

流固耦合数据的 界面非线性降维传递

李立州 著



科学出版社

流固耦合数据的 界面非线性降维传递

李立州 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

流固耦合界面网格间的数据传递是流固耦合数值分析方法实现的重要环节。现有的流固耦合数据传递方法由于受到耦合面弯曲、网格不匹配、网格密度大小等因素的影响,数据传递精度不高,进一步影响了流固耦合数值分析的精度。本书着重从耦合面和耦合数据空间非线性的全新角度讨论流固耦合数据传递问题,通过大量的算例阐述耦合面和耦合数据空间非线性对耦合数据传递精度的影响,在此基础上将非线性降维理论和方法引入流固耦合数据传递,建立了将空间耦合面降维投影到平面空间的插值思想,以消除空间非线性和网格不匹配等对流固耦合数据传递精度和鲁棒性的影响。

本书可供飞行器、船舶、流体机械和高层建筑等领域的研究人员参考,也可作为高等院校航空航天、发动机设计、流体机械、风力发电、机械设计、武器设计、桥梁设计、船舶设计和高层建筑设计等相关专业研究生和高年级本科生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

流固耦合数据的界面非线性降维传递/李立州著. —北京:科学出版社, 2018. 9

ISBN 978-7-03-058814-2

I. ①流… II. ①李… III. ①耦合-研究 IV. ①O441

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 213250 号

责任编辑:朱英彪 亢列梅 赵晓廷 / 责任校对:王萌萌

责任印制:张 伟 / 封面设计:蓝正设计

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 9 月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2018 年 9 月第一次印刷 印张: 13 1/4

字数: 264 000

定价: 88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

流固耦合主要描述流体和固体之间相互作用的现象。在流体与固体共同构成的系统中,流体与固体之间发生相互作用,固体在流体作用下产生变形或运动,而固体的变形和运动反过来又影响流体的形状和运动特征。正是流体和固体的这种非线性相互作用,产生了形形色色的流固耦合现象。流固耦合引发的安全问题直接影响工程的安全性、经济性、可靠性和耐久性,有时甚至会引起灾难性后果。因此,近年来流固耦合问题得到了广泛的关注。

流固耦合数值求解方法是流固耦合研究的主要方法。众所周知,在固体力学中习惯采用运动坐标系的 Lagrange 方法,而在流体力学中更多地使用 Euler 方法。在流固耦合面上,固体和流体模型的网格节点分布迥异,在分析时不得不在模型之间进行耦合数据的插值传递,因此,适当的耦合数据插值传递方法是保证流固耦合分析精度的重要前提。流固耦合数据的插值传递对研究人员的知识结构要求较高,不仅需要熟悉固体力学、流体力学和动力学等基础力学知识,还要对计算力学、网格生成方法、计算方法和程序设计等非常熟悉,这样才能设计出适当的流固耦合数据插值方法。本书对这一问题进行了梳理,并根据相关研究成果给出了一些解决方法。

2003~2007 年作者在岳珠峰教授和吕震宙教授指导下开展博士研究工作,期间发现对于粗网格的涡轮叶片模型,几乎所有的流固耦合数据插值传递算法的精度都不高或者鲁棒性不好。为解决这一问题,作者提出了耦合面参数空间投影插值传递方法,其思想是将耦合面投影到平面参数空间,并在该平面参数空间中进行耦合数据的插值,该方法很成功。博士毕业后,作者继续从事相关方面的研究,总感觉意犹未尽,直到 2012 年偶然读到 Tenenbaum 的著名论文 *A Global Geometric Framework for Nonlinear Dimensionality Reduction*,豁然开朗,原来参数空间投影插值传递方法不是碰巧,而是有着数学上的机理。为此,通过几年在多维数据分析、非线性降维和流形学习等方面的研究,作者发表了论文 *An Enhanced 3D Data Transfer Method for Fluid—Structure Interface by ISOMAP Nonlinear Space Dimension Reduction*,以此解释了自己的疑惑,也解决了流固耦合插值方法的疑难。本书整理和总结了这一研究过程中的成果,以及在流固耦合数据传递方面的经验和教训,目的是给从事流固耦合研究和应用的相关人员提供参考,使他们在流固耦合插值这个复杂的问题上少走弯路。

