

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.016

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



核设备设计地震动包络标准 PSD 的拟合及试验研究

谢皓宇^{1,2,3}, 潘飞^{1,2}, 朱翊洲⁴, 郑万山^{1,2}, 仇文岗³

(1. 桥梁工程结构动力学国家重点实验室, 重庆 400067; 2. 招商局重庆交通科研设计院有限公司, 重庆 400067;
3. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 4. 上海核工程研究设计院有限公司, 上海 200233)

摘要:核设备的抗震设计是核电厂抗震领域的一个重要问题, 为了实现核电厂设备典型反应谱(RRS)匹配和标准功率谱密度(PSD)包络的设计地震动拟合, 提出了一个标准 PSD 生成方法, 该方法基于 2014 版《标准审查大纲》(SRP) 建议的核电厂厂址设计地震动拟合方法, 考虑迭代相关及随机相位谱对迭代收敛效率的影响, 并通过在传统频域法拟合人工波过程中控制傅里叶幅值的手段实现了 RRS 匹配和标准 PSD 包络的人工地震波合成, 为核设备抗震设计的楼面地震波提供了检验依据。选择压力容器作为核设备抗震研究的原型, 通过振动台模型试验对比试件的响应峰值参数以及响应加速度时程的功率谱密度函数, 验证了同时匹配 RRS 及包络 PSD 的人工地震动会激励设备更大响应的理论, 说明了在设计地震动拟合中包络 PSD 要求的意义与重要性, 认为可以作为设计过程中非强制的建议条件。

关键词:核设备; 设计地震动; 功率谱密度; 振动台试验

中图分类号: TU318 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2021)03-0128-07

Simulation and test of design ground motion for nuclear equipment with standard PSD envelopment

XIE Haoyu^{1,2,3}, PAN Fei^{1,2}, ZHU Yizhou⁴, ZHENG Wanshan^{1,2}, ZHANG Wengang³

(1. State Key Laboratory of Bridge Engineering Structural Dynamics, Chongqing 400067, P. R. China; 2. CMCT Research & Design Institute Co., LTD, Chongqing 400067, P. R. China; 3. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 4. Shanghai Nuclear Engineering Research & Design Institute Co., LTD, Shanghai 200233, P. R. China)

Abstract: The seismic design of nuclear equipment is an important topic in the anti-seismic field of nuclear power plants. In order to achieve the ground motions fitting design of nuclear power plant equipment to meet the requirements of the typical response spectrum (RRS) matching and the standard power spectral density (PSD) envelope, a standard PSD generation method based on the ground motion fitting method for nuclear power plant site design recommended in the 2014 edition of the Standard Review Program (SRP) is proposed, which considers the effects of iteration correlation and random phase spectrum on the iterative convergence efficiency. The method realizes the artificial seismic wave synthesis with RRS matching and

收稿日期: 2020-11-11

基金项目: 国家科技重大专项专题(2017ZX06001001)

作者简介: 谢皓宇(1991-), 男, 主要从事地震工程与结构抗震设计研究, E-mail: xhy. civil@yahoo. com.

仇文岗(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: cheungwg@126. com.

Received: 2020-11-11

Foundation items: National Science and Technology Major Project (No. 2017ZX06001001)

Author brief: XIE Haoyu (1991-), main research interests: earthquake engineering and structural seismic design, E-mail: xhy. civil@yahoo. com.

ZHANG Wengang (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: cheungwg@126. com.

standard PSD envelope by controlling the Fourier amplitude in the process of fitting the artificial wave in the traditional frequency domain method, which provides a test basis for the seismic wave of the floor of the nuclear equipment anti-seismic design. The pressure vessel is selected as the prototype for seismic research of nuclear equipment. And the theory that artificial ground motions matching RRS and envelope PSD will stimulate greater response of equipment is verified by the shaking table test comparing the response peak parameters of the specimen and the power spectral density function in response acceleration time history. It shows that the significance of enveloping PSD requirements in the ground motion fitting design, which can be used as a suggested requirement in seismic design process.

