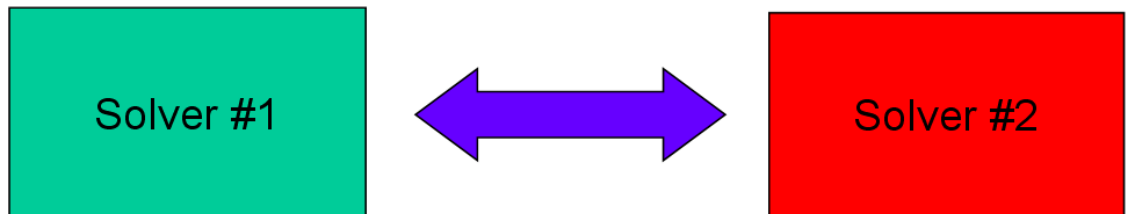


图 5 求解器集成式的基本原理

求解器集成式的典型应用有：带有屈曲等材料非线性问题的大型结构模型，带有流固耦合、冲击等几何非线性问题的大型结构问题，等等。这种方式的优势在于可以方便有效的运用多种学科领域的求解技术，便于用户直接使用现有模型，而局限在于模型中的某些因素如单元类型、函数形式等某些情况下需要重新定义，同时软件的开发和升级周期较长。

3. MSC.Software 多学科协同仿真解决方案

针对多学科协同仿真三个层次的需求，MSC.Software 提供当前最为系统和完整的解决方案。

首先，MSC.Software 提供集成的 VPD 建模仿真环境 MSC.SimOffice。MSC.SimOffice 包含一整套全面的 VPD 工具用于仿真系统的各种性能，从而高效的建立各子系统的模型，评价系统性能。

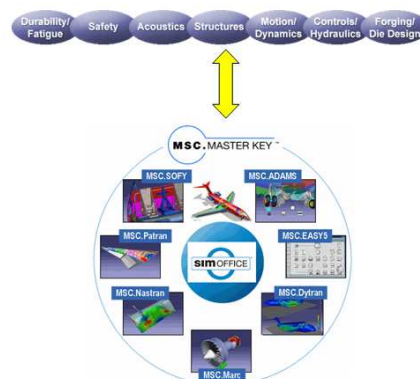


图 6 集成 VPD 仿真环境 MSC.SimOffice

其次，MSC.SimOffice 各成员之间均具有无缝集成能力，可以实现数据交换和模型整合，建立完整的一体化虚拟样机；MSC.SimOffice 具有悠久的开发历史，其成员都是各自领域居于领先地位的仿真工具，通过了大量工程项目的检验，知识和经验的不断积累，具有极强的可靠性与稳定性。目前 MSC.SimOffice 各成员之间可以方便的通过不同方式实现模型数据交互、求解器整合和计算过程协同，同时 MSC 正在积极的开展工作，将 MSC.SimOffice 各成员移植和整合到统一的架构之下，以便用户可以在统一的界面环境下完成所有分析工作。



图 7 MSC.SimOffice 实现完整功能虚拟样机

再次，MSC.SimManager 是强大的仿真流程与数据管理平台，为企业提供协调和管理设计人员、仿真工具，模型数据的统一架构，实现资源的优化配置和组合，提高产品开发效率。

3.1 MSC.SimOffice 集成仿真方式

根据实现集成仿真的三种通用方法各自的优势和特点，结合各仿真工具自身的特点和用途，MSC.SimOffice 成员间通过不同的方式实现整合。

3.1.1 MSC.EASY5 与 MSC.ADAMS 集成方式

目前 MSC.EASY5 与 MSC.ADAMS 两者之间的集成越来越紧密，集成的方式也越来越丰富。MSC.EASY5 与 MSC.ADAMS 可以通过联合仿真式、模型转换式和求解器集成式三种方式进行协同仿真。

■ 联合仿真式

- 由 MSC.EASY5 和 MSC.ADAMS 求解器求解各自的模型；
- 在设定时间步进行数据通信。

■ 模型转换式（控制系统导入）

- 将 MSC.EASY5 所建立的控制与多学科系统导入 MSC.ADAMS；
- MSC.EASY5 模型作为一套 GSE 方程加入到 MSC.ADAMS（dll 动态链接库形式引入）；
- MSC.ADAMS 求解器积分计算所有的模型；
- 在 MSC.ADAMS 中对控制系统性能进行评估，采用此种方式，可以在控制系统预置参数的情况下研究整个模型的性能，进行统一的试验设计和参数优化。

■ 求解器集成式

- MSC.ADAMS C++求解器集成于 MSC.EASY5 中，MSC.EASY5 用户可以直接调用 MSC.ADAMS 的 C++求解器来计算 MSC.EASY5 的模型；
- 在 MSC.EASY5 中建模并仿真；
- MSC.EASY5 会在后台直接调用和运行 MSC.ADAMS C++求解器；
- 仿真结束时会自动打开 MSC.ADAMS 的后处理器来查看仿真结果。

