

空间核动力装置鼓棒系统地面试验样机抗震试验研究

李楠, 张金山, 范月容, 郭志家, 衣大勇, 彭朝晖, 刘磊, 冯嘉敏

中国原子能科学研究院, 北京
Email: linan_ciae@126.com

收稿日期: 2021年3月27日; 录用日期: 2021年4月15日; 发布日期: 2021年4月29日

摘要

控制鼓系统和安全棒系统是用于空间核动力装置的重要安全设备。在空间核动力装置地面工程样机的控制鼓系统和安全棒系统不仅必须满足未来在空间运行的性能要求, 还须保证在设计基准地震期间和之后执行其安全功能的能力, 因此必须对其抗震性能进行验证。针对此类核安全级能动设备, 须从相关的法规、标准、验证方法、试验方案及验收准则各个方面考虑, 明确抗震试验的试验技术要求。鼓棒系统试验样机的抗震试验研究是其模拟件通过设备抗震鉴定、产品取证制造的重要基础。

关键词

抗震试验, 控制鼓, 安全棒, 安全级设备, 能动机械设备

Study on Seismic Test of Control-Drum System and Safety-Rod System for Space Nuclear Power Ground Prototype

Nan Li, Jinshan Zhang, Yuerong Fan, Zhijia Guo, Dayong Yi, Zhaohui Peng, Lei Liu, Jiamin Feng

China Institute of Atomic Energy, Beijing
Email: linan_ciae@126.com

Received: Mar. 27th, 2021; accepted: Apr. 15th, 2021; published: Apr. 29th, 2021

Abstract

Control-drum system (CS) and safety-rod system (RS) are important safety equipments. CS and RS for nuclear ground test must meet the expected operating requirements in space applications and assure that the safety functions can perform during and after earthquake event, therefore, their

文章引用: 李楠, 张金山, 范月容, 郭志家, 衣大勇, 彭朝晖, 刘磊, 冯嘉敏. 空间核动力装置鼓棒系统地面试验样机抗震试验研究[J]. 核科学与技术, 2021, 9(2): 89-98. DOI: 10.12677/nst.2021.92011

seismic performances must be validated. Seismic study on CS and RS for nuclear ground test is developed to validate safety functions during and after design basis earthquake event. Test spectrum enveloping multi-support accelerations with margin, operation settings in seismic test cases and acceptance criteria are presented according to referenced regulations and standards in this paper. This seismic experiment study on CS and RS for nuclear ground test serves as an important foundation for seismic qualification and manufacture certificate application.

Keywords

Seismic Test, Control Drum, Safety Rod, Safety Equipment, Active Mechanical Equipment

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

空间核动力装置是改变未来航天动力格局的颠覆性技术之一,美俄的相关空间核反应堆电源研发计划稳步推进,我国也明确表示在未来的深空探测任务中将应用空间核动力,并发展了相关的技术储备[1]-[8]。在开展航天飞行试验前必须进行地面工程样机的研制和考验,验证其总体及各组成部分在试验寿命期内的性能和可靠性[1][2]。

空间核动力装置地面工程样机的控制鼓系统和安全棒系统(以下简称为“鼓棒系统”)是执行功率调节、紧急停堆功能的重要安全设备,在运行期间须保持动作的精度(包括运行精度、运行速率、同一位置的重复精度)。由于空间核动力装置地面工程样机是地面运行的核设施,在设计基准地震(DBE-Design Basis Earthquake)下仍须保证核安全,因此地面工程样机中的鼓棒系统能否精确地执行其安全功能,就必须通过抗震试验进行验证。

鼓棒系统试验样机是其正式产品的原理样机,验证性试验的技术要求、试验过程及结果是其工程样机(模拟件)通过核安全设备鉴定各项型式试验的重要技术准备。根据国家核安全设备鉴定的要求[9]-[15],在破坏性的抗震试验之前,鼓棒系统试验样机已实施并通过了常温、高温性能试验[16]。

