

1

流固耦合分析基础

近年来，流固耦合分析研究和应用取得了飞速的发展，尤其是 ANSYS Workbench 推广以来，流固耦合分析变得容易起来，也因此很快在相关工程领域得到广泛应用。本章是学习 ANSYS 流固耦合分析的入门篇，旨在介绍 ANSYS 流固耦合分析的基本知识，引导初学者由浅入深地了解流固耦合分析的基本操作和应用。

本章内容包括：

- ✓ 流固耦合基础
- ✓ ANSYS 流固耦合分析
- ✓ ANSYS 流固耦合分析的基本步骤

1.1 流固耦合基础

下面简单介绍什么是流固耦合作用、流固耦合分析，流固耦合的重要性，以及流固耦合分析用到的控制方程。

1.1.1 认识流固耦合分析的重要性

随着计算科学以及数值分析方法的不断发展，流固耦合或交互作用（fluid structure coupling 或 fluid structure interaction）研究从 20 世纪 80 年代以来，受到了世界学术界和工业界的广泛关注。流固耦合问题是流体力学（Computational Fluid Dynamics, CFD）与固体力学（Computational Solid Mechanics, CSM）交叉而生成的一门力学分支，同时也是多学科或多物理场研究的一个重要分支，它是研究可变形固体在流场作用下的各种行为以及固体变形对流场影响这二者相互作用的一门科学。

流固耦合问题可以理解为既涉及固体求解又涉及流体求解，而两者又都不能被忽略的模拟问题。因为同时考虑流体和结构特性，流固耦合可以有效节约分析时间和成本，同时保证结果更接近于物理现象本身的规律。所以，近年来流固耦合分析在工程设计特别是虚拟设计和仿真中的应用越来越广泛和深入。

图 1-1 显示了流固耦合分析在产品虚拟设计中的层次以及与各学科之间的相互联系。整个虚拟设计流程可以分为三个阶段。

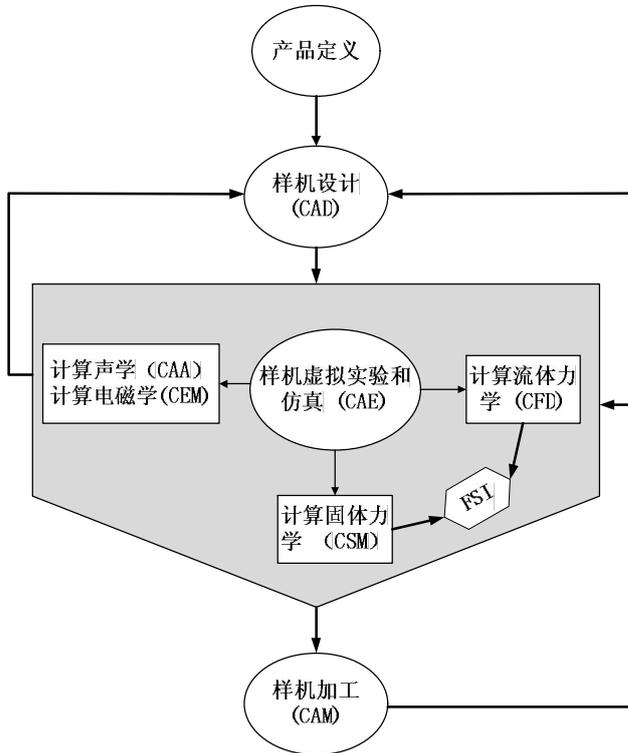


图 1-1 虚拟设计流程以及流固耦合分析

- 第一阶段：样机设计阶段，主要是采用计算机辅助设计方法（CAD）按产品定义进行样机的结构设计。
- 第二阶段：样机虚拟实验和仿真阶段，主要是通过计算机辅助工程方法（CAE）对初始设计产品进行性能评估。依据各学科特性，进行的仿真分析主要有：计算流体力学分析、计算固体力学分析、计算声学以及计算电磁学分析。其中把计算流体力学分析和计算固体力学分析结合起来的分析简称为流固耦合分析。
- 第三阶段：样机加工阶段，主要采用计算机辅助加工方法和手段进行样机制造。

其中，如果在第二阶段发现样机性能不能满足设计要求，可以返回第一阶段，第三阶段如果发现成品样机有问题，可以根据情况分别返回到第一阶段和第二阶段进行再开发和设计。

流固耦合研究和分析在众多领域，包括航空航天、水利、建筑、石油、化工、海洋以及生物领域，有着十分重要的意义和应用前景。如石油行业中，地震作用下大型贮油罐振动与罐内储备油晃动的相互影响；化工行业中，长管道由于流体流动诱发的振动情况；海洋领域中，海洋石油平台在强波浪中的结构安全性能评估；水利行业中，水电工程中水轮机发电叶片与水流的相互作用；生物领域中，心脑血管和血液流动的相互影响，如图 1-2 所示；航空航天领域中，飞机机翼绕流及颤振问题等都属于流固耦合作用问题，相应的分析都可归为流固耦合分析。

