

燃料组件的地震和失水事故响应 ——FAMSAP 程序的应用

张重珠 张忠岳

(中国原子能科学研究院反应堆工程技术研究所, 北京, 102413)

在地震和失水事故下堆芯燃料组件的动力响应程序——FAMSAP 主要由两个程序块组成, 并包括一个绘图程序, 即:

$$\text{FAMSAP} = \text{FAMREC} + \text{FAFRES} + \text{绘图程序}$$

其中 FAMREC 程序块是美国核管会主持开发的程序。FAFRES 和绘图程序是根据具体需要研究编制的程序块。文章阐述了 FAMSAP 的功能和它所应用的模型, 同时简要列出用此程序帮助上海核工程研究设计院计算的秦山核电厂燃料组件动力响应的部分结果作为示例。

关键词 燃料组件 地震 失水事故 FAMSAP 程序

地震和假想主管道双端断裂事故, 会在堆芯上下芯板上产生横向运动, 并可能引起相邻组件之间和外围组件与围板之间在格架处的随机碰撞运动(图 1)。若碰撞发生, 必须计算组件在

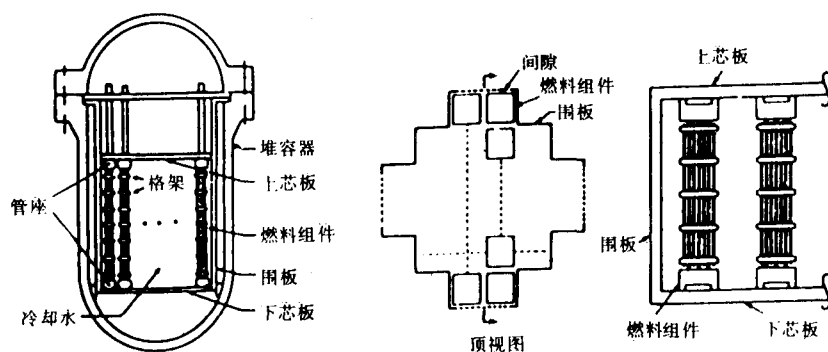


图 1 燃料组件示意图

Fig. 1 Schemata for core region and fuel assemblies

格架处的位移轨迹、元件棒与格架的冲击力、格架之间的挤压力以及组件各部件(控制棒导向管和元件棒)的应力, 以评定组件位移或燃料棒、控制棒导向管和格架的损伤是否会因严重到

妨碍控制棒在必要时插入堆芯,同时需要估计损伤是否会妨碍堆芯的可冷却性。FAMSAP^[1]和原版 FAMREC 程序^[2]就是为计算在地震和失水事故下堆芯燃料组件横向动力响应的程序。

FAMSAP 程序是由原版 FAMREC(原程序仍保留作为一个程序块)与新模块 FAFRES 和绘图程序组成的新程序。

其中 FAMREC^[2](Fuel Assembly Mechanical Respose Code)是美国核管会主持发展的程序,主要用于分析地震和失水事故下燃料组件的位移响应、冲击力和格架挤压力响应。原版 FAMREC 的输入数据包括需要从燃料组件原型试验得到的组件固有频率矩阵、振型矩阵及组件的一些静态性质。但原型试验只有在设计加工之后才能实现,而且在国内目前条件下很难得到整套试验数据。为了解决这个问题,并使 FAMREC 的功能扩展到能对组件的各部件(控制棒导向管、元件棒)作应力分析,我们编制了 FAFRES (Fuel Assembly Frequency and Stress Analysis)程序块,并增补了适合于 CYBER-825 机软件的绘图程序,与原版 FAMREC 一起形成了新程序 FAMSAP。

1 FAMSAP 程序简介

确定组件在地震和失水事故下的动力响应,包括很多分析工作。

第一步,先要确定失水事故主管道的断裂部位。第二步,用热工水力分析程序计算压力容器入口和出口处的动力作用时程曲线;另一方面,需根据安全停堆地震,确定作用在压力容器支承上的加速度时程曲线。第三步,根据从第二步得到的加速度时程曲线,利用堆本体的集中质量数学模型作堆系统的非线性动力学分析,从而得到堆内构件的加速度响应。第四步,由第三步分析得到上下芯板加速度响应,作组件的动力分析,得到组件的位移、元件棒与格架的冲击力以及格架之间的挤压力。第五步,是组件详细静力分析(如导向管、元件棒),它主要是计算由第四步得到的最严重变形下的组件应力。

