

万水 ANSYS 技术丛书

ANSYS

流固耦合分析与工程实例



宋学官 蔡林 张华 编著

流固耦合分析的完美解决方案

- 基于ANSYS Workbench平台，深入解析流固耦合分析实例
- 多年ANSYS实际科研与工程经验的总结
- 免费下载典型流固耦合分析实例的模型文件



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

万水 ANSYS 技术丛书

ANSYS 流固耦合分析与工程实例

宋学官 蔡 林 张 华 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书不涉及系统理论以及具体算法的介绍,而是从实际应用角度出发,通过大量的原创性分析实例,向读者细致地讲解流固耦合分析。全书共分5章,从基础开始讲解,层层深入到ANSYS单向流固耦合分析、双向流固耦合分析,以及动网格和网格重构技术。为了让读者能够更好地理解ANSYS流固耦合分析的工程应用,本书还详细讲解了4个工程实例。

本书案例丰富,覆盖面广,通过实例一步步地讲解具体的分析思路以及实现步骤,并对分析中容易遇到的问题给出特别提示。本书的模型文件可以从<http://www.waterpub.com.cn/softdown/>及<http://www.wsbookshow.com>上免费下载。

本书可以作为机械专业、力学专业、电子电气等专业的教材,也适合应用ANSYS进行流固耦合分析的初学者学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

ANSYS流固耦合分析与工程实例 / 宋学官, 蔡林, 张华编著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2012. 1
(万水ANSYS技术丛书)
ISBN 978-7-5084-9230-8

I. ①A… II. ①宋… ②蔡… ③张… III. ①有限元分析—应用程序, ANSYS IV. ①O241.82

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第258227号

策划编辑: 杨元泓 责任编辑: 宋俊娥 封面设计: 李 佳

书 名	万水 ANSYS 技术丛书 ANSYS 流固耦合分析与工程实例
作 者	宋学官 蔡 林 张 华 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: mchannel@263.net (万水) sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)、82562819 (万水)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京万水电子信息有限公司
印 刷	北京蓝空印刷厂
规 格	184mm×260mm 16开本 18.75印张 465千字
版 次	2012年1月第1版 2012年1月第1次印刷
印 数	0001—5000册
定 价	45.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换
版权所有·侵权必究

前 言

经过几十年的发展，计算机数值分析已经逐渐从科学研究领域走进工业应用领域。其中，作为计算机数值分析中的两个重要分支，计算固体分析和计算流体分析逐渐完善和成熟，目前已经广泛地应用于机械、航空、造船、建筑、电子等各种行业。全国各大高校相关专业也都陆续开设了有关结构分析和流体分析的专业课程，如有限元法（FEM）、计算流体力学（CFD）等。

随着理论和应用的不断发展和融合，一种古老而又全新的分析方法——流固耦合分析，逐渐走进了广大研究人员和工程师的视野。流固耦合分析（Fluid - Structure Interaction Analysis）是流体分析与固体分析交叉耦合而生成的分析方法，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分析方法。在某些特定研究和分析中，由于涉及的固体变形和流场变化都不能忽视，流固耦合分析便显得极为重要和不可缺少。

作为世界著名的通用仿真分析软件，ANSYS 很早便开始流固耦合分析方面的研究和应用。其先后并购和组合了流体仿真中的著名软件 CFX 和 FLUENT，使得新开发的 ANSYS Workbench 有能力在不需要第三方软件的情况下，实现单向和双向的流固耦合分析。大量的流固耦合分析研究和应用已经证明，通过 ANSYS Workbench 进行流固耦合分析操作简单、计算迅速、结果可靠。

尽管如此，辅助和培训教材的缺失仍然极大地制约着初学者对流固耦合分析的学习、掌握和使用。即使非常精通结构分析和流体分析的研究人员和工程师也时而对流固耦合分析中的关键步骤一头雾水。本书不涉及系统理论以及具体算法的介绍，而是从实际应用角度出发，通过大量的工程分析实例，向读者细致地讲解流固耦合分析。全书共分 5 章，从基础开始讲解，层层深入到 ANSYS 单向流固耦合分析、双向流固耦合分析，以及动网格和网格重构技术。为了让读者能够更好地理解 ANSYS 流固耦合分析的工程应用，本书还详细讲解了 4 个工程实例。

