

爆炸冲击载荷作用下流固耦合数值模拟¹⁾

郭攀* 刘君† 武文华*²⁾

* (大连理工大学运载工程与力学学部工程力学系, 工业装备结构分析国家重点实验室, 大连 116024)

† (大连理工大学运载工程与力学学部航空航天学院, 工业装备结构分析国家重点实验室, 大连 116024)

摘要 建立了基于位移相等条件的流固耦合数值模拟程序框架, 通过串联弱耦合方式对爆炸冲击波作用下流固耦合效应进行数值模拟. 其中非线性固体位移场采用基于 Lagrange 方法描述的时域间断伽辽金有限元方法进行处理. 基于修正弹簧近似的非结构动网格新技术, 非定常流场采用格心格式的有限体积方法进行求解. 数值模拟结果表明: 该文所发展的弱耦合分析程序在流固耦合数值模拟过程中具有可靠的计算精度. 同时, 程序对于爆炸强间断气动冲击载荷冲击作用下固体变形引起流场的反射和叠加效应, 以及流场变化引起复杂的固体响应具有良好的耦合求解能力.

关键词 时域间断伽辽金有限元法, 爆炸冲击波, 有限体积法, 非结构动网格

中图分类号: TK121 文献标识码: A DOI: 10.6052/0459-1879-12-118

引言

爆炸现象广泛存在, 诸如军事领域中各类军事活动、恐怖事件, 工业生产领域的工程爆破、爆炸焊接、瓦斯爆炸等以及生活当中日前频发的燃气爆炸事件. 其中爆炸往往造成建筑物和结构的变形与破坏, 进而给人类的生命财产带来了危害. 爆炸载荷作用下流固耦合问题已成为研究的热点, 是目前学术界的前沿课题之一.

Taylor^[1] 最早采用一维的 Taylor 模型对流固耦合现象进行了研究. Rabczuk 等^[2] 采用简化的模型对冲击载荷作用下的流固耦合进行了数值模拟, 与完全流固耦合相比, 取得了较好的结果. Subramaniam 等^[3] 通过任意拉格朗日-欧拉 (arbitrary Lagrangian-Eulerian, ALE) 方法对爆炸冲击作用下结构弹性变形进行了数值模拟, 研究了固体材料参数对冲击波流场的影响. 在冲击载荷作用下的流固耦合数值模拟方面, 与国外的研究相比, 国内的研究目前还相对滞后, 但也取得了不少研究成果^[4-5].

目前流固耦合的主要数值模拟方法有 ALE 方法、无网格方法等. 在流体采用 ALE 方法, 固体基于 Lagrange 坐标系下的有限元方法研究基础上, 本文发展了自主流固耦合数值模拟程序框架, 对爆炸冲击载荷作用下的流固耦合作用进行数值分析.

1 流固耦合分析

目前流固耦合问题的研究方法主要有强耦合和弱耦合. 前者将流域、固体域和耦合作用构造在同一控制方程中, 在单一时间步内对所有变量同时求解; 后者在固体域和流域中分别求解, 通过搭建数据交换平台交换信息, 实现流固耦合. 弱耦合能充分发挥计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD)、计算固体动力学 (computational structural dynamics, CSD) 各自求解优势进行学科交叉, 在应用上有独特优势^[5-6].

在程序实现方面, 可以通过并联与串联的方式实现弱耦合. 本文基于位移相等条件采用固体调用流体程序串联方式对流固耦合问题进行模拟分析, 计算流程如图 1 示. 其中非线性固体位移场采用基于 Lagrange 方法描述时域间断伽辽金有限元法 (time discontinuous Galerkin finite element method, DGFEM) 进行处理. 非定常流场基于刘君等^[6] 提出的修正弹簧近似的非结构动网格新技术采用格心格式的有限体积方法进行求解.

2 弹塑性问题的隐式求解方法

在非线性结构动力学问题分析中, 时间步 I_n 的

2012-05-03 收到第 1 稿, 2012-12-06 收到修改稿.

1) 国家重点基础发展规划 (2011CB013705), 国家重大专项 (2011ZX05026-02) 和创新研究群体研究基金 (50921001) 资助项目.