应用较广的国外燃料组件动力分析程序列于表 1。

表 1 地震(和失水)事故下组件动力学分析程序
Table Fuel assembly dynamic analysis code for seismic (and LOCA) events

国	家	程 序 名	发 表 年
美	国	FAMREC ^[2]	1979
日	本	FUVIAN3 ^[3] (+FLOAN)	1977
比	利 时	CLASH ^[4]	1981
法	国	CASAC ^{[5]1)}	1983
瑞	士	INTRANS ^[6]	1977

1)包括组件纵向振动特性描述。

这些程序的功能大体相近(都从上下芯板的激振计算组件位移、元件棒与格架的冲击力和格架之间的挤压力),但所用的格架处的冲击单元形式各异。在描述一排组件在地震和失水事故动态载荷下的碰撞之前,需要输入单个组件的振动和静力学特性。CASAC 程序采用组件的单梁模型(图 2a')计算这些特性;CLASH 程序采用两个梁模型(图 2b);FUVIAN3 程序与

FLOAN 程序结合起来采用接近组件原型的多梁模型(图 2c)。FAMREC 则要以组件的动态和静态试验结果作为输入数据,这类试验要在组件加工之后才可进行,在国内目前条件下较难实现。为解决这个问题,并使 FAMREC 的功能扩展到上述的第五步应力分析,本文按 FUVIAN3 与 FLOAN 相结合的思想,将 FAMREC 作为一个模块,与新研制的 FAFRES 程序块相结合(即 FAMSAP)。

FAFRES 程序块的功能叙述如下:

第一个功能:若无组件原型试验为 FAMREC 程序块提供组件频率矩阵 $[W]$ 、振型矩阵 $[\phi]$ 和静态性质 $[RBT]$,可利用适当的力学模型,调用 FAFRES 程序块来计算这些矩阵。

第二个功能:在 FAMREC 程序块计算出一排组件的位移之后,从中找出变形最大的组件,再用 FAFRES 可计算这根组件的应力分布。

对应上述功能,FAFRES 程序块包含适应各种力学模型的单元库(梁单元、杆单元和边界元),并能对相应力学模型进行静力分析(用于得到 $[RBT]$ 和对最大变形组件的应力分析)和求解特征方程的行列式搜索法,以计算组件的特征值 $[W]$ 和特征向量 $[\phi]$,这些功能均取自 SAP 程序。

FAFRES 既可为 FAMREC 提供单个组件的振动和静力学特性,又可在由 FAMREC 得到组件位移之后,对最大变形组件进行应力分析。FAMREC 与 FAFRES 相结合,加上绘图程序所形成的新程序 FAMSAP 的功能,实际上与 FUVIAN3 与 FLOAN 相结合^[3]的功能相当。FAMSAP 的主要功能还有:

1. 若有条件提供从组件原型试验得到的组件固有频率、振型矩阵及组件的静态性质, FAMSAP 程序可旁路 FAFRES,完全保留 FAMREC 的功能。
2. 原 FAMREC 只可计算 5 个格架的组件, FAMSAP 中的 FAMREC 程序块则可计算带 8 个或更多格架的组件结构。
3. FAMSAP 的绘图程序可绘制输入的芯板加速度、组件的位移响应、冲击力和格架挤压力响应,以及对应变形最严重组件的应力分析结果。
4. FAMSAP 的再启动功能十分灵活,可多次启动,直至算完整个时间历程的响应。

2 秦山组件在地震(SSE)下动力响应计算实例

我院在完成 FAMSAP 程序的编制工作后,首次使用 FAMSAP 程序为上海核工程设计院完成了秦山核电厂堆芯燃料组件的地震分析(目前还缺少失水载荷数据)。

通过 5 次启动,计算了秦山核电厂 10s 时程范围内的地震响应,前 5s 时程的情况如图 3—6 所示(上下芯板时程曲线图从略)。

图 3 为中间格架的位移响应;图 4 为中间格架的挤压力响应;图 5 为中间格架与燃料棒间的冲击力响应;图 6 为 SSE 激励下变形最大的组件中的燃料棒与控制棒导向管中的应力分布。