2. 设备描述

地面工程样机的控制鼓系统分为控制鼓系统(内部)和控制鼓系统(外部),其中与空间核动力装置的控制鼓系统设计保持一致的称为控制鼓系统(内部),而根据冗余设计增设的可手动操作驱动机构的称为控制鼓系统(外部)。安全棒系统则与空间核动力装置中的设计保持一致。

控制鼓系统(如图1所示)主要包括:控制鼓组件、分配机构、传动机构、驱动机构以及包容以上部件的壳体及其支撑结构等。功能要求如下:1) 在正常工况下,通过鼓体的缓慢转动,实现功率调节;2) 在事故工况下,通过鼓体的快速转动,实现紧急停堆,并保持足够的停堆深度。

安全棒系统(如图2所示)主要包括:安全棒组件、驱动机构、分配机构、传动连接轴、卡锁机构、气体供应系统以及包容以上部件的壳体及其支撑结构等。功能要求如下:1) 安全棒应有足够的中子物理效应,可使反应堆处于足够深的次临界度。2) 安全棒系统应具有按照指令提升、保持、断电释放安全棒组件的功能。

鼓棒系统试验样机是其正式产品的原理样机,在抗震试验之前已通过了常温性能试验、高温性能试验。此项抗震试验是对试验样机抗震性能的验证,并且其抗震试验的技术要求、试验指标与相应的工程

样机保持一致,因此此项工作的成果为鼓棒系统工程样机(模拟件)通过核安全设备鉴定并取得正式产品的制造许可证夯实了基础。

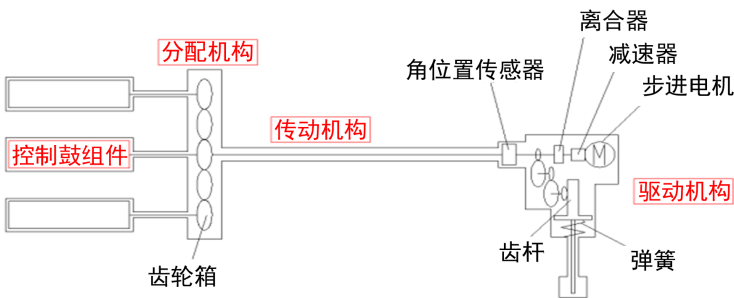


Figure 1. Scheme of control drum system
图 1. 控制鼓系统示意图

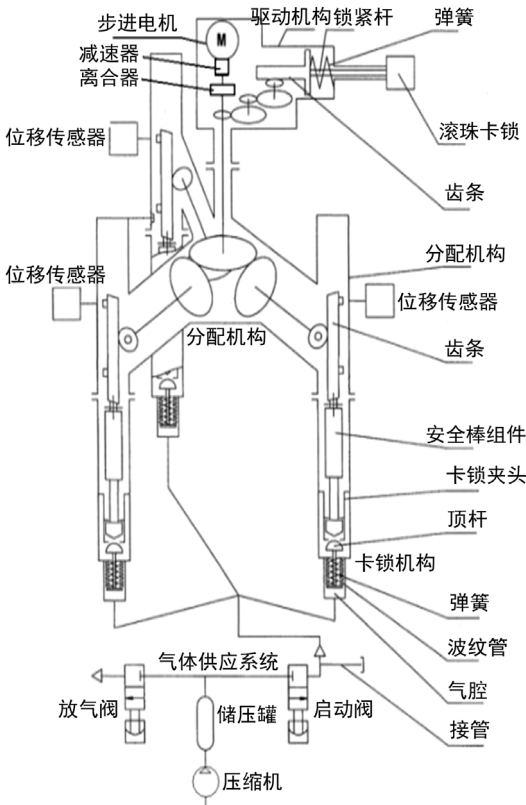


Figure 2. Scheme of safety-rod system
图 2. 安全棒系统示意图

3. 地震激励

为提取地面工程样机鼓棒系统各支撑点的地震激励载荷, 首先对鼓棒系统及其所在的真空室建立有限元模型(如图 3 所示)并进行时程分析, 输入为基于目标楼层反应谱生成的人工模拟地震波。