Keywords: nuclear equipment; design ground motion; power spectrum density; shaking table test

地震灾害对核电站造成的破坏会导致非常严重的后果,放射性物质泄漏对于人类和自然环境都是无法承受的。鉴于此,世界各国对于核电厂及核电厂楼面设备的抗震可靠度都给予了高度重视。基于性能的抗震设计理念要求对目标结构的有限元模型进行时程动力分析或符合相似原则的模型振动台试验,因此,设计地震动的选择被认为至关重要^[1-2]。对于核电厂设备的设计地震动,中国的《核设备抗震鉴定试验指南》(HAF·J0053)^[3]、《核电厂抗震设计标准》(GB 50267—2019)^[4]以及美国的 NUREG-0800 号《标准审查大纲 (SRP)》^[5-6]、IEEE 344-2013^[7]均有相关规定,即输入地震波的频域信息在匹配典型反应谱 (Representative Response Spectrum)的同时,还需要在指定的频域范围内(0.3~24 Hz)包络标准功率谱密度 (Power Spectral Density)曲线的 70%或 80%。然而,无论是 HAF·J0053 或 IEEE 344-2013,对于核设备标准 PSD 的规定都停留在定性的层面而非定量的描述。因此,针对核电厂设备的抗震设计,目标 PSD 包络的要求通常被列为低于 RRS 匹配的次要要求,在 2014 版 SRP 颁布之前都并未得到足够重视。孙渝刚等^[8]讨论了基于 2014 版 SRP 推荐的核电厂厂址抗震设计标准 PSD 拟合程序,但并未针对核设备的 RRS 做进一步的优化,赵凤新等^[9]、张郁山等^[10]则对包络标准 PSD 的人工波拟合方法做出了基于时域的研究,但他们提出的算法中需要根据具体的谱型调整的参数较多,且也未针对核设备的 RRS 做出优化。此外,对于同时满足 RRS 匹配及 PSD 包络的输入地震动和只有 RRS 匹配的输入地震动,时程动力分析中核设备被激发的实际响应特性会有何区别,目前也缺乏相关试验研究与效果验证。

笔者基于 2014 版 SRP 建议的生成标准 PSD 的方法,做出了提升迭代效率的修改,并在包络 PSD 的情况下使用传统的频域法拟合了匹配 RRS 的人

工地震动,再以典型的核设备压力容器的模型作为研究对象进行振动台试验,对安全停堆地震 (SSE) 的 RRS 匹配及 PSD 包络的人工波性能进行验证,以期为核电厂设备动力分析输入地震动的选择提供更可靠的依据。

1 RRS 匹配和 PSD 包络

1.1 标准 PSD 的生成

SRP 3.7.1 附录 B.1 中建议使用一种对 RRS 频域控制点逐点迭代的方法生成标准 PSD。这个方法的步骤可以简要地概括:1)对于作为目标的 RRS 用 RS_{rep} 表示,使用 NUREG/CR-6728 时程数据库中的平均 PSD 作为迭代的初始 PSD;2)对于第 M 次迭代,以 $M-1$ 步迭代生成的 PSD 为基础通过快速傅里叶逆变换及随机相位谱生成 $10 \times M$ 条人工地震波;3)将生成的人工地震波时程乘以一个包含上升段、平台段和下降段的时程包络函数;4)计算 $10 \times M$ 条人工地震波所对应 5% 阻尼比的反应谱,并求出他们的算数平均 RS_{avg} ;5)将 $M-1$ 步迭代生成的 PSD 逐个频率控制点都乘以 $(RS_{rep}/RS_{avg})^2$,再使用新生成的 PSD 作为下一次迭代的基础,直到满足规定的收敛条件。孙渝刚等^[11]在研究中已经实现了这个方法。本质上这个方法是求出了匹配 RRS 的人工波的一个“均值”,并要求输入地震动的 PSD 高于这个均值的 PSD。

