



## 基于TMSR-LF1的Ⅱ类研究堆抗震设计方法研究

刘艺诚, 王晓艳, 王 晓, 张小春, 龚 玮, 代仁聪

### Study on Seismic Design Method of Class II Research Reactor Based on TMSR-LF1

Liu Yicheng, Wang Xiaoyan, Wang Xiao, Zhang Xiaochun, Gong Wei, and Dai Rencong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2022.05.0223>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于统计数据的非基岩核电厂抗震设计谱研究

Study on Spectral Accelerations for Seismic Design of Nuclear Power Plants on Non-Bedrock Sites Based on Statistical Data  
核动力工程. 2020, 41(3): 115-120

#### 某研究堆应急电力系统设计

Design of an Emergency Power Supply System for a Research Reactor  
核动力工程. 2019, 40(3): 165-169

#### 匹配设计反应谱的目标功率谱密度的确定方法

Method of Developing Target Power Spectral Density Compatible with Design Response Spectra  
核动力工程. 2019, 40(3): 125-129

#### 核电厂设备抗震设计标准功率谱密度的生成方法

Generation Method of Target Power Spectral Density for Seismic Design of Nuclear Power Plant Equipment  
核动力工程. 2021, 42(5): 128-133

#### 基于NASPIC平台的反应堆保护系统架构设计研究

Research on Architecture Design of Reactor Protection System Based on NASPIC Platform  
核动力工程. 2021, 42(6): 114-119

#### 基于系统工程的研究堆启停与关键设计维护策略设计研究

Research on Start-up and Shutdown and Key Design and Maintenance Strategy of Research Reactor Based on System Engineering  
核动力工程. 2021, 42(S2): 159-164



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 0258-0926(2022)05-0223-06; DOI:10.13832/j.jnpe.2022.05.0223

# 基于 TMSR-LF1 的 II 类研究堆 抗震设计方法研究

刘艺诚<sup>1,2</sup>, 王晓艳<sup>1</sup>, 王 晓<sup>1\*</sup>, 张小春<sup>1</sup>, 龚 玮<sup>1,2</sup>, 代仁聪<sup>1,2</sup>

1. 中国科学院上海应用物理研究所, 上海, 201800; 2. 中国科学院大学, 北京, 100049

**摘要:** 抗震设计是核设施为满足安全与经济综合要求进行设计时的重要内容, 目前研究堆的抗震设计缺乏相应的规范与研究, 尚未发现较为完善的方法体系。本文推荐了一个匹配结构与设备的 II 类研究堆抗震设计方法, 以 50 a 超越概率 2% 地震动作为安全停堆地震 (SSE), 并以 2 MW 液态燃料钍基熔盐实验堆 (TMSR-LF1) 为例, 对比分析了采用该方法与采用其他相关规范方法得到的设计反应谱 (DRS), 并将其应用于结构和设备的抗震设计计算中。结果表明: 推荐方法在满足结构与设备的抗震设计匹配性的前提下, 相比核电规范具有较好的经济性, 相比民用规范具有较好的保守性, 更加合理。

**关键词:** 研究堆; 抗震设计; 设计反应谱 (DRS)

中图分类号: TL371 文献标志码: A

## Study on Seismic Design Method of Class II Research Reactor Based on TMSR-LF1

Liu Yicheng<sup>1,2</sup>, Wang Xiaoyan<sup>1</sup>, Wang Xiao<sup>1\*</sup>, Zhang Xiaochun<sup>1</sup>,  
Gong Wei<sup>1,2</sup>, Dai Rencong<sup>1,2</sup>

1. Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai, 201800, China;  
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China

**Abstract:** Seismic design is an important part of nuclear facilities design to meet the comprehensive requirements of safety and economy. At present, the seismic design of research reactors lacks corresponding specifications and studies, and a relatively complete method system has not yet been found. In this paper, a seismic design method for class II research reactor matching structure and equipment is recommended. Taking the earthquake motion with a 50 a exceedance probability of 2% as the safe shutdown earthquake (SSE), and taking the 2 MW liquid fuel thorium based molten salt experimental reactor (TMSR-LF1) as an example, the design response spectra obtained by using this method and various specification methods are compared and analyzed, and they are applied to the seismic design and calculation of structures and equipment. The results show that the recommended method has better economy than the nuclear power code and better conservatism than the civil code on the premise of meeting the seismic design matching of structures and equipment.