显然，流固耦合作用自古以来便一直存在，但是流固耦合分析以及其广泛应用是伴随着计

算流体力学和计算固体力学的快速发展而产生和实现的。所以要探究流固耦合的基本原理还需要从计算流体力学和计算固体力学着手。

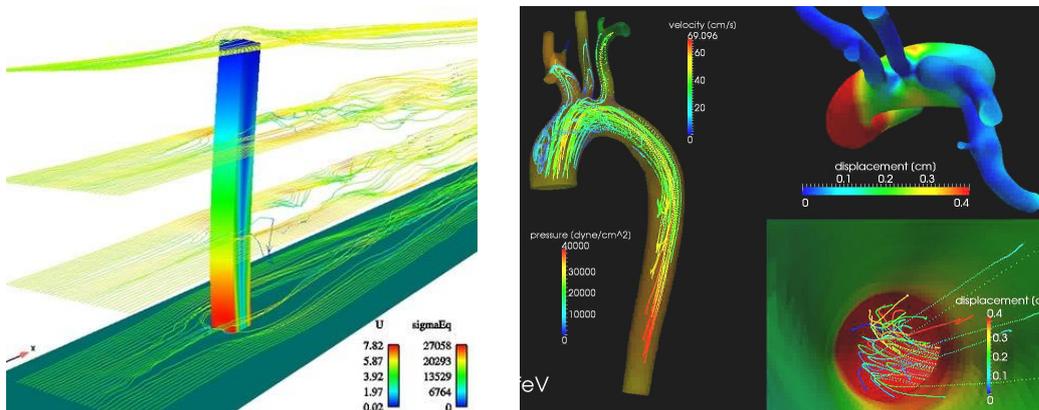


图 1-2 典型的流固耦合分析：立柱在风载下大变形（左），心脑血管变形及血液流动（右）

1.1.2 流体控制方程

流体流动要遵循物理守恒定律，基本的守恒定律包括质量守恒定律、动量守恒定律、能量守恒定律。如果流体中包括混合的其他不同成分，系统还要遵循组分守恒定律。对于一般的可压缩牛顿流来说守恒定律通过如下控制方程描述。

质量守恒方程：

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \mathbf{v}) = 0 \quad (1-1)$$

动量守恒方程：

$$\frac{\partial \rho_f \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \mathbf{v} \mathbf{v} - \boldsymbol{\tau}_f) = \mathbf{f}_f \quad (1-2)$$

其中， t 表示时间， \mathbf{f}_f 是体积力矢量。 ρ_f 是流体密度， \mathbf{v} 是流体速度矢量， $\boldsymbol{\tau}_f$ 是剪切力张量，可表示为：

$$\boldsymbol{\tau}_f = (-p + \mu \nabla \cdot \mathbf{v}) \mathbf{I} + 2\mu \mathbf{e} \quad (1-3)$$

其中， p 是流体压力， μ 是动力粘度， \mathbf{e} 是速度应力张量， $\mathbf{e} = \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T)$ 。

1.1.3 固体控制方程

固体部分的守恒方程可以由牛顿第二定律导出：

$$\rho_s \ddot{\mathbf{d}}_s = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}_s + \mathbf{f}_s \quad (1-4)$$

其中， ρ_s 是固体密度， $\boldsymbol{\sigma}_s$ 是柯西应力张量， \mathbf{f}_s 是体积力矢量， $\ddot{\mathbf{d}}_s$ 是固体域当地加速度矢量。



注意

上述流体和固体控制方程中都没有考虑能量方程，若考虑流体、固体的能量传递，需要添加能量方程，对于流体部分总焓（ h_{tot} ）形式的能量方程可以写成如下形式：

$$\frac{\partial(\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f v h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (v \cdot \tau) + v \cdot \rho f_f + S_E \quad (1-5)$$

其中, λ 表示导热系数, S_E 表示能量源项。

对于固体部分, 增加了由温差引起的热变形项:

$$f_T = \alpha_T \cdot \nabla T \quad (1-6)$$

其中, α_T 是与温度相关的热膨胀系数。

1.1.4 流固耦合方程

同样, 流固耦合遵循最基本的守恒原则, 所以在流固耦合界面处, 应满足流体与固体应力 (τ)、位移 (d)、热流量 (q)、温度 (T) 等变量的相等或守恒, 即满足如下 4 个方程:

$$\begin{cases} \tau_f \cdot n_f = \tau_s \cdot n_s \\ d_f = d_s \\ q_f = q_s \\ T_f = T_s \end{cases} \quad (1-7)$$