第 1 章：流固耦合分析基础，主要介绍流固耦合的基本概念以及 ANSYS 流固耦合分析的基础知识。

第 2 章：单向流固耦合分析，主要讲解单向流固耦合分析的应用。

第 3 章：双向流固耦合分析，主要讲解双向流固耦合分析的应用。

第 4 章：CFX 和 FLUENT 动网格分析，主要讲解大变形情况下的流体网格重构。

第 5 章：流固耦合工程实例，主要介绍 4 个实际工程项目中的流固耦合分析。

需要注意的是，本书中的实例都在 ANSYS 12.1 版本中完成。其中，大多数使用的是 ANSYS Workbench 平台，即在 ANSYS Workbench 中建立结构分析和流体分析系统的方法；少数例子使用 CFX+ANSYS Workbench，或者 FLUENT+ANSYS Workbench，或 ICEM CFD+CFX/FLUENT+ANSYS Workbench 等组合软件。目前，ANSYS 已有最新版本发布，经过验证，本书中所有例子在 ANSYS 最新版本上也运行良好，并不影响读者学习并参照这些实例来解决自己所遇到的工程问题。另外，为了最大限度地简化不必要过程和帮助读者多方面体验 ANSYS

的各种技巧，除了工程实例中的分析，其他分析演示中，很多方面如网格精度、边界条件、材料属性等的设置都与实际情况有所出入，读者可学习参考，但切不可直接拷贝应用。

本书特色

- 贴近工程实际——本书的实例多从实际工程、科研项目中提炼出来，具有很强的参考价值，其中包括热应力、水压、旋转域 turbo 建模、周期边界、燃烧、热应力、血管壁耦合、模态分析、流体冲击、自由页面、结构振动、活动域、大变形 Remesh、FLUENT Remesh 6 DOF 等方面的技术或问题。
- 配套模型文件下载——为了方便读者更有效地学习，本书还配套提供模型文件的下载，网址为 <http://www.waterpub.com.cn/softdown/> 及 <http://www.wsbookshow.com>，这样读者学习起来效率更高。

致谢与分工

本书由宋学官、蔡林和张华编写，其中宋学官主要侧重于 CFX 模块的耦合分析，蔡林主要侧重于 FLUENT 模块的耦合分析，张华主要侧重于旋转机械部分的分析模拟。全书由宋学官统稿。

感谢成都道然科技有限责任公司为本书策划与质量控制所做的大量工作，同时感谢南京蓝深制泵集团股份有限公司给予的协助，感谢中国仿真互动网（www.Simwe.com）各位朋友的热情支持。在本书的编辑过程中，参与具体工作的还有：李伟、景小艳、许志清、刘军华、夏惠军、张赛桥、张强林、张代全、万雷、王斌、江广顺、李强、余松、郭敏、董茜、陈鲲、王晓、李晓宁、丁佳、虞志勇、吴艳。在本书创作期间获得中国水利水电出版社老师的大力支持，正是他们的辛苦付出，才使得本书能够在第一时间面向读者。若读者在学习过程中发现问题或有更好的建议，可以通过 www.dozan.cn/bbs 与我们联系。

