

线性流固耦合动力分析程序 FSIAP 92简介

邢京堂

(北京航空航天大学固体所,北京,100083)

A SHORT INTRODUCTION TO THE LINEAR FLUID-SOLID INTERACTION DYNAMIC ANALYSIS PROGRAM-FSIAP 92

Xing Jing-tang

(*Research Center of Solid Mechanics, Beijing University of Aeronautics and
Astronautics, Beijing, 100083*)

摘要 简单介绍了线性流固耦合动力分析程序 FSIAP 92 的基本原理、程序结构、主要功能特点及其使用环境。给出了两个例子,以说明程序的应用。

关键词 流固耦合, 动力分析, 程序系统

Abstract The elementary principle, the structure of the program, the main functions and characteristics as well as its running environment about the linear fluid-solid interaction dynamic analysis program—FSIAP 92 are shortly introduced in this paper. A simple flow chart for the program is drawn to explain the relations between each principal function blocks of subroutine. Two numerical examples, a one-dimensional fluid pressure wave problem transmitting along a water pipe of 100m long and a dynamic response problem of a dam-water system excited by a given horizontal ground motion, are presented to demonstrate the applications of the program—FSIAP 92. Comparisons of the computational results with the corresponding theoretical solutions show that the FSIAP92 are very attractive.

Key words fluid-solid interaction, dynamic analysis, computer program, FSIAP92

流固耦合问题在工程中十分重要,但可提供工程应用的流固耦合动力分析的通用程序国内外极其少见。例如:最初人们将流体作为剪切刚度为零的固体、应用通用结构分析程序 SAP 5 进行耦合分析^[1],遇到零能模式,所得固有频率无法区分,从而未被人们延用;ADINA 程序 1977 理论文本^[2]中未见流固耦合方面的报道;而文献[3]中提及的仅仅是

1991年11月24日收到,1992年1月16日收到修改稿
国家自然科学基金及航空航天工业部结构动力学“七、五”预研课题经费资助项目

可压流体充满容器的大变形分析问题。教科书^[4]被读者看作是 ADINA 程序的理论说明，其中未涉及耦合问题。ADINA 集团资助的有关流固耦合开发研究的报告^[5]中采用位移、速度位及水静压力为变量，其方法未计及自由面波。NASTRAN 理论文本^[6]仅涉及轴对称问题，将压力展成方位角的级数予以近似求解。FSIAP92 程序正是基于这种情况而开发的。

1 基本原理

基于线化理论、固体为线弹性、流体可压无粘并计及自由面线性波，文献[8]发展了一个变分公式。文献[9~11]提出了 4 种可选的对称化方法，克服了文献[7]中方法实用时的困难。其位移、压力流固耦合有限元方程为

$$\begin{bmatrix} K \\ m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{U} \\ \dot{p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} KM^{-1}K & -KM^{-1}R^T \\ -RM^{-1}K & k+RM^{-1}R^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} KM^{-1}\hat{F}^G \\ \hat{f}^G - RM^{-1}\hat{F}^G \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 m, k, \hat{f}^G 为流体有关矩阵； M, K, \hat{F}^G 为固体有关矩阵； R 为耦合矩阵； U 为固体的位移； p 为流体的压力。方程 (1)

有限元生成过程的大致步骤及求解见框图 1。

2 程序结构及功能特点

FSIAP 92 程序采用 FORTRAN 77 语言编写，共有源语句 2 万多条。编程中考虑了源程序易读性、通用性；功能模块化；运行微机化等实用要求。有以下特点。

(1) 丰富的单元库 共有 19 个单元，除包含 SAP 5 程序全部单元外，有二维、三维流体压力元；同二维、三维、薄膜、梁、板壳元耦合的流体界面元。

(2) 子结构功能 有流体子区域、固体子结构、耦合子结构、含耦合面的固体子结构 4 种供选用。耦合面固体自由度可用固定界面或自由界面模态。

(3) 双节点或多节点编号 可处理同一固体节点耦合四周不同压力的问题。

(4) 移频功能 可处理含刚体自由度的动力问题。

(5) 多载荷输入 固体元可有 4 种不同类型及不同到来时间的单元载荷，可向任一节点施加集中动荷或集中质量；流体元可有动压力载荷、边界面上的动加速度载荷；系统可输入基础运动载荷。所有载荷可是连续或离散的时间历程。