注意

下标 f 表示流体, 下标 s 表示固体。

以上就是流固耦合分析所采用的基本控制方程, 为便于分析, 可以建立控制方程的通用形式, 然后给定各参数以及适当的初始条件和边界条件, 统一求解。目前, 用于解决流固耦合问题的方法主要有两种: 直接耦合式解法 (directly coupled solution, 也称为 monolithic solution) 和分离解法 (partitioned solution, 也称为 load transfer method)。直接耦合式解法通过把流固控制方程耦合到同一个方程矩阵中求解, 也就是在同一求解器中同时求解流体和固体的控制方程

$$\begin{bmatrix} A_{ff} & A_{fs} \\ A_{sf} & A_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_f^k \\ \Delta X_s^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_f \\ B_s \end{bmatrix} \quad (1-8)$$

其中, k 表示迭代时间步, A_{ff} 、 ΔX_f^k 和 B_f 分别表示流场的系统矩阵、待求解和外部作用力。同理, A_{ss} 、 ΔX_s^k 和 B_s 分别对应固体区域的各项。 A_{sf} 和 A_{fs} 代表流固的耦合矩阵。

由于同时求解流固的控制方程, 不存在时间滞后问题, 所以直接解法在理论上非常先进和理想。但是, 在实际应用中, 直接解法很难将现有 CFD 和 CSM 技术真正结合到一起, 同时考虑到同步求解的收敛难度和耗时问题, 直接解法目前主要应用于如压电材料模拟等电磁-结构耦合和热-结构耦合等简单问题中, 对流动和结构的耦合只能应用于一些非常简单的研究中, 还没有在工业应用中发挥重要的实际作用。

与之相反, 流固耦合的分离解法不需要耦合流固控制方程, 而是按设定顺序在同一求解器或不同的求解器中分别求解流体控制方程和固体控制方程, 通过流固界面 (FS Interface) 把流体域和固体域的计算结果互相交换传递。待此时此刻的收敛达到要求, 进行下一时刻的计算, 依次而行求得最终结果。相比于直接耦合式解法, 分离解法有时间滞后性和耦合界面上的能量不完全守恒的缺点, 但是这种方法的优点也显而易见, 它能最大化地利用已有计算流体力学和计算固体力学的方法和程序, 只需对它们做少许修改, 从而保持程序的模块化; 另外分离解法

对内存的需求大幅降低，因此可以用来求解实际的大规模问题。所以，目前几乎在所有商业 CAE 软件中，流固耦合分析都采用的是分离解法。

1.2 ANSYS 流固耦合分析

ANSYS 很早便开始进行流固耦合的研究和应用，目前 ANSYS 中的流固耦合分析算法和功能已相当成熟，可以通过或者不通过第三方软件（如 MPCCI）实现 ANSYS Mechanical APDL + CFX、ANSYS Mechanical APDL + FLUENT、ANSYS Mechanical + CFX 的流固耦合分析。

从算法上讲，ANSYS（也包括其他大型商业软件）主要采用分离解法也就是载荷传递法求解流固耦合问题。但从数据传递角度出发，流固耦合分析还可以分为两种：单向流固耦合分析（one-way coupling 或 uni-directional coupling）和双向流固耦合分析（two-way coupling 或 bi-directional coupling）。其中，双向耦合因为求解顺序的不同又可分为顺序求解法（Sequential solution）和同时求解法（Simultaneous solution），图 1-3 简单概括了基于 ANSYS 的耦合分析类型，具体解释如下。

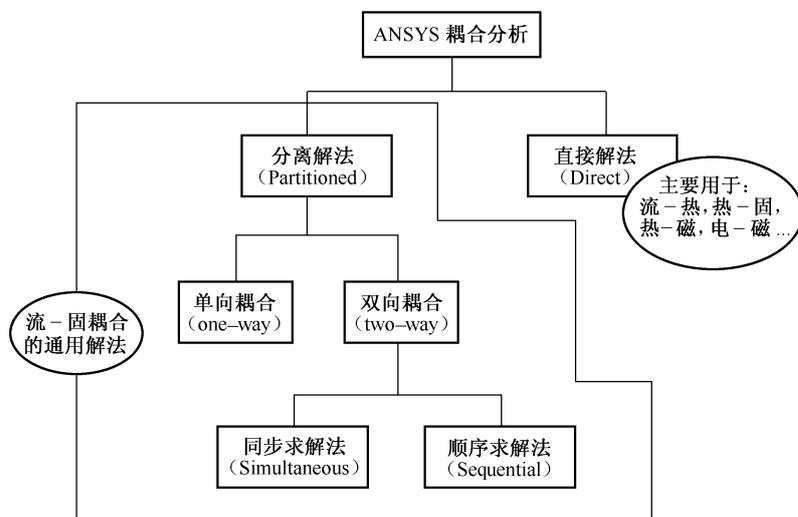


图 1-3 ANSYS 耦合分析分类

1.2.1 单向流固耦合分析

单向流固耦合分析指耦合界面处的数据传递是单向的，一般是指把 CFD 分析计算的结果（如力、温度和对流载荷）传递给固体结构分析，但是没有固体结构分析结果传递给流体分析的过程。也就是说，只有流体分析对结构分析有重大影响，而结构分析的变形等结果非常小，以至于对流体分析的影响可以忽略不计。单向耦合的现象和分析非常普遍，比如热交换器的热应力分析、阀门在不同开度下的应力分析（见图 1-4）、塔吊在强风中的静态结构分析、旋转机械的结构强度分析等都属于单向耦合分析。