**Key words:** Research reactor, Seismic design, Design response spectra(DRS)

## 0 前 言

研究堆作为测试材料和推进科研的工具, 设

计种类繁多, 应用范围非常广泛, 有助于世界各国实现可持续发展的目标。抗震设计对于保证研

收稿日期: 2021-09-16; 修回日期: 2021-10-14

作者简介: 刘艺诚 (1994—), 男, 博士研究生, 现主要从事核反应堆厂房抗震方面的研究, E-mail: liuyicheng@sinap.ac.cn

\*通讯作者: 王 晓, E-mail: wangxiao@sinap.ac.cn

究堆的安全性和经济性有着重要的意义。根据潜在源项大小、安全特性和放射性释放后果来划分,目前在甘肃武威建造的 2 MW 液态燃料钍基熔盐堆 (TMSR-LF1) 属于 II 类研究堆<sup>[1-2]</sup>。

国内外已有的针对研究堆的抗震设计的研究成果<sup>[3-10]</sup>有 2 个问题: ①目前缺少专门针对研究堆抗震设计的方法与规范, 研究堆抗震设计基本上仍按照以往核电规范<sup>[11-13]</sup>。而核电规范标准通常高于民用标准, 若研究堆完全采用核电规范, 尽管保守性得到满足, 但是经济性较差; 反之, 若全采用民用规范, 尽管有较好经济性, 但显然不符合保守性; ②研究堆的抗震设计采用民用规范时存在匹配性的问题, 上述的研究堆结构若采用民用规范或民用规范加 1 度 (加 1 度代表着加速度峰值提高 1 倍) 进行抗震设计时, 其设备无论采用核电规范还是民用规范, 结构与设备在抗震设计计算中采用的地震动水准均不同, 这会为计算带来不便。

为了解决以上问题, 本文推荐了一个匹配结构与设备的 II 类研究堆抗震设计方法, 以 TMSR-LF1 为例, 对比分析了推荐方法与各规范的设计反应谱, 从保守性、经济性和匹配性方面分析了推荐方法的合理性, 并将其应用于 TMSR-LF1 结构和设备的抗震设计。

## 1 推荐的 II 类研究堆抗震设计方法

本文结合核电规范与民用规范, 并参考规范 TECDOC-1347<sup>[14]</sup>, 列出了各规范的抗震设计要求, 见表 1。表 1 中验收准则由宽松到严格分别为: 不倒塌、局部非线性、准弹性和弹性。表中的地震动数据是根据文献 [15] 得到的 TMSR-LF1 场地结果。本文将根据表 1, 推荐一个适合于 II 类研究堆的抗震设计方法。

从表 1 可以看出各设计要求的保守性。以 TMSR-LF1 为例, 不同超越概率的地震动水准 (不考虑加 1 度) 对应于不同的地震动峰值加速度, 其中最小值为 0.045 g ( $g$  为重力加速度), 对应于 50 a 超越概率 63%, 它应用于民用规范小震下的弹性计算, 其最不保守; 最大值为 0.370 g, 对应于 100 a 超越概率 1%, 它应用于核电规范的弹性计算, 其最保守。其他地震动水准的地震动峰值加速度在这两者之间, 对应于设