本书从传统流固耦合插值方法次第展开介绍,逐渐阐述了空间非线性对流固

耦合数据插值传递问题的影响,详细介绍了参数空间投影插值传递方法、基于局部坐标投影的耦合面参数空间插值法、基于耦合面非线性降维的数据插值方法等一系列方法;通过实例展示了这些方法在消除耦合面空间非线性、将网格不匹配弱化为网格不一致问题、提高流固耦合数据传递的准确性和鲁棒性等方面的能力。

感谢岳珠峰教授、吕震宙教授以及我的好友在研究中给予的支持,感谢研究生刘明敏、杨明磊、罗骁和张新燕在本书撰写过程中提供的帮助。

本书相关内容的研究得到了航空推进技术验证计划(APTD)、国家高技术研究发展计划(2006AA04Z401)和国家自然科学基金(51775518)的支持,在此一并表示感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在不妥之处,恳请读者批评指正。

作 者

2018年2月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 流固耦合现象	1
1.2 流固耦合力学	3
1.3 流固耦合力学的求解方法	4
1.3.1 流固耦合力学的基本方程	4
1.3.2 流固耦合数值求解方法	6
1.4 流固耦合数据插值传递方法	8
1.4.1 一致插值法	9
1.4.2 投影插值法	11
1.5 空间非线性和流固耦合数据插值传递	14
1.6 小结	17
参考文献	17
第 2 章 耦合面空间非线性对流固耦合数据传递精度的影响	23
2.1 流固耦合数据插值方法	23
2.1.1 最邻近插值法	23
2.1.2 多项式插值法	24
2.1.3 反距离加权法	26
2.1.4 多重二次曲面法	27
2.1.5 无限平板样条插值法	28
2.1.6 薄板样条插值法	28
2.1.7 径向基插值法	29
2.1.8 克里金插值法	30
2.1.9 等参元逆变换插值法	31
2.1.10 非均匀 B 样条插值法	32
2.1.11 投影插值法	33
2.1.12 常体积转换法	34
2.1.13 公共细分网格法	35
2.2 耦合面空间非线性对耦合数据传递的影响	35
2.3 流固耦合面降维投影的插值方法	37

2.4 耦合面空间非线性对耦合数据传递精度影响的验证	39
2.4.1 粗网格下各插值方法的比较	40
2.4.2 细网格下各插值方法的比较	45
2.5 小结	48
参考文献	49
第3章 压力梯度和网格密度对流固耦合数据传递精度的影响	52
3.1 研究模型	52
3.2 压力梯度对流固耦合数据传递精度的影响	54
3.2.1 压力梯度对耦合数据传递影响的研究模型	54
3.2.2 压力梯度对现有三维空间插值法精度的影响	57
3.2.3 压力梯度对耦合面降维投影插值法精度的影响	61
3.3 网格密度对流固耦合数据传递精度的影响	66
3.3.1 不同网格密度的流体网格	66
3.3.2 不同网格密度的固体网格	72
3.3.3 不同密度流场和固体网格的配对模型	73
3.3.4 网格密度对现有三维空间插值法精度的影响	74
3.3.5 网格密度对耦合面降维投影插值法精度的影响	90
3.4 小结	105
参考文献	105
第4章 参数空间投影插值传递方法	106
4.1 耦合面向二维参数空间投影的方法	106
4.1.1 投影网格向二维参数空间的映射关系	107
4.1.2 耦合面任意节点向二维参数空间的投影	107
4.1.3 学科节点和投影网格单元位置关系的判别	109
4.2 流固耦合数据参数空间插值传递方法	113
4.3 算例分析	115
4.4 小结	120
参考文献	120
第5章 基于局部坐标投影的耦合面参数空间插值法	121
5.1 基于局部坐标的空间耦合面平面投影方法	121
5.2 基于局部坐标投影的耦合数据平面参数空间插值	123
5.3 基于局部坐标降维投影的叶片流固耦合数据插值	124
5.3.1 基于局部坐标的叶片耦合面降维投影方法	124
5.3.2 基于局部坐标降维投影的叶片流固耦合数据插值方法	125
5.3.3 涡轮叶片耦合数据插值的算例	127