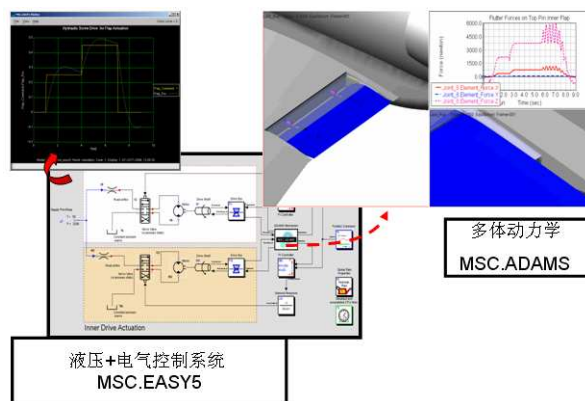


图 8 MSC.ADAMS 与 MSC.EASY5 实现机电一体化仿真

3.1.2 MSC.ADAMS、MSC.Nastran、MSC.Fatigue 集成方式

这三者之间主要通过模型转换方式进行集成。

- ✓ 由 MSC.Nastran 对部件进行有限元分析，生成含有模态信息的 mnf 文件；
- ✓ 将 mnf 文件导入 MSC.ADAMS 中，创建刚柔耦合模型；
- ✓ 由 MSC.ADAMS 对机构进行动力学分析；
- ✓ MSC.ADAMS 分析得到的载荷和位移等边界条件可重新转入 MSC.Nastran 进行详细的应力、振动、噪音等分析；
- ✓ MSC.ADAMS 分析得到的载荷时间历程信息可通过 DAC 或 RPC III 格式文件转入 MSC.Fatigue 中进行疲劳分析。

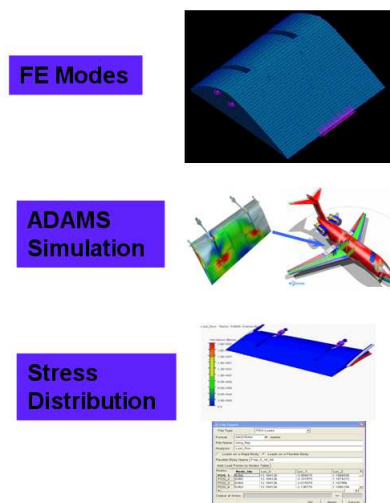


图 9 MSC.ADAMS 与 MSC.Nastran 的集成

3.1.3 MSC.Nastran、MSC.Marc、MSC.Dytran 集成方式

这三者主要通过求解器集成方式实现整合。

- ✓ MSC.Nastran + 隐式非线性 SOL600 (MSC.Marc);
- ✓ MSC.Nastran + 显式非线性 SOL700 (LS-DYNA);
- ✓ 在统一的前后处理架构之下进行计算求解；
- ✓ 在 MSC.Nastran 中完全集成了 MSC.Marc 和 LS-DYNA 的非线性功能；
- ✓ 极大地扩展了 MSC.Nastran 的仿真范围和应用领域。

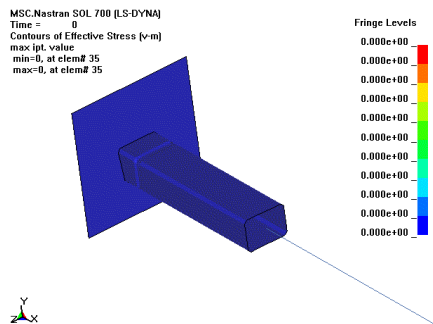


图 10 MSC.Nastran 显式非线性求解器 SOL700

3.1.4 MSC.EASY5 与 MSC.Nastran 的直接集成

目前 MSC.EASY5 与 MSC.Nastran 可以通过模型转换方式实现直接集成，从而允许在 MSC.EASY5 中引入弹性体结构数据，解决控制与结构的耦合问题。

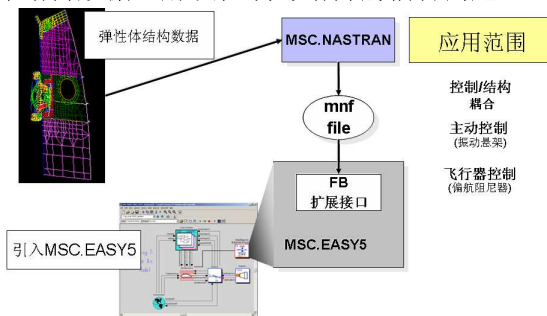


图 11 MSC.EASY5 与 MSC.Nastran 的直接集成

3.2 MSC.SimOffice 协同仿真的典型应用方式

由前文可见，MSC.SimOffice 成员间可以通过良好的集成能力实现复杂产品的一体化开发。在一个包含控制、结构、机构运动以及疲劳分析等多学科多子系统的产品开发流程中，我们可以在先期阶段通过 MSC.EASY5 建立包括控制系统和多学科动态系统在内的系统原理模型，通过 MSC.Nastran/Marc/Dytran 对部件进行有限元分析，然后将 MSC.EASY5 建立的控制系统模型和 MSC.Nastran 分析的弹性体模型导入 MSC.ADAMS 中，建立机电一体化的功能虚拟样机，通过 MSC.ADAMS 分析产品的运动情况，评估产品性能。在 MSC.ADAMS 分析过程中产生的载荷时间历程文件，亦可进一步导入到 MSC.Fatigue 中，进行详细的疲劳分析。在 MSC.SimOffice 中可以完成整个产品的开发流程。