地面工程样机材料均为 316H 不锈钢, 样机各部件设计温度分布在 200℃~600℃范围内。上部支架温度为 200℃, 下部支架温度为 500℃~600℃。真空室材料为 S30408, 样机及组合支架材料为 Q235A, 总重约为 2800 kg。详细材料性能参数见表 1。

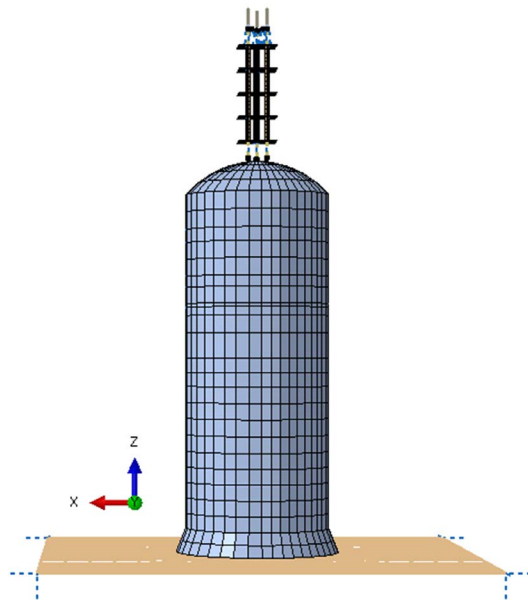


Figure 3. FE model of ground test sample
图 3. 地面工程样机有限元模型示意图

Table 1. Mechanical properties of test assembly
表 1. 鼓棒系统试验样机材料机械性能

材料	温度/℃	密度/kg/m ³	弹性模量/MPa	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	基本许用应力/MPa
S30408	20	7850	203.0	485	170	-
	100	7850	198.0	450	145	97
316H	20	7850	196.0	515	205	-
	200	7850	184.0	496	148	99.2
	550	7850	166	435	116	77.3
	600	7850	166	396	114	76
1Cr13 (M36)	20	7850	194.3	758	586	138
	100	7850	192.7			138
	200	7850	190.4			133
Q235A	20	7850	205	215	205	215

抗震时程分析计算关键部件的加速度结果见表 2，其中动力放大系数为测点加速度反应与输入人工波对应方向加速度峰值的比值。关键点响应谱的包络谱，经过标准化处理后的 DBE 工况试验目标谱见图 4。目标谱包括两个水平方向和一个竖直方向的分量。在生成试验反应谱时在每个激励方向考虑 + 10%加速度裕量。

Table 2. Acceleration results of main components
表 2. 主要部件的加速度结果表

设备部件	最大加速度结果				
	测点位置	方向	加速度/g	输入波/g	动力放大系数
悬吊杆件顶部	A201	X	0.407	0.326	1.25
悬吊杆件底部	A101	X	0.414	0.326	1.27
控制鼓和安全棒系统	A3	X	0.438	0.326	1.34