5.3.4 误差分析	129
5.4 基于局部坐标降维投影的弹体参数空间插值方法	131
5.4.1 基于局部坐标的弹体耦合面降维投影方法	131
5.4.2 基于局部坐标降维投影的弹体参数空间插值方法的步骤	132
5.4.3 基于局部坐标投影的弹体压力参数空间插值	134
5.5 小结	137
参考文献	137
第6章 基于等距映射的耦合面非线性降维插值方法	138
6.1 非线性降维理论	138
6.2 等距映射法的基本原理	140
6.3 基于等距映射的耦合面非线性降维插值	141
6.3.1 基于等距映射的耦合面非线性降维插值方法的步骤	141
6.3.2 基于等距映射的耦合面非线性降维插值方法的算例	142
6.3.3 与现有插值方法的比较	149
6.4 小结	153
参考文献	153
第7章 耦合面非线性降维方法比较	154
7.1 高维数据降维理论	154
7.2 线性降维方法	155
7.2.1 主成分分析法	155
7.2.2 线性局部切空间排列法	156
7.2.3 局部保留投影法	157
7.2.4 邻域保持嵌入法	158
7.2.5 多维尺度分析法	159
7.3 非线性降维方法	159
7.3.1 随机距离嵌入法	159
7.3.2 核主成分分析法	160
7.3.3 扩散映射法	161
7.3.4 拉普拉斯特征映射法	162
7.3.5 等距映射法	162
7.3.6 基于界标点的等距映射法	163
7.3.7 局部线性嵌入法	163
7.3.8 Hessian 局部线性嵌入法	165
7.3.9 局部切空间排列法	165
7.4 降维方法用于耦合面的平面展开	166

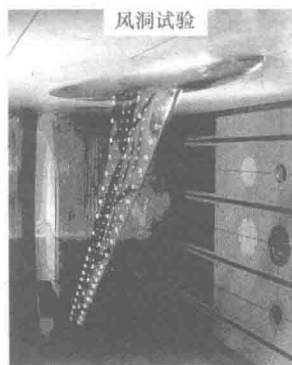
7.5 小结	170
参考文献	170
第8章 基于耦合面非线性降维的数据插值方法	173
8.1 基于耦合面非线性降维的数据插值方法的步骤	173
8.2 涡轮叶片耦合面插值传递	174
8.2.1 涡轮叶片耦合面的降维插值	174
8.2.2 涡轮叶片耦合面降维方法的效率	188
8.2.3 涡轮叶片耦合面的压力插值传递	189
8.2.4 涡轮叶片压力插值误差	196
8.3 小结	200
参考文献	201
后记	203

第 1 章 绪 论

1.1 流固耦合现象

流固耦合 (fluid-solid interaction, FSI) 是流体与固体之间相互作用的现象^[1-5]。在流体和固体共同构成的耦合系统中,流体与固体之间相互作用。固体在流体作用下产生变形,而固体的变形反过来又影响流体域的形状和流体的运动特征。正是流体和固体的这种非线性相互作用产生了形形色色的流固耦合现象,如图 1.1 所示。