由于时间仓促，作者水平有限，书中错误、纰漏之处难免，敬请广大读者批评指正。

编者

2011年12月

目 录

前言

第 1 章 流固耦合分析基础	1	2.3.5 开始流体计算	38
1.1 流固耦合基础	1	2.3.6 流体计算过程中的参数监控和修改	40
1.1.1 认识流固耦合分析的重要性	1	2.3.7 查看流体计算结果	41
1.1.2 流体控制方程	3	2.3.8 结构分析的模型处理	44
1.1.3 固体控制方程	3	2.3.9 结构网格划分	45
1.1.4 流固耦合方程	4	2.3.10 加载与求解	46
1.2 ANSYS 流固耦合分析	5	2.4 轴流叶片的应力分析	48
1.2.1 单向流固耦合分析	5	2.4.1 问题描述	49
1.2.2 双向流固耦合分析	6	2.4.2 创建分析项目	50
1.2.3 耦合面的数据传递	7	2.4.3 BladeGen 中叶片的设计	50
1.2.4 网格映射和数据交换类型	9	2.4.4 TurboGrid 结构网格划分	57
1.3 ANSYS 流固耦合分析的基本步骤	9	2.4.5 流体分析设置	60
1.3.1 CFX + Mechanical APDL 单向 耦合基本设置	10	2.4.6 流体计算和结果查看	61
1.3.2 FLUENT+ANSYS 单向耦合 基本设置	11	2.4.7 Static Structural(ANSYS)结构分析	62
1.3.3 通过 Mechanical APDL Product Launcher 设置 MFX 分析	12	2.5 燃烧室流场计算及热变形分析	66
1.4 本章小结	13	2.5.1 问题描述	66
第 2 章 单向流固耦合分析	14	2.5.2 ICEM CFD 划分燃烧流场网格	66
2.1 单向流固耦合分析基础	14	2.5.3 利用 FLUENT 求解燃烧流场	70
2.2 三通管的热强度计算	16	2.5.4 NO _x 排放量预测	77
2.2.1 问题描述	16	2.5.5 Workbench 进行结构分析	81
2.2.2 ICEM CFD 划分三通管流场网格	16	2.6 水流冲击平板分析	86
2.2.3 利用 CFX 求解三通管流场	19	2.6.1 问题描述	86
2.2.4 利用 Workbench 进行三通管 热强度分析	25	2.6.2 创建分析项目	86
2.3 风力发电叶片及支架整体分析	29	2.6.3 建立几何模型	88
2.3.1 问题描述	29	2.6.4 流体分析	88
2.3.2 几何模型处理	30	2.6.5 结构分析	93
2.3.3 流场网格划分	31	2.7 泥浆搅拌机预应力下的模态分析	96
2.3.4 流体分析设置	33	2.7.1 问题描述	96
		2.7.2 创建分析项目	96
		2.7.3 Fluent 流场分析	98
		2.7.4 结构分析	109
		2.8 本章小结	116

第 3 章 ANSYS 双向流固耦合分析	117	3.6.2 利用 ICEM 划分水膜网格	192
3.1 双向流固耦合分析基础	117	3.6.3 利用 Workbench 完成结构设置	195