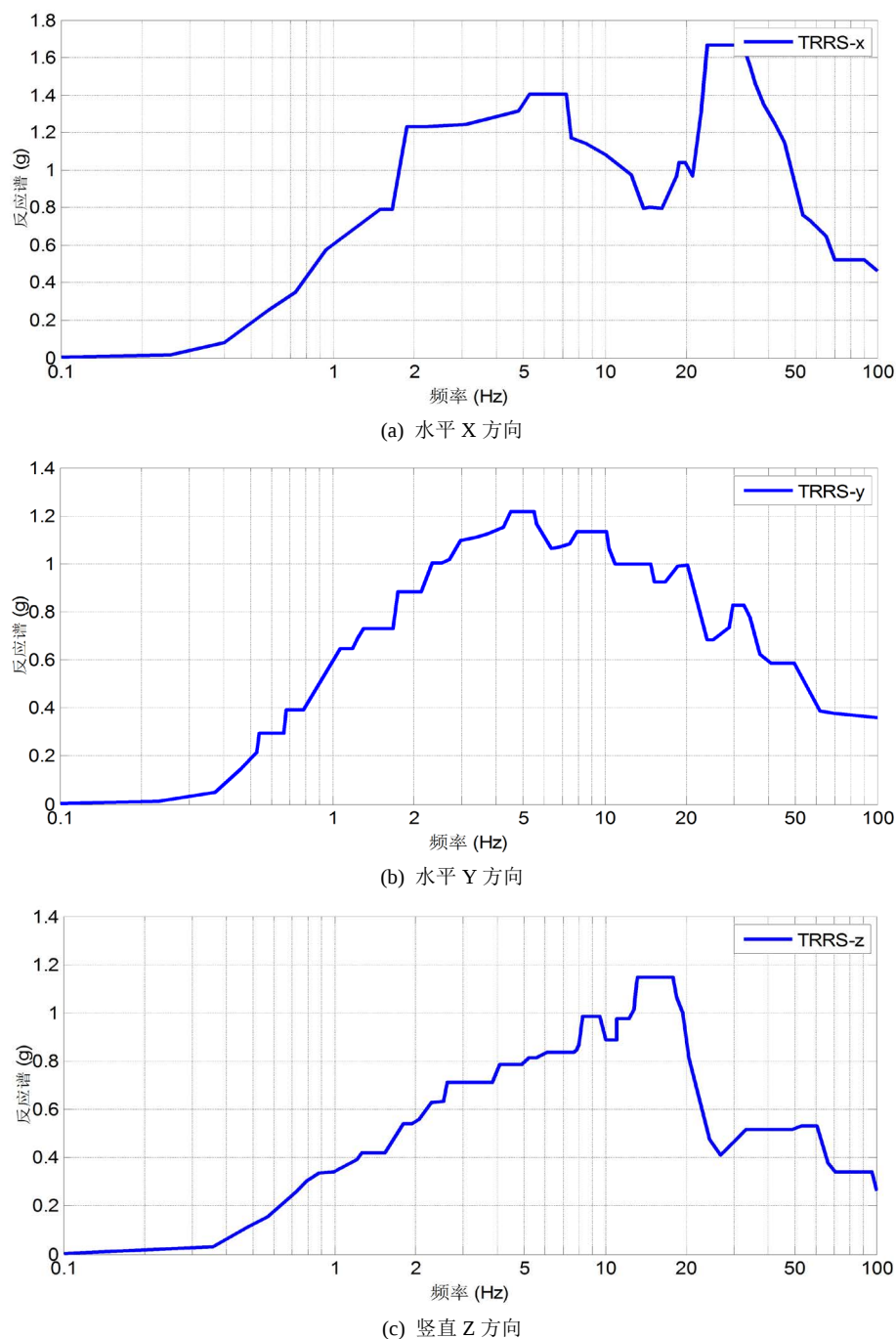


Figure 4. Test required response spectrum

图 4. 试验目标谱

4. 试验台架和试验设备

根据地面工程样机整体抗震分析的结果可以推断地震载荷下地面工程样机真空室内鼓棒系统试验样机的响应与其在堆芯结构安装位置处单点地震激励下的响应较为一致, 可以采用地震模拟振动台进行抗震试验。根据鼓棒系统试验样机在地面工程样机真空室内的安装方式及其自身结构形式, 考虑采用下部刚性台架与上部轻型限位支架相组合的试验台架方案, 见图 5。

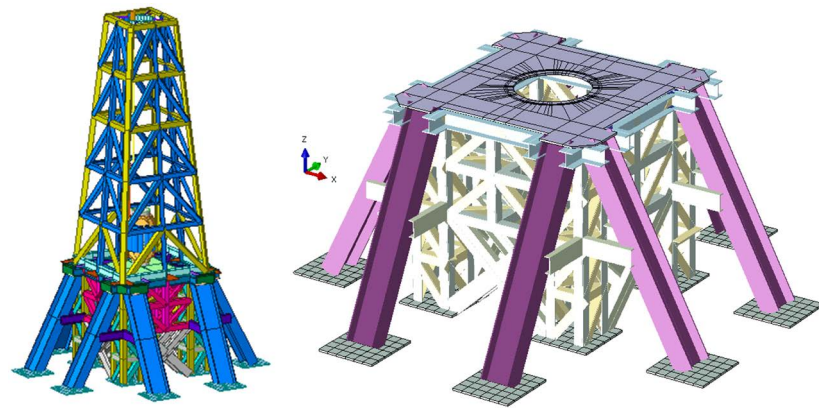


Figure 5. Scheme of test support system
图 5. 试验台架方案

试验台架设置为上、下两部分，下部为高 2.0 m 的刚性试验台架，上部为高 5.0 m 的限位支架。试验样机安装在下部刚性试验台架顶面，在试验过程中台架将振动台的模拟地震运动传递给试验样机。上部限位支架仅为控制鼓系统(外部)提供水平向的限位约束和竖向的支承作用。

