控制棒驱动机构与反应堆堆顶组合 模型的抗震分析

鲁治诚^{1,2},尚尔涛³,伍时建^{1,2},聂照宇^{1,2},陈永超^{1,2}

(1. 核电安全监控技术与装备国家重点实验室,广东 深圳 518124;2. 深圳中广核工程设计有限公司, 广东 深圳 518172;3. 深圳中广核工程设计有限公司 上海分公司,上海 200241)

摘要:目的 获得控制棒驱动机构(CRDM)和反应堆堆顶组件(RHP)在地震作用下的动力学响应。方法 建 立控制棒驱动机构与反应堆堆顶组件的有限元组合模型,采用 ANSYS 软件对模型开展三维非线性抗震分 析。分析模型中分别用梁单元、杆单元和弹簧单元等模拟堆顶的各个部件,考虑控制棒驱动机构抗震支承 板之间、抗震支承板与抗震支承环之间的相互碰撞作用。此外,将电缆托架和电缆桥组件的梁模型也加入 到组合模型,而不是简单地将其简化为集中质量,可减小该部分质量分配不真实对抗震分析结果带来的误 差。结果 利用 ANSYS 软件时程法中的直接积分法完成了组合模型的抗震分析,提取了控制棒驱动机构和 反应堆堆顶组件各部位应力评定所需的载荷。结论 较为准确地模拟了抗震板之间的碰撞作用,得到了各截 面的载荷,可为设备应力分析提供输入。

关键词:控制棒驱动机构;反应堆堆顶;抗震分析

DOI: 10.7643/ issn.1672-9242.2019.02.013

中图分类号: TL351 文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2019)02-0065-05

Seismic Analysis of Assembled Model of Control Rod Drive Mechanism and Reactor Head Package

LU Zhi-cheng^{1,2}, SHANG Er-tao³, WU Shi-jian^{1,2}, NIE Zhao-yu^{1,2}, CHEN Yong-chao^{1,2}
(1. State Key Laboratory of Nuclear Power Safety Monitoring Technology and Equipment, Shenzhen 518124, China;
2. China Nuclear Power Design Co., Ltd, Shenzhen 518172, China;
3. Shanghai Branch, China Nuclear Power Design Co., Ltd, Shanghai 200241, China)

ABSTRACT: Objective To obtain the dynamic response of control rod drive mechanism (CRDM) and reactor head package (RHP) under earthquake conditions. **Methods** The assembled finite element model for CRDM and RHP was established. Three-dimensional nonlinear seismic analysis was performed with software ANSYS. Beam, link, and spring elements in software ANSYS were used for modeling components of CRDM and RHP, and the collision effects among seismic support plates and between seismic ring and seismic support plates were considered. Furthermore, the beam model of cable frame and cable-bridge was also assembled in the model instead of simplifying to quality point, which can reduce the error of seismic analysis caused by untruthful mass distribution. **Results** The seismic analysis and calculation of assembled model were conducted by the direct integral calculus method with software ANSYS, and the section loads of CRDM and RHP which was required in stress analysis were extracted. **Conclusion** The seismic plate collision between the load of each section is simulated accurately and the load of each section is obtained. It can provide input for stress analysis of equipment.

KEY WORDS: control rod drive mechanism; reactor head package; seismic analysis

控制棒驱动机构(CRDM)和反应堆堆顶组件 (RHP)是实现核反应堆功能的重要设备,属于抗震 I类设备。根据 RCC-M 规范^[1]、ASME 规范^[2]等相关 要求,需要对其开展抗震分析,以验证其能够在设计 基准地震作用下不丧失其执行的安全功能。

对结构开展抗震分析时,可采用等效静力法、响应谱法和时程分析法等。考虑到在 SSE 地震过程中, CRDM 与 RHP 各部件之间将发生碰撞和摩擦等非线 性因素,文中采用时程分析法进行分析,能使计算结 果更为精确。以 CPR1000 堆型的 CRDM 及 RHP 为 例,采用时程分析法开展三维非线性抗震分析,采用 ANSYS 程序^[3]中的梁单元、杆单元及弹簧单元等建 立了 CRDM 和 RHP 的下部吊具组件、抗震支承组件、 抗震板组件及电缆托架和电缆桥组件的等效模型,考 虑 CRDM 顶部抗震支承板之间、抗震支承板与抗震 支承环之间的碰撞作用,获得 CRDM 和 RHP 各位置 的截面载荷。

1 结构简介

CRDM 和 RHP 安装在反应堆压力容器(RPV) 顶盖上方,是反应堆的重要组成部分。运行时,RPV 顶盖与容器法兰通过主螺栓连接。停堆换料时,CRDM 和 RHP 随 RPV 顶盖一并起吊和回放,放置在顶盖存放架上。RHP 主要由以下几个部件组成。

