

减振与降噪

# 核电应急柴油发电机组辅助高温水循环泵 抗震鉴定试验研究

孙志宏<sup>1</sup>, 郑忠伟<sup>2</sup>, 李鹏涛<sup>3</sup>

(1. 陕西柴油机重工有限公司, 陕西 兴平 713105; 2. 中国核电工程有限公司, 北京 100840;  
3. 陕西柴油机重工有限公司西安电站工程分公司, 陕西 西安 710077)

**摘 要:** 为验证某核电站应急柴油发电机组辅助用高温水循环泵的抗震性能, 根据国家相关规范标准进行了抗震性能试验研究。采用白噪声信号作为输入激励, 分别测试了高温水循环泵在抗震试验前后的固有频率和阻尼比; 根据高温水循环泵具体位置选定对应的反应谱, 进行了 5 次运行基准地震试验和 1 次安全停堆地震试验。试验结果表明: 该型高温水循环泵有足够的抗震强度, 能够在规定的地震条件下正常运行, 满足抗震性能要求。

**关键词:** 应急柴油发电机组, 高温水循环泵, 抗震试验; 固有频率

中图分类号: TM623 文献标识码: A 文章编号: 1001-4357(2017)05-0041-05

## Seismic Test Research of Auxiliary High Temperature Water Circulating Pump for Emergency Diesel Generator Sets in Nuclear Power Station

Sun Zhihong<sup>1</sup>, Zheng Zhongwei<sup>2</sup>, Li Pengtao<sup>3</sup>

(1. Shaanxi Diesel Engine Heavy Industry Co., Ltd., Shaanxi Xingping 713105;  
2. China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100