试验中共布置了 24 个加速度测点，共计 72 个加速度通道，分别布置于控制鼓系统(外部) (见图 6 左图)、控制鼓系统(内部) (见图 6 中图)和安全棒系统(见图 6 右图)。

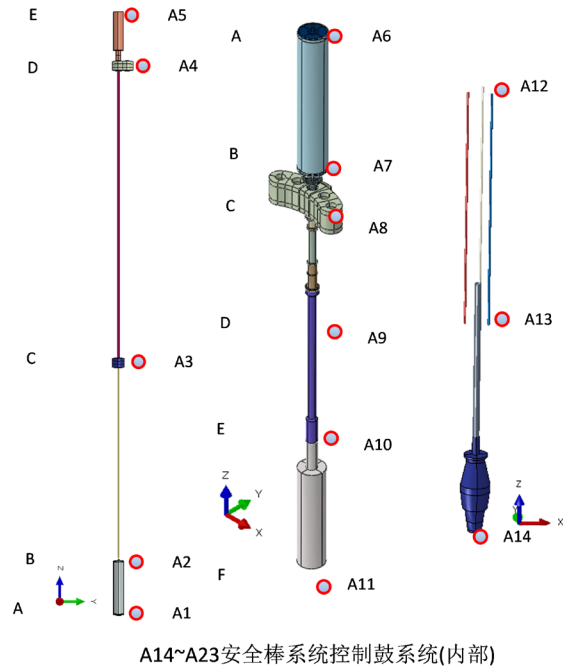


Figure 6. Scheme of accelerometer arrangement on test sample
图 6. 试验样机加速度测点示意图

5. 错对中的考虑

由于控制鼓系统(外部)的传动机构(见图 1)穿过地面工程真空室的上封头、生物屏蔽层到达地面，其驱动机构部分则固定在试验大厅的地面以上，因此必须考虑其中可能存在的安装偏差。抗震试验中根据设备的设计及工艺要求设置了错对中偏差，将这一因素在试验中定量地加以考虑。

6. 试验工况及验收准则

鼓棒系统试验样机抗震试验中包括的试验工况有：基准功能试验、动态特性试验、抗震性能试验、震后功能试验。其中抗震性能试验包括 5 次 1/2DBE 和 1 次 DBE 试验工况，并根据鼓棒系统在 DBE 期间和之后须执行的安全功能设置了执行动作。具体验收指标见表 3 和表 4。

Table 3. Criteria for seismic test on control-drum system

表 3. 控制鼓系统抗震试验验收指标

参数	验收指标
1/2DBE/次	5
重复精度/°	±1
机械动作复位时间/s	≤1
DBE/次	1
DBE 机械动作复位时间/s	≤1
DBE 复位零位允许偏差/°	5

Table 4. Criteria for seismic test on safety-rod system

表 4. 控制鼓系统抗震试验验收指标

测量参数	验收指标
1/2DBE/次	5
DBE/次	1
机械复位时间/s	≤1
安全棒组件行程位移偏差/mm	±5

7. 试验结果

抗震试验顺利完成，鼓棒系统试验样机在所有试验工况下均能满足性能要求运行并执行快速复位的安全功能，下面将从动力特性、加速度及位移响应和试验验收指标等方面进行说明。

7.1. 动力特性

动力特性的探查采取从台面输入加速度幅值为 0.10 g，持时 180 s 白噪声随机波，对试验样机进行激振。测得试验样机各测点的反应后，经 FFT 处理得到频响函数，经模态识别求得试验样机的动力特性，得到了 3 次白噪声激振下识别出的试验样机的自振频率和阻尼比，见表 5。