(6) 动响应分析 有振型叠加法与直接积分法；模态阻尼可由用户输入。

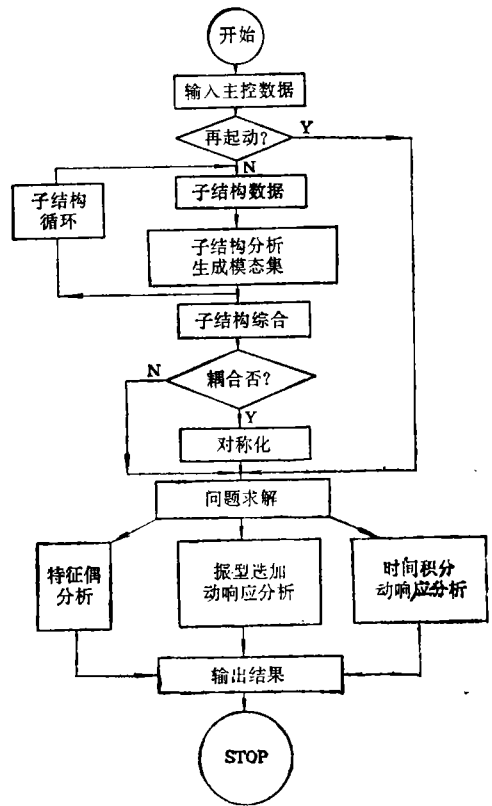


图 1 程序粗框图

(7) 输出选择 可选择输出位移及压力,或单元应力的历程表、最大值或历程曲线。

(8) 再起功能 特征偶分析以后,可重起动改变要求的特征向量数目、收敛精度或移频大小进行二次计算,或动响应计算。再起时,省去了重复计算。

(9) 可变重力加速度 用于处理微重力环境下的耦合问题。

3 可解问题

FSIAP 92 是一通用程序,可求解线化理论下纯固体系统、纯流体系统、液体或气体、以及两相耦合系统的相当广泛的动力问题。相应的工程结构有水利结构、核动力结构、船舰系统、航空航天器、声学结构物等。动力响应问题如:地震响应、爆炸响应、冲击响应及常见的强迫响应。不用子结构方法解题规模随内存大小而定。对于 4 M 内存下,可解 1000 阶左右的动力问题。若用子结构方法,问题规模可明显加大。如:若用 10 个子结构,每个子结构自由度 1000 阶,保留的界面及正则模态为 100,则可求解 10000 阶自由度的动力问题。我们已用此程序计算过 6000 阶的问题。

4 运行环境

(1) 硬件 PC 386 微机;协处理器 80387;内存 $\geq 4\text{M}$;外存 $\geq 60\text{M}$;对于较大题目,内外存应相应扩大。

(2) 软件 DOS 3.30 以上;NDPFORTRAN 386 编译系统。

5 算例

例 1 图 2 示为一维水管,右端受一压力波作用,有关尺寸见图。用 FSIAP 92 程序采用 10 个流体元计算,其结果同理论解的比较示于图 3 中。由图可见,二者吻合很好。