SRP 建议的迭代方法中涉及到频域法拟合人工地震波的内容。为了优化该方法、提升迭代效率,参考胡聿贤等^[12]、谢皓宇等^[13]的研究工作,提出考虑迭代相关及随机相位谱对迭代收敛效率的影响,修正上一段中 SRP 方法第 5) 步的迭代公式,具体内容包括:1)对于频率 ω 的线性振子,相同频率的傅里叶分量激励下的响应加速度 $a_w(\omega)$ 与人工波激励下的响应加速度 $a_g(\omega)$ 在 $a_g(\omega)$ 峰值出现的时刻 t 反向,那么将功率谱密度迭代的指数修改为负数;2)当人

工波的平均反应谱大于 RRS 并且 t 时刻 $a_\omega(\omega)$ 与 $a_g(\omega)$ 同向,或人工波平均反应谱小于 RRS 并且 t

$$a_\omega(\omega, t) \cdot a_g(\omega, t) < 0 \rightarrow S_{x(r+1)}(\omega) = S_m(\omega) \cdot \left(\frac{R'_a(\omega)}{R_{an}(\omega)} \right)^{-2} \quad (1)$$

$$\begin{cases} R_{an}(\omega) > R'_a(\omega) \\ a_\omega(\omega, t) \cdot a_g(\omega, t) > 0 \end{cases} \wedge \begin{cases} R_{an}(\omega) < R'_a(\omega) \\ a_\omega(\omega, t) \cdot a_g(\omega, t) < 0 \end{cases} \rightarrow \theta'_r(\omega) = \theta_r(\omega) + \pi \quad (2)$$

式中: t 为指定频率的线弹性振子在地震波作用下峰值加速度出现的时间; $a_\omega(\omega, t)$ 为自然频率 ω 的振子在 ω 频率的傅里叶分量激励下在时刻 t 响应的加速度; $a_g(\omega, t)$ 为自然频率 ω 的振子在地震波激励下的峰值加速度; S_m 为第 n 次迭代后生成的 PSD; R'_a 为 RRS; R_{an} 为第 n 次迭代后的平均反应谱; θ_r 及 θ'_r 分别为修正前后的随机相位谱。

1.2 人工波拟合

核设备设计地震动的拟合应以 RRS 匹配和包络标准 PSD 的 80% 为目标。前述方法生成的标准 PSD 是基于 RRS 的,即标准 PSD 与 RRS 所对应的人工时程在频域上的特性及包含的信息相似。因此,初始时程加速度 x_{initial} 直接由标准 PSD 所计算出的傅里叶幅值谱和随机的相位谱通过傅里叶逆变换之后乘以一个时程包络函数 $I(t)$ 得到^[14]。

$$A(\omega) = \sqrt{4 S_x(\omega) \cdot \Delta\omega} \quad (3)$$

$$x_{\text{initial}}(t) = I(t) \cdot \sum_{\omega} A(\omega) \sin(\omega t + \varphi(\omega)) \quad (4)$$

式中: $S_x(\omega)$ 为标准 PSD; $A(\omega)$ 为标准 PSD 对应的傅里叶幅值谱; $\Delta\omega$ 为频域采样间隔; $\varphi(\omega)$ 为随机的傅里叶相位谱,随机相位谱由马特赛特回旋算法(Mersenne Twister)^[15]生成。

由于 PSD 包络的目标,需要修正传统频域法的迭代过程,令迭代过程中的傅里叶相位谱始终高于 $0.8 \times A(\omega)$,即

$$A_n(\omega) > 0.8 \cdot A(\omega) \rightarrow A_n(\omega) = A_n(\omega) \quad (5)$$

$$A_n(\omega) < 0.8 \cdot A(\omega) \rightarrow A_n(\omega) = 0.8 \cdot A(\omega) \quad (6)$$

式中: $A_n(\omega)$ 为第 n 次迭代后的傅里叶幅值谱。由于标准 PSD 和 RRS 之间的高相性,通常 3~5 次迭代就能够使人工地震动的反应谱收敛。