1)反应堆堆顶吊具组件,分为下部吊具和上部 吊具,下部吊具下端通过销轴与顶盖吊耳连接,上部 穿过抗震支承环并通过螺栓与支承环固结,支承抗震 支承环、电缆托架和电缆桥的质量。上部吊具在反应 堆开盖时通过销轴与下部吊具上端连接,是起吊顶盖 组件的重要工具。

2)反应堆堆顶抗震支承装置,主要由抗震支承 环和 5 组抗震拉杆组件组成,在地震和 LOCA 工况 下,与 CRDM 抗震板组件配合限制 CRDM 顶部的侧 向位移,防止 CRDM 发生较大的弯曲变形。抗震拉 杆包括 3 个径向拉杆和 2 个限制转动的切向拉杆组 成,这些拉杆可以假设只受拉不受压,抗震环所受载 荷通过拉杆传递到混凝土墙上。

3) CRDM 抗震板组件,由 61 个抗震板、8 个隔 离板及固定在抗震支承环上的限位座组件等构成。每 个抗震板对应固定在一组 CRDM 上,相邻抗震板之 间存在间距,为 CRDM 抗震提供侧向限位,将地震 时 CRDM 之间的撞击力传递至抗震支承环上。

4)反应堆堆顶电缆托架及电缆桥组件,通过 5 个支座固定在抗震支承环上。运行状态下,电缆桥的 另一端搭在反应堆水池池边,作为堆顶电缆与外部端 口连接的通道。在顶盖存放状态,电缆桥连同其上的 电缆被收起并固定在堆顶上。

5)反应堆堆顶通风罩组件,坐落在顶盖通风罩 支承上,为 CRDM 磁轭提供冷却风,是非抗震设备, 在分析时将不考虑此组件的抗震。

CPR1000的堆顶结构如图1所示。



图 1 CPR1000 的堆顶结构

2 分析模型

2.1 模型建立

在正常运行工况下, CRDM 和 RHP 的下部与堆 内构件、反应堆压力容器相连接,需要依据 SRP3.7.2 的解耦准则^[4]进行解耦处理。采用多点激励,分别在 反应堆压力容器上封头中心位置和抗震拉杆位置施 加位移时程输入。

采用 ANSYS 程序的梁单元 BEAM188 建立下部 吊具、抗震支承环和电缆托架及电缆桥的模型,根据 截面形状及尺寸设置相应的单元截面参数。CRDM 为 几种空心的圆截面的组合,抗震支承环为空心的方形 截面的梁结构,下吊杆为实心圆截面的梁结构,电缆 托架及电缆桥则主要由 L 型钢组成。根据 BEAM188 的截面分类选取各自的类型,并输入截面尺寸数据。 抗震拉杆在承受拉力时发挥作用,而在承受压力时失 去作用,因此采用 ANSYS 程序的 LINK10 单元进行 模拟。由于通风罩主要由 RPV 顶盖承重,对 CRDM 和 RHP 地震响应的影响可以忽略,且该设备为非抗 震设备,因此不在模型中建立,也不考虑其质量。 CRDM 分为耐压壳、驱动杆、棒位指示器、引线 管等部件组成,均为空心的圆截面。采用梁单元分别 建立各部件模型,并根据位置关系建立绑定,组合形 成完整的 CRDM 模型。钩爪部件、线圈部件和内部 水的质量作为等效质量附加在耐压壳单元上,通过修 改单元密度的方法实现。CRDM 的动力学分析模型如 图 2 所示,将各部件的位置进行了平移,以显示各模 型之间的连接关系。实际分析模型中,驱动杆、耐压 壳和棒位指示器梁单元的对称轴是统一的。在 CRDM 上部的抗震板位置,建立带间隙的弹簧单元 COM-BIN40 模拟抗震板之间的碰撞,间隙值设置为相邻 抗震板之间的实际间隙,弹簧刚度依据抗震板在碰 撞方向的实际刚度进行设置。



图 2 CRDM 动力学分析模型

抗震支承组件的支承环和下吊杆用 BEAM188 单 元模拟,下吊杆为圆形截面,支承环为薄壁方形截面。 支承环的梁单元作一定偏心设置,使梁单元节点和下 吊杆的连接位置重合。抗震拉杆用 LINK10 单元模拟, 并设置成只受拉力作用。拉杆与支承环的连接位置离 开支承环的梁单元节点有一定距离,用刚性梁连接。 抗震支承组件和下吊杆的有限元模型如图 3 所示。

电缆托架及电缆桥组件简化为梁结构模型,主要由下层电缆托架、上层电缆托架、下层电缆桥、 上层电缆桥和用于支承的支座、连杆等组成,均采 用BEAM188单元模型。电缆质量及其他附属部件质 量等效分配在相应位置的托架工字梁和桥架角钢 上。电缆托架及电缆桥组件在运行状态下的有限元 模型如图 4 所示。



