

# 中国实验快堆控制棒驱动线抗震试验研究

孙磊<sup>1</sup>, 杨红义<sup>2</sup>, 陈学德<sup>1</sup>, 宋青<sup>2</sup>, 李天勇<sup>1</sup>, 李锡华<sup>1</sup>, 李朋洲<sup>1</sup>, 文静<sup>2</sup>

(1. 中国核动力研究设计院, 四川 成都 610041; 2. 中国原子能科学研究院, 北京 102413)

**摘要:** 本工作依据相关规范, 参考当前核电厂控制棒驱动线抗震试验的先进技术, 结合中国实验快堆控制棒驱动线的结构特点, 对中国实验快堆安全棒驱动线进行了抗震鉴定试验研究。研究结果为其安全评审提供了重要数据。

**关键词:** 中国实验快堆; 控制棒驱动线; 抗震试验

**中图分类号:** TL327      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-6931(2008)S1-0422-04

## Seismic Test Research of Control Rod Drive Line for China Experimental Fast Reactor

SUN Lei<sup>1</sup>, YANG Hong-yi<sup>2</sup>, CHEN Xue-de<sup>1</sup>, SONG Qing<sup>2</sup>, LI Tian-yong<sup>1</sup>,  
LI Xi-hua<sup>1</sup>, LI Peng-zhou<sup>1</sup>, WEN Jing<sup>2</sup>

(1. Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610041, China;  
2. China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

**Abstract:** Based on safety codes, reference to advanced seismic test technology of control rod drive line, and combining to the structure characteristics, the seismic test was carried out for China Experimental Fast Reactor to provide key-data for its safety review.

**Key words:** China Experimental Fast Reactor; control rod drive line; seismic test

中国实验快堆(CEFR)工程是国务院批准的国家“863”计划能源领域2000年发展目标中的重点项目, 是我国第1座快中子反应堆。

作为CEFR中核心的停堆安全系统, 控制棒驱动线是保证反应堆在发生事故情况下终止中子链式反应的直接手段。作为池式钠冷快堆, CEFR的控制棒驱动线结构设计技术从俄罗斯直接引进, 分为事故保护系统和补偿-调节系统两部分。事故保护系统由安全棒驱动机构

和安全棒组成, 而补偿-调节系统由补偿-调节棒驱动机构和补偿-调节棒组成。两种驱动机构均为电动机械型的伺服传动装置, 分别用于在反应堆堆芯内移动安全棒和补偿-调节棒, 以控制反应堆的反应性, 即对反应堆进行功率调节。此外, 在必要时, 应使安全棒和补偿-调节棒在规定的时间内快速插入堆芯以保证反应堆安全停堆。安全棒和补偿-调节棒的设计落棒时间分别为0.7 s和2.5 s。

根据国家核安全局发布的安全法规《核电厂地震分析及试验》(HAF0102)要求,控制棒驱动线系统属 I 类抗震物项,应能承受在厂区附近发生的 SL1 和 SL2 地震载荷,并保证在地震发生时或(和)地震后均能保持其结构完整性和履行其安全功能。CEFR 的安全棒驱动机构和补偿-调节棒驱动机构在俄罗斯曾做过“模拟”地震试验,但此“模拟”地震试验的载荷更接近于冲击,不满足我国相关核安全法规的要求。这使其成为 CEFR 安全再审查中的重大遗留问题,必须予以解决。因此,中国原子能科学研究院通过合同委托中国核动力研究设计院对 CEFR 控制棒驱动线(CRDL)工程样机进行抗震鉴定试验。

## 1 试验对象

CEFR 是我国研制的第 1 座工程实验快中子增殖反应堆。控制棒驱动线作为反应堆的关键部件,其抗震性能直接影响 CEFR 的安全运行。在 CEFR 中,控制棒驱动线涉及的结构部件有:安全棒和补偿-调节棒驱动机构、控制棒驱动机构支承管、小旋塞(包括中心测量柱)、控制棒组件和小栅板联箱,总高度约为 14 m。整个控制棒驱动线结构复杂,根据其结构特点,在地震中它将受到多点不同地震载荷的作用,其抗震试验无法在堆上进行,而只能在堆外采用模拟的方法完成。

## 2 试验模型设计

本试验模型由驱动机构通道管和控制棒堆上模拟支承结构组成。图 1 为模型总体示意图。

### 2.1 驱动机构的通道管

驱动机构的通道管是驱动机构运动部件下落的通道,它由上部支撑筒和小旋塞本体以及中心测量柱内的一系列不同管径和壁厚的导管组成。在设计中,采用同样的材料,1:1 的比例真实模拟实际结构。

