弹性整流罩分离的流固耦合仿真方法

张小伟 王延荣 谢胜百 单 鹏

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191)

摘 要: 发展了一种流固耦合的动力学数值仿真方法,用以模拟弹性结构在其运动诱导的非定常气动载荷作用下的动态响应. 针对给定的运动规律,对不可压流场采用侵入式边界方法求解了非定常气动载荷,其中未计及弹性结构变形对流场的影响. 对非定常气动载荷作用下的薄壁弹性结构进行了瞬态动力学数值模拟. 以地面试验状态的整流罩分离为例,对刚性体及是否考虑表面气体压力作用的柔性体等情形下的整流罩的动力学行为进行了对比分析,验证了发展的流固耦合动力学仿真方法的可行性.

关 键 词: 整流罩; 流固耦合; 侵入式边界; 动力学

中图分类号: V 215. 3

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2009)08-0976-04

Fluid-structure interaction method on numerical simulation of elastic fairing separation

Zhang Xiaowei Wang Yanrong Xie Shengbai Shan Peng

(School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: A fluid-structure interaction (FSI) method for the simulation of the motion of elastic structure under the unsteady aerodynamic load induced by its motion was developed. For a given motion of the structure, the unsteady aerodynamic load of incompressible fluid was solved by immersed boundary (IB) method without the influence of elastic deformation for fluid being considered. The transient dynamic simulation of the thin-walled elastic structure was done. For a fairing separation in the ground test state, by comparing the deformation of fairing in different cases: rigid, flexible structure with or without surface loading, the feasibility of the FSI method is verified.

Key words: fairing; fluid-structure interaction; immersed boundary; dynamics

当运载火箭在大气中飞行时,卫星整流罩用于保护卫星及其它有效载荷,以防止卫星受气动力、气动加热及声振等有害环境的影响,它是运载火箭的重要组成部分[1].

随着运载的需求,整流罩结构越来越向大型发展,而大型整流罩结构的柔性相对增加,因此,在整流罩分离时极易发生扭转和弯曲等各种形式的振动[2],这导致整流罩分离动力学以及变形对卫星等的影响问题变得更为突出. 早期研究此类问题的方法是将柔性多体动力学模型退化为多刚体系统动力学模型和结构动力学模型,分别求解后再进行叠加,最终给出分离安全包络曲线[2]. 而当前国内的大多数研究仅限于对刚体自身冲击式运动的仿真,而这并未考虑整流罩运动过程中变形的影响.

随着柔性多体动力学和计算机辅助工程的飞速发展,系统地解决整流罩动特性问题已经成为可能. 本文采用通用软件 ANSYS和 ADAMS联合求解建立了一种考虑弹性结构的方法,并开发了基于 IB(Immersed Boundary)方法的 Fortran程序,对结构运动与周围空气介质之间的相互作用进行了初步研究,分析了过顶前整流罩的动态过程,并对比分析了刚性结构、柔性不加载和柔性加载等情况.

收稿日期: 2008-07-02

作者简介: 张小伟(1984 -),男,湖北广水人,博士生, xwzhang1984@163. com.

1　计算方法

本文介绍了弹性结构运动的流固耦合仿真方法,其中包括运动边界的流体力学数值分析、固体有限元模型的动力学分析及流体力学和固体动力学之间的数值信息传递,即流场压力如何传递到固体域中运动物体的有限元模型的各个节点上.

1.1　冲击式非定常运动的数值仿真方法

本文对于非定常运动固面边界的计算流体力学采用了 B方法. B方法由于在处理复杂几何物面边界、运动边界以及流固耦合等问题上的优势,在最近十余年得到了迅速发展和应用.一般来说,B方法即使在处理很复杂的物面边界时也只需要采用固定的笛卡儿坐标系和矩形正交网格,而无需贴体结构或非结构网格;在处理运动边界时也无需重新生成网格和动网格下的流场信息插值;因此极大地节省了网格生成的时间及动网格计算消耗的时间. B方法的关键在于将物面边界条件作用于笛卡儿型网格节点上.