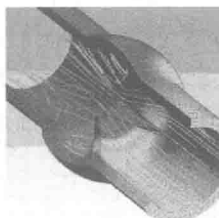
计算得到的变形和压力分布



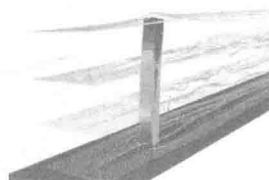
(a) 机翼抖振和颤振



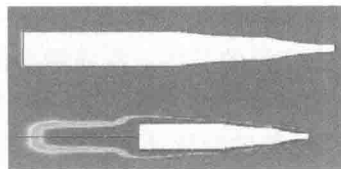
(b) 安全气囊



(c) 血液和心脏瓣膜



(d) 高层建筑



(e) 水下枪弹发射

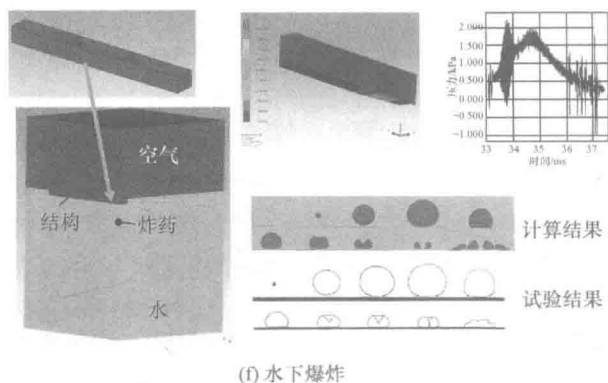


图 1.1 流固耦合现象

根据耦合方式,流固耦合问题可分为两大类^[1,2]。第一类流固耦合问题是指流体和固体部分或者全部相互重叠在一起的现象,例如,土壤渗流(孔隙流动)问题,水在土壤的孔隙中流动,导致土壤剪切强度下降,水和土壤一起移动,山体或堆土坝因此坍塌,危害十分严重。第二类流固耦合问题是流体和固体相互作用只发生在两者的公共耦合界面上的现象,如压气机叶片的抖振和颤振、汽轮机叶片的受迫振动、风力发电机和水轮机的各种流体弹性振动^[4]、输液管道的振动、机翼的气动弹性抖振和颤振^[5]、桥梁受海浪冲击后的变形、水利设施和海洋工程结构的水弹性振动、含液容器的晃动、水下爆炸冲击、高层大跨建筑物和构筑物的风致振动等问题^[2]。第二类流固耦合问题也是工程实践中经常遇到的问题,其危害在于:在流固耦合振动过程中固体会不断地从流体中吸收能量,当固体吸收的能量大于其能够耗散的能量时,流固耦合系统就会变得不稳定,系统是发散的,会产生大幅剧烈振荡,而这种大幅剧烈振荡会使固体结构在短时间内裂断,后果极为严重;当固体吸收的能量小于其能够耗散的能量时,小幅持续振荡会引起结构的疲劳,引发突然的脆性破坏;当流体的振荡频率与固体结构的固有频率相同时,流体和固体也会发生共振,产生灾难性后果,例如,F/A-18S 双垂尾的抖振就严重影响了垂尾的使用寿命。

总之,在不同工程领域,如土木、航空航天、船舶、动力、海洋、石化、机械、核动力、地震地质和生物工程等,流固耦合都可能会引发安全问题,直接影响工程的安全性、经济性、可靠性和耐久性,有时甚至会引起灾难性后果。近年来,流固耦合问题的研究得到了广泛的关注。流固耦合问题涉及流体力学、固体力学、动力学、传热学和计算力学等多个学科,具有学科交叉的性质,研究难度大,而随着工程技术的不断发展,新的问题还在不断地涌现,因此,深入开展流固耦合研究有着重要的意义。

1.2 流固耦合力学

流固耦合力学是研究流固耦合现象的一门科学,是流体力学与固体力学交叉而生的力学分支,它关注固体和液体两相介质之间的交互作用以及这种交互作用对流体和固体产生的影响^[1-5]。图 1.2 给出了流固耦合问题中各种力之间的相互影响关系。其中,两个大圆分别画出了流体和固体两相,在这两个大圆周相交的地方表示固体和流体两相的耦合。通过固体和流体的耦合,流体力影响固体运动,而固体的运动又反过来影响流体的流动特征。

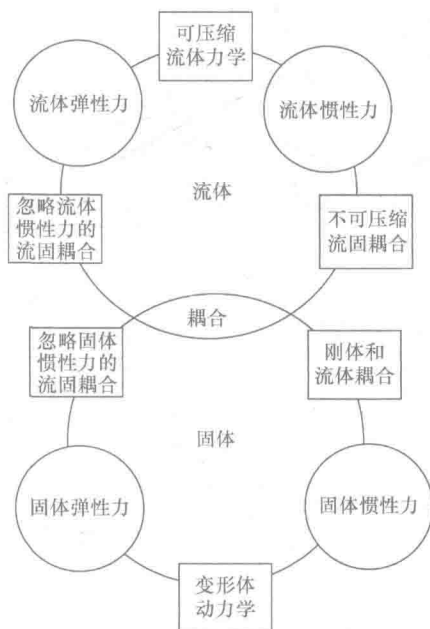


图 1.2 流固耦合的力学关系^[1]