### 2.2 控制棒驱动线的堆上支承结构

实堆中,控制棒驱动线的堆上支承结构包括小旋塞本体以上附属结构、小旋塞本体、小旋塞吊篮、中心测量柱和小栅板联箱等部件。小旋塞本体以上附属结构固定于小旋塞本体的上表面,由两层平板及 12 根  $\phi 30$  mm 的连杆等组

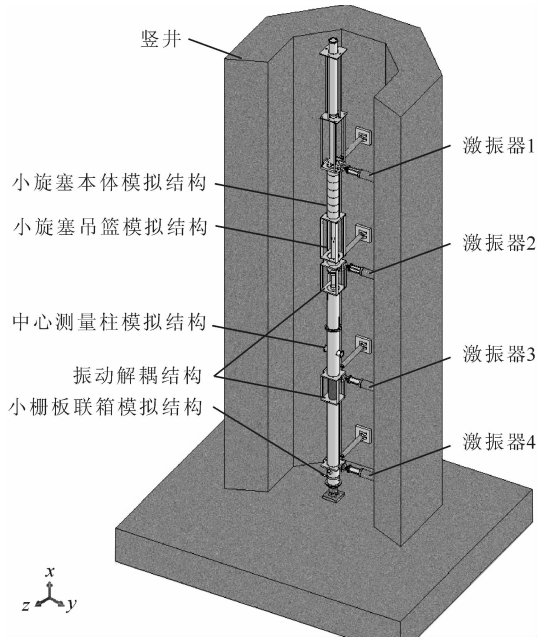


图 1 试验模型示意图

Fig. 1 Scheme of test model

成。小旋塞本体有很大的质量和刚度,直径约 2.96 m,高约 3.33 m,质量 33 985 kg。中心测量柱生根于小旋塞底部热屏蔽,为一直径 0.865 m、厚 0.018 m、高约 3 m 的柱体。另外,控制棒组件插在小栅板联箱上,控制棒组件的外形结构为六边形,长度为 2.58 m。

由于本试验在堆外进行,故在试验中需根据堆上实际支承结构的力学特性,由力学等效的原理设计堆上支承模拟结构。它由小旋塞本体以上模拟结构、小旋塞本体模拟结构、吊篮下部热屏蔽模拟结构、中心测量柱模拟结构、小栅板联箱模拟结构和解耦装置等 6 部分组成。

