

核电厂电气仪控设备柜地震响应分析研究

徐定耿 叶维娟 张 明

(上海核工程研究设计院)

摘 要

完成了五种典型电气仪控设备柜的地震响应分析和试验。采用梁、板线性有限元数学模型计算了结构自振特性和地震响应。对三台典型电气仪控机柜进行地震试验,测得结构自振频率和加速度响应值。计算结果和试验数据符合得很好,从而论证了计算数学模型的有效性。

**Seismic Response Analysis and Test for
Electrotechnical Box of Nuclear Power Plant**
(*In Chinese*)

XU Dinggeng YE Weijuan ZHANG Ming
(Shanghai Nuclear Engineering Research and Design Insititute)

ABSTRACT

The seismic response analysis and exprimental study for five typical types of electrotechnical box of NPP have been completed. Structural free vibration characterization and seismic response were calculated by means of beam-plate linear mathematical model of finite element method. Seismic tests have been carried out for three typical types of electrotechnical box. Structural natural frequency and acceleration response from seismic tests were measured. Calculation results fairly meet test data. Thus effectiveness of the mathematical model is further verified.

概 述

核电站安全系统设备要求在核电站事故情况下可靠地运行,即使在发生地震的情况下也不例外。这就要求在安全系统中使用的 1E 级电气、仪控设备具有抗地震性能,为确保电气、仪控设备在地震载荷下能安全、可靠、正确地动作,必须按规定进行抗震试验验证。而对安装电气、仪控设备的柜、屏、盘、箱结构也应满足抗地震要求,要求设计的机柜结构在地震载荷作用下不仅满足结构完整性要求,同时应尽量使安装在机柜中的电气、仪控设备承受较小的地震载荷作用,即该机柜在所在楼层地震加速度作用下,机柜结构的加速度的反应不致影响电气、仪控设备的正确动作,因此,在抗地震验证试验前,对机柜进行抗地震分析计算,以便对机柜的结构设计提出合理的抗地震加固和减震措施以满足抗地震要求,从而保证电气、仪控设备抗地震验证试验(5 次 OBE、1 次 SSE)的成功。

本文选取了典型的的不同结构形式机柜进行抗地震分析计算,计算结果与装有电气、仪控设备的机柜样机的抗地震验证试验结果比较,自振频率与加速度响应值均较一致,证实了分析的计算模型、计算方法、计算程序是合理可信的,为今后电气、仪控机柜的抗地震设计提供了可靠的依据。

对选取的保护、专设、核测机柜;过程仪表机柜;电气仪表继电器屏;仪表端子箱;安全壳空气事故取样装置等结构,根据各机柜结构的特点,应用有限元法中的梁、板单元建立计算模型,以机柜所在楼层的地震加速度响应谱为地震载荷进行响应谱动态响应分析。为评价结构的完整性,对结构各部件所受的应力,按规范要求作了评定,分析和评定的主要依据为 NRC 有关管理导则^[1]和 ASME Ⅲ 的有关分卷和附录^[2]。

计算分析应用 ANSYS 程序,在 CONVEX C-120 计算机上完成计算。

1 分析方法

应用有限元法,建立结构计算模型,把设备所在楼面的地震加速度响应谱作为地震载荷,用响应谱法做动力响应分析,求得结构自振频率、振型。并用平方和平方根法(SRSS 法)得到结构总模态响应值(位移、加速度、内力、内力矩)。

1.1 计算模型

根据机柜特点,合理地建立计算模型是分析结果是否正确的关键。电气、仪控机柜主要为框架结构和板架结构两种形式,框架结构由 2~3 mm 厚钢板的型材或型钢组成机柜框架,外壁覆以 1.5~2 mm 板材组成机柜(如保护、专设、核测机柜,过程仪表机柜)。电气、仪控设备安装于机柜的内部桁架上。板架结构由 3~5 mm 的板材组成箱体,内部安置型材框架以增加板的刚度,电气、仪控设备安装在板上或框架上(如 BTG 盘,继电器屏,端子箱,安全壳空气事故取样装置)。因此,用有限元法建立计算模型时,选用三维梁单元和板单元组合成计算模型。保护、专设、核测机柜,过程仪表柜,继电器屏,端子箱和安全壳空气事故取样装置的有限元网格图见图 1~5。各机柜的有限元单元、结点数见表 1。