图 4 电缆托架及电缆桥组件有限元模型

将 61 组 CRDM 及 RHP 各组件的模型依据位置 关系和连接关系组合起来,得到用于分析的组合模 型,如图 5 所示。将模型进行 3D 可视化显示,上部 的局部结构如图 6 所示。



图 5 CRDM 和堆顶结构的组合模型

2.2 边界条件

模型的边界条件为:1)拉杆的外端与土建结构 固定约束,电缆桥架的土建支承点(两个支腿)约束 竖直方向位移;2)下吊杆与压力容器上封头连接, 约束三个方向的平动自由度(x、y、z),可绕吊耳销 轴自由转动,约束另外两个方向的转动自由度;3) RPV上封头简化成为刚体,CRDM管座贯穿件均与 RPV上封头固定约束。上封头的顶点作为控制点,分 别与每个CRDM管座贯穿件下端建立刚性耦合单元。



2.3 阻尼

采用等效粘性阻尼来体现系统中的阻尼效应,在 系统运动微分方程中,假设 Rayleigh 阻尼矩阵为:

 $[C] = \alpha[M] + \beta[K]$

式中: [M]为质量矩阵; [K]为刚度矩阵; α 、 β 为 Rayleigh 阻尼常数,可通过以下方程求解:

ξ_i=α/(2ω_i)+βω_i/2 (2)
式中: *ξ_i* 为结构的阻尼比; *ω_i* 为结构频率(圆频率), 一般可选取结构的两个最重要的频率值来求
μ α、β。

由于 CRDM 的第一阶频率为 1.6 Hz,且 CRDM 和 RHP 的重要频率多在 40 Hz 以下,因此选择 1 Hz 和 40 Hz 这两个频率来计算 Rayleigh 阻尼常数。对于 SSE 地震和 LOCA 动力响应分析,阻尼比取 4%,计 算得到 α =0.49、 β =0.000 31。阻尼比与频率的关系曲 线如图 7 所示。



3 结构的抗震分析

3.1 地震输入

堆顶在运行状态时的地震输入来源有两个:一个 是 RPV 上封头的运动;一个是抗震拉杆处土建结构 的运动。采用时程分析法对 CRDM 和 RHP 组合模型 开展抗震分析, RPV 上封头的位移施加在 RPV 上封 头的控制节点上,抗震拉杆处的位移施加在抗震拉杆 外端与土建连接处。

取某 SSE 地震反应谱经谱转时程后并积分得到 的位移时程作为地震输入,考虑地震的随机性,共转 换了3组时程,针对每组时程开展一次独立运算。RPV 顶盖对应的3组位移时程如图8所示,加载在 RPV 顶盖上封头中心位置。抗震拉杆位置的时程数据也通 过其固定位置的土建结构楼层反应谱转换得到,加载 在拉杆外端。



(1)

图 8 RPV 上封头位移时程输入

3.2 分析结果

基于ANSYS程序开展了CRDM和堆顶组合模型的地震动力学分析,取自动时间步长,初始时间步长

为 0.001 s,最小时间步长为 1×10⁻⁶ s,最大时间步长 为 1×10⁻³ s。计算得到了地震时程作用下 CRDM 和 RHP 的动力学响应,在结果中可提取 CRDM 和 RHP 各部件截面上的最大轴力、剪力和弯矩等载荷(部分

结果见表 1),这些载荷可作为设备应力分析的输入。 还可以提取结构关键位置的响应时程和反应谱,作为 部件抗震性能试验的输入。

部件	轴力/N	剪力/N	弯矩/(N·m)
CRDM 耐压壳	1.93×10^{4}	1.42×10^{4}	1.93×10^{4}
下吊杆	1.67×10^{5}	1.34×10^{4}	1.09×10^{4}
电缆托架与电缆 桥支座	2.42×10 ⁵	1.11×10 ⁵	5.01×10 ⁴

表 1 分析得到的部分截面地震载荷

3 结论

采用 ANSYS 建立 CPR1000 机组 CRDM 和 RHP 的组合模型,并运用时程分析法、多点激励技术开展

了模型在地震作用下的动力学响应分析,较为准确地 模拟了抗震板之间的碰撞作用,得到了各截面的载 荷,可为设备应力分析提供输入。

参考文献:

- RCC-M 2012, Design and Construction Rules for Mechanical Components of Power Nuclear Islands[S].
- [2] ASME 2013, ASME Boiler and Pressure Vessel Code[S].
- [3] ANSYS Inc. ANSYS User's Manual for Revision[K]. Pittsburgh: ANSYS Inc, 2009.
- [4] NUREG-0800, Standard Review Plan for the Review of Safety Analysis Reports for Nuclear Power Plants: LWR Edition[S].