## 3 传感器布置

本试验的传感器有加速度计(A)、应变计(S)和位移计(激光)。各传感器布置位置示于图 2。

## 4 试验结果

本试验主要包括 3 部分:功能测试、模态试验和地震试验。这里主要介绍安全棒驱动线模态试验和地震试验的主要结果。

### 4.1 模态试验

不同介质和棒位下主要部件的频率和阻尼比列于表 1。

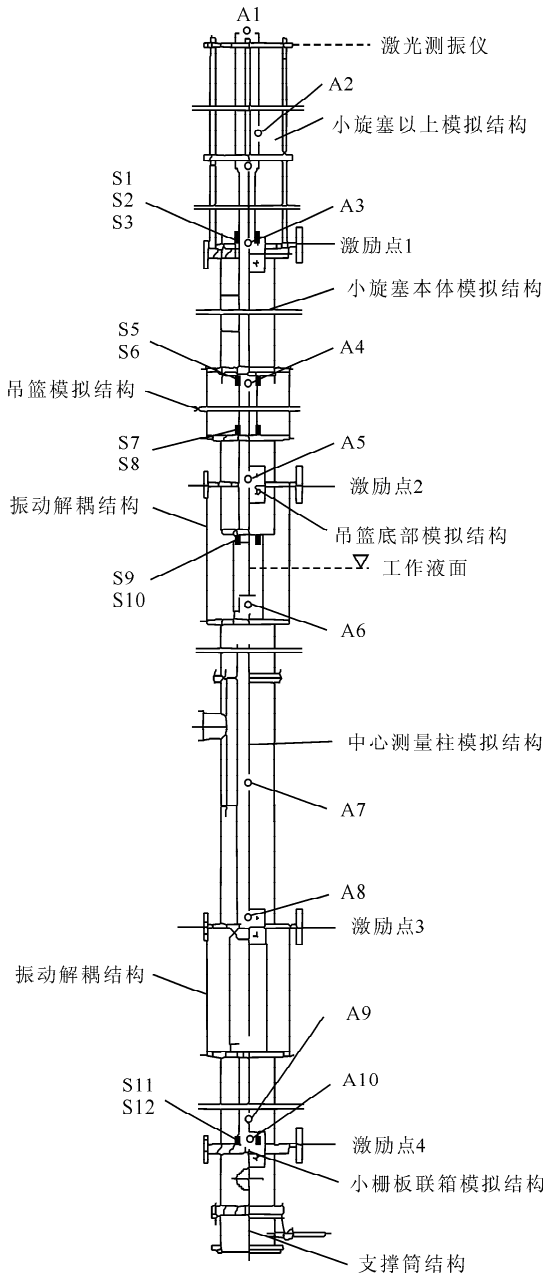


图2 传感器布置示意图

Fig.2 Scheme of sensors layout

## 4.2 地震试验

在驱动机构和组件间偏心 $-6\text{ mm}$ 安装条件下,安全棒驱动线在各地震工况下的性能如下。

1) 第1次SL1地震输入:地震中安全棒能够保持在最高位置,地震后的落棒时间为 $0.645\text{ s}$ 。

2) 第2次SL1地震输入:安全棒按规定落棒,落棒时间为 $0.637\text{ s}$ 。

3) 第3次SL1地震输入:地震中安全棒能够保持在最高位置,地震后的静态落棒时间为 $0.673\text{ s}$ 。

4) 第4次SL1地震输入:安全棒按规定落棒,落棒时间为 $0.671\text{ s}$ 。

5) 第5次SL1地震输入:安全棒按规定落棒,落棒时间为 $0.687\text{ s}$ 。

6) SL2地震输入:安全棒按规定落棒,落棒时间为 $0.624\text{ s}$ 。

在SL1地震中,上部支撑筒根部的应变最大值为 $324\mu\epsilon$ (对应的应力为 $68\text{ MPa}$ ),而整个驱动线的最大应变出现在吊篮底部上表面通道管(传感器编号为S8,下同)上,为 $658\mu\epsilon$ (对应的最大应力为 $138.2\text{ MPa}$ );加速度的最大值出现在动导管(A7)上,为 $194\text{ m/s}^2$ ;上部支撑筒顶部的最大位移为 $27\text{ mm}$ 。

在SL2地震中,上部支撑筒根部应变最大值为 $374\mu\epsilon$ (对应的应力为 $78.5\text{ MPa}$ ),同样,整个驱动线的最大应变出现在吊篮底部上表面通道管(S8)上,为 $673\mu\epsilon$ (对应的最大应力为 $141.3\text{ MPa}$ );加速度最大值为 $305\text{ m/s}^2$ ,出现在动导管(A7)上;上部支撑筒顶部的最大位移为 $34\text{ mm}$ 。

表1 安全棒驱动线主要部件的固有频率

Table 1 Main component natural frequencies of safety rod CRDL

主要部件	频率/Hz				阻尼比/%			
	50%棒位		100%棒位		50%棒位		100%棒位	
	空气中	静水中	空气中	静水中	空气中	静水中	空气中	静水中
上部支撑筒	3.15	3.23	3.15	3.27	2.2	2.2	1.6	0.8
	19.77	20.39	20.17	21.74	—	—	—	—
控制棒组件	3.28	3.2	3.83	3.4	—	—	—	—

注:50%和100%棒位分别指控制棒提升到总行程的一半和提升到顶部时所处的状态

## 5 结论

通过对试验数据的分析和比较,得到以下结论。

本项目采用动力学等效的原理对控制棒驱动线的模拟支承结构进行设计,试验件的动态特性实际测量值和理论分析值具有很好的一致性,即本试验采用的试验件是合理有效的,它能很好地反映实堆结构的力学特性。

CEFR 安全棒驱动线上部支撑筒的频率为 3.1 Hz,且棒位和试验介质(空气和常温水)对其频率影响不大。安全棒驱动线控制棒组件的频率在 50%棒位时约为 3.2 Hz;100%棒位时,

在空气和水介质下的频率分别为 3.8 和 3.4 Hz(安全棒驱动线)。控制棒组件频率在不同棒位和试验介质下有一定变化。

CEFR 的安全棒驱动线,在 SL1 地震下,其顶部的最大位移为 27 mm,上部支撑筒根部的最大应力为 68 MPa,且在地震中能正常落棒,其最长落棒时间为 0.687 s;在 SL2 地震下,其顶部的最大位移为 34 mm,上部支撑筒根部的最大应力为 78.5 MPa,地震中的落棒时间为 0.624 s。驱动线整个结构的响应随着地震输入的增大而变大,各种工况下的落棒时间都满足设计要求。