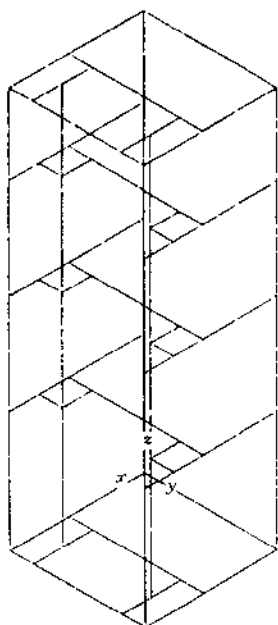


图1 保护、专设、核测机柜有限元网格图

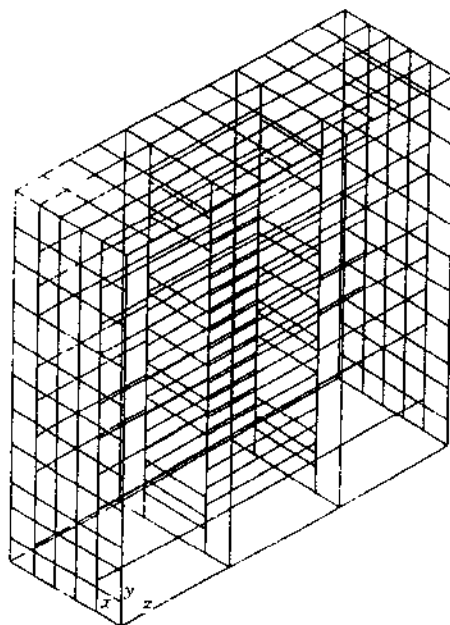


图2 过程仪表柜有限元网格图

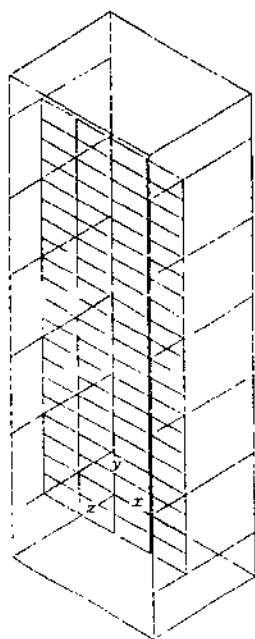


图3 继电器屏有限元网格图

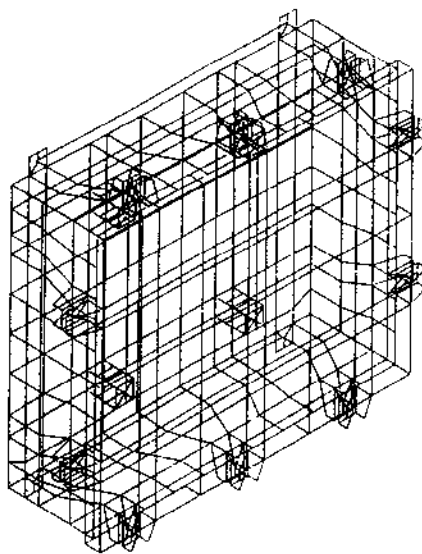


图4 仪表端子箱有限元网格图

表 1 计算模型单元、结点数

机柜名	模型型式	梁单元数	板单元数	结点数
核测机柜	梁	146	/	113
过程仪表柜	梁-板	762	170	706
继电器屏	梁-板	192	80	269
端子箱	板-梁	529	15	705
取样装置	板-梁	499	149	680