本文采用"连续力源"的 B方法[3].首先构造在物面边界上的力源,再通过外推形式将其作用于周围流场节点,并作为力源项加入控制方程组.对于不可压流场,其无量纲控制方程为

$$\left.\begin{aligned} \partial u/\partial t &= -(u\cdot\nabla u) - \nabla p + \Delta u/Re + F \\ \nabla\cdot u &= 0 \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

求解时,在全场求解(1)即可,而无需对物面边界做任何处理.本文力源项 F的构造和计算采用文献[4]提出的如下两式的力源形式:

$$F_s = -R_s + (U_s - u_s)/\Delta t \tag{2}$$

$$R_s = (u_s\cdot\nabla u_s) + \nabla p_s - \Delta u_s/Re \tag{3}$$

式中,下标 s表示物面节点.为求 F_s,需由附近流场的速度和压强插值出物面节点 $x_s = (x_s, y_s)$上的速度 $u_s(x_s)$、速度梯度 ∇u_s与压强梯度 ∇p_s.本文采取双线性插值(即体积加权插值)[5],利用该节点周围的 8个流场网格点来获得插值结果,即

$$u_s(x_s) = \sum_{i,j,k}^{i+1,\,j+1,\,k+1} D_{i,j,k}(x_s)\,u_{i,j,k} \tag{4}$$

其中

$$D_{i,j,k}(x_s) = d(x_s - x_i)\,d(y_s - y_j)\,d(z_s - z_k) \tag{5}$$

$$\left.\begin{aligned} d(x_s - x_i) &= \frac{(x_s - x_{i+1})}{(x_i - x_{i+1})} && \text{if}\quad x_i < x_s \\ d(x_s - x_i) &= 1 && \text{if}\quad x_i = x_s \\ d(x_s - x_i) &= \frac{(x_s - x_{i-1})}{(x_i - x_{i-1})} && \text{if}\quad x_i > x_s \end{aligned}\right\} \tag{6}$$

式(3)中的压力和速度导数采用 2阶拉格朗日多项式近似.若将各种变量统一表示为 Φ,则其 x方向的 1阶和 2阶导数可分别表示为

$$\frac{\partial\Phi}{\partial x}(x_s, y_s) = \frac{(x_s - x_2)\Phi_1}{(x_1 - x_2)(x_1 - x_s)} + \frac{(x_s - x_1)\Phi_2}{(x_2 - x_1)(x_2 - x_s)} + \frac{(x_s - x_1) + (x_s - x_2)}{(x_s - x_1)(x_s - x_2)}\Phi_s \tag{7}$$

$$\frac{\partial^2\Phi}{\partial x^2}(x_s, y_s) = \frac{2\Phi_1}{(x_1 - x_2)(x_1 - x_s)} + \frac{2\Phi_2}{(x_2 - x_1)(x_2 - x_s)} + \frac{2\Phi_s}{(x_s - x_1)(x_s - x_2)} \tag{8}$$

式中,Φ_i ($i = 1, \cdots, 8$)是位于节点周围 8个流场网格点上的流场值,同理可得到 y和 z向的插值式.

物面边界节点上的力 F_s求得之后,需要计算出其在周围流场网格节点 (i, j, k)上的影响力或称欧拉力 $F_{i,j,k}$,从而影响流场方程的求解.本文采用体积加权平均[3]外推得到

$$F_{i,j,k} = \frac{1}{N_b}\sum_{n=1}^{N_b} D_{i,j,k}(x_s)\,F_n(x_s) \tag{9}$$

式中,N_b是对节点 (i, j, k)产生影响的边界节点 s的个数.经过外推,边界上 s点的力源被分布到了与之距离为 $O(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$的诸流场节点上.文献[6]指出这种外推只有 1阶精度.

对于主控方程(1),其差分控制方程组为

$$\frac{u^{n+1} - u^n}{\Delta t} = -(u\cdot\nabla u)^{n+1/2} - \nabla p^{n+1} + (\Delta u^{n+1} + \Delta u^n)/(2Re) + F^{n+1/2} \tag{10}$$

$$\nabla\cdot u^{n+1} = 0 \tag{11}$$

为提高较高雷诺数下的数值稳定性,对流项采用基于 Godunov法的迎风格式,粘性项采用 Crank-Nicolson半隐式格式,而空间离散均采用 2阶精度格式.采用基于 Mac型交错网格的压力校正投影法或称压力校正分裂步法求解差分控制方程组.另外,利用多重网格法来加速收敛,对求得的压力和速度进行校正,判断校正后的速度场是否满足连续性方程(11),满足即进入下一时间层,否则将求得的压力场作为初值重新迭代.