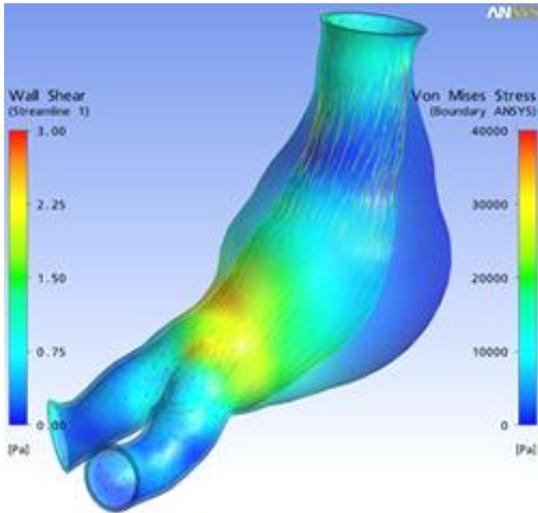


图 1-5 典型的双向耦合分析（动脉瘤分析）

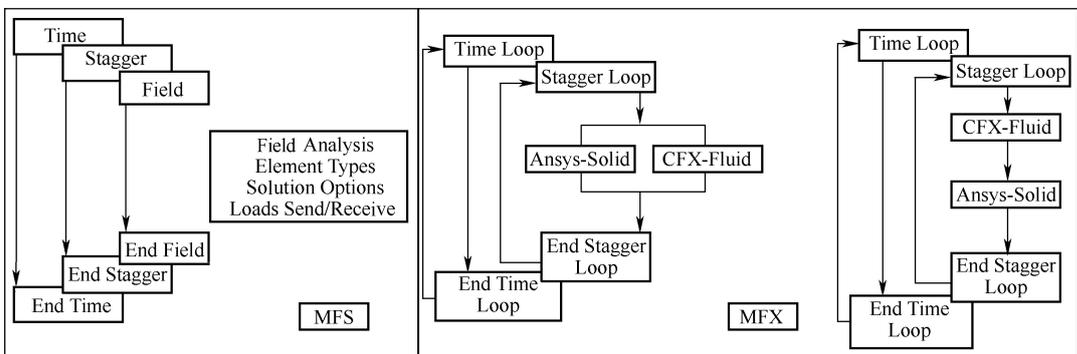


图 1-6 ANSYS 多场求解器求解程序（MFS & MFX）

1.2.3 耦合面的数据传递

流固耦合中的数据传递是指将流体计算结果和固体结构计算结果通过界面相互交换传递。不管是完美对应的流固网格还是相差很大的非对应网格（dissimilar mesh），通过严格设置，ANSYS 多场求解器 MFS 和 MFX 都能很好地完成传递。但是，对于非对应网格的数据传递，传递前的插值运算是必不可少的一步。

多场求解器 MFS 提供两种插值方式，分别是 profile preserving 和 globally conservative 插值法。在 profile preserving 插值法中（见图 1-7 左），数据接收端的所有节点映射到数据发射端的相应单元上，要传递的参数数据在发射端单元的映射点完成插值后，传递给接收端，是一种主动问询式传递。与之相反，globally conservative 插值法（见图 1-7 右）首先把发射端的节点一一映射到接收端单元上，然后把要传递的参数数据按比例切分到各个节点上，对接收端而言，属于被动式传递方式。

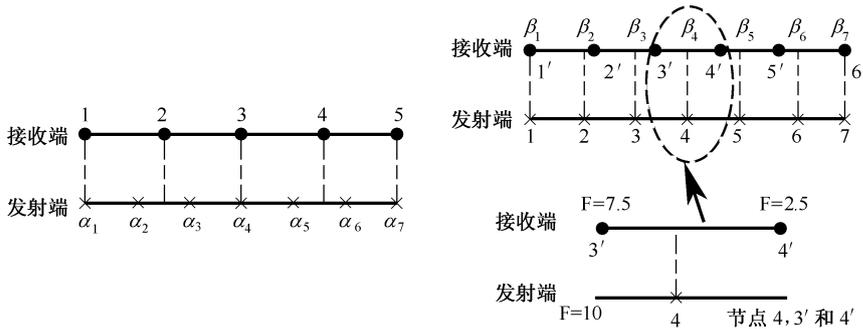


图 1-7 两种数据传递过程示意图

两种插值法出发点和原理不同，所以效果也相差很远。比如使用 **profile preserving** 插值法传递参数数据时(如力、热通量等)，发射端和接收端的数据有可能不守恒；**globally conservative** 插值法在局部也同样有类似不守恒情况，但是可以保证在全部界面数据的总体守恒。从物理角度出发，力、热通量等参数在耦合界面处保持总体守恒更有意义，但是对位移和温度，保持整体上的守恒不是很有意义，反而局部的分布轮廓更需要精确传递。所以一般情况下，对力、热通量等参数传递，可以根据网格情况采用 **globally conservative** 或者 **profile preserving** 方式，但是对位移和温度的传递，一般总是采用 **profile preserving** 方法。