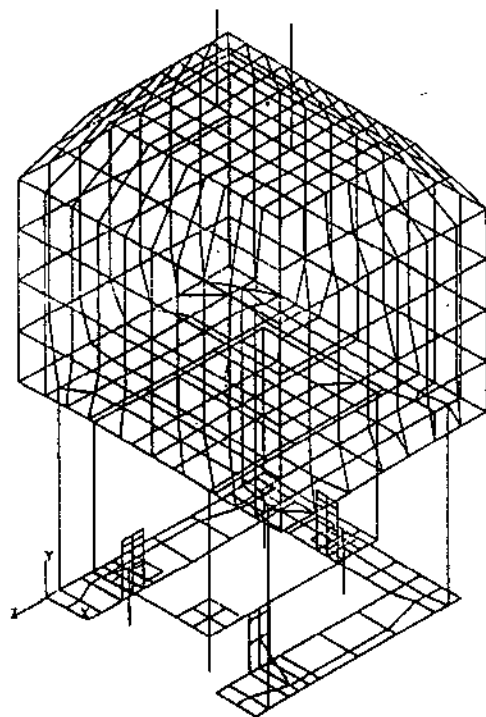
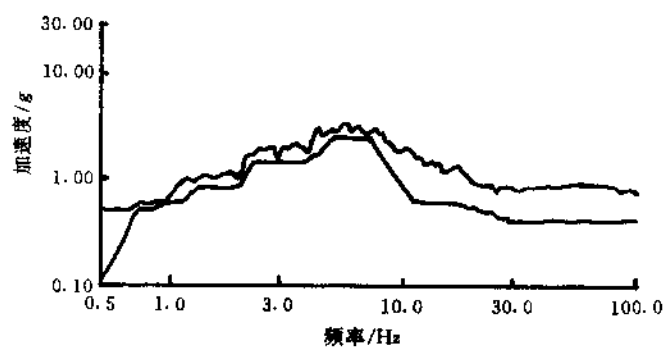


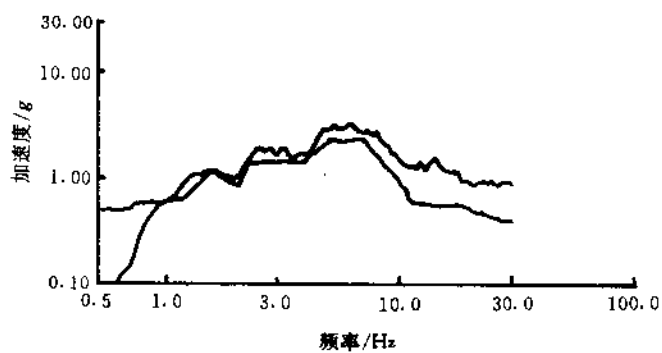
图 5 取样装置有限元网格图

1.2 地震载荷

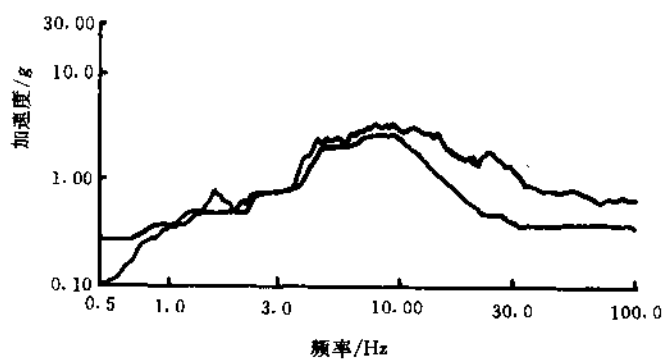
机柜三个方向的地震载荷,取自该机柜所在核电厂楼层的地震响应谱。本文的楼面地震响应谱取自 PC 核辅助厂房的楼面地震加速度响应谱^[3]。图 6 给出了 +22.5 m SSE 地震加速度响应谱,图 7 给出了 OBE 地震加速度响应谱。图示直线为设计楼面地震加速度响应谱。波浪线为地震试验台面加速度响应谱。OBE 和 SSE 的阻尼比分别取 0.02 和 0.04。