2) 武文华, 副教授, 主要研究方向: 计算力学. E-mail: lxuhua@dlut.edu.cn

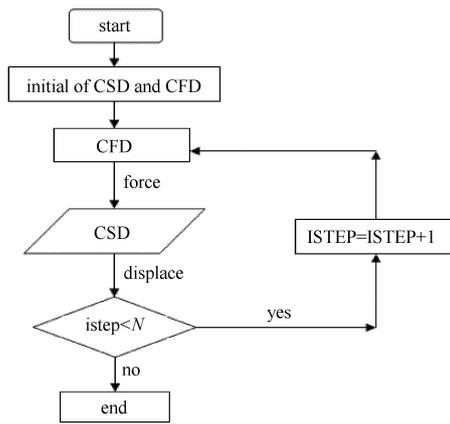


图 1 流固耦合计算流程图

Fig. 1 Flow chart of fluid-structure interaction modeling

弹塑性 DGFEM 弱形式表示为 [7]

$$\int_{I_n} \delta \mathbf{v}^T (\mathbf{M} \dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C} \mathbf{v}(t) + \sum_{j=1}^{N_e} \int_{\Omega_j} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma}(t) d\Omega_j - \mathbf{f}^e) dt + \int_{I_n} \mathbf{K}(t_n) \delta \mathbf{d}(\dot{\mathbf{d}} - \mathbf{v}) dt + \delta \mathbf{d}_n^T \mathbf{K}(t_n) [\mathbf{d}_n] + \delta \mathbf{v}_n^T \mathbf{M} [\mathbf{v}_n] = 0 \quad (1)$$

其中, $\mathbf{M} = \int_{\Omega} \mathbf{N}^T \mathbf{N} d\Omega$, $\mathbf{C} = \int_{\Omega} 2\mathbf{N}^T \mathbf{N} d\Omega$, $\mathbf{f}^e(t) = \int_{\Omega} \mathbf{N}^T \mathbf{q} d\Omega$, $\mathbf{K}(t_n)$ 为 n 时刻弹塑性切线刚度矩阵, $\boldsymbol{\sigma}(t)$ 为应力向量, \mathbf{q} 为载荷向量, \mathbf{N} 为形函数, \mathbf{B} 为应变矩阵. 式中由 $\delta \mathbf{d}_n$, $\delta \mathbf{d}_{n+1}$, $\delta \mathbf{v}_n$, $\delta \mathbf{v}_{n+1}$ 的独立变分条件并应用 Newton-Raphson 过程, 可获得弹塑性问题计算的 DGFEM 基本公式

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} + \frac{\Delta t}{6} \mathbf{C} - \frac{\Delta t^2}{12} \mathbf{K}_t & -\frac{\Delta t}{6} \mathbf{C} - \frac{\Delta t^2}{12} \mathbf{K}_t \\ \frac{\Delta t}{2} \mathbf{C} + \frac{\Delta t^2}{3} \mathbf{K}_t & \mathbf{M} + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{C} + \frac{\Delta t^2}{6} \mathbf{K}_t \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \mathbf{v}_n^j \\ \Delta \mathbf{v}_{n+1}^j \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\mathbf{R}_1^j \\ -\mathbf{R}_2^j \end{Bmatrix} \quad (2a)$$

$$\mathbf{d}_n^+ = \mathbf{d}_n^-, \quad \mathbf{d}_{n+1} = \mathbf{d}_n^- + \frac{1}{2} \Delta t (\mathbf{v}_n + \mathbf{v}_{n+1}) \quad (2b)$$

式中, $\mathbf{K}_t = \sum_{l=1}^{N_e} \mathbf{k}_{cp}^l$ 为当前时刻的总弹塑性切线刚度矩阵, \mathbf{k}_{cp}^l 是第 l 个单元切线刚度阵. $\mathbf{R}_1^j, \mathbf{R}_2^j$ 为残数向量. $\mathbf{d}_n^+, \mathbf{d}_{n+1}^-, \mathbf{v}_n^+, \mathbf{v}_{n+1}^-$ 分别表示 τ_n^+ 和 τ_{n+1}^- 时刻的节点位移值和位移的时间导数.

时间步 I_n 的迭代求解过程为: 当迭代步 $j = 0$, 由弹性矩阵计算预测值 $\mathbf{v}_n^0, \mathbf{v}_{n+1}^0, \mathbf{d}_{n+1}^0$; 当迭代步 $j \neq 0$, 采用式 (2) 进行数值求解. 当残数向量满足精度要

求, 迭代收敛, 结束本时间步内的迭代循环, 由式 $\mathbf{v}_n^j = \mathbf{v}_n^{j-1} + \Delta \mathbf{v}_n^j, \mathbf{v}_{n+1}^j = \mathbf{v}_{n+1}^{j-1} + \Delta \mathbf{v}_{n+1}^j, \mathbf{d}_{n+1}^j = \mathbf{d}_n^- + \frac{1}{2} \Delta t (\mathbf{v}_n^j + \mathbf{v}_{n+1}^j)$ 得到下一步的预测值, 并进入下一代步.