3.2 血管和血管壁耦合分析	119	3.6.4 流体分析设置	199
3.2.1 问题描述	119	3.6.5 开始计算及计算结果监测	202
3.2.2 创建分析项目	119	3.6.6 查看水膜流场结果	203
3.2.3 结构分析设置	123	3.7 本章小结	204
3.2.4 流场模型处理	124	第 4 章 ANSYS 动网格技术应用	205
3.2.5 流体分析设置	126	4.1 动网格分析基础	205
3.2.6 求解计算和结果监视	130	4.2 大变形网格重构功能分析	206
3.2.7 查看流体计算结果	132	4.2.1 问题描述	207
3.2.8 查看结构计算结果	133	4.2.2 网格划分和脚本录制	207
3.2.9 创建动画文件	135	4.2.3 流体分析设置	211
3.3 泥浆冲击立柱分析	137	4.2.4 求解和计算结果	217
3.3.1 问题描述	137	4.3 FLUENT Remesh 6DOF 分析	220
3.3.2 创建分析项目	138	4.3.1 问题描述	220
3.3.3 添加新材料 (concrete)	139	4.3.2 FLUENT 6DOF UDF 的编译	221
3.3.4 建立模型	140	4.3.3 FLUENT 查看流场结果	230
3.3.5 结构分析设置	141	4.3.4 利用 Tecplot 进行流场后处理	230
3.3.6 流场模型处理	143	4.4 本章小结	234
3.3.7 流场网格划分	143	第 5 章 ANSYS 流固耦合工程实例	235
3.3.8 流体分析设置	144	5.1 某型号离心泵分析	235
3.3.9 求解和计算结果	151	5.2 问题描述	236
3.4 飞机副翼转动耦合分析	156	5.2.1 网格划分	236
3.4.1 问题描述	157	5.2.2 流体分析设置	237
3.4.2 创建分析项目	157	5.2.3 结构分析设置	245
3.4.3 选用新材料 (Aluminum Alloy)	158	5.3 泄压阀动态特性分析	253
3.4.4 导入模型	159	5.3.1 问题描述	253
3.4.5 结构分析设置	159	5.3.2 创建 CFX 分析项目	256
3.4.6 流场模型处理	164	5.3.3 流体分析设置	256
3.4.7 流场网格划分	164	5.3.4 求解计算和结果监视	263
3.4.8 流体分析设置	166	5.4 止回阀动态分析	266
3.4.9 求解和计算结果	171	5.4.1 问题描述	266
3.5 圆柱绕流耦合振动分析	175	5.4.2 FLUENT DEFINE CG_Motion UDF 的 编译	267
3.5.1 问题描述	176	5.4.3 止回阀动网格的编译	267
3.5.2 ICEM CFD 划分流场网格	177	5.4.4 压力进口 UDF 编写	269
3.5.3 无耦合的圆柱绕流分析	180	5.4.5 FLUENT 止回阀流场求解设置	269
3.5.4 流固耦合圆柱绕流分析	186	5.4.6 流场后处理	275
3.6 水润滑橡胶轴承分析	191	5.5 滑动轴承玻璃轴瓦强度分析	277
3.6.1 问题描述	191		