(a) X 方向

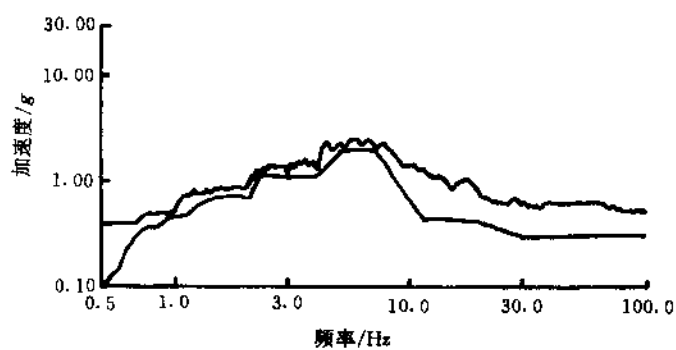


(b) Y 方向

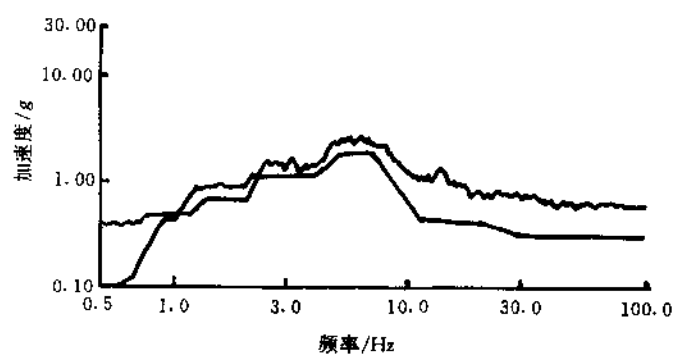


(c) Z 方向

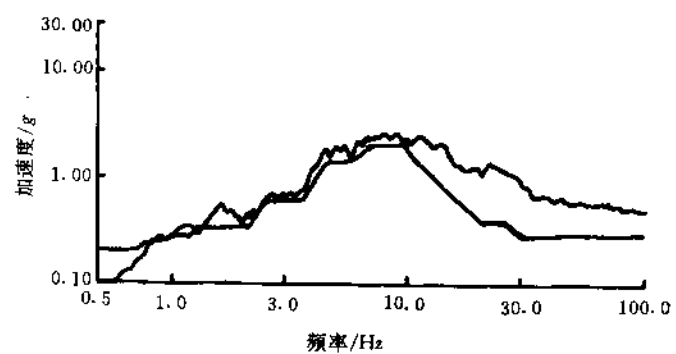
图 6 SSE 地震加速度响应图



(a) X 方向



(b) Y 方向



(c) Z 方向

图 7 OBE 地震加速度响应图

1.3 模态组合

在响应谱法中, 所研究的特定响应的峰值, (位移、加速度、内力、内力矩、应力)。按每一振型加以确定, 总的响应则用峰值模态响应组合以平方和平方根法 (SRSS 法) 求得。

先分别求出 X, Y, Z 三个方向的各阶模态响应的平方和平方根, 然后, 再以它们的平方和平方根作为总的响应, 即:

$$R_x = \sqrt{\sum_{k=1}^N R_{kx}^2}$$

$$R_y = \sqrt{\sum_{k=1}^N R_{ky}^2}$$

$$R_z = \sqrt{\sum_{k=1}^N R_{kz}^2}$$

总响应值为:

$$R = \sqrt{\sum_{k=1}^N (R_{kx}^2 + R_{ky}^2 + R_{kz}^2)}$$

如果当 N 个自振频率 (W) 中有几个相邻振型之间的频率差等于或小于较低频率的 10%, 即:

$$\frac{W_i - W_j}{W_i} \leq 0.1 \quad (1 \leq i \leq j \leq N)$$

则称为紧密间隔振型, 对此, 在模态组合时, 上述 SRSS 法修改为百分之十法, 即:

$$R_x = \sqrt{\sum_{k=1}^N R_{kx}^2 + 2 \sum (R_{ix} \cdot R_{jx})}$$

$$R_y = \sqrt{\sum_{k=1}^N R_{ky}^2 + 2 \sum (R_{iy} \cdot R_{jy})} \quad (i \neq j)$$

$$R_z = \sqrt{\sum_{k=1}^N R_{kz}^2 + 2 \sum (R_{iz} \cdot R_{jz})}$$

2 计算结果

2.1 结构固有频率

对选取的各机柜作模态分析, 求得结构前 n 阶自振频率与振型, 对进行抗地震验证试验的机柜用白噪声法测得了自振频率。各机柜计算结果与试验结果的基频列于表 2, 各机柜基频的振型图见图 8~12。

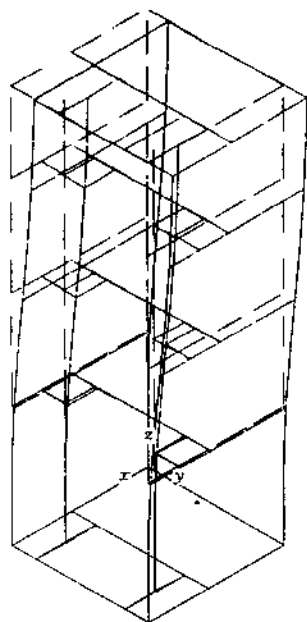


图 8 保护、专设、核测机柜第 1 阶振型图

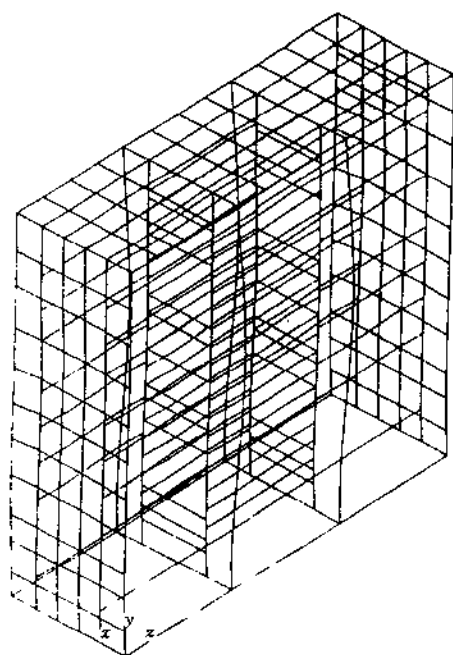


图 9 过程仪表柜第 1 阶振型图

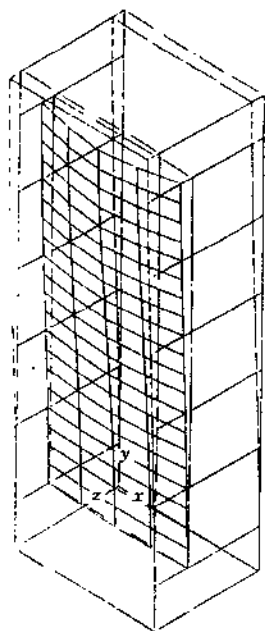


图 10 继电器屏第 1 阶振型图

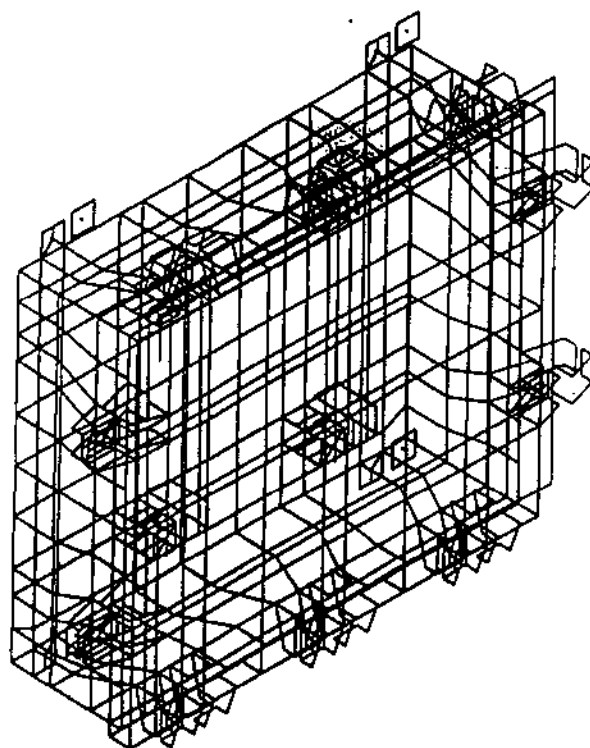


图 11 仪表端子箱第 1 阶振型图

表 2 各机柜基频