1.3 压力容器算例

以压力容器 SSE 的 RRS 作为算例,先计算出相应的标准 PSD,再拟合出匹配 RRS 的同时还包络 80% 标准 PSD 的人工地震动。RRS 的控制频率区间从 1 Hz 到 100 Hz,其中,1.0~5.0 Hz 为反应谱幅值的上升段;5.0~8.6 Hz 为峰值平台段,幅值为

时刻 $a_\omega(\omega)$ 与 $a_g(\omega)$ 反向,那么将频率 ω 对应的随机相位加上 π 。可以用公式来描述以上两项修改。

6.23g; 8.6~42.5 Hz 为下降段; 42.5~100 Hz 为下降段之后的平台段,加速度幅值为 0.92g 左右。按照前述计算方法,生成了 10 条人工地震波,持时为 40 s,综合振动台硬件的优化需求以及人工波拟合过程中的效率,决定使用 1 024 Hz 作为采样频率。10 条人工波反应谱与 RRS 的匹配情况见图 1,规范要求 0.3~24 Hz 的频域里人工地震动包络 80% 标准 PSD,而算例中 RRS 的控制频率并不包含 0.3~1 Hz 的控制点,因此,仅考虑 1~24 Hz 频域内 PSD 的包络情况,结果见图 2,其中 1 条人工地震动的加速度波形示意图 3。

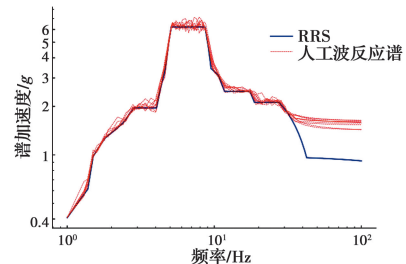


图 1 10 条人工地震动反应谱匹配

Fig. 1 Response spectra compatibility of 10 artificial ground motions

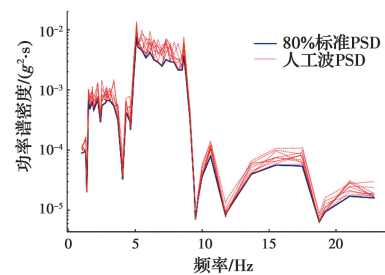


图 2 10 条人工地震动标准 PSD 包络

Fig. 2 Standard PSD envelopment of 10 artificial ground motions

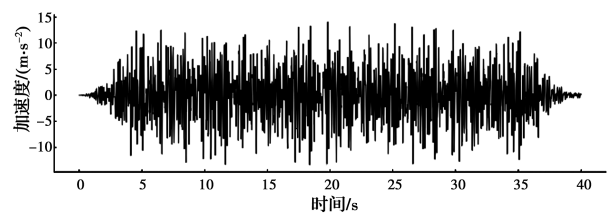


图 3 人工地震动的加速度时程

Fig. 3 Acceleration time-history of artificial ground motion

从图 1~图 3 中可知,人工地震动时程的峰值加速度(PGA)为 14.2 m/s^2 ,PSD 完全包络了 80% 的标准 PSD,反应谱的匹配在高频部分无法实现的原因是设计谱中高频部分的谱加速度与峰值平台段对应的加速度幅值相比有 6~7 倍的差距,高频振子在人工波的作用下主要模态为刚体运动,因此,受人工地震波峰值加速度影响较大,在中间频率平台段拟合的条件下高频部分难以完全收敛。

2 振动台试验

2.1 试验设备及模型设计

试验使用的双点振动台试验机可实现 3 向 6 自由度的运动,单点最大试样重量可达 35 t,最大倾覆力矩为 $70 \text{ t} \cdot \text{m}$,最大扭转力矩为 $35 \text{ t} \cdot \text{m}$,工作频率范围是 0.1~100 Hz,最大工作位移、速度及加速度分别为 $\pm 150 \text{ mm}$, $\pm 800 \text{ mm/s}$ 以及 $\pm 2.5g$ 。