Table 5. Natural frequencies and damp ratios of test assembly

表 5. 试验样机的自振频率与阻尼比值

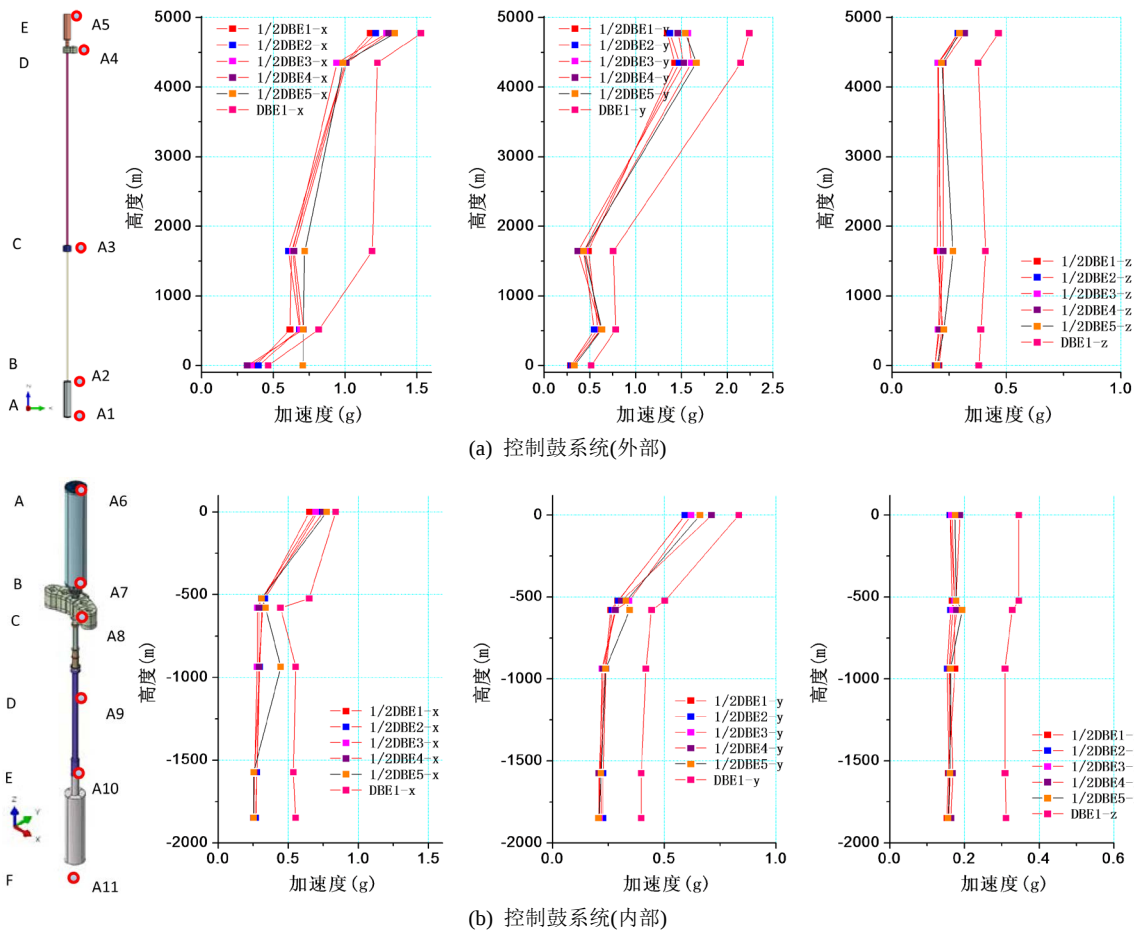
序号	序号	工况	方向	第一阶		第二阶		第三阶	
				频率/Hz	阻尼比%	频率/Hz	阻尼比%	频率/Hz	阻尼比%
1	地震前	白噪声/单向 安全棒入堆芯	x	21.50	1.65	27.32	5.04	42.32	1.75
2			y	20.87	1.58	29.20	5.12	40.91	2.38
3			z	30.87	4.26	-	-	-	-