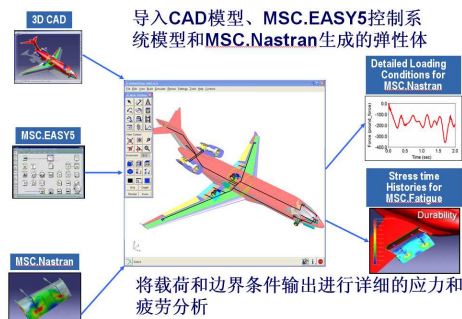


图 12 MSC.SimOffice 实现产品的完整开发流程

3.3 MSC.SimOffice 的未来架构

目前 MSC.Software 公司正在积极的开展工作，将 MSC.SimOffice 各成员移植和整合到统一的架构中，在同一界面环境下实现更为便利的协同仿真。

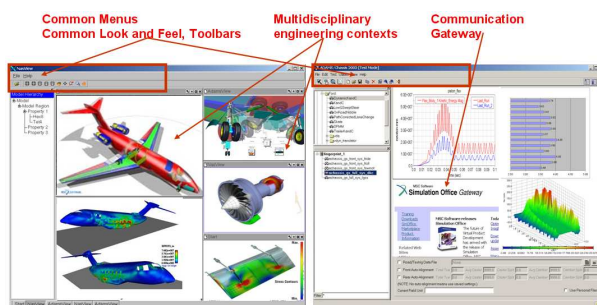


图 13 MSC.SimOffice 的未来架构

3.3 MSC.SimManager 建立协同仿真平台

在多团队、多子系统、多学科领域的产品开发过程中，仅具有各子系统和各学科领域的开发工具，并实现各开发工具的集成尚不能达到完全的协同设计，因为在开发过程中，涉及到不同开发人员、大量的数据和信息、以及各子系统不同的设计流程。为了有效的管理人员、数据和设计流程，使得开发过程实现真正的协同，我们还需具备仿真管理平台。

MSC.SimManager 是当前最为强大的仿真数据和流程管理系统，为基于 IE 的门户式管理体系，帮助管理多学科联合仿真的众多仿真工具、流程和数据，在统一的平台下进行各类分析，将企业的分析人员和资源优化配置，建立起真正的协同仿真平台。

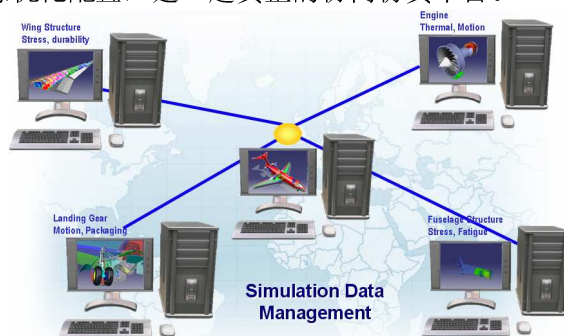


图 14 MSC.SimManager 建立协同仿真平台

4. 多学科系统级虚拟样机开发实例

以下实例给出在开发飞行控制系统副翼液压作动分系统的过程中，MSC.SimOffice 成员是如何协同工作，完成整个系统的一体化开发任务的。在开发过程中，各仿真工具、数据和开发流程的管理是通过 MSC.SimManager 实现的。

传统的飞行控制系统开发主要依赖于“铁鸟”试验，该试验通常应用于系统综合以及功能测试中。在“模型飞机”上要进行大量不同类型的物理试验，以确保设计的正确性。如果仅仅考虑飞机副翼对飞行员操作响应的話，“铁鸟”试验还是比较理想的。

但是“铁鸟”试验最大的缺点就在于，它将飞机考虑为刚性体，而且不能包括空气动力学的因素、完整的飞行载荷（仅仅是点载荷）以及弹性体的影响。这些因素对于设计的影响实际上是相当大的。

另外，如果完全依赖“铁鸟”试验，那么带来的开发周期和成本都是不可接受的。

借助于 MSC.Software 的 VPD 技术，建立功能化数字飞机，可以在仿真中完全考虑以上关键因素的影响，同时可以减少物理样机的试制和试验，节省开发成本，缩短开发周期。

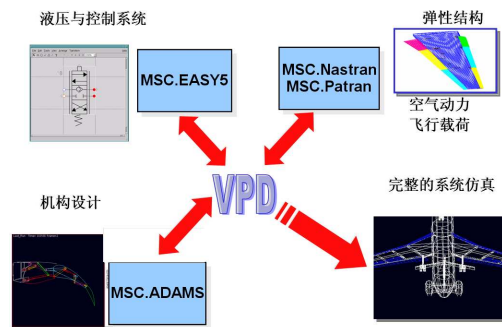


图 15 MSC.SimOffice 实现完整系统仿真

完整的开发流程如下：