压力容器作为比较典型的核电厂楼面设备被选作试验的目标系统。作为机理性试验,选用模型与实际的反应堆压力容器有一定区别,试件以较为简单的低压压力容器为原型进行以 1:1 的比例制作,试样主要部件包括桶体、盖板、内件、气阀、底座等,材质为 Q235。试样总高度为 1 464 mm,桶内径为 550 mm,壁厚 3 mm,设计承受压力 0.8 MPa。底板与桶体采用厚 20 mm 的 45° 三角形肋板加固。压力容器上有桶盖,能够拆卸便于安装内件。试样与底座之间使用螺栓连接,底座与振动台采用连接螺栓进行锚固。利用锤击法得到压力容器外件 1 阶模态频率为 64.9 Hz,压力容器内件 1 阶模态频率为 10.3 Hz。压力容器模型装配构造见图 4,振动台模型实际布置见图 5。

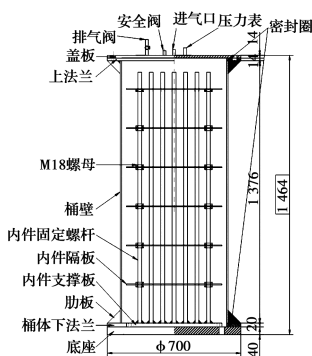


图 4 压力容器模型构造图

Fig. 4 Detail structure drawing of pressure vessel

2.2 测点布置

为了测量输入地震载荷作用下试样内件与外件的动态响应及应力变化规律,模型试验采用了加速



图 5 压力容器内件及外件模型

Fig. 5 Model of pressure vessel trim part and exterior part

度传感器、位移传感器及应变传感器。在模型上的测点布置见图 6。

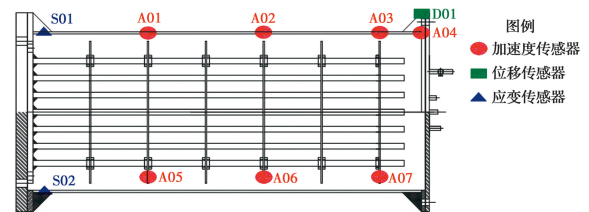


图 6 模型测点布置图

Fig. 6 Layout of measuring points on the model

由于内件和外件相对独立,因此,传感器主要依据分别测量内件及外件沿竖向分布的地震动响应而布置。另外,通过经验判断,外件最大变力的发生位置大概在桶底,因此,在相应位置布置了应变传感器。如图 6 所示,加速度传感器沿试样外侧面从低至高布设,依次为从隔板第 2、第 4、第 6 层分别对应桶壁外侧的高度位置,桶体上的传感器测点编号为 A01~A03,并在外桶顶端布置加速度传感器,测点编号 A04,内件的第 2 层隔板、第 4 层隔板以及最上层隔板上布设加速度传感器,测点编号依次为 A05~A07。位移传感器在压力容器模型外件的顶端布设,测试试样顶端的位移,测点编号为 D01。另外,地震台台面的加速度信号从振动台获取,测点编号为 A00,台面的位移从振动台获取,测点编号为 D00。桶底距下法兰 20 mm 处截面布置了 2 个应变测点,测点编号为 S01、S02,每个测点布设 1 个应变花。

2.3 输入地震动

以前述 10 条随机人工地震波作为试验输入波的实验组。对照组仅针对 RRS 匹配进行传统的频域法拟合人工地震波,即不使用标准 PSD 作为初始傅里叶幅值谱的依据,并且计算过程中没有式 5、式 6 所实现的包络标准 PSD 的迭代修正条件。对照组总共也拟合了 10 条随机人工地震动,比照实验组的

信号参数,持时取 40 s,采样频率取 1 024 Hz。对照组 10 条人工波反应谱与 RRS 的匹配情况见图 7, PSD 见图 8。

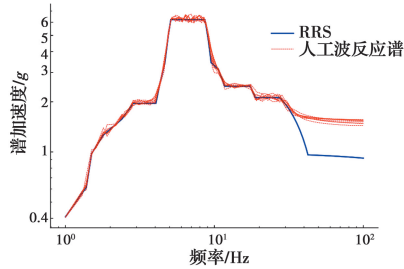


图 7 对照组人工地震动反应谱匹配

Fig. 7 Response spectra compatibility of artificial ground motions in control group