与 MFS 相似，多场求解器 MFX 同样提供两种插值方式，分别是 **profile preserving** 和 **conservative** 插值法。MFX 中的 **profile preserving** 插值法与 MFS 中的完全相同。不过虽然第二种 **conservative** 方式与 MFS 中的 **globally conservative** 只一字之差，但原理、方法完全不同。MFX 中的 **conservative** 方式采用单元分割、像素概念、桶算法以及新建控制面等多种方式和方法完成数据传递，只要确保流固耦合面能完全重合对应，交界面上的参数数据从全局到局部都能得到精确传递。对于流固耦合面不完全对应的情况，**conservative** 方法会通过不在对应区域设置 0 值、特殊边界条件等方式忽略此区域数据的传递，从而保持严格的守恒传递，如图 1-8 所示。

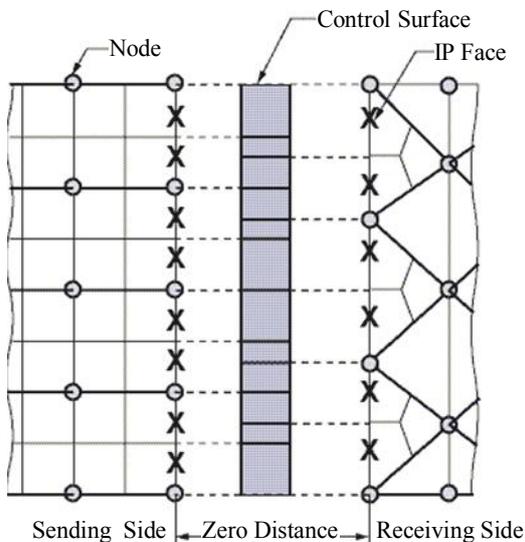


图 1-8 MFX 中 conservative 插值法示意图

1.2.4 网格映射和数据交换类型

为了在非相似网格之间传递数据，每个网格上的节点必须映射到对应网格的单元上。在流固耦合分析中，为了传递位移变量，流场耦合面上的节点必须映射到固体耦合面的单元上；为了传递应力，固体耦合面上的节点必须映射到流场耦合面的单元上，也就是一次完整的数据交换传递必须实行两次映射操作（见图 1-9）。

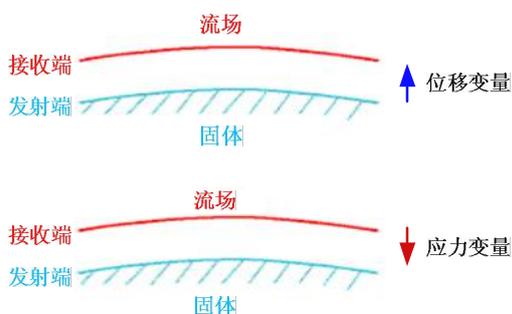


图 1-9 流固耦合的网格映射

由于各场独自的物理属性和特点，流固耦合（也包括热固和热流耦合）分析时，并不是所有数据都能相互交换传递的，比如，流场耦合面的速度参数就不能传递给固体耦合面，固体耦合面的应力分布也不能传递给流场耦合面。表 1-1 至表 1-3 列出了流固耦合（也包括热固和热流耦合）中两场间的传递参数类型。

表 1-1 流-固耦合数据传递 (Structural - Fluid Coupling)

面载荷传递 (Surface Load Transfer)	结构 (Structural)	流体 (Fluid)
发射端 (Send)	Displacements	Forces
接收端 (Receive)	Forces	Displacements

表 1-2 热-固耦合数据传递 (Thermal - Structural Coupling)

体载荷传递 (Volumetric Load Transfer)	结构 (Structural)	热 (Thermal)
发射端 (Send)	Displacements	Temperature
接收端 (Receive)	Temperature	Displacements

表 1-3 热-流耦合数据传递 (Thermal - Fluid Coupling)

面载荷传递 (Surface Load Transfer)	热 (Thermal)	流体 (Fluid)
发射端 (Send)	Temperature/Heat Flux	Temperature/Heat Flux
接收端 (Receive)	Heat Flux/Temperature	Heat Flux/Temperature

1.3 ANSYS 流固耦合分析的基本步骤

ANSYS 在原有 Mechanical APDL（也叫 ANSYS Classical）的基础上，相继合并开发了

ANSYS Workbench CFX 和 ANSYS CFX，从 12.0 版本开始又合并集成了另一款著名的计算流体力学软件 FLUENT。通过坚持不懈的努力，ANSYS 流固耦合分析从单向到双向、从简单二维模型到复杂三维模型、从小变形分析到基于动网格或网格重构的大变形分析，功能不断增加，分析能力大幅加强、分析结果日益精确。