机柜名	计算结果	试验结果
核测机柜	14.005	14.61
过程仪表柜	16.884	15.918
继电器屏	11.956	12.695
端子箱	47.789	未试验
取样装置	9.89	未试验

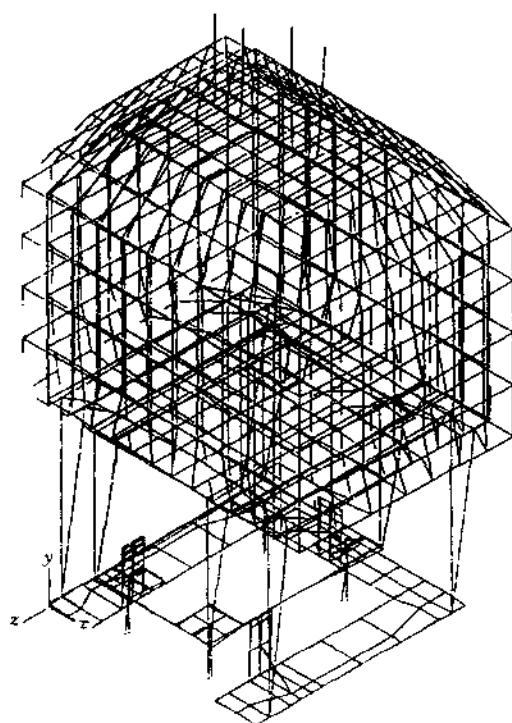


图 12 取样装置第 1 阶振型图

2.2 位移、加速度响应值

由响应谱法动力响应分析,可得到各机柜在 OBE, SSE 地震楼面加速度谱作用下结构各部位的位移、加速度响应值。根据该加速度值,即可预计安装于该部位的电气、仪控设备所承受的地震力,以便合理地布置电气、仪控设备。各机柜最大位移及最大加速度响应值列于表 3。

表 3 各机柜最大位移、最大加速度响应值

机柜名	位移/mm		加速度(计算)/g		加速度(试验)/g	
	OBE	SSE	OBE	SSE	OBE	SSE
核测机柜	0.53	0.77	0.80	0.82	0.83	1.07
过程仪表柜	0.46	0.58	0.966	0.987	1.03	1.35
继电器屏	1.957	2.609	1.48	1.94	1.06	1.08
端子箱	0.0363	0.0484	1.14	1.57	未试验	未试验
取样装置	0.754	1.008	0.771	1.04	未试验	未试验

3 应力分析与评定

3.1 应力分析

ANSYS 程序用 SRSS 法并考虑频率密集的影响,计算了由垂直和两个水平方向的地震谱共同输入而引起的单元内力、内力矩。由这些内力、内力矩,根据各结构构件的截面形状、连接螺栓尺寸、焊缝形式,可求得各部位的正应力、弯曲应力和剪应力,各机柜的应力状态详见参考文献 [4~8]

