

文章编号: 0258-0926(2018)03-0040-05; doi:10.13832/j.jnpe.2018.03.0040

基于 ANSYS 的燃料组件事故动力分析程序

齐欢欢, 吴万军, 沈平川, 姜乃斌, 叶献辉, 黄旋, 黄茜

中国核动力研究设计院核反应堆系统设计技术重点实验室, 成都, 610213

摘要: 对燃料组件事故动力分析的流程、燃料组件轴向模型以及横向排模型建立方法、轴向和横向事故动力响应计算方法、格架作用力和导向管应力计算方法进行了研究。基于有限元软件 ANSYS 的 APDL 和 UIDL 语言, 引入参数化和模块化的思想, 编制燃料组件事故动力分析程序, 并采用编制的程序与专用软件分别对某型燃料组件进行对比验证。对比结果表明差异较小, 均在工程允许误差范围之内; 采用编制的程序代替专用软件进行燃料组件事故动力分析, 编制的程序分析能力增强, 效率更高。选取某电厂作为分析对象, 采用编制的程序进行了实例计算, 分析结果满足规范要求。

关键词: 燃料组件; 事故工况; 动力分析; ANSYS

中图分类号: TL352 **文献标志码:** A

Dynamic Analysis of Fuel Assembly for Accident Condition Based on ANSYS

Qi Huanhuan, Wu Wanjun, Shen Pingchuan, Jiang Naibin,
Ye Xianhui, Huang Xuan, Huang Qian

Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China

Abstract: The process of fuel assembly dynamic analysis for accident condition was studied. Method of axial and lateral dynamic modeling was developed. The axial and lateral dynamic response calculation method was established, and then the grid impact force and guide thimble stress calculation were carried out. Based on ANSYS APDL and UIDL language, introducing the idea of parameterization and modularization, the fuel assembly dynamic analysis program (program-developed) for accident condition was developed. Compared validation was carried out using program-developed and software-specific respectively for a certain type of fuel assembly. Comparison results show that the difference was small, and in the range of engineering permissible error. The program developed can be used to analyze the fuel assembly accident instead of software-specific. Analysis ability of the program developed was stronger and calculation efficiency was higher than that of the specific software. Selecting a nuclear power plant as the analysis object, the program developed is used to do the dynamic calculation of fuel assembly for accident condition, and the analysis results meet the requirements of the code.

Key words: Fuel assembly, Accident condition, Dynamic analysis, ANSYS

0 引言

燃料组件是核电厂反应堆堆芯的核心部件。压水堆燃料组件设计准则要求在极限事故工况期间, 为了确保燃料系统的可冷却性, 燃料组件应保持结构完整, 因此需要对燃料组件进行极限事故安全分析。为了开展燃料组件极限事故安全分析, 必须对燃料组件进行事故动力响应分析, 主要包括安全停堆地震 (SSE) 和失水事故 (LOCA)。

通过燃料组件事故动力响应分析, 可验证燃料组件是否满足相关规范的要求。已有学者对燃料组件的事故动力分析进行了研究^[1-3]。目前国内大部分燃料组件采用专用软件进行事故动力分析, 但大部分专用软件的建模可视性差, 输入格式不灵活, 编程语言不易掌握, 使用范围不广泛, 因此, 有必要开发一种基于通用软件进行燃料组件事故动力分析的系统。另外在燃料组件导向管应力分

析方面,周云清^[4]等在燃料组件详细模型基础上,将动态分析得到的燃料组件最大变形作为边界条件输入,通过有限元软件对导向管应力进行应力分析;齐欢欢^[5]等以燃料组件动态分析得到的燃料组件变形为基础,推导得出导向管应力的计算方法,可直接计算得到导向管应力,本文将基于此方法进行导向管应力计算。

本文分析燃料组件事故动力分析的流程,对燃料组件轴向模型以及横向排模型建立方法进行研究,分别进行燃料组件轴向和横向事故动力响应分析,求解接口载荷、格架撞击载荷,研究导向管应力的计算方法,并对计算结果进行组合。基于通用有限元软件 ANSYS 的 APDL 和 UIDL 语言,引入参数化和模块化的思想,编制燃料组件事故动力分析程序。针对某型燃料组件采用 ANSYS 编制的程序与专用软件分别进行事故工况动力分析,对分析结果进行了对比验证。选取某电厂作为分析对象,采用 ANSYS 编制的程序进行了实例计算。