5.5.1 问题描述	278	5.5.5 结构分析设置	286
5.5.2 FLUENT 分析滑动轴承油膜流场	278	5.5.6 结构求解及结果分析	289
5.5.3 油膜流场结果后处理	283	5.6 本章小结	291
5.5.4 流场与结构分析耦合	285	参考文献	292

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。

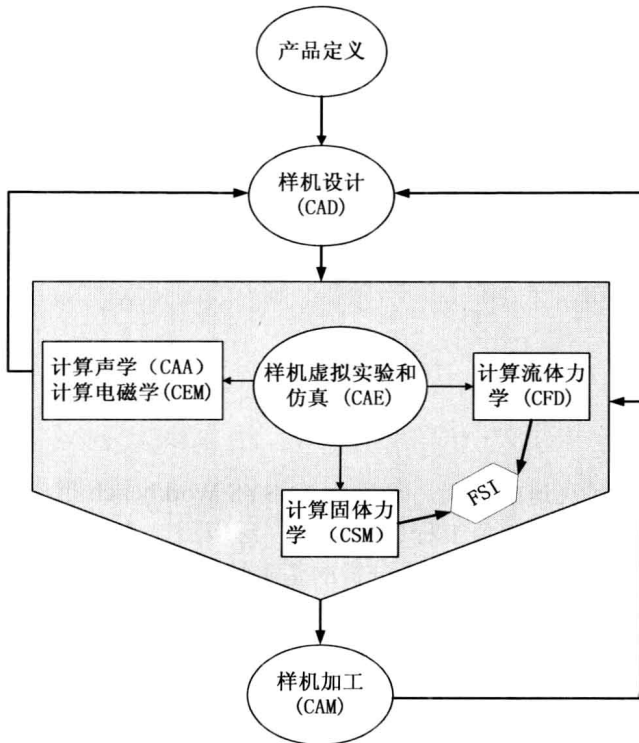


图 1-1 虚拟设计流程以及流固耦合分析

- 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。

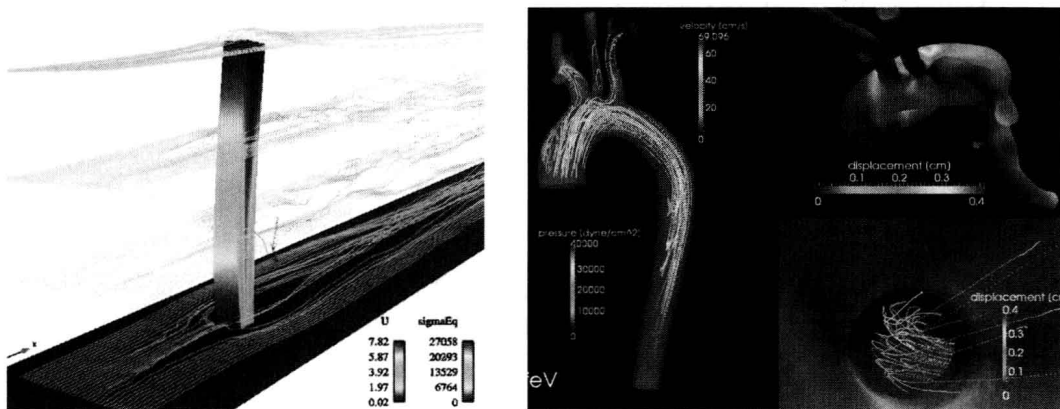


图 1-2 典型的流固耦合分析：立柱在风载下大变形（左），心脑血管变形及血液流动（右）

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：

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

动量守恒方程：

$$\frac{\partial \rho_f v}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f v v - \tau_f) = f_f \quad (1-2)$$

其中， t 表示时间， f_f 是体积力矢量。 ρ_f 是流体密度， v 是流体速度矢量， τ_f 是剪切力张量，可表示为：

$$\tau_f = (-p + \mu \nabla \cdot v) I + 2\mu e \quad (1-3)$$

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

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：

$$\rho_s \ddot{d}_s = \nabla \cdot \sigma_s + f_s \quad (1-4)$$

其中， ρ_s 是固体密度， σ_s 是柯西应力张量， f_s 是体积力矢量， \ddot{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, 所以在流固耦合交界面处, 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, 通过流固交界面 (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。