1.2　结构分析

在结构分析中,需要考虑结构位形和结构变形这两方面的作用,因此,必须分别考虑刚性结构和柔性结构.

1) 刚性分析

刚体动力学分析时,采用刚体的质心笛卡儿坐标和反映刚体方位的欧拉角作为广义坐标,通过拉格朗日乘子建立系统的普遍动力学方程:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(\partial T/\partial \dot{q})^{\mathrm{T}} - (\partial T/\partial q)^{\mathrm{T}} + \Phi_q^{\mathrm{T}}\rho + \theta_q^{\mathrm{T}}\mu = Q$$

$$\Phi(q, t) = 0 \quad (\text{完整约束方程})$$

$$\theta(q, \dot{q}, t) = 0 \quad (\text{非完整约束方程}) \tag{12}$$

式中，T为系统动能；q为系统广义坐标列阵；Q为广义力列阵；ρ为对应于完整约束的拉氏乘子列阵；μ为对应于非完整约束的拉氏乘子列阵.

由于拉格朗日方程采用了不独立的广义坐标，上述的动力学方程是耦合的非线性微分代数方程，因此，在进行刚体系统（特征值变化范围大的系统）动力学分析时，需要有效的数值积分方法来处理. 通用软件 ADAMS就是采用了功能强大的 GSTIFF积分器、DSTIFF积分器和 BDF积分器用 Gear预估-校正算法来数值求解上述的动力学方程.

2）柔性分析

在实际分析中，载荷作用时结构会产生变形，而仅仅采用刚体分析无法考虑变形对结构分析的影响，因此需要将模型中考虑变形的结构离散成柔性体来处理. 柔性体就是用离散化的若干个单元的有限节点自由度来表示连续结构的无限多个自由度. 基于物体的弹性变形是相对于连接物体坐标系的弹性小变形，同时物体坐标系又是经历大的非线性整体移动和转动的这个假设，单元节点的弹性变形采用少量模态的线性组合来近似表示. 用惯性坐标系中的笛卡儿坐标 $X = (x, y, z)$和反映刚体方位的欧拉角 $\psi = (\varphi, \theta, \phi)$来表示物体坐标系的位置，模态坐标为 $q = (q_1, q_2, \cdots, q_n)$（$m$为模态坐标数），则柔性体的广义坐标为

$$\xi = \begin{Bmatrix} X \\ \Psi \\ q \end{Bmatrix} = (x \quad y \quad z \quad \varphi \quad \theta \quad \phi \quad q_{i,\ i=1,m})^{\mathrm{T}} \tag{13}$$

结构的动能为

$$T = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{N} m_i V_i^{\mathrm{T}} V_i = \frac{1}{2}\dot{\xi}^{\mathrm{T}} M(\xi)\dot{\xi} \tag{14}$$

式中，T为结构的动能；m_i为柔性体中任一单元质量；N为单元总数；M（ξ）为质量矩阵.

用拉格朗日方程表示的动力学方程为

$$M\ddot{\xi} + M\dot{\xi} - \frac{1}{2}\left[\frac{\partial M}{\partial \xi}\dot{\xi}\right]^{\mathrm{T}}\dot{\xi} + K\xi + f_g + C\dot{\xi} + \left[\frac{\partial \mu}{\partial \xi}\right]^{\mathrm{T}}\lambda = Q \tag{15}$$

式（15）可改写为

$$M\ddot{\xi} + C\dot{\xi} + K\xi = F_T \tag{16}$$

式中，C为柔性体阻尼矩阵；K为柔性体刚度矩阵，可通过广义弹性力的虚功来得到；f_g为重力；λ为约束方程的拉格朗日乘子；Q为广义力矩阵；F_T为外力矩阵.

通过求解方程式（16），计算每一时刻物体的弹性位移来描述其变形运动.