Continued

4	地震前	白噪声/单向 安全棒出堆芯	x	21.77	2.35	27.39	4.42	41.14	1.60
5			y	20.94	2.63	28.42	6.77	40.41	2.90
6			z	31.00	4.73	-	-	-	-
7	1/2DBE 地震后	白噪声/三向	xyz:x	21.10	1.88	27.43	5.58	40.15	1.42
			xyz:y	20.55	1.64	27.58	5.98	40.22	1.64
			xyz:z	30.15	4.64	-	-	-	-
8	DBE 地震后	白噪声/三向	xyz:x	20.76	1.99	27.17	4.58	40.35	2.29
			xyz:y	20.55	2.10	28.58	5.21	40.36	1.55
			xyz:z	30.11	4.54	-	-	-	-

7.2. 试验测点加速度

控制鼓系统(外部)、控制鼓系统(内部)和安全棒系统的不同方向加速度响应分布规律(见图 7)。其中安全棒系统在第五次 1/2DBE 和 DBE (图 7 下图 1/2DBE5-X、DBE-X)工况下须执行快速落棒动作, 因此在对应的测点处产生了超出加速度计量程的冲击响应。



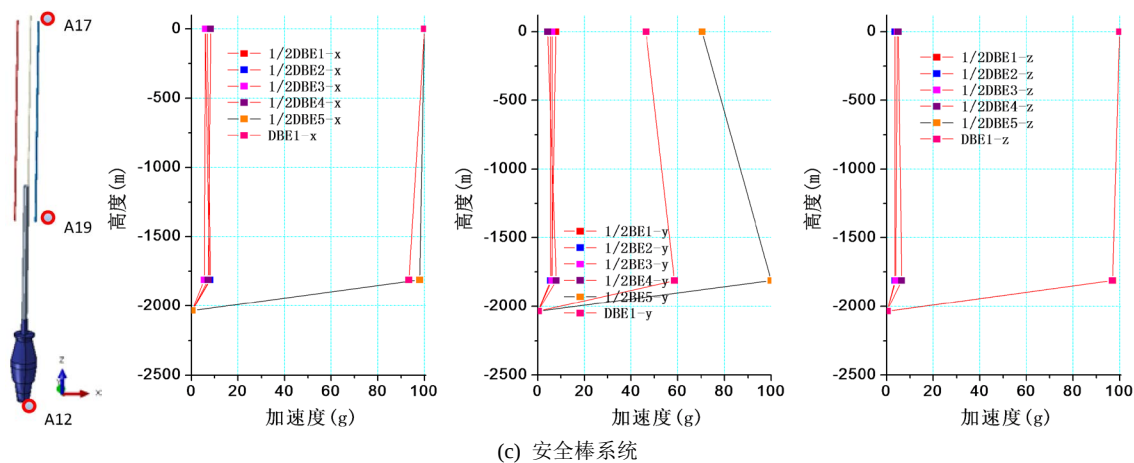


Figure 7. Acceleration responses of test sample
图 7. 试验样机加速度响应分布

7.3. 试验测点动应力

动应力试验结果表明不同试验工况中各测点的动应力幅值较为接近，且动应力值均较小，结构材料处于弹性状态。控制鼓系统(外部)传动杆外壁面测点最大主应力为 2.783 MPa (1/2DBE 工况)，2.581 MPa (DBE 工况)。控制鼓系统(内部)传动杆外壁面测点最大主应力为 1.350 MPa (1/2DBE 工况)，2.059 MPa (DBE 工况)。试验样机壳体外壁面测点最大主应力为 2.778 MPa (1/2DBE 工况)，DBE 工况的 3.942 MPa (DBE 工况)。