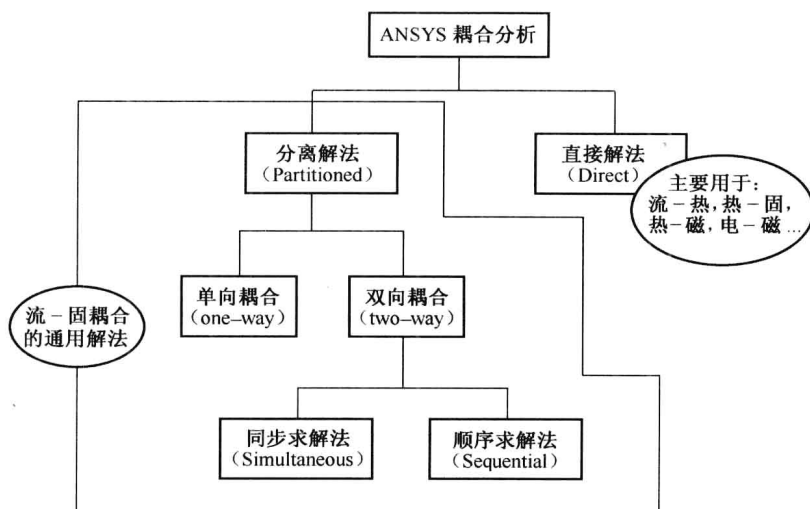


图 1-3 ANSYS 耦合分析分类

1.2.1 单向流固耦合分析

单向流固耦合分析指耦合交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。

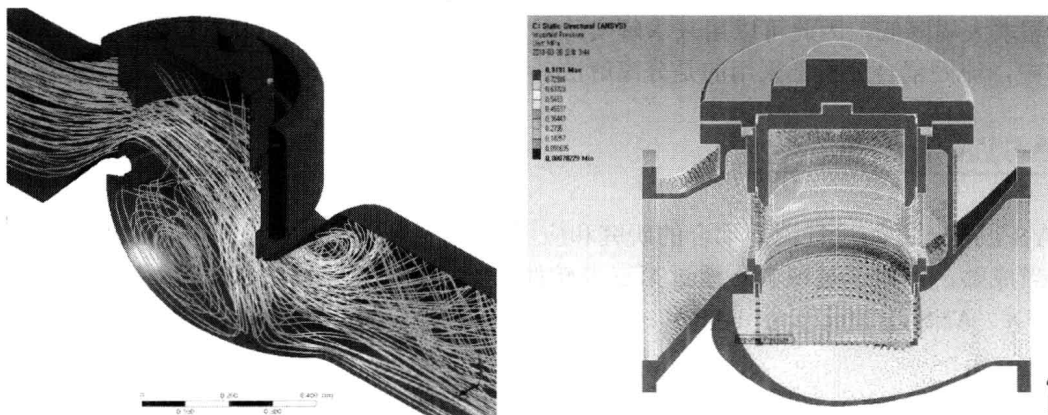


图 1-4 典型的单向耦合分析（阀门结构分析）

另外，已知运动轨迹的刚体对流体影响分析在某种程度上也可以看作是一种单向耦合分析。如汽车通过隧道时对隧道内部气流的影响分析，快启阀在开启过程中对流体流动的瞬时影响分析等。由于固体运动已知，且固体变形忽略不计，所以此类问题一般可以单独在 CFD 求解器中完成，但是运动轨迹需要通过用户自定义函数设定。

1.2.2 双向流固耦合分析

双向流固耦合分析是指数据交换是双向的，也就是既有流体分析结果传递给固体结构分析，又有固体结构分析的结果（如位移、速度和加速度）反向传递给流体分析。此类分析多用于流体和固体介质密度比相差不大或者高速、高压下，固体变形非常明显以及其对流体的流动造成显著影响的情况。常见的分析有挡板在水流中的振动分析、血管壁和血液流动的耦合分析（见图 1-5）、油箱的晃动和振动分析等。一般来讲，对大多数耦合作用现象，如果只考虑静态结构性能，采用单向耦合分析便足够，但是如果考虑振动等动力学特性，双向耦合分析必不可少，也就是说双向耦合分析很多是为了解决振动和大变形问题而进行的，最典型的例子莫过于深海管道的激振问题。同理，如前所述，塔吊在强风中的静态结构分析属于单向耦合分析，但是如果考虑塔吊在强风中的振动情况，就需要采用双向耦合进行分析。

ANSYS 提供两种类型的求解器来求解双向流固耦合分析，分别是多场求解器 MFS - single code 和多场求解器 MFX - multiple code（见图 1-6）。前者主要基于 ANSYS FLOTRAN 开发，在 ANSYS Mechanical APDL 中单独使用，多用于一些非常简单的小模拟分析。后者基于 ANSYS CFX 开发，旨在联合 ANSYS Mechanical（或 APDL）和 CFX，是比较形象的“耦合”求解器，可用于解决大规模复杂模型。因为不是采用直接耦解法，所以两种多场求解器都需要迭代求解，不同的是，MFS 只有顺序求解方式（sequential），即指定流固场求解顺序，依次求解；而 MFX 有两种方式，即同步求解（simultaneous）和顺序求解（sequential），可设定固体计算域和流体计算域，分别使用 ANSYS 和 CFX 同时求解，也可以设定二者的优先级，按顺序求解，直到达到收敛标准或者设定的最大迭代数。