3 流体计算数值方法

二维可压缩非定常 Euler 方程可表示为如下的积分形式 [6]

$$\frac{\partial}{\partial t} \iint_{\Omega(t)} \mathbf{Q} dA + \oint_{\partial \Omega(t)} \mathbf{F}(\mathbf{Q}, \dot{\mathbf{x}}) \mathbf{n} dl = 0 \quad (3)$$

$\Omega(t)$ 表示运动的流场区域, $\partial \Omega(t)$ 是其运动边界, x 和 t 为位置坐标和时间, $\dot{\mathbf{x}}$ 和 \mathbf{n} 为网格运动速度向量和控制体边界外法向单位向量, \mathbf{Q} 和 $\mathbf{F}(\mathbf{Q})$ 为守恒变量和对流项, 表达式为

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho e \end{pmatrix}, \quad \mathbf{F}(\mathbf{Q}) \cdot \mathbf{n} = (\mathbf{U} \cdot \mathbf{n}) \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho e \end{pmatrix} + p \begin{pmatrix} 0 \\ n_x \\ n_y \\ a_t \end{pmatrix} \quad (4)$$

其中, $\mathbf{U} = \{u - x_t, v - y_t\}$, $a_t = x_t n_x + y_t n_y$, n_x 和 n_y 表示的 2 个分量, x_t 和 y_t 表示网格运动速度 $\dot{\mathbf{x}}$ 的 2 个分量.

采用格心格式的有限体积方法, 由格林公式求得单元内的变量梯度, 重建单元边界两侧的变量, 形成近似的一维 Riemann 问题. 为保证时间精度, 采用 4 步 Runge-Kutta 方法进行求解. 采用 Venkatakrishnan 通量限制器对流场中物理量间断处可能出现的数值振荡进行抑制. 采用文献 [6] 给出的推广后的顶点弹簧近似方法实现网格变形. 将网格各边线看做弹簧, 节点 i 所受的合力可表示为

$$f_i = \sum_{j=1}^{N_i} f_{ij} \quad (5)$$

其中, f_{ij} 为节点 i 和 j 间的弹簧张力, K_{ij} 为连结节点 i 和 j 的弹簧的倔强系数, x_i 和 x_j 分别是节点 i 和 j 的位置矢量. N_i 是与节点 i 相连的节点总数. 当边界上的点移动后, 通过求解弹簧系统节点受力平衡问题确定网格点的新位置.

4 算例分析

算例 1 为了验证本程序的可靠性, 采用具有微分方程形式 [6] 的一维活塞模型来比较分析. 如图 2 所示, 活塞左侧为均匀静止气体, 右侧为真空, 并与劲度系数为 k 的弹簧相连接, 弹簧右侧固支.

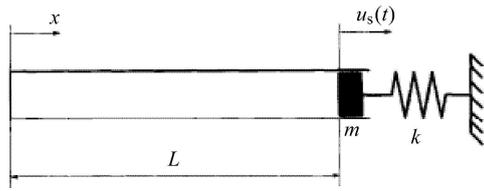


图 2 一维活塞模型

Fig. 2 Piston model of one dimension

采用 Runge-Kutta 方法对活塞运动解析式 $m\ddot{u}_s + ku_s = p_0(1 - \frac{r-1}{2a_0}\dot{u}_s)^{\frac{2r}{r-1}}$ 进行求解. 本文计算的初始无量纲参数为: 密度 $\rho_0 = 1$, 速度 $\dot{u}_s = 0$, 压力 $p_0 = 1/\gamma$, 声速 $a_0 = 0$, 活塞质量 $m = 1$, 劲度系数 $k = 1$. 计算区域的初始无量纲长度 $L = 10$. 流场内部采用三角形网格, 共 2844 个网格点, 5260 个网格单元. 从图 3 中可以看出, 本文方法和解析结果吻合良好, 验证了本文提出的基于位移相等条件的松耦合算法程序的可靠性.