1 分析流程

燃料组件事故下的动力分析流程如图 1 所示。建立整个反应堆的响应模型,根据地震响应谱和 LOCA 水力载荷,计算堆芯上下板的载荷、堆芯上下板及围板的运动时程,以此作为燃料组件事故动力分析的输入。进行事故动力分析先要建立燃料组件事故动力分析模型,该模型需要通过一系列的试验进行验证;然后进行事故动力分析,包括轴向和横向分析,每种分析又分别包含 SSE 和 LOCA 分析,计算得到格架撞击载荷、导向管应力和结构内部载荷;将各种情况计算的格架撞击载荷和导向管应力分析进行组合[平方和平方根组合 (SRSS)],最后评价计算结果是否满足相关要求。

2 计算模型

根据设计要求,堆芯必须满足第 4 类事故工况(包括 SSE 和 LOCA)下的安全要求。在这类工况下,地震地面运动或 LOCA 的脉冲压力波传

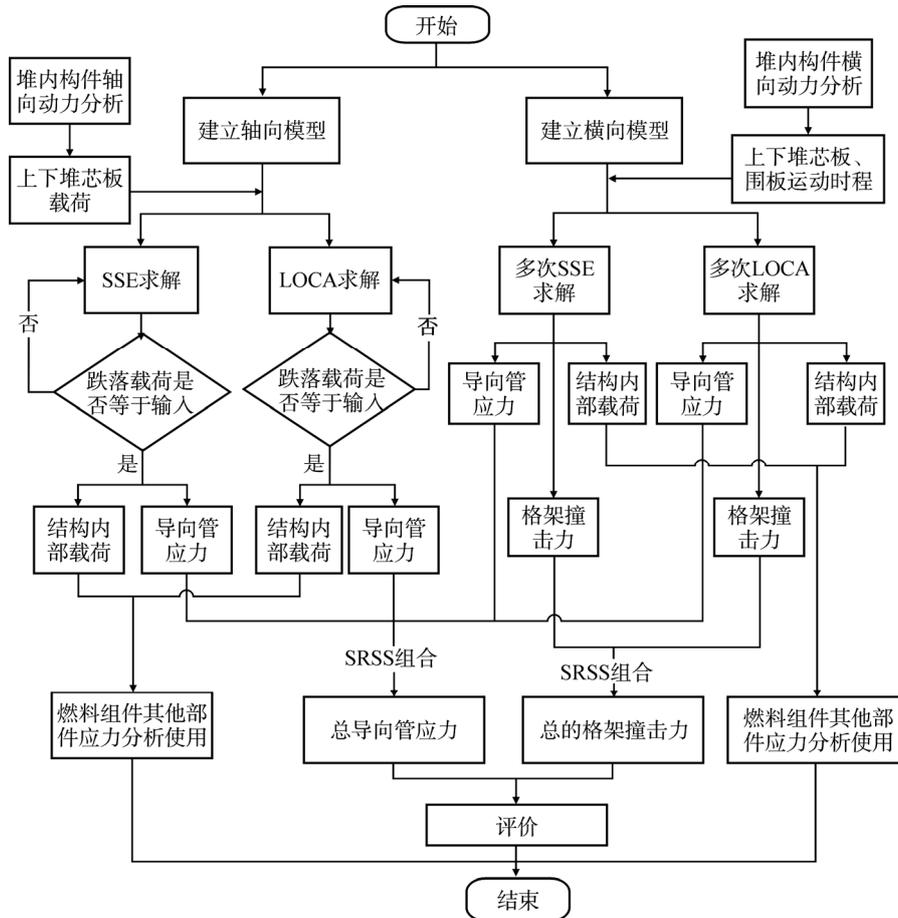


图 1 燃料组件事故动力分析流程

Fig. 1 Process of Fuel Assembly Dynamic Analysis for Accident Case

递给压力容器引起显著的堆芯位移，堆芯运动的水平分量导致燃料组件横向变形，相邻组件间或组件与围板间在格架处易发生碰撞；垂直分量使燃料组件产生轴向应力，严重时可能导致燃料棒滑移。

在进行燃料组件事故动力分析时，需要提供堆芯上下板和围板的运动时程以及堆芯上下板载荷作为设计输入。由于堆内构件水平和垂直方向结构耦合以及输入时程耦合较弱，因此分别建立了堆内构件水平模型和垂直模型进行动力分析，计算出堆芯上下板和围板的运动时程以及堆芯上下板载荷，以供燃料组件事故动力分析使用。