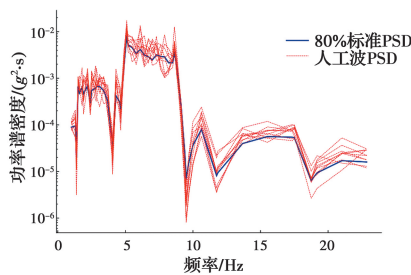


图 8 对照组人工地震动 PSD

Fig. 8 Standard PSDs of artificial ground motions in control group

从图 8 可见,80%的标准 PSD 处于 10 条对照组人工波 PSD 的中间位置。而对比图 7 和图 1 可以发现,由于对照组没有包络 PSD 的限制,对照组 RRS 的拟合精度略优于实验组。

2.4 模型动力响应

着重关注桶顶最大响应加速度 a_1 (A04 测点)、桶顶最大响应位移 d (D01 测点)、内件顶层隔板最大响应加速度 a_2 (A07 测点) 以及桶底最大应变 s (S01 测点) 4 项动力响应参数,这 4 项参数能够相对全面地反映试件模型在地震过程中的响应特点,数据见表 1。

从表 1 可以看到,外件最大响应加速度与输入地震动的 PGA 接近,说明压力容器外件在输入地震动作用下做近似刚体运动,而内件顶层的最大响应加速度是外件顶部最大响应加速度的 4 倍左右,这是因为其模态频率比外件更低,所以内件沿高度放大了人工波的 PGA。实验组与对照组内外件最顶层最大加速度、外件底部应变以及外件顶层最大位移 4 项数据平均值归一化之后的对比见图 9,图 10 为外件及内件沿高度方向上各测点平均最大响应加速度的包络图,其中,外件 4 个测点,内件 3 个测点。

表 1 模型地震动力响应统计表

Table 1 Statistical table of model's seismic responses

序号	工况	PGA/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	a_1 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	d /mm	a_2 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	$s/10^{-6}$
1	实验组 1#	15.06	15.44	23.00	54.91	18.31
2	实验组 2#	14.02	14.64	22.21	53.89	16.95
3	实验组 3#	15.75	14.26	21.62	54.13	16.67
4	实验组 4#	16.02	15.85	24.03	53.85	19.55
5	实验组 5#	15.64	14.86	24.53	55.01	17.40
6	实验组 6#	15.05	14.70	23.93	62.31	17.46
7	实验组 7#	15.60	15.66	25.05	50.49	18.90
8	实验组 8#	15.62	15.07	23.06	48.83	18.66
9	实验组 9#	15.95	14.85	21.80	49.65	18.29
10	实验组 10#	15.40	14.80	21.96	49.12	17.64
11	对照组 1#	14.49	13.86	20.86	53.72	17.99
12	对照组 2#	15.01	15.39	22.89	54.52	17.10
13	对照组 3#	15.49	14.19	21.04	48.83	17.23
14	对照组 4#	15.14	15.08	23.68	51.97	17.36
15	对照组 5#	14.09	14.65	22.27	55.01	17.32
16	对照组 6#	15.23	14.22	22.54	52.52	18.20
17	对照组 7#	15.28	14.48	22.45	49.72	17.32
18	对照组 8#	14.87	14.05	22.88	49.38	16.48
19	对照组 9#	15.22	14.44	24.04	52.82	16.74
20	对照组 10#	15.24	14.85	22.01	57.12	17.95

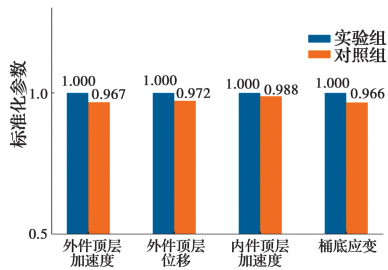


图 9 实验组与对照组地震响应对比

Fig. 9 Comparison of seismic responses between experimental group and control group