表 1 各规范抗震设计要求

Tab. 1 Requirement of Seismic Design of Codes

设计要求	地震动水准	地震峰值加速度/ $g$	验收准则
核电规范	100 a 超越概率 1%	0.370	弹性
民用规范	50 a 超越概率 63%	0.045	弹性
	50 a 超越概率 10%	0.135	局部非线性
	50 a 超越概率 2%	0.230	不倒塌
民用规范加 1 度	50 a 超越概率 63% 的 2 倍	0.090	弹性
	50 a 超越概率 10% 的 2 倍	0.270	局部非线性
	50 a 超越概率 2% 的 2 倍	0.460	不倒塌
设计 1 级	100 a 超越概率 1%	0.370	准弹性
设计 2 级	50 a 超越概率 2%	0.230	局部非线性
设计 3 级	100 a 超越概率 10%	0.175	不倒塌
设计 4 级	50 a 超越概率 10%	0.135	同民用规范
推荐方法	50 a 超越概率 2%	0.230	弹性

计 1~4 级, 其保守性在民用规范与核电规范之间。对于采用民用规范的结构, 采用“三水准”进行抗震设防: ①小震 (50 a 超越概率 63%) 不坏 (弹性); ②中震 (50 a 超越概率 10%) 可修 (局部非线性); ③大震 (50 a 超越概率 2%) 不倒 (不倒塌)。通常研究院按照民用规范加 1 度进行研究堆的抗震设计<sup>[16]</sup>。尽管民用规范加 1 度中的大震, 即 50 a 超越概率 2% 的 2 倍 (地震动峰值加速度为 0.460 g) 高于核电规范的 100 a 超越概率 1% (地震动峰值加速度为 0.37 g), 但是根据《建筑抗震设计规范》<sup>[13]</sup>, 后者的弹性验收标准 (最大层间位移角为 1/800) 远高于前者的不倒塌验收标准 (最大层间位移角为 1/100)。

从表 1 还可以看出匹配性的问题。对于核电规范而言, 其结构采用 100 a 超越概率 1% 的地震动, 根据《核电厂抗震设计标准》<sup>[12]</sup>, 可以把该地震动作为设备的安全停堆地震 (SSE), 因此不存在匹配性问题。然而当研究堆的结构采用民用规范或民用规范加 1 度进行抗震设计时, 其设备无论是采用核电规范还是民用规范, 其地震动水准均不一致, 这会导致其计算较为复杂。因此结构与设备的匹配是一个急需解决的问题。

为解决抗震设计的匹配性问题, 兼顾保守性, 本文参考核电规范, 统一结构与设备抗震设计所采用的地震动水准, 采用线弹性方法进行计算, 并参考 TECDOC-1347 选取合适的地震动水准, 推荐一个适用于 II 类研究堆的抗震设计方

法。TECDOC-1347 将核设施分为 4 个设计等级，其中设计 1 级的地震动水准与核电规范相当。鉴于核电厂在发生核事故时可能造成的环境及社会影响，核电规范极为严格；而对于 II 类研究堆，由于其功率水平较低（500 kW~10 MW），远低于百万千瓦级功率的核电厂，采用设计 1 级的方法可能过于保守，影响其经济性。设计 4 级的构筑物按民用规范进行设计，采取该方法可能不够保守。对于设计 3 级，其地震动水准相比民用规范与民用规范加 1 度保守性不足。而设计 2 级的地震动水准高于民用规范，与民用规范加 1 度相当。

综合考虑以上因素，本文推荐采用设计 2 级对应的 50 a 超越概率 2% 地震动水准作为 II 类研究堆的 SSE，进行结构与设备的抗震设计。

## 2 推荐抗震设计方法的合理性分析

为验证本文推荐方法的合理性，以 II 类研究堆 TMSR-LF1 为例，通过该方法设计反应谱与各规范设计反应谱的比较，从保守性、经济性和匹配性方面分析该方法的合理性。

### 2.1 推荐方法的保守性与经济性

为说明推荐方法的保守性与经济性，将其设计反应谱与核电规范与 TECDOC-1347 的设计反应谱比较。三者的结构与设备在抗震设计计算中采用的地震动水准相同，不存在匹配性问题，推荐方法的结构与设备具有相同的保守性与经济性。