流固耦合力学的主要特征是流体力和固体耦合界面的运动事先未知,只有整个流固耦合系统求解后,才能给出它们的解。若没有这一特征,流固耦合问题将失去耦合的性质。例如,若流固耦合界面的流体力或固体结构的运动规律已知,则耦合将会消失,原来的流固耦合系统将被解耦为单一固体在给定表面力下的动力问题及单一流体在给定边界条件下的流体力学边值或初值问题^[1]。

在最一般的情况下,流体与固体通过耦合界面相互作用,同时受各自的弹性力和惯性力影响,但问题过于复杂,求解异常困难。在实际工程问题中,常根据研究目的的不同将流固耦合的着眼点放在流体或固体上,有针对性地将问题做相应的简化,从而形成各种相对简单、便于求解且能反映问题的流固耦合问题(图 1.2)。例如,在

研究水和结构长期相互作用时可以不考虑水的压缩性,就形成了不可压流体和固体相互作用的流固耦合问题;类似地,若忽略结构的弹性变形就形成了刚体和流体相互作用的流固耦合问题,例如,在航空中成为一门独立学科的飞行力学,航空器就简化成了一个六自由度的刚体;当然求某些问题时也可以忽略流体或固体的惯性效应,如在静气动弹性力学中的机翼的扭转扩大、副翼反效等问题就是忽略结构惯性力的流固耦合问题。至于忽略流体惯性的流固耦合问题,其本质是将流体视为一个可压缩弹簧——空气弹簧。

1.3 流固耦合力学的求解方法

1.3.1 流固耦合力学的基本方程

本书主要讨论界面耦合的流固耦合问题。这类问题可以用三组方程来描述,分别是流体力学方程、弹性力学基本方程和耦合方程^[1-5]。

1. 流体力学方程

流体力学方程一般包括动量守恒方程、能量守恒方程、质量守恒方程和气体状态方程。

(1) 动量守恒方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho u \vec{U}) = \operatorname{div}(\mu \cdot \operatorname{grad}(u)) - \frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho v \vec{U}) = \operatorname{div}(\mu \cdot \operatorname{grad}(v)) - \frac{\partial p}{\partial y} \\ \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho w \vec{U}) = \operatorname{div}(\mu \cdot \operatorname{grad}(w)) - \frac{\partial p}{\partial z} \end{cases} \quad (1.1)$$

式中, $\operatorname{div}(\vec{U}) = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}$ 为矢量 $\vec{U} = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k}$ 的散度; u, v, w 为流速 $\vec{U}$ 在 x, y 和 z 坐标方向上的分量; $\operatorname{grad}(u) = \frac{\partial u}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial u}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial u}{\partial z}\vec{k}$ 为 u 在某一点的梯度; $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ 为单位方向向量; ρ 为流体密度; p 为气体压力。

(2) 能量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho T \vec{U}) = \operatorname{div}(\lambda \cdot \operatorname{grad}(T)) - p \cdot \operatorname{div}(\vec{U}) + \varphi \quad (1.2)$$

式中, T 为气体热力学温度; λ 为导热系数。

$$\varphi = \mu \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right\} + \lambda (\operatorname{div}(\vec{U}))^2 \quad (1.3)$$

(3) 质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{U}) = 0 \quad (1.4)$$

(4) 气体状态方程:

$$p = \rho RT \quad (1.5)$$

式中, R 为普适气体常数。

2. 弹性力学基本方程

描述固体力学性能的弹性力学基本方程有平衡微分方程、几何方程和物理方程。

(1) 平衡微分方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + X = 0 \\ \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + Y = 0 \\ \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + Z = 0 \end{cases} \quad (1.6)$$