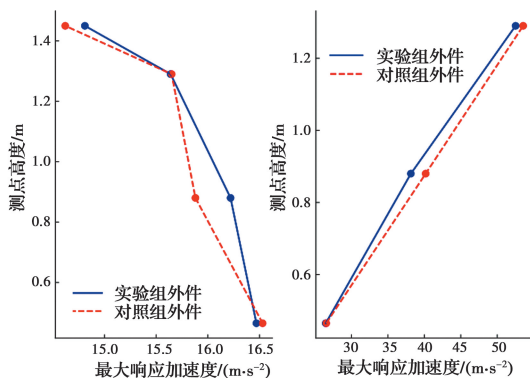


图 10 实验组与对照组响应加速度对比

Fig. 10 Comparison of response accelerations between experimental group and control group

由图 9 可知,对于外件顶部最大加速度、顶层最大位移、内件顶层最大加速度以及桶底最大应变 4 项地震动响应参数,对照组的平均值均小于实验组的平均值,分别小 3.3%、2.8%、1.2%及 3.4%;由图 10 可以发现,在模型沿竖直高度方向上,内件与外件的最大响应加速度都是实验组包络了对照组,平均高 2.0%。除了对于地震动响应强度峰值的比较,图 11 还对比了实验组与对照组总共 20 个工况下,内件顶层隔板响应的加速度时程的 0~50 Hz 的功率谱密度曲线,对于他们在频域中所包络的平均能量(曲线所包络的面积),实验组为 1.601,对照组为 1.551。可以看到,实验组激励的加速度响应在 0~50 Hz 的能量高于对照组的 3.3%。

以上结果均说明,实验组的人工地震动激励下模型的实际响应高于对照组,这是因为,虽然实验组和对照组的人工地震动都以 RRS 匹配为目标拟合,但实验组的人工波同时包络了 PSD,因此,在 PGA 接近的情况下,实验组在频域中包含的能量实际大于对照组,这一点从图 9 和图 2 的 PSD 对比中就能看到,而振动台试验的结果也验证了这个理论。

考虑到同时匹配 RRS 及包络 PSD 的人工地震动在频域中比仅匹配 RRS 的人工地震动在频域具有更高的幅值,核设备在其激励下有更大的响应,因此,可以认为“包络 PSD”对于核设备动力分析输入地震动的拟合是一项有意义的、更保守的设计条件。

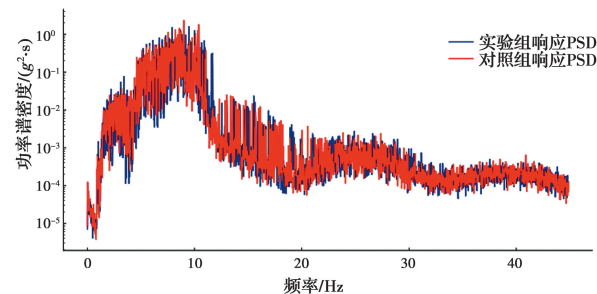


图 11 实验组及对照组地震动作用下模型内件顶层响应加速度 PSD 平均值对比图

Fig. 11 Comparison of mean value of response accelerations on the top layer of inner part between experimental group and control group

3 结论

针对核设备的设计地震动需要同时匹配 RRS 及包络标准 PSD 的问题,在 2014 版 SRP 建议方法的基础上做了提升迭代效率的修改,生成了满足要求的标准 PSD;同时,在传统的频域法拟合人工波的算法中引入了新的迭代判定条件,使得最终拟合的人工地震波不仅匹配了 RRS,还在规定的频域范围内包络标准 PSD。

通过振动台模型试验,验证了同时匹配 RRS 及包络标准 PSD 的人工地震动引起的设备响应高于仅匹配 RRS 的人工地震动这一结论,说明包络标准 PSD 对于核设备的抗震设计输入地震动的计算有一定的意义,是更保守的设计条件。但从本例看,PSD 包络对实际结构地震的地震动响应影响有限。

参考文献:

[1] GUPTA A, CHO S G, HONG K J, et al. Current state of in-cabinet response spectra for seismic qualification of equipment in nuclear power plants [J]. Nuclear Engineering and Design, 2019, 343: 269-275.