7.4. 功能检查结果

在试验中设置了试验前基准功能试验和试验后功能试验工况，以判断地震载荷对设备运行功能的影响，测量结果详见表 6，各项试验指标均满足表 3 和表 4 的验收要求。

Table 6. Reset time results in various test cases
表 6. 各试验工况下落棒时间和复位时间

试验工况	系统	安全棒落棒时间/s	控制鼓(内部)复位时间/s	控制鼓(外鼓)复位时间/s
试验前基准功能试验		0.172 s	0.25 s	0.671 s
第 1 次 1/2DBE 试验后		0.125 s	/	/
第 2 次 1/2DBE 试验后		0.125 s	/	/
第 3 次 1/2DBE 试验后		0.125 s	/	/
第 4 次 1/2DBE 试验后		0.125 s	/	/
第 5 次 1/2DBE 试验中		0.125 s	0.172 s	0.686 s
DBE 试验中		0.141 s	0.188 s	0.640 s
试验后功能试验		0.125 s	0.171 s	0.514 s

8. 结论

为保证空间核动力装置鼓棒系统在地面工程样机运行期间满足抗震要求，本研究依据相关的地面核设施的核安全法规和标准的要求，为鼓棒系统试验样机抗震试验提出了合理的、工程适用的技术要求，

包括地震动激励的包络、试验台架设计、试验验收指标等，主要的内容及参考意义如下：

1) 依据国家核安全法规、标准的要求，确定采用试验法进行抗震性能验证的技术要求和验收指标，并在抗震试验前完成其他运行试验；

2) 对鼓棒系统所在的真空室进行整体建模和抗震时程分析，预测了设备的动力响应，计算结果支持了试验方案和试验设备的选择；目标反应谱采用地面工程样机整体抗震时程分析中获得的关键点响应谱的包络谱，并在生成试验反应谱时在每个激励方向考虑 + 10%加速度裕量；

3) 在试验中考虑了错对中要求。

空间核动力装置鼓棒系统试验样机通过抗震试验验收，标志着其抗震性能满足核安全设备抗震设计要求，为下一阶段鼓棒系统模拟件通过设备鉴定打下坚实基础。

参考文献

- [1] 苏著亭, 杨继材, 柯国土. 空间核动力[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2016.
- [2] 胡古, 赵守智. 空间核反应堆电源技术概览[J]. 深空探测学报, 2017, 4(5): 430-443.
- [3] 新华网新闻. 中国深空探测将应用空间核动力[QJ].
http://www.xinhuanet.com/2017-03/09/c_1120600610.htm
- [4] 吴伟仁, 刘继忠, 赵小津, 等. 空间核反应堆电源研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2019, 49(1): 1-12.
- [5] 马世俊, 杜辉, 周继时, 等. 核动力航天器发展历程(上) [J]. 中国航天, 2014(4): 31-35.
- [6] 马世俊, 杜辉, 周继时, 等. 核动力航天器发展历程(下) [J]. 中国航天, 2014(5): 32-35.
- [7] 姚成志, 胡古, 解家春, 等. 月球基地核电源系统方案研究[J]. 原子能科学技术, 2016, 50(3): 464-470.
- [8] 姚成志, 赵守智, 胡古, 等. 星球表面用核反应堆临界安全分析[J]. 原子能科学技术, 2018, 52(12): 2176-2180.
- [9] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 12727-2017 核电厂安全级电气设备鉴定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [10] 国家技术监督局. GB/T 13625-1992 核电厂安全系统电气设备抗震鉴定[S]. 北京: 中国标准出版社, 1992.
- [11] 国家核安全局. HAF J0053 核设备抗震鉴定试验指南[S]. 北京: 国家核安全局, 1995.
- [12] 国家能源局. NB/T 20036.2-2011 核电厂能动机械设备鉴定第2部分: 抗震鉴定[S]. 北京: 原子能出版社, 2011.
- [13] 国家能源局. NB/T 20040-2011 核电厂安全级电气设备抗震鉴定试验规则[S]. 北京: 原子能出版社, 2011.
- [14] 王英, 郎爱国, 顾申杰, 等. 核安全设备鉴定[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [15] 环境保护部核与辐射安全中心. 核动力厂核级设备抗震鉴定[M]. 北京: 中国原子能出版社, 2015.
- [16] 郭志家, 张金山, 衣大勇, 等. 空间核动力装置控制鼓系统试验样机热态性能试验[J]. 原子能科学技术, 2019, 53(7): 1317-1323.