(2) 几何方程:

$$\begin{cases} \epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \\ \epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \\ \epsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \\ \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \gamma_{zx} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \end{cases} \quad (1.7)$$

(3) 物理方程:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)] \\ \varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z)] \\ \varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)] \\ \gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G} = \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{xy} \\ \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G} = \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{yz} \\ \gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G} = \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{zx} \end{array} \right. \quad (1.8)$$

式(1.6)~式(1.8)中, $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ 为描述固体内部应力的量; $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$ 为描述固体内部应变的量; u, v, w 为描述固体位移的量; X, Y, Z 为固体体积力在 x, y, z 三个坐标轴上的分量; E 为弹性模量; G 为剪切模量; μ 为泊松比。

3. 耦合方程

流体和固体的耦合关系可由界面的耦合方程来描述,其基本要求是在流场和固体耦合面上每一点均满足^[3]

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{q}_f = \vec{q}_s \\ \vec{p}_s = \vec{p}_f \end{array} \right. \quad (1.9)$$

式中, $\vec{q}_s$ 为固体耦合边界位移向量; $\vec{p}_s$ 为固体耦合边界载荷向量; $\vec{q}_f$ 为流体耦合边界位移向量; $\vec{p}_f$ 为流体耦合边界载荷向量。

以上三组方程同时有流体域和固体域,未知变量包括描述流体现象、描述固体现象和描述两者耦合关系的变量。它们具有以下特征。

(1) 必须同时求解流体域和固体域。

(2) 在进行流体域或固体域求解时,无法显式地消去描述流体运动的独立变量或描述固体运动的独立变量,导致流固耦合问题的求解非常困难。

1.3.2 流固耦合数值求解方法

随着计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)、计算结构力学(computational structural mechanics, CSM)、流固耦合分析理论和计算技术的不断发展,计算流体力学与计算结构力学相结合的流固耦合数值求解方法成为流固耦合研究的主要方法,也成为正确理解复杂流固耦合现象和指导工程实践的重要

手段。

流固耦合问题涉及流体力学和固体(结构)力学两个相互耦合的学科,其数值求解方法研究经历了从简单到复杂的过程,现在大致可分为三类^[3,5]:直接耦合法(完全耦合法)、紧耦合法(强耦合法)和松耦合法。

直接耦合法(图 1.3(a))把流场和结构放在一个控制方程中,在同一时间步内统一对流场和结构场进行求解,因此不需要在流固耦合面上传递数据。直接耦合法的思想相对容易理解,计算结果也相对准确。在直接耦合法中,流场和结构被统一到同一个模型中,不能使用现有的计算流体力学和计算结构力学方法,因此,求解过程非常复杂,需要研究全新的理论并重新编写数值分析程序。另外,固体和流体刚度的巨大差异,容易导致由结构方程的矩阵系数过大引起的流固耦合方程组奇异问题,因此直接耦合法存在严重的收敛问题。现今虽然相关的理论和技术都有所突破,但用直接耦合法求解流固耦合问题还存在相当的困难。