为了与堆内构件动力分析对应，燃料组件事故动力分析模型包括横向排模型(亦称水平模型)和轴向模型(亦称垂直模型)。

燃料组件轴向模型采用弹簧单元来模拟燃料组件骨架、燃料棒、上/下管座、压紧弹簧的刚度，采用间隙模拟燃料棒与上/下管座的间隙和燃料组件下落的当量高度，用滑移单元模拟燃料棒和骨架间的滑移特性。燃料组件轴向模型如图 2 所示，图中数字表示节点编号。轴向模型通过燃料组件的相关试验进行验证，如燃料组件的跌落实验、轴向刚度试验等，通过调节轴向模型的参数使计算结果与试验结果相符。

在燃料组件横向排模型中(图 3)，一般考虑一排燃料组件在一个方向上激振，每个组件由一系列梁单元来代表(图 4，图中数字表示节点编号)，用带间隙的弹簧模拟格架处的碰撞。在组件梁模型中，节点位于格架处，足以代表横向变形的重要位置。反应堆冷却剂对组件动态性质的影响通过流固耦合单元和合适的阻尼值来代表。横向模型需通过燃料组件的相关试验来验证，

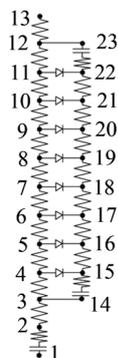


图 2 燃料组件轴向模型

Fig. 2 Axial Model of Fuel Assembly

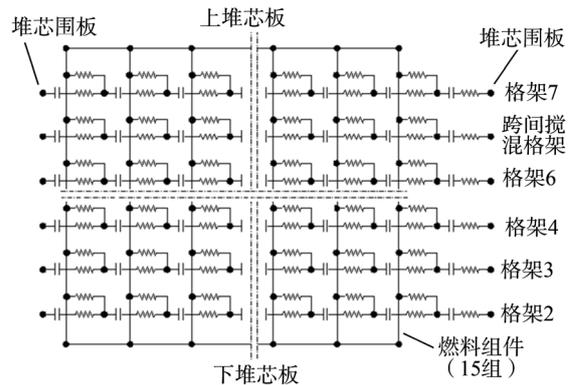


图 3 燃料组件横向排模型

Fig. 3 Lateral Model of Fuel Assembly

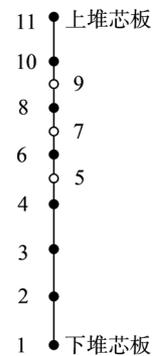


图 4 单组燃料组件梁模型

Fig. 4 Lateral Beam Model of One Fuel Assembly

如格架动态压缩试验、燃料组件撞墙试验、燃料组件横向刚度试验、自由振动试验等，调节模型中的参数使计算结果与试验结果相符。

3 事故动力分析的程序验证

在建立燃料组件事故动力分析模型之后，以堆芯上下板载荷以及堆芯上下板和围板的运动时程作为载荷输入条件，进行燃料组件轴向跌落以及横向排模型瞬态动力分析。

3.1 轴向动力响应分析及验证

燃料组件轴向动力分析的目的是计算外部冲击载荷作用下组件中各部件的载荷分布。

基于燃料组件的轴向分析模型，以堆芯上下板的载荷作为输入，调整撞击间隙，进行轴向跌落分析，提取跌落撞击载荷，判断其是否等于输入。编制程序使此迭代过程自动化，程序自动判断修改间隙值直到跌落载荷等于输入，最后输出导向管应力和内部载荷，供应力评价使用。

为了验证轴向模型模拟方法、动力分析计算方法以及编制程序的正确性，针对某型燃料组件，

分别采用 ANSYS 编制的程序与专用软件进行轴向动力分析，并对关键位置的变形进行对比，关键节点 7 的位移对比结果如图 5 所示，其他位置的对比结果与图 5 类似。通过对比发现，基于 ANSYS 编制的程序和专用软件的计算结果一致。