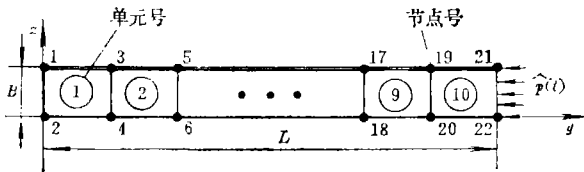


图 2 一维流体压力波问题

$$L = 100\text{m}, B = 0.1\text{m}, C = 1430\text{m/s},$$

$$\hat{p}(t) = 0.098 \cos 2\pi f t \text{ MPa}, f = 4.0 \text{ Hz}$$

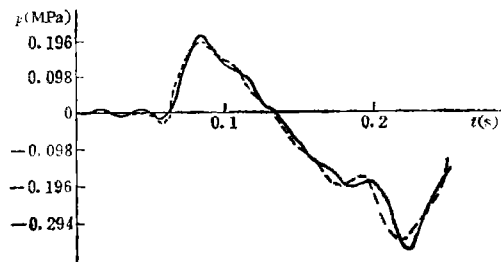


图 3 图 2 例计算与理论比较

虚线——计算结果,实线——理论结果。

例 2 图 4 为二维坝水耦合系统,受水平地震载荷作用。采用 8 个平面应变固体元和 16 个二维流体压力元计算,其结果示于图 4 中。图中实线为刚性坝情形的理论解。由图可见,随着坝弹性模量的加大,耦合解趋向理论解,其趋势是正确的。

研究生王一民、孙国江、侯涛,本科生余永毅曾作过一些探讨性的计算,特此致谢。

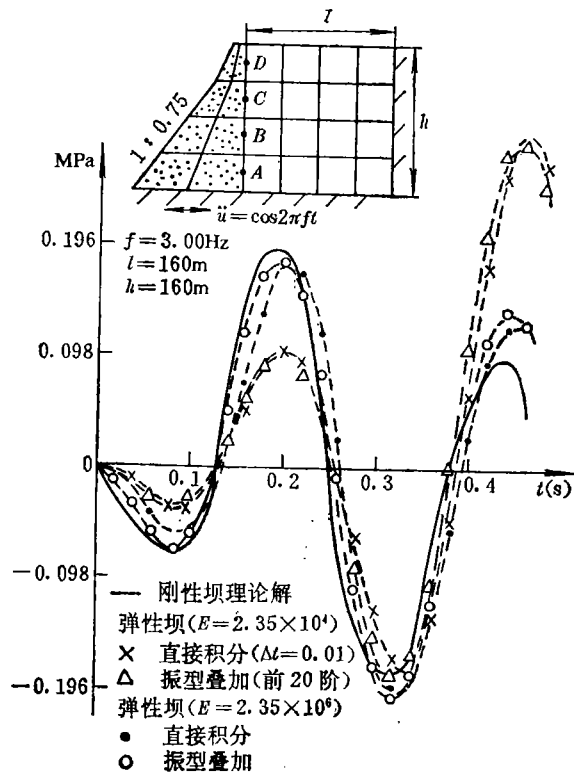


图4 坝水耦合系统A点动力压力曲线

参考文献

- 1 Akkas N, et al. Applicability of Generalpurpose Finite Element Program in Solid-fluid Interaction Problems. *Computer & Structures* 1979, (10):773~783
- 2 [美]K. J. 贝塞著, 张圣坤等译. 非线性有限元分析. ADINA 理论文本, 上海: 上海交通大学, 1986, 164
- 3 Bathe K J 著, 赵兴华等译. AF-81 ADINA (上、下册). 郑州: 郑州机械研究所, 1982, 380
- 4 Bathe K J. *Finite Element Procedures in Engineering Analysis*. Prentice-Hall Int INC, London, 1982, 735
- 5 Olson L G, et al. Analysis of Fluidstructure Interactions. A Direct Symmetric Coupled Formulation Based on Fluid Velocity Potential. *Comp. & Struc*: 1985, 21: 21~32.
- 6 [美]R H 麦克尼尔主编, 航空航天工业部六二三所译. NASTRAN 理论手册 (1~4), 陕西: 耀县六二三所资料室, 1978. 538
- 7 Irons B M. Role of Part-inversion in Fluid-structure Problems with Mixed Variables. *AIAA J*, 1970, (8):568
- 8 邢京堂. 考虑自由面线性波的流固耦合动力分析的两个变分公式. *航空学报*, 1988, 9(11): A568~A571
- 9 邢京堂. 流固耦合振动分析的有限元与子结构-子区域方法研究. *固体力学学报*, 1986, (4):329~337
- 10 诸德超, 邢京堂, 王一民. 贮箱液固耦合振动分析的数值研究. *航空学报*, 1990, 11(11): A578~A583
- 11 Xing J T, Price W G. A Mixed Finite Element Method for the Dynamic Analysis of Coupled Fluid-solid Interaction Problems. *Proc R Soc London A*, 1991, (433):235~255