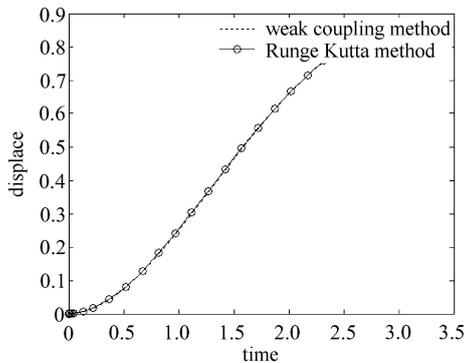


图 3 活塞位移计算结果比较

Fig. 3 Comparison of displacement for piston problem

算例 2, 考虑高压爆炸冲击作用下二维流固耦合问题. 如图 4 所示, 二维流场计算区域长 10m, 宽 0.5m, 左边界和上下两边界均为固壁, 右边界为长 0.5m, 厚 2mm 的靶板. 流场内部采用三角形网格, 共 3547 个网格点, 6738 个网格单元. 靶板共 50 个四边形单元, 102 个节点. 以 $(-0.25\text{ m}, 0.25\text{ m})$ 为中心以 0.15 m 为半径的区域内为 10 个大气压的高压气体. 气体比热容比 γ 为 1.4. 靶板长 0.5 m, 厚 2 mm. 假定变形靶板弹性模量为 59 GPa, 泊松比 0.33, 材料塑性屈服行为服从 von Mises 准则. 屈服应力服从线性硬化规律, 其中初始屈服应力、硬化参数分别为 $\sigma_{y0} = 4.5\text{ MPa}$, $h_p = 5.9\text{ GPa}$.

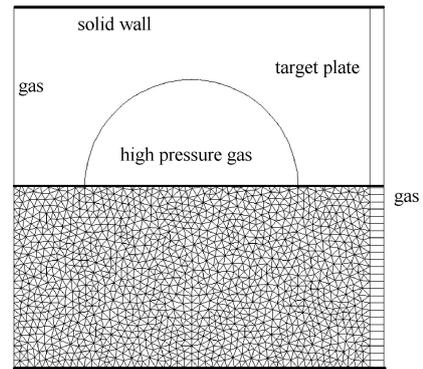
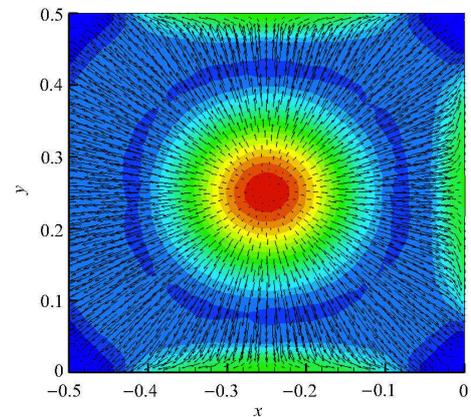


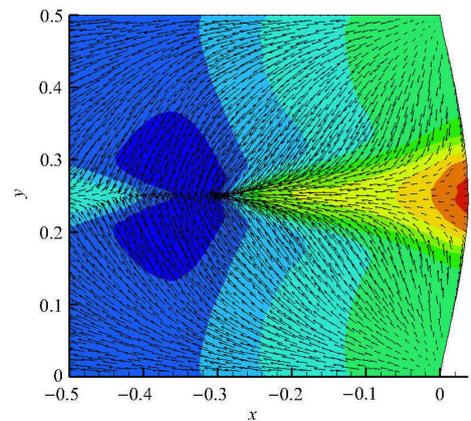
图 4 算例 2 计算模型与网格划分

Fig. 4 Modeling and mesh discretization for example 2

图 5 为 5.396 μs , 1.285 ms, 1.695 ms 时刻压力流场结果. 如图 6 中白色、黑色、灰色网格依次为耦合条件下 5.396 μs , 1.285 ms, 1.695 ms 时刻相应的动边界靶板弹性位移场构型.



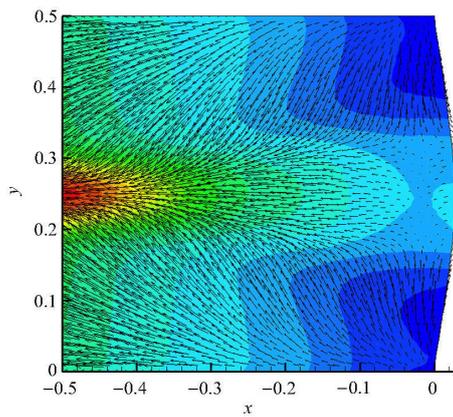
(a) 5.396 μs



(b) 1.285 ms

图 5 流场空间分布

Fig. 5 Spatial distribution with pressure and velocity



(c) 1.695 ms

图 5 流场空间分布 (续)

Fig. 5 Spatial distribution with pressure and velocity (continued)