核电规范指出，设计反应谱（DRS）可采用其推荐的标准设计反应谱或厂址特定地震反应谱，本文同时采用这 2 种反应谱得到核电规范在 SSE（100 a 超越概率 1%）下的 DRS，并将推荐方法（采用厂址特定地震反应谱）与 SSE（50 a 超越概率 2%）下的 DRS 进行对比，结果见图 1。可以看出：

（1）在核电规范的要求下，采用厂址特定地震反应谱和采用 RG 1.60 谱得到的 DRS 较为接近，在高频（>9 Hz）部分前者高于后者；在低频部分（<3 Hz）的水平向上，前者略低于后者。

（2）无论采用哪种 DRS，均远高于推荐方法的 DRS，峰值分别高约 60.9% 和 77.5%。

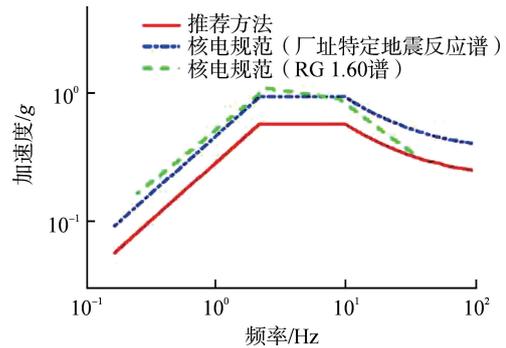


图 1 推荐方法与核电规范的水平 DRS 对比

Fig. 1 Comparison of Horizontal DRS between Recommended Method and Nuclear Power Codes

这对于抗震要求相比核电厂较低的 II 类研究堆是过于保守的，采用推荐的抗震设计方法具有较好的经济性。

根据不同的地震动水准，得到了 TECDOC-1347 的 4 个设计级别设计反应谱，将推荐方法的设计反应谱与之对比，结果见图 2。可以看出：

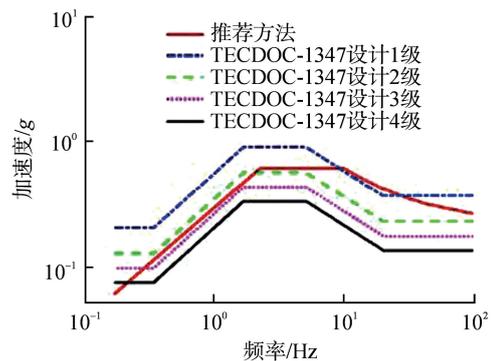


图 2 TECDOC-1347 设计方法与其他核设施的水平设计反应谱对比

Fig. 2 Comparison of Horizontal Design Response Spectrum of TECDOC-1347 Design Method and Other Nuclear Facilities

（1）推荐方法 DRS 的峰值与 TECDOC-1347 的设计 2 级相当，峰值仅比后者高约 8.0%。其在高频部分（>5 Hz）高于后者，在低频部分（<2 Hz）略低于后者。但推荐方法要求结构在地震下处于弹性状态，比 TECDOC-1347 设计 2 级要求的局部非线性严格。

（2）推荐方法 DRS 基本可包络 TECDOC-1347 的设计 3、4 级，尤其在高频部分，前者 DRS 谱值远大于后者。

（3）推荐方法 DRS 相比 TECDOC-1347 的

设计 1 级, 在高频部分与之接近, 中低频部分则远低于后者。但设计 1 级的物项需按核电规范进行设计, 故较为严格。

总体来说, 推荐方法的 DRS 基本可包络 TECDOC-1347 的设计 2、3、4 级, 具有较好的保守性。

## 2.2 推荐方法的匹配性

研究堆结构采用民用规范或民用规范加 1 度进行抗震设计时, 其设备无论采用核电规范还是民用规范, 结构与设备的抗震设计均存在匹配性问题。而推荐方法解决了匹配性问题, 其结构与设备的 DRS 比较见图 3, 其中民用规范的 DRS 由其给出的地震影响系数得到。可以看出:

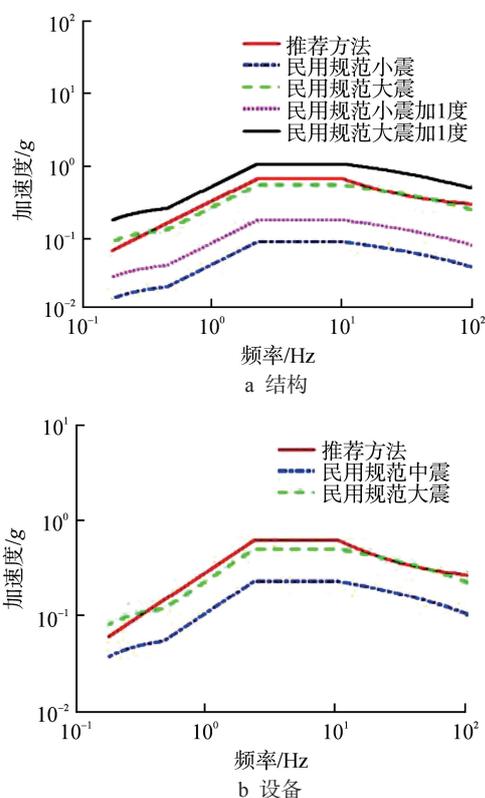


图 3 推荐方法与民用规范的水平 DRS 对比

Fig. 3 Comparison of Horizontal DRS between Recommended Method and Civil Codes

(1) 对于结构, 若采用民用规范的方法, 推荐方法的 DRS 基本可包络民用规范的 DRS。在验收准则上, 推荐方法要求结构处于弹性状态, 而民用规范仅要求结构在小震下处于弹性, 在大震下不倒塌即可。故推荐方法相比民用规范具有较好的保守性。

(2) 对于结构, 若采用民用规范加 1 度的方法, 推荐方法的 DRS 高于民用规范小震加 1 度, 两者均要求结构处于弹性状态。推荐方法的 DRS 低于民用规范大震加 1 度, 但民用规范仅要求结构不倒塌, 在规范中的层间位移角限值为 1/100, 而弹性的限值为 1/800, 相比更为严格。故推荐方法相比民用规范加 1 度的方法较为合理。

(3) 对于设备, 推荐方法的 DRS 虽低于核电规范, 但可包络民用规范。推荐方法的 DRS 略高于民用规范大震, 峰值高约 24.2%, 远高于民用规范中震的 DRS, 峰值为后者的 2.7 倍。故推荐方法较为合理。

总之, 无论结构还是设备的抗震设计, 推荐方法相比民用规范均具有较好的保守性, 与民用规范加 1 度相当。但对于研究堆的抗震设计, 结构和设备抗震设计采用不同的地震动水准进行计算, 这种不匹配将为后续带来不便, 而推荐方法将两者的地震动水准统一, 在保证一定保守性的前提下, 解决了匹配性的问题。

## 3 推荐抗震设计方法的应用

本文将推荐方法应用在 TMSR-LF1 结构与设备的抗震设计计算中。将各抗震设计方法的 DRS 作为地震动输入, 计算 5% 阻尼比下 TMSR-LF1 的最大层间位移角与楼层反应谱。

TMSR-LF1 垂直方向低层标高-14 m, 顶层标高+20 m。结构共分为 5 个楼层, 从下到上分别为第 1 层 (-14~-8 m)、第 2 层 (-8~0 m)、第 3 层 (0~5 m)、第 4 层 (5~10 m)、第 5 层 (10~15 m)。-14 m、-8 m、0 m、5 m 和 10 m 楼板上均放置了各种设备。