[2] SUZUKI J. Consideration about seismic design of the nuclear power plant using seismic observation records [C]//Japan: Proceedings of the 14th Annual Meeting of Japan Society of Maintenology, 2018, Japan: Kashiwa. (in Japanese)

- [3] 中国国家核安全局. 核设备抗震鉴定试验指南: HAF·J0053 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
China's National Nuclear Safety Administration. Guide for seismic qualification test of nuclear equipment: HAF·J0053 [S]. Beijing: Standards Press of China, 1995. (in Chinese)
- [4] 核电厂抗震设计标准: GB 50267—2019 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
Standard for seismic design of nuclear power plants: GB 50267-2019 [S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese)
- [5] U. S. NRC. Regulatory guide 1. 60, design response spectra for seismic design of nuclear power plants [S]. Washington: United States Nuclear Regulatory Commission, 2014.
- [6] U. S. NRC. Standard review plan, Section 3. 7. 1, seismic design parameters: NUREG-0800 [R]. Washington: Nuclear Regulatory Commission, 2014.
- [7] IEEE Standard Association. IEEE standard for seismic qualification of equipment for nuclear power generating stations: IEEE 344-2013 [S]. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2013.
- [8] 孙渝刚, 褚濛, 丁振坤, 等. 核设备抗震鉴定试验中功率谱密度检验方法分析评估[J]. 核动力工程, 2020, 41(4): 101-104.
SUN Y G, CHU M, DING Z K, et al. Analysis of inspection methods for power spectral density in seismic qualification test of equipment in nuclear power plants [J]. Nuclear Power Engineering, 2020, 41(4): 101-104. (in Chinese)
- [9] 赵凤新, 刘爱文. 地震动功率谱与反应谱的转换关系[J]. 地震工程与工程振动, 2001, 21(2): 30-35.
ZHAO F X, LIU A W. Relationship between power spectral-density functions and response spectra of earthquake ground motions [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2001, 21(2): 30-35. (in Chinese)
- [10] 张郁山, 赵凤新. 包络目标功率谱的人工地震动合成方法研究[J]. 核动力工程, 2010, 31(4): 96-100.
ZHANG Y S, ZHAO F X. Study on synthesizing method of artificial ground motion that envelopes target power spectrum [J]. Nuclear Power Engineering, 2010, 31(4): 96-100. (in Chinese)
- [11] 孙渝刚, 褚濛, 黄小林, 等. 匹配设计反应谱的目标功率谱密度的确定方法[J]. 核动力工程, 2019, 40(3): 125-129.
SUN Y G, CHU M, HUANG X L, et al. Method of developing target power spectral density compatible with design response spectra [J]. Nuclear Power Engineering, 2019, 40(3): 125-129. (in Chinese)
- [12] 胡聿贤, 何训. 考虑相位谱的人造地震动反应谱拟合[J]. 地震工程与工程振动, 1986, 6(2): 37-51.
HU Y X, HE X. Phase angle consideration in generating response spectrum-compatible ground motion [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1986, 6(2): 37-51. (in Chinese)
- [13] 谢皓宇, 郑万山, 仇文岗, 等. 考虑迭代相关及相位谱的人工地震波反应谱拟合[J]. 地震学报, 2020, 42(3): 341-348, 378.
XIE H Y, ZHENG W S, ZHANG W G, et al. Response spectra-compatible artificial ground motion simulation considering iterative correlation and phase spectra [J]. Acta Seismologica Sinica, 2020, 42(3): 341-348, 378. (in Chinese)
- [14] BOORE D M. Simulation of ground motion using the stochastic method [J]. Pure and Applied Geophysics, 2003, 160(3/4): 635-676.
- [15] MATSUMOTO M, NISHIMURA T. Mersenne twister [J]. ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation, 1998, 8(1): 3-30.

(编辑 胡玲)