本文采用 ANSYS和 ADAMS联合仿真. 在 ANSYS中建立整流罩的有限元模型，给定结构的材料参数以及提取的模态阶数，通过软件之间的接口，从 ANSYS生成 ADAMS所需的模态中性文件 MNF，然后，利用 ADAMS软件的 ADAMS/Flex模块，对 MNF文件进行柔性体仿真分析.

1.3 气动载荷的施加

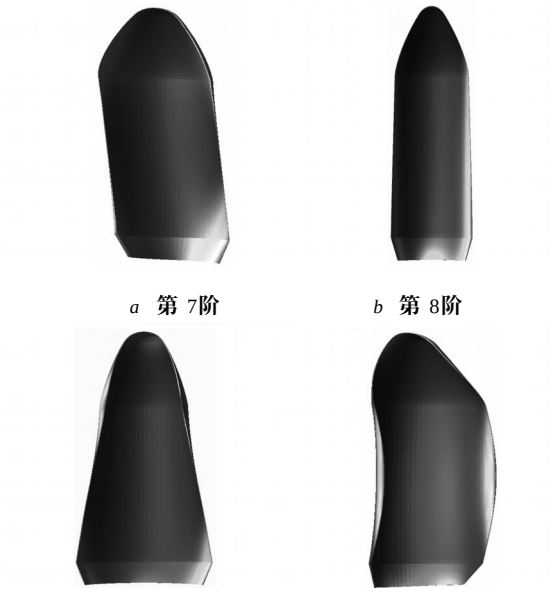
由 B方法得到固体域中不同时刻各个节点的压强，利用有限元方法将不同时刻的压强转化成相应时刻的节点压力. 本文采用了一种近似平均的方法对压强进行转化：将该压力平均分配到相应的 4个节点上去. 这样对不同的单元，将对应节点编号相同的压力求和，即可得到整流罩上所有节点的压力. 通过这种方法可以近似得到固体域中不同时刻各节点压力，然后对固体域中的每一个节点，在 ADAMS中分别生成节点压力随时间变化的样条曲线，并将样条曲线形式的单向力施加到柔性体上，进行柔性体动力学分析.

2 仿真实例

现以某整流罩为例，仅考虑整流罩过顶前的运动. 给定整流罩分离前为匀角加速度运动，拟和出其旋转角位移满足：$\theta = -(0.136\,98t + 54.778t^2)$，其中 θ为旋转角度，初始值为 0°；$t$为运动时间. 采用“绞链-弹簧”旋转分离方式，弹簧位于整流罩倒锥段的半罩根，自由长约 0.3m，给定弹簧刚度 20 000N/m.

由于整流罩分离引起非定常流场的 Ma数远远小于 0.3，因此以粘性不可压流场来处理. 采用整流罩壳体最大直径作为标准长度 L，壳体顶部在分离过程的平均线速度（不考虑气流阻力）为标准速度 U_0，标准大气密度为标准密度 ρ_0 来进行无量纲化，得到雷诺数大致为 $Re = 4 \times 10^5$. 流体计算域取为 12.8×12.8×12.8的立方体；均匀正交网格，宽度为 0.1；克朗数为 0.1；壳体位于正中.

在 ANSYS中建立整流罩有限元模型，单元为 Solid45，总数为 3064，节点总数为 6350. 将该模型导入 ADAMS，提取前 36阶模态，图 1所示为非刚体运动的前 4阶模态，即第 7阶～第 10阶.



a 第 7阶　　*b* 第 8阶

c 第 9阶　　*b* 第 10阶

图 1　整流罩的模态

将柔性体替代刚性体,得到如图 2所示的刚 - 柔混合仿真模型,其中倒锥段的旋转分离铰链结构如图 3所示. 结构 2与整流罩固连在一起,结构 1与基础固连在一起,结构 1和结构 2之间给定一个旋转副,并施加给定的旋转驱动.

必须指出,本文仅仅讨论一种流固耦合的数值仿真方法,所以建立柔性体时忽略了板壳结构中加强筋对变形的影响而代之以实体模型来处理. 另外,整流罩各段材料不同,且大多为蜂窝结构,本文模型中也忽略了各段结构的材料差异而代之以各向同性材料. 整流罩各构件的材料参数见表 1.