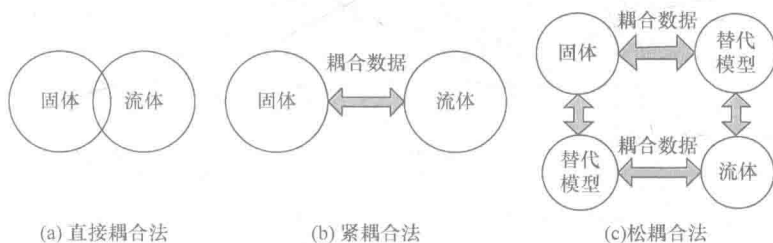


图 1.3 直接耦合法、紧耦合法、松耦合法

紧耦合法(图 1.3(b))是分别建立流体和固体的控制方程,通过耦合迭代和学科模型之间的耦合数据(载荷和位移)传递来实现耦合问题的求解。其中,载荷传递是将流场分析得到的温度和压力传递到结构分析模型,这里的载荷泛指温度和气动力等不会引起流体域和结构域形状改变的耦合量;位移传递是根据结构变形调整流场模型的耦合面形状,这里的位移是指引起流体域和结构域形状改变的耦合量,通常包括结构变形、速度和加速度等。在紧耦合法中,固体域和流体域分开求解,流场模型和结构模型相对独立,可以避免因结构方程的矩阵系数过大导致的流固耦合方程组奇异问题;流场和结构可以按照学科自身的要求使用现有的理论、算法和成果,充分利用现有计算流体力学和计算结构力学的优势,建模过程相对容易,因此紧耦合法对流固耦合问题的研究有着重要的价值。

松耦合法(图 1.3(c))是将流固耦合问题进行解耦分析,分别建立流场模型和结构模型,并通过模型间数据传递和迭代实现耦合问题的求解。但在求解某一个学科时,另外的学科常采用经验模型、实验模型、简化模型、替代模型、降阶模型等加以简化,是一种间接耦合的方法。例如,在机翼颤振研究中一般采用线性化理论,具体的方法是计算结构的主要振动模态,假定结构以其中一个模态参与流固耦

合振动,分析该模式下机翼的颤振边界;在飞机飞行性能研究中对流场进行线性化处理,将飞行运动简化为准静态求解。在松耦合合法中,固体域和流体域分开求解,建模过程相对容易。

采用直接耦合合法需要重新研究和编写程序,而紧耦合合法和松耦合合法仅仅需要开发一些接口,因此在实践中紧耦合合法和松耦合合法应用更为广泛。

1.4 流固耦合数据插值传递方法

在过去几十年里,计算流体力学、计算结构力学、计算机软件与硬件都取得了快速的发展。在计算结构力学方面,非线性有限元分析技术已十分完善。在计算流体力学中,非线性纳维-斯托克斯方程求解的有限体积法、有限元法、有限差分法等的发展也十分迅速。计算流体力学与计算结构力学相结合的紧耦合合法已经成为解决流固耦合问题的主要方法。紧耦合合法和松耦合合法求解遇到的最大困难在于流场和固体求解体系的统一,即耦合界面的协调问题^[6-11]。

众所周知,在固体力学中习惯采用运动坐标系的 Lagrange 方法,该方法着眼于质点,对物质的形貌描述准确、清楚。在流体力学中则更多地使用 Euler 方法,其着眼点是空间上的速度、密度、压力等状态,不是物质本身。这两种描述运动状态的体系本质上是相同的,且可以相互转换,但对于大运动和非线性问题,其转换过程十分复杂,尤其是在流固耦合分析中,Lagrange 体系的节点随固体的运动而移动,Euler 体系的节点不随流体的移动而移动。当结构发生振动时,在流固耦合界面上就会出现流体模型和固体模型的分离问题,如何协调耦合界面是流固耦合分析的关键问题之一。另外,由于流体力学和固体力学自身的特点,它们所采用的网格模型在耦合界面上节点分布迥异,在协调流体和固体的耦合关系时不得不在网格模型之间进行耦合界面上节点的插值。适当的流固耦合插值传递方法是保证流固耦合分析精度的重要前提^[6-11]。

网格是计算流体力学和计算结构力学的基础。为实现基于计算流体力学和计算结构力学的流固耦合求解,需要在流场和结构网点之间进行耦合数据传递。当流场和结构的耦合面网格节点一致^[12]时,流场和结构模型的网格与节点对应,只需要在对应网格和节点之间传递耦合面数据(图 1.4(a));当流场和结构的界面网格不一致时,耦合数据传递需要在网格之间进行插值,这将在流固耦合分析中引入额外的误差(图 1.4(b))。实践中,流场和结构界面网格节点通常是不一致的,这是因为流场分析主要关注几何外形和细节,而结构分析主要关注高应力区,导致两者网格加密位置和加密方式不同,通常流场网格的密度比结构网格大得多;另外,在流固耦合求解过程中流场和结构的网格随着结构的变形而相互错动,原来一致的网格也可能变得不一致了。不一致的网格使得流体计算不能直接使用结构网格