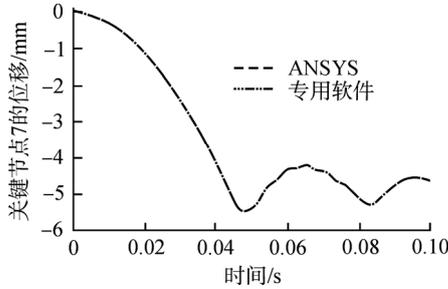


图 5 轴向动力分析关键节点 7 的位移比较

Fig. 5 Comparison of Displacement of Key Node No.7 for Axial Dynamic Analysis

3.2 横向动力响应分析及验证

燃料组件横向动力分析是为了得到在 SSE 和 LOCA 作用下燃料组件之间的碰撞情况，得到格架作用力、导向管应力以及组件内部载荷等。

以堆芯上下板及围板的运动时程作为输入，基于燃料组件横向排模型进行 SSE 和 LOCA 动力分析。因为地基存在多种剪切波速，且假设了多个接管嘴断裂，所以需进行多次 SSE 和 LOCA 计算。编制程序使多次 SSE 和 LOCA 分析可自动进行计算，并自动输出格架作用力供格架稳定性评价、输出导向管应力和内部载荷供应力评价使用。

为验证横向模型模拟方法、动力分析计算方法以及编制程序的正确性，针对某型燃料组件，分别采用 ANSYS 编制的程序与专用软件进行横向排模型动力分析，并对格架作用力和导向管应力结果进行了对比，对比结果如表 1 和表 2 所示，其中 P_m 表示薄膜应力， P_b 表示弯曲应力。

通过对比发现，基于 ANSYS 编制的程序和专用软件计算的格架之间作用力的差别在 6% 以内，导向管薄膜加弯曲应力的差别在 4% 以内，在工程允许误差范围之内。由于专用软件采用显式直接积分法，ANSYS 采用精度更高的隐式求解方

表 1 格架作用力比较

Table 1 Comparison of Grid Force Results

分析软件	格架与内部结构之间作用力/N	格架撞击力/N
专用软件	3142	7853
ANSYS	2978	8038
差异/%	-5.2	2.4

表 2 导向管应力比较

Table 2 Comparison of Stress Results for Guide Thimble

分析软件	P_m+P_b (单元第 1 个节点)/Pa	P_m+P_b (单元第 2 个节点)/Pa
专用软件	1.360×10^8	1.434×10^8
ANSYS	1.363×10^8	1.489×10^8
差异/%	0.2	3.9

法，因此对于非线性较多的模型，两者的计算结果必然存在差异。相对于轴向模型，横向排模型存在更多的非线性单元，因此差异相对增大，但均在工程允许误差范围之内。

4 格架作用力和导向管应力分析及评定

燃料组件事故动力分析的目的是：计算格架之间的作用力，用于格架稳定性评价；求解导向管应力，用于事故工况下导向管应力评价；提供燃料组件内部载荷，用于其他部件应力评定。

对于格架间的作用力计算，因只有横向排模型会发生组件之间的碰撞，产生格架作用力，所以将横向 SSE 和 LOCA 输出的格架作用力进行组合得到总的格架作用力。通过格架动态压缩试验确定格架极限载荷，将格架作用力与格架的极限载荷进行比较，判断格架设计是否满足规范要求。

轴向和横向动力分析均产生导向管应力，因此需对轴向 SSE 和 LOCA 以及横向 SSE 和 LOCA 产生的应力进行组合得到总的导向管应力。对于轴向动力分析，采用通过试验确定的应力分布因子对应力计算结果进行修订。对于横向动力分析，通过研究横向排模型导向管应力的计算方法，结合横向排模型中燃料组件的简化方法以及导向管在燃料组件中的结构分布，推导出导向管薄膜应力、弯曲应力的计算方法，编制程序实现该算法。将轴向和横向动力分析计算的导向管应力进行组合得到总导向管应力，根据 ASME^[6]规范确定应力限值，将总导向管应力与限值进行比较，判断导向管设计是否满足规范要求。

另外通过编制程序输出燃料组件内部载荷，为其他部件的应力分析提供接口载荷。

5 算例

选取某电厂作为分析对象，取该电厂堆芯中燃料组件数量最多一排作为分析对象，根据第 1 节所述的分析流程，按照第 2 节方法分别建立燃料组件轴向和横向动力分析模型，根据第 3 节中燃料组件事故动力分析方法进行动态响应分析，