同时，由于集成了多个产品，流固耦合的分析使用方法也变得多种多样，比如可以通过 Mechanical APDL Product Launcher 设置基于 MFX 的双向耦合分析，可以通过 Mechanical APDL 本身设置与 CFX 或 FLUENT 的单向耦合分析，可以通过 ANSYS Workbench 设置与 CFX 和 FLUENT 的单向耦合分析，通过 ANSYS Workbench 平台设置 ANSYS 和 CFX 的双向耦合分析，到 13.0 版本虽然还不支持 ANSYS 与 FLUENT 的双向耦合分析，但是通过第三方软件 MPCCI 也可以轻松实现双向耦合分析，具体的可行性设置方式如表 1-4 所示。

表 1-4 ANSYS 流固耦合可行性设置方式

	结构软件或模块	流体软件或模块	主要配置环境
单向耦合分析	Mechanical APDL	CFX	Mechanical APDL/CFX
	Mechanical APDL	FLUENT	Mechanical APDL/FLUENT
	Static Structural (ANSYS)	CFX/FLUENT	ANSYS Workbench
双向耦合分析	Mechanical APDL	FLOTRAN	Mechanical APDL
	Mechanical APDL	CFX	Mechanical APDL Product Launcher/CFX
	Transient Structural (ANSYS)	CFX	ANSYS Workbench
	Mechanical APDL	FLUENT	MPCCI

因为通过 ANSYS Workbench 设置单向和双向耦合分析有相应的快捷菜单，所以大致过程十分简单，只需注意各个求解器的内部设置即可，此处不做多讲。以下简单介绍一下非 Workbench 方式设置的单向耦合和双向耦合分析的基本步骤。

1.3.1 CFX + Mechanical APDL 单向耦合基本设置

对于单向耦合分析，因为没有流场和固体的交错迭代求解，所以，耦合其实主要是指耦合界面处的数据传递。以 CFX-Post 传递耦合面数据的方式创建 ANSYS Mechanical APDL 载荷为例，其单向数据传递过程设置大致如下：

Step 1 打开 Mechanical APDL 导入模型，设置结构单元类型、面单元 (SURF154) 和实参数，然后分别划分结构网格和耦合面网格。完毕后，通过单击 Preprocessor > Archive Model > Write 输出包含所有有限单元信息 (DB All Finite Element Information) 的 CDB 文件 (见图 1-12 (左))。

Step 2 在 CFX-Post 中打开流体分析的 .res 结果文件。单击 File > ANSYS Import/Export > Import ANSYS CDB Surface。此时，会弹出 Import ANSYS CDB Surface 对话框，见图 1-10 所示。

Step 3 在 Import ANSYS CDB Surface 对话框中，指定 File 为之前使用 Mechanical APDL

保存的 CDB 文件，也就是指定目标传递面。然后指定流体分析中的相应面为 Associated Boundary, 映射到结构面(目标传递面), 并适当设置其他选项。单击 OK 按钮导入 ANSYS CDB 网格。

Step 4 此时，只是面面映射完成，接着进行数据传递并导出文件。单击 File>ANSYS Import/Export>Export ANSYS Load File, 弹出 Export ANSYS Load File 对话框，见图 1-11 所示。