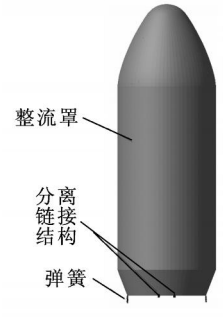


图 2　刚 柔混合模型

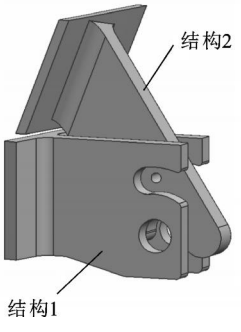


图 3　分离绞链结构

表 1　结构的材料参数

构件	密度 /(kg·m^{-3})	弹性模量 /GPa	泊松比
整流罩	1400	112	0.31
结构 1	7800	210	0.30
结构 2	7800	210	0.30

由给定的条件,分别对整流罩进行刚性体运动学、柔性体不加载的运动学和柔性体加载的动力学分析. 图 4所示为罩体质心位移随时间的变化情况. 图 5所示为 3种情况下整流罩 z方向的变形量.

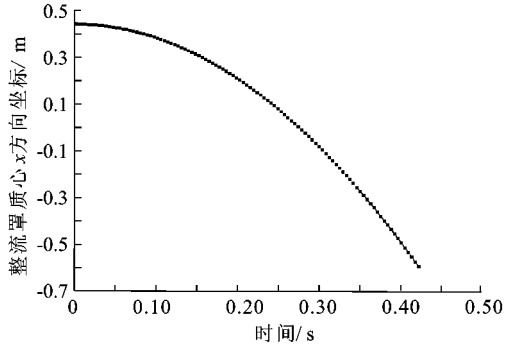


图 4　整流罩质心 *x*方向位移变化

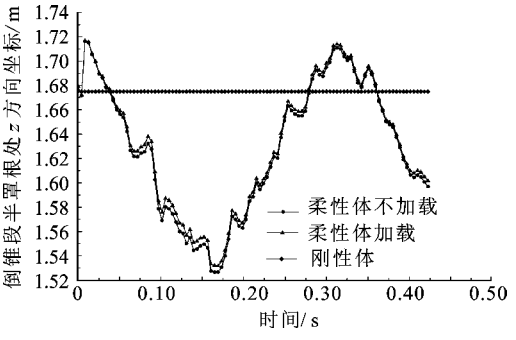


图 5　半罩根处 z方向坐标变化情况

由图 5可见,随着时间的变化,刚性体的半径保持初始给定值不变,即刚性体分析没有变形量;而柔性体分析中,倒锥段半罩根处的 z方向变形呈现振荡变化,在某一时刻半罩根的半径达到最小值,两种情况下的变形趋势相似. 算例中柔性体不加载的最小半径为 1.544 48 m,加载的最小半径为 1.551 11 m. 由于在建立整流罩有限元模型时并未计及加强筋对结构变形的影响,所以本文求得的结构变形相对较大;另一方面,由于给定的整流罩分离速度较小,导致作用于整流罩表面的非定常压力较小,所以计算得到的柔性体不加载和柔性体加载情况下的变形量之间的变化较小.

3　结　论

本文发展的这种弹性结构受运动诱导的流固耦合分析方法可以较好地应用于火箭整流罩分离等动力学分析中. 从刚性体和柔性体等情形的分析对比可以看到:在整流罩地面分离试验中,建立柔性体并且施加相应的气动载荷可以很好地模拟整流罩在运动过程中受气动力影响的变形历程,由于整流罩的变形直接关系到卫星等罩内发射物体的安全性,因此,对柔性体的分析可以指导整流罩的设计,对地面试验也是很有参考价值的.

(下转第 995页)

路由信息,减少了链路超时引起的触发更新.

3 结 束 语

为改善路由协议的可扩展性,使协议在网络中存在大量节点的情况下仍能维持良好的性能,本文提出了一种新的分群路由协议——AFCR协议.一方面,它通过局部路由信息的交换来建立与维护分群网络结构、连接相邻群;另一方面,它基于局部路由信息和分群网络结构完成数据分组的自适应转发.仿真结果表明,在大规模、重业务情况下,该协议能有效地控制 MANET中路由开销的增长速度,改善网络的传输性能.