### 3.1 结构的抗震设计计算

在结构的抗震设计计算中, 通过最大层间位移角来判断结构是否符合验收准则。本文采用弹性反应谱法计算了推荐方法、核电规范、TECDOC-1347 设计 2 级、民用规范小震以及民用规范加 1 度小震的 TMSR-LF1 结构响应, 5 个楼层的最大层间位移角见图 4。

由图 4 可以看出:

(1) 对于各方法得到的结果, 其楼层的最大层间位移角趋势基本相同, 均在第 3 层最大, 而第 1、2 层因位于地下, 其最大层间位移角非常

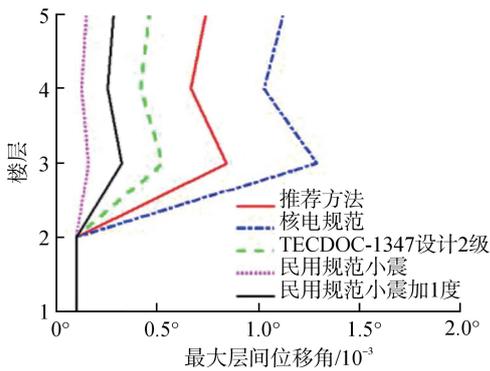


图4 结构的最大层间位移角

Fig. 4 Maximum Inter-story Displacement Angle of Structure

小, 计算结果为软件显示的最小值 1/9999。

(2) 对于响应最大的第 3 层, 推荐方法的值 (1/1184) 小于核电规范的值 (1/775), 同时高于 TECDOC-1347 设计 2 级 (1/1896)、民用规范小震 (1/6201) 以及民用规范加 1 度小震的值 (1/3100)。

故对于结构的抗震设计, 推荐方法相比核电规范具有较好的经济性, 相比 TECDOC-1347 设计 2 级和民用规范具有较好的保守性。

### 3.2 设备的抗震设计计算

由于设备放置于各层楼板上, 楼层反应谱是结构内设备抗震设计的重要输入。本文采取时域分析方法计算考虑土壤-结构相互作用 (SSI) 效应的楼层反应谱。采用梁、板壳、实体 3 种单元混合对 TMSR-LF1 结构以及土壤建立了完整的三维有限元模型, 包含结构、土壤与人工边界 3 个部分。

本文以 5 m 楼层为例, 将推荐方法得到的楼层反应谱与其他规范得到的楼层反应谱进行对比分析, 结果见图 5, 可以看出:

(1) 核电规范的谱值远高于推荐方法的谱值, 尤其是主峰的频率范围 (1~8 Hz), 峰值高约 56.8%, 而在次峰的频率范围 (8~20 Hz), 两者间的差距则没有那么大, 前者峰值比后者高约 17.9%。

(2) 推荐方法的楼层反应谱与 TECDOC-1347 设计 2 级和民用规范大震的楼层反应谱较为接近, 前者仅在 2~6 Hz 的频率范围略高于后者, 峰值分别高约 12.8% 和 35.4%。

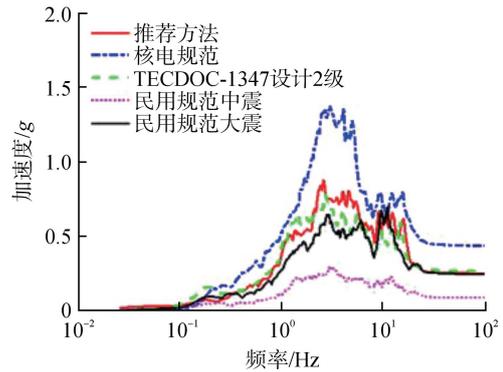


图5 推荐方法与规范的楼层反应谱对比

Fig. 5 Comparison of Floor Response Spectrum between Recommended Method and Codes