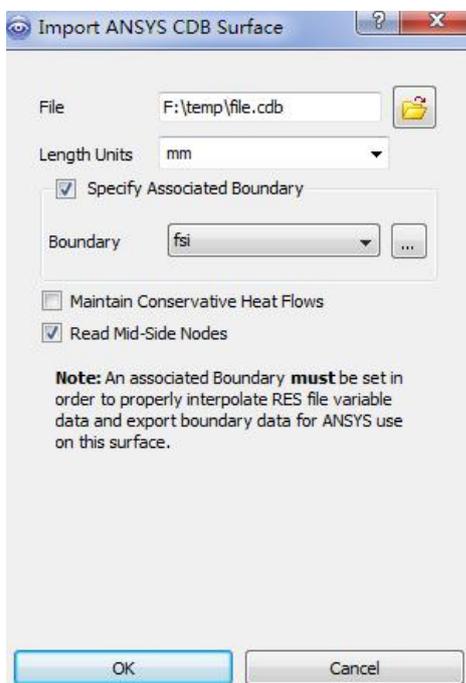


图 1-10 加载 ANSYS .cdb 结构文件

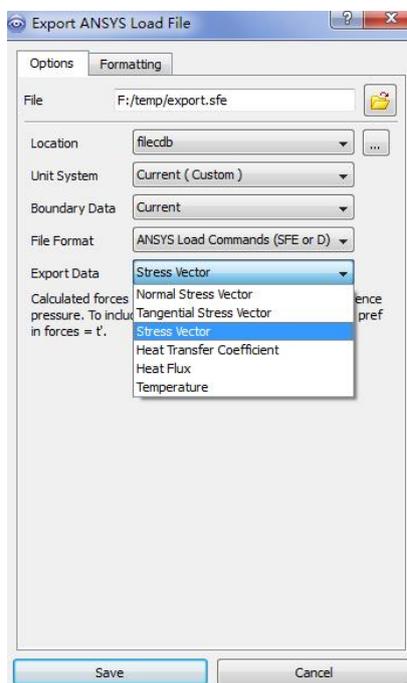


图 1-11 导出 ANSYS .sfe 载荷文件

Step 5 在 Export ANSYS Load File 对话框中，设定文件名保存数据。Location 参数值中指定导入的 ANSYS 结构面。File Format 下拉菜单中选择 ANSYS Load Commands (SFE or D), 或者，选择包含所有传递信息的 WB Simulation Input (XML)方式输出。然后，在 Export Data 中选择要输出的数据：Normal Stress Vector, Tangential Stress Vector, Stress Vector, Heat Transfer Coefficient, Heat Flux 或者 Temperature。单击 Save 按钮，ANSYS 载荷数据文件就创建好了。

Step 6 回到 Mechanical APDL 界面，单击 File > Read Input From... 导入刚才生成的.sfe 载荷文件。然后设置约束等其他边界条件，全部设置完毕后，即可求解，如图 1-12 (右) 所示。

1.3.2 FLUENT+ANSYS 单向耦合基本设置

FLUENT + Mechanical APDL 的单向耦合分析过程与 CFX + Mechanical APDL 单向耦合过程十分相似，单击 File > FSI Mapping > Surface, 在弹出的 Surface FSI Mapping 对话框中，指定保存的 ANSYS CDB 文件为 FEA File, 单击 Read 按钮, 便可以导入 CDB 文件(见图 1-13)。检查无误后，设置对话框右侧的 Output File 属性，单击 Write 按钮可以导出具有载荷信息的新 CDB 文件（注意不是.sfe 文件）。然后在 Mechanical APDL 中通过 Read input from... 可以加载新的 CDB 文件完成载荷加载。