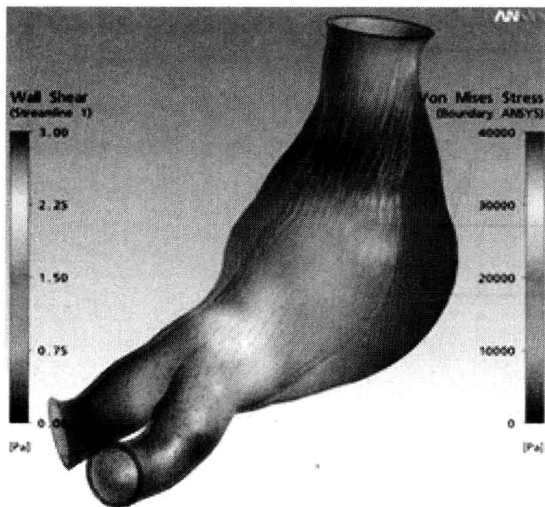


图 1-5 典型的双向耦合分析（动脉瘤分析）

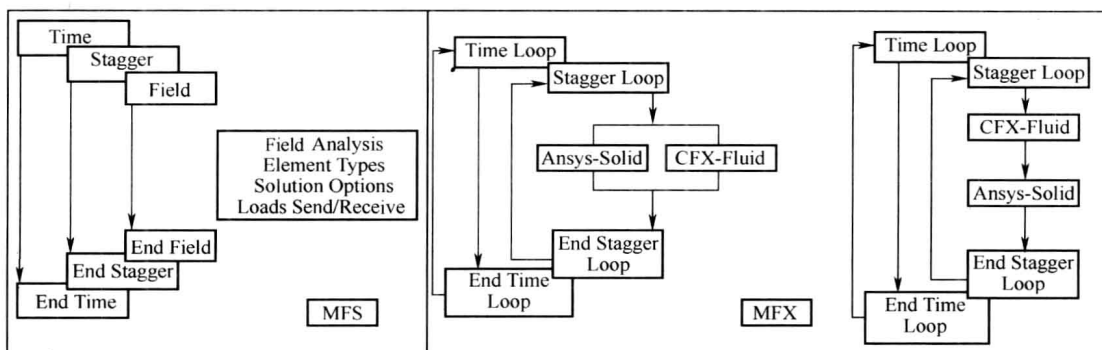


图 1-6 ANSYS 多场求解器求解程序（MFS & MFX）

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交界面相互交换传递。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。

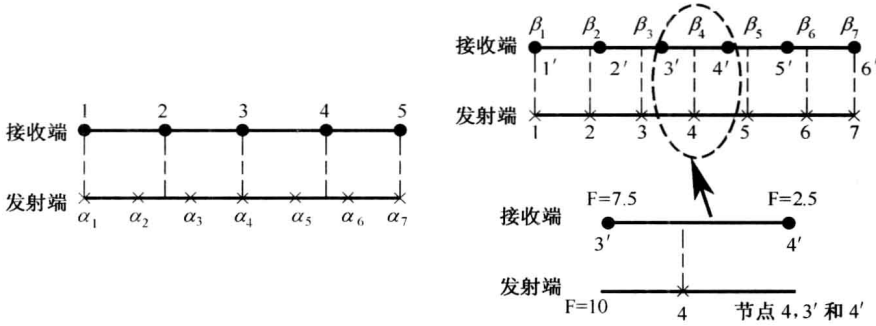


图 1-7 两种数据传递过程示意图

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交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** 方法会通过在不对应区域设置 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。

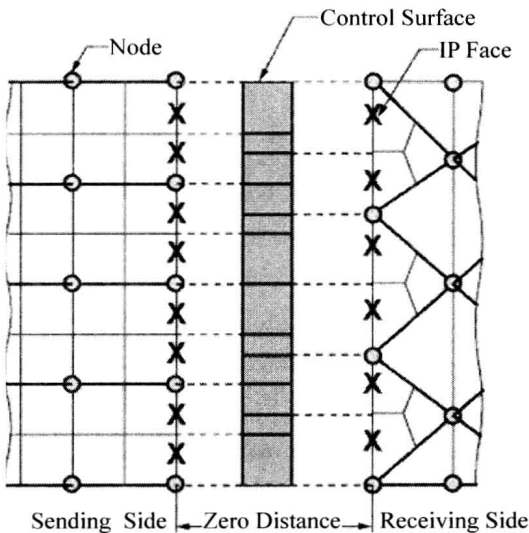


图 1-8 MFX 中 conservative 插值法示意图

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）。

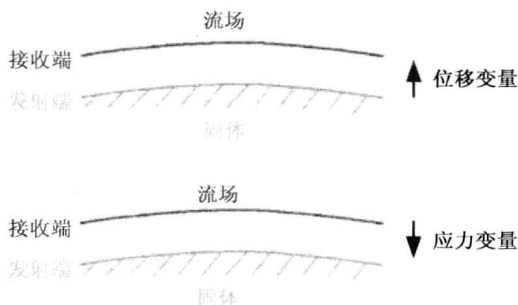


图 1-9 流固耦合的网格映射

由于各场各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