参考文献 (References)

[1] Hong Xiaoyan, Xu Kaixin, Gerla M. Scalable routing protocols for mobile ad hoc networks[J]. IEEE Network, 2002, 16(4): 11 - 21

[2] Perkins C E, Bhagwat P. Highly dynamic destination sequenced distance vector routing (DSDV) for mobile computers[C]// Proc ACM SIGCOMM 94. New York: ACM, 1994: 234 - 244

[3] Clausen T, Jacquet P. Optimized link state routing protocol (OLSR)[R]. IETF RFC 3626, 2003

[4] Perkins C E, Belding Royer E M, Das S R. Ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing[R]. IETF RFC 3561, 2003

[5] Bjohnson David, Maltz David A, Hu Yihchun. The dynamic source routing protocol for mobile ad hoc networks (DSR)[R]. IETF RFC 4728, 2003

[6] Yu J Y, Chong P H J., A survey of clustering schemes for mobile ad hoc networks[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2005, 7(1): 32 - 48

[7] Basagni S, Mastrogiovanni M, Panconesi A, et al. Localized protocols for ad hoc clustering and backbone formation: a performance comparison[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2006, 17(4): 292 - 306

[8] Yu J Y, Chong P H J, Zhang M. Performance of efficient CBRP in mobile ad hoc networks (MANTS)[C]//Proc IEEE VTC 2008-Fall. Calgary, Canada: IEEE, 2008: 1 - 7

[9] Chiang C C, Gerla M. Routing and multicast in multihop mobile wireless networks[C]//Proc IEEE ICUPC. San Diego, CA: IEEE, 1997: 546 - 551

[10] Jiang Mingliang, Li Jinyang, Chiang Tay. CBRP: a cluster based routing protocol for mobile ad hoc networks[EB/OL]. National University of Singapore, 1999[2008 - 9 - 16]. http://www.comp.nus.edu.sg/~tayyc/cbrp

[11] Liu Ting, Liu Kai. An improved routing protocol in mobile ad hoc networks[C]//Proc IEEE MAPE2007, Hangzhou: IEEE, 2007: 748 - 751

[12] The ns Manual[EB/OL]. 2006. http://www.isi.edu/nsnam/ns

(责任编辑:娄　嘉)

(上接第 979页)

由于本文仅考虑了气动力对结构变形的影响,而未考虑结构变形对气动力的影响,因此,未来进一步发展的方向是采用结构瞬态动力学的迭代方法,将结构运动的位形提供给非定常气动分析,求得的压力作为瞬态分析的表面载荷,并采用结构动力学方法模拟结构在非定常气动力作用下的瞬态动力学响应,得到的新位形作为下一时刻非定常气动分析的输入,逐步迭代,实现运动过程耦合仿真.

参考文献 (References)

[1] 李耀明.卫星整流罩设计与"三化"[J].导弹与航天运载技术,1999,(2):1 - 11
Li Yaomin. Satellite fairing design and systematization, standardization and combination[J]. Missiles and Space Vehicles, 1999(2): 1 - 11(in Chinese)

[2] 董寻虎.大型柔性整流罩抛罩多体动力学仿真[C]//中国力学学会学术大会论文集.北京:中国力学学会,2005:1687
Dong Xunhu. Multibody dynamics simulation of large scale flexible fairing separation[C]//CCATM. Beijing: CCATM, 2005: 1687(in Chinese)

[3] Mittal R, Iaccarino G. Immersed boundary methods[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2005, 37: 239 - 261

[4] Mohd-Yusof J. Combined immersed-boundary / B-spline methods for simulations of flow in complex geometries[R]. Annual Research Briefs 1997, Center for Turbulence Research, 1997

[5] Lima E Silva A, Silveira-Neto A, Damasceno J. Numerical simulation of two-dimensional flows over a circular cylinder using the immersed boundary method[J]. Journal of Computational Physics, 2003, 189: 351 - 370

[6] Saiki E A, Biringen S. Numerical simulation of a cylinder in uniform flow: application of a virtual boundary method[J]. Journal of Computational Physics, 1996, 123: 450 - 465

(责任编辑:张　嵘)