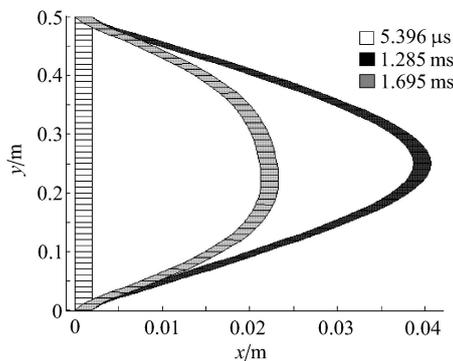


图 6 位移场构型

Fig. 6 Displacement configuration

5 结 论

本文提出了自主开发的基于位移相等条件下的流固弱耦合数值模拟程序. 对一维含弹簧运动活塞以及爆炸冲击波作用下的金属靶板非线性动力学响应进行了数值模拟. 计算表明, 基于位移相等条件

的流固耦合数值模拟在模拟流固耦合过程中, 具有较高的精度. 在爆炸冲击波作用下的金属靶板非线性动力学响应数值模拟过程中, 气动载荷冲击作用下固体发生变形, 进而引起流场复杂的反射与叠加. 本文结合基于非结构动网格技术的有限体积方法和 DGFEM 的流固耦合数值模拟系统预测了爆炸载荷作用下含固体非线性的流固耦合问题, 并为进一步爆炸载荷作用下流固耦合数值模拟研究打下基础.

参 考 文 献

- 1 Taylor GI. The pressure and impulse of submarine explosion waves on plates. Aerodynamics and the mechanics of projectiles and explosions. In: The Scientific Papers of Sir Geoffrey Ingram Taylor, vol. III. Cambridge: Cambridge University Press, 1963. 287-303
- 2 Rabczuk T, Samaniego E, Belytschko T. Simplified model for predicting impulsive loads on submerged structures to account for fluid-structure interaction. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, 34: 163-177
- 3 Subramaniam KV, Nian WM, Andreopoulos Y. Blast response simulation of an elastic structure: Evaluation of the fluid-structure interaction effect. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36: 965-974
- 4 钱若军, 董石麟, 袁行飞. 流固耦合理论研究进展. 空间结构, 2008, 14: 1-13 (Qian Ruojun, Dong Shilin, Yuan Xingfei. Advances in research on fluid-structure interaction theory. *Spatial Structure*, 2008, 14: 1-13 (in Chinese))
- 5 王彬, 杨庆山. 弱耦合算法的实现及其应用. 工程力学, 2008, 25(12): 48-52 (Wang Bin, Yang Qingshan. The realization and application of loosely coupled algorithm. *Engineering Mechanics*, 2008, 25(12): 48-52 (in Chinese))
- 6 刘君, 白晓征, 郭正. 非结构动网格计算方法. 长沙: 国防科技大学出版社, 2009 (Liu Jun, Bai Xiaozheng, Guo Zheng. *Dynamic Unstructured Grid Method*. Changsha: National University of Defense Technology Press, 2009 (in Chinese))
- 7 Li XK, Yao DM, Lewis RW. A discontinuous Galerkin finite element method for dynamic and wave propagation problems in non-linear solids and saturated porous media. *Int J Numer Meth Eng*, 2003, 57(3): 1775-1800

(责任编辑: 刘希国)

NUMERICAL MODELING FOR FLUID-STRUCTURE INTERACTION UNDER BLAST AND IMPACT LOADING RESPONSE¹⁾

Guo Pan* Liu Jun[†] Wu Wenhua^{*,2)}

** (The State Key Laboratory for Structural Analysis of Industrial Equipment, Department of Engineering Mechanics, Faculty of Vehicle Engineering and Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)*

[†] (The State Key Laboratory for Structural Analysis of Industrial Equipment, School of Aeronautics and Astronautics, Faculty of Vehicle Engineering and Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract In this paper, a framework for numerical modeling of fluid and structure interaction (FSI) under blast shock wave has been developed and implement by loose coupling method on the basis of the equivalence of displacement condition. The nonlinear displacement of solid field is simulated by Discontinuous Galerkin Finite Element Method (DGFEM) which is based on the Lagrange method. The flow field is computed by using the cell-centered finite-volume scheme on the assumption of the improved spring analogy. Compared to the analytical results of one-dimensional spring piston problem, the present loose coupling method shows the good performance in computational accuracy in simulating fluid-structure interaction problem. Furthermore, the program framework exhibits the good abilities in simulating the coupling interacting behavior of the reflection and superposition of flow field due to the complex solid deformations.

Key words time discontinuous galerkin finite element method (DGFEM), blast wave, finite volume method, unstructured dynamic mesh

Received 3 May 2012, revised 6 December 2012.

1) The project was supported by the National Basic Research Program of China (973 Program) (2011CB013705), National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China (2011ZX05026-002-02) and Innovation Research Group Research Fund (50921001).

2) Wu Wenhua, associate professor, research interests: computational mechanics. E-mail: lxyuhua@dlut.edu.cn