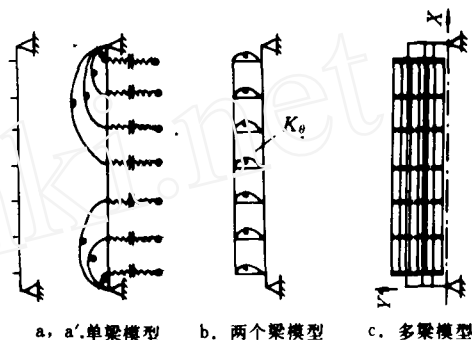


图 2 组件力学模型

Fig. 2 Various mechanical models of an assembly

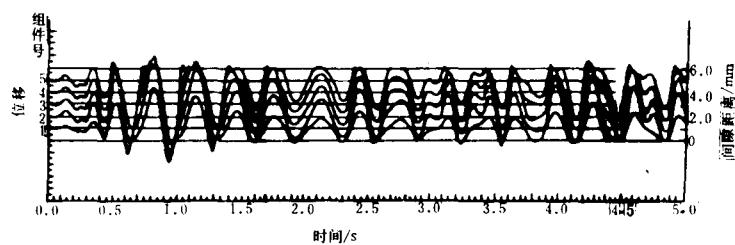
图3 中间格架的位移响应($\Delta = 0.002s$)

Fig. 3 Calculated displacements at mid-grids of fuel assemblies

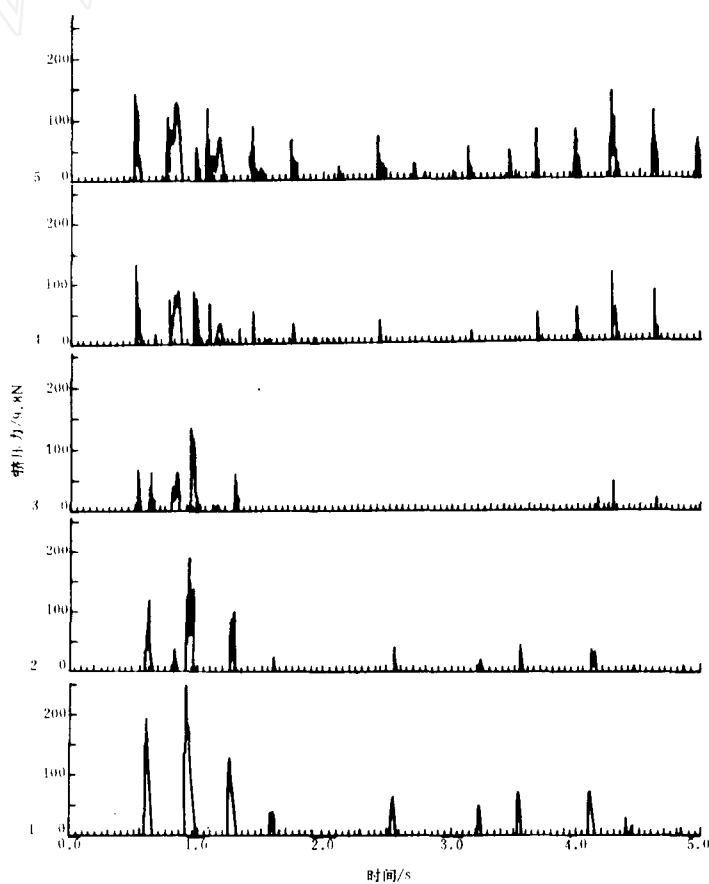
图4 中间格架的挤压力响应($\Delta = 0.002s$)

Fig. 4 Calculated crushing forces at mid-grids of fuel assemblies

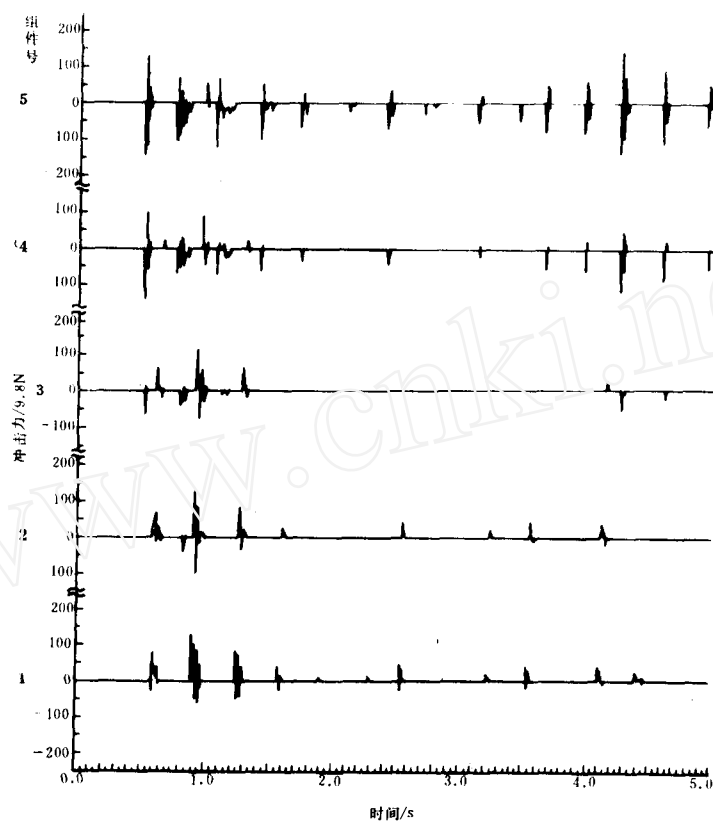
图5 中间格架冲击力响应($\Delta t = 0.002s$)

Fig. 5 Calculated impact forces at mid-grids of fuel assemblies

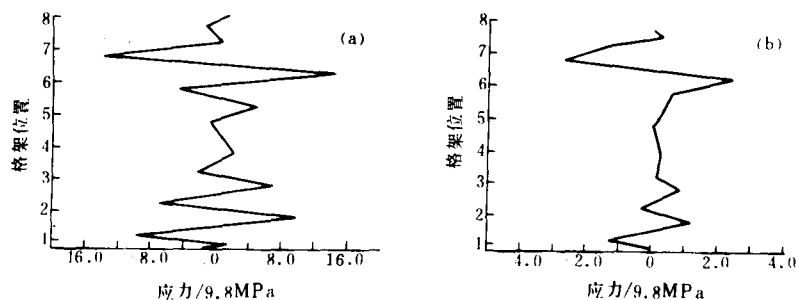


图6 SSE 激振中变形最大组件中的控制棒导向管(a)与燃料棒(b)上的应力分布

Fig. 6 Stress distribution of a control rod guide thimble (a) and a fuel rod (b) on the worst deformed assembly for whole time-history

参 考 文 献

- 1 张重珠. FAMREC (Fuel Assembly Mechanical Response Code)和它的扩展,第六届全国反应堆结构力学会议论文汇编. 北京. 1990. 11.
- 2 EG & G. Pressurized Water Reactor Lateral Core Response Routine. FAMREC (Fuel Assembly Mechanical Response Code), 1979. 9.
- 3 Nuno H, Mizuta M, Tsumura N. Development of Advanced Method for Fuel Seismic Analysis. SMIRT-4 D4/6. 1977.
- 4 Preumont A, Van Stunberghe T. Dynamic Characteristics of PWR Fuel Assemblies. SMIRT-6 D3/8. 1981.
- 5 Preumont A. A Two-Time Step Algorithm for Seismic Analysis of a PWR Core. NED 55. 1981. 49—62.
- 6 Leroux JC. CASAC: A Code Computing the LOCA and Seismic Loading on PWR Fuel Assemblies. SMIRT-7 C6/1. 1983.
- 7 RAMANI DT. Stress and Deflection Analysis of Reactor Internals due to Seismic and Maximum Hypothetical LOCA Loading Conditions. SMIRT-3 F1/9. 1975.

FAMSAP: A CODE TO ANALYZE THE DYNAMIC RESPONSE OF PWR FUEL ASSEMBLIES IN LOCA AND SEISMIC CONDITIONS

ZHANG CHONGZHU ZHANG ZHONGYUE

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-64, Beijing, 102413)

ABSTRACT

FAMSAP is used to calculate the non-linear lateral transient response of PWR fuel assemblies to seismic or LOCA excitation. It is mainly composed of three subcodes; two of which are for physics calculation and another one is for plotting purpose,

FAMSAP=FAMREC+FAFRES+PLOT.

FAMREC was developed by EG & G Idaho, Inc., to supply the US NRC. FAFRES and PLOT were developed at CIAE, Beijing, China. In the report, the functions of the FAMSAP are described and some results of dynamic analysis for Qinshan assemblies are given. Finally, several acceptance criteria for fuel assembly during seismic or LOCA condition are suggested.

Key words Fuel assemblies Seismic LOCA FAMSAP Code