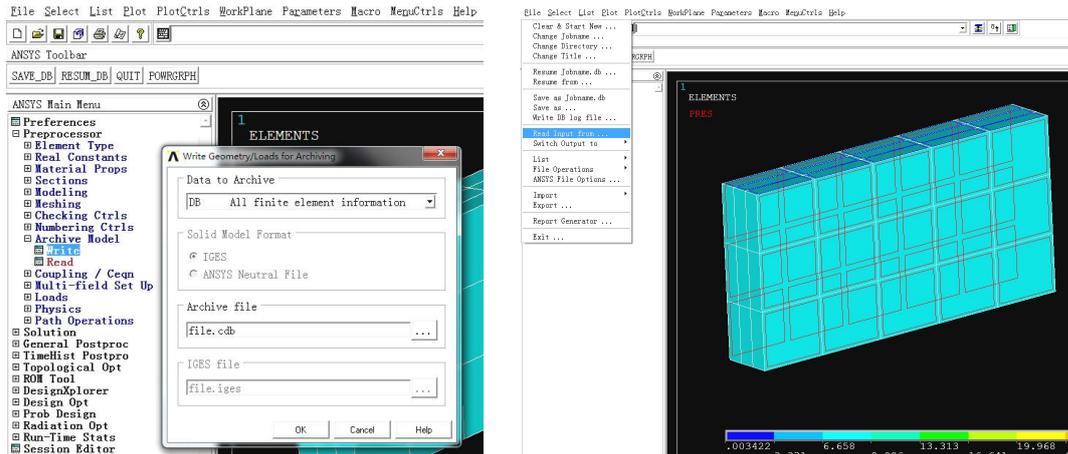


图 1-12 Mechanical APDL 导出.cdb 文件（左）和加载.sfe 载荷文件（右）

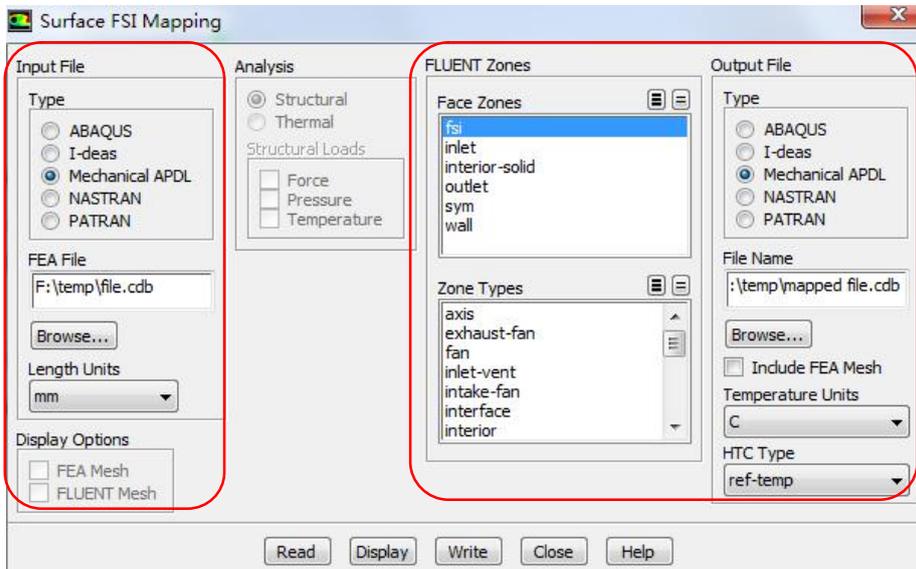


图 1-13 通过 FLUENT 中的 FSI Mapping 导入、导出 CDB 文件

1.3.3 通过 Mechanical APDL Product Launcher 设置 MFX 分析

相较于单向耦合分析，双向耦合分析的设置要复杂得多，除了设置求解顺序、求解器之间的数据传递属性外，还需要仔细设定各个求解器的迭代属性等众多相关内容。所以，目前常用的双向耦合分析都是通过 ANSYS Workbench 设置的，ANSYS Workbench 提供了便捷的快捷菜单设置方式，可以方便地完成双向耦合分析的数据传递部分。本书中的双向耦合分析有大量实例，此处不作讲解，下面简单介绍一下通过 ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 设置双向耦合分析，大致设置步骤如下：

Step 1 打开 ANSYS Mechanical APDL Launcher，在 Simulation Environment 中选择 MFX - ANSYS/CFX。然后选择 License 为 ANSYS Multiphysics（见图 1-14）。

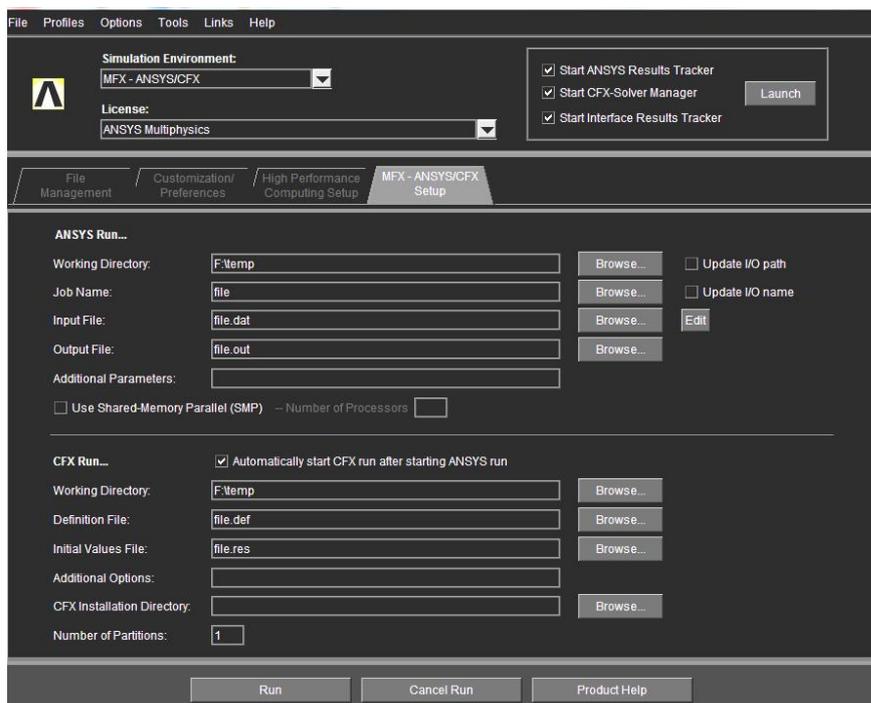


图 1-14 ANSYS Mechanical APDL Launcher 窗口

Step 2 在 MFX - ANSYS/CFX Setup 选项卡中，设置 ANSYS Run...属性，如 Working Directory、Job name 等。

Step 3 设置 CFX Run...属性，如 Working Directory、Definition File、Initial Values File 等。

Step 4 单击 Run 按钮。

通过 ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 设置 MFX 分析时，ANSYS 和 CFX 会自动启动，用户需要分别设置其属性和参数。同时，需要在本地机器使用 CFX，如果想在不同机器运行 CFX，需要通过命令流方式设置，参见 ANSYS 帮助文件中的 Starting an MFX Analysis via the Command Line。

1.4 本章小结

本章简要介绍了流固耦合分析的基本概要，给出了流固耦合分析的基本方程和方法，接着介绍了应用 ANSYS 进行流固耦合分析的基本类型和工作过程。本章的目的是让读者对流固耦合分析有一个总体上的认识，了解流固耦合分析的基本思路。作为本书的基础，读者必须将其中的基本概念和流程搞清，因为本章介绍的相关内容应用 ANSYS 进行流固耦合分析必须掌握的前提。需要说明的是，流固耦合分析的基础知识和分析方法远不止这些，基于其他商业软件的耦合分析也多种多样，需要读者通过阅读其他理论文献和软件说明来加强理解体会。