3.2 应力评定

电气、仪控设备柜、屏、盘、箱,主要为安装电气、仪控设备而设计,可视为设备支承件,因此,可按 ASME Ⅲ 规范 NF 分卷设备支承结构有关规定评定。对板型构件按 NF3220 一级支承件的分析法设计要求评定,对梁型构件按 NF3320 一级支承件的线弹性分析法设计的要求评定。在 SSE 地震载荷下,亦可按 ASME Ⅲ 附录 F 进行评定。据此对所使用的材料给出应力限值,将计算所得的各类应力与规定应力限值比较,若小于规定的应力限值,则符合规范要求,表明结构设计满足完整性要求。本文计算的各机柜,应力评定结果均符合规范要求。各机柜最大应力部位评定结果见表 4。

表 4 各机柜最大应力部位评定结果

机柜名	拉应力		压应力		剪应力		弯曲应力		拉(压)应力+弯曲应力	
	OBE	SSE	OBE	SSE	OBE	SSE	OBE	SSE	OBE	SSE
核测机柜	0.201	0.120	0.213	0.119	0.0071	0.0059	0.193	0.182	0.612	0.428
过程仪表柜	0.039	0.018	0.078	0.018	0.030	0.015	0.687	0.560	0.705	0.561
继电器屏	0.0041	0.0027	0.0043	0.0027	0.0023	0.0017	0.119	0.143	0.159	0.187
端子箱	0.0009	0.0006	0.0009	0.0009	0.0005	0.0004	0.0159	0.0191	0.0174	0.0207
取样装置	0.0067	0.0046	0.0062	0.0046	0.009	0.013	0.175	0.213	0.329	0.397

4 抗震验证试验

1E 级电气、仪控设备柜、屏、盘、箱的抗地震验证试验,按 IEEE-344 规定的要求进行^[9]。在地震试验台上进行了自振特性试验,测得机柜的自振频率及阻尼比,按三个方向楼面地震加速度响应谱换算成地震试验台面三个方向人工地震加速度时程载荷。进行了 5 次 OBE,1 次 SSE 地震考核试验,测得机柜各部位的加速度响应值。对安装于机柜中的 1E 级电气、仪控设备,在地震试验前,试验过程中及试验后的功能特性作了检测,有关试验报告由另文详情介绍。

5 结束语

本文为电气、仪控设备柜、屏、盘、箱结构地震响应分析的综合评述。选取了典型机柜作地震响应分析并与抗地震验证试验结果作了比较,求得的自振频率、加速度响应值与试验结果较为一致。证实了用有限元法建立的计算模型、计算方法、计算程序是合理可信的。各机柜结构应力评定结果亦满足 ASME Ⅲ 规范的要求。为今后合理地设计电气仪控设备抗地震机柜提供了可靠的依据。

参考文献

- 1 U. S. Nuclear Regulatory Commission, R. G. 1. 60, R. G. 1. 92
- 2 ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Rules for Construction of Nuclear Power Plant Components, NF, Appendix F, Appendix N. 1992
- 3 李紹平. 核辅助厂房核面反应谱, SNERDI PC-02-39-00, 93. 5
- 4 张明. 电气机柜地震响应分析, SNERDI 920401-7-4, 93. 8
- 5 叶维娟. 过程仪表机柜地震响应分析, SNERDI 920401-7-5, 93. 8
- 6 徐定耿. 安全壳空气事故取样装置地震分析和评定, SNERDI 920401-7-11, 95. 6
- 7 徐定耿. IE 级仪表端子箱抗地震分析, SNERDI 920401-7-13, 96. 5
- 8 徐定耿. 电气仪表继电器柜抗地震分析, SNERDI 920401-7-14, 96. 10
- 9 IEEE Recommended Practice for Seismic Qualification of Class IE Equipment for Nuclear Power Generating Stations, IEEE std 344-1987