(3) 推荐方法的楼层反应谱远高于民用规范大震的楼层反应谱, 峰值约为其 3.03 倍。

故对于设备的抗震设计, 推荐方法相比核电规范具有较好的经济性, 相比民用规范具有较好的保守性。

## 4 结论

本文参考民用规范与核电规范, 推荐了一个匹配结构与设备的 II 类研究堆的抗震设计方法, 以 TMSR-LF1 为例, 对比分析了推荐方法与采用各规范方法得到的设计反应谱, 并应用于 TMSR-LF1 楼层反应谱计算, 得出以下结论:

(1) 相比核电规范, 推荐方法不如其严格, 对于研究堆具有较好的经济性。

(2) 相比 TECDOC-1347, 推荐方法与其设计 2 级相当, 在高频部分较之更保守, 但在低频部分反之; 基本可包络设计 3、4 级。推荐方法具有较好的包络性。

(3) 相比民用规范, 对于结构的抗震设计推荐方法具有较好的保守性, 与民用规范加 1 度相当; 对于设备的抗震设计, 推荐方法具有较好的保守性。推荐方法统一了结构与设备抗震设计中计算采用的地震动水准, 解决了匹配性问题。

(4) 推荐方法在结构与设备抗震设计计算的应用中仍具有较好的经济性 with 保守性。

总体来说, 推荐方法是较为合理的, 可作为后续 II 类研究堆抗震设计的参考。

### 参考文献:

[1] 徐洪杰, 戴志敏, 蔡翔舟, 等. 钍基熔盐堆和核能综

- 合利用[J]. 现代物理知识, 2018, 30(4): 25-34.
- [2] 宋琛修, 朱立新. 研究堆的分类和基于分类的安全监管思路探讨[J]. 核安全, 2013, 12(S1): 134-137.
- [3] 孙锋, 栾海燕, 潘蓉. I、II类研究堆构筑物抗震设计初探[C]//第一届中国国际核电厂建构筑物可靠性与抗震性能评价技术交流论坛论文集. 北京: 论坛理事会, 2016.
- [4] 朱凯昕, 王晓欣, 史力, 等. 三向地震载荷下HTR-10厂房土壤-结构相互作用分析[J]. 原子能科学技术, 2018, 52(10): 1817-1824.
- [5] 荣峰, 汪嘉春, 何树延, 等. CARR堆反应堆厂房土壤-结构相互作用与楼层反应谱分析[J]. 核动力工程, 2006, 27(5): 19-23.
- [6] 黄文慧, 陈学德. 18-5临界装置厂房楼层响应谱计算研究[J]. 核技术, 2013, 36(4): 43-46.
- [7] KWAG S, LEE J M, OH J, et al. Development of system design and seismic performance evaluation for reactor pool working platform of a research reactor[J]. Nuclear Engineering and Design, 2014, 266: 199-213.
- [8] 李水安. 西安脉冲堆抗震设计计算[J]. 核动力工程, 2002, 23(6): 12-15.
- [9] 高李霞. HFETR除气加压系统105型加压泵抗震校核[C]//第14届全国反应堆结构力学会议论文集. 桂林: 中国力学学会, 中国核学会, 2006.
- [10] 官贞珍, 朱全军, 樊习英, 等. 中美欧电气设备抗震设计规范研究[J]. 地震工程与工程振动, 2018, 38(3): 184-193.
- [11] 国家技术监督局, 中华人民共和国建设部. 核电厂抗震设计规范: GB 50267—1997[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997: 26-31.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 核电厂抗震设计标准: GB 50267-2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019: 45-48.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 72-78.
- [14] IAEA. Consideration of external events in the design of nuclear facilities other than nuclear power plants, with emphasis on earthquakes[R]. TECDOC-1347, Vienna, Austria: IAEA, 2003: 103-112.
- [15] 谢富仁. TMSR先进核能实验基地选址项目工程场地地震安全性评价报告: 13FW043-W-地KY-BG 0101[R]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2017: 12-18.
- [16] 潘蓉. 核设施抗震设计中的设计地震反应谱[J]. 核安全, 2010(3): 36-41,50.

(责任编辑: 王中强)