表3 格架作用力
Table 3 Summary of Grid Force

格架位置	格架作用力/N			格架位置	格架作用力/N		
	LOCA-横向	SSE-横向	组合		LOCA-横向	SSE-横向	组合
格架 2	3138	4941	5853	MSMG2	2329	3057	3843
格架 3	1719	11396	11525	格架 6	3913	8452	9314
格架 4	1254	15493	15544	MSMG3	3395	1474	3701
MSMG1	2235	4812	5306	格架 7	3314	2446	4119
格架 5	2738	15447	15688	—	—	—	—

表4 导向管应力分析结果统计 MPa
Table 4 Summary of Stress Results for Guide Thimble MPa

导向管位置	LOCA-横向		LOCA-轴向		SSE-横向		SSE-轴向		组合	
	P_m	P_m+P_b	P_m	P_m+P_b	P_m	P_m+P_b	P_m	P_m+P_b	P_m	P_m+P_b
下管座-格架 2	32	54	62.2	91.3	119.7	180.3	29.1	42.7	141.7	213.5
格架 2-格架 3	34.3	60.8	28.8	29.9	43.5	84.4	5.4	5.6	62.7	108.4
格架 3-格架 4	38.3	63.8	11.4	11.9	89.4	101	4.6	4.7	98.0	120.1
格架 4-MSMG 1	63.3	97.1	8.4	8.8	111.9	167.3	3.8	4	128.9	193.7
MSMG 1-格架 5	53.6	109.9	7.5	7.8	109.5	172.2	3.2	3.3	122.2	204.5
格架 5-MSMG 2	42.9	118.5	6.2	6.4	93.7	137.1	2.5	2.6	103.3	181.3
MSMG 2-格架 6	51	109.4	4.3	4.4	88.5	140.6	1.6	1.7	102.2	178.2
格架 6-MSMG 3	57.9	111.3	2	2.1	62	145.5	0.7	0.8	84.9	183.2
MSMG 3-格架 7	56.8	135.1	2.4	2.5	29.3	155.9	0.9	0.9	64.0	206.3
格架 7-上管座	43.3	73.9	34.9	45.8	128.2	201.2	0.1	0.1	139.7	219.2

得到格架作用力、导向管应力以及燃料组件内部载荷等,然后依据第4节中方法分别进行格架作用力和导向管应力组合,得到各格架的作用力,结果如表3所示,导向管的薄膜应力以及薄膜加弯曲应力结果如表4所示,其中MSMG表示跨间搅混格架。

根据试验确定格架极限载荷,对比计算结果和极限载荷发现格架设计满足要求。根据规范查找应力限值,对比导向管应力计算结果和应力限值发现导向管设计满足规范的要求。

6 结论

(1) 开展了燃料组件事故动力分析的流程、燃料组件轴向模型以及横向排模型建立方法、轴向和横向事故动力响应计算方法、格架作用力和导向管应力计算方法研究。

(2) 基于通用有限元软件 ANSYS 的 APDL 和 UIDL 语言,引入参数化和模块化的思想,编制燃料组件事故动力分析程序。

(3) 采用 ANSYS 编制的程序与专用软件分别对某型燃料组件进行对比验证,对比结果表明差异较小,均在工程允许误差范围之内,因此,

可采用 ANSYS 编制的程序代替专用软件进行燃料组件事故动力分析,ANSYS 编制的程序分析能力增强,效率更高。

(4) 选取某电厂作为分析对象,采用 ANSYS 编制的程序进行了实例计算,分析结果满足规范要求。

参考文献:

- [1] 张重珠, 张忠岳. 燃料组件的地震和失水事故响应——FAMSAP 程序的应用[J]. 原子能科学技术, 1993, 27(4): 353-358.
- [2] 肖忠. 秦山二期工程燃料组件 LOCA 和 SSE 下的事故分析[J]. 核动力工程, 2000, 21(6): 511-514.
- [3] 谢永诚, 姚伟达, 姜南燕. 燃料组件在地震和失水工况下的结构动力反应分析[J]. 核动力工程, 2002, 23(2): 139-147.
- [4] 周云清, 刘家正, 朱丽兵. 地震加 LOCA 下的燃料组件安全分析研究[J]. 核动力工程, 2011, 32(增刊): 83-86.
- [5] 齐欢欢, 沈平川, 吴万军, 等. 燃料组件导向管事故工况应力计算方法研究[J]. 应用数学和力学, 2016, 37(5): 534-541.
- [6] AMSE. ASME boiler and pressure vessel code, section III [S]. New York: AMSE, 2004.

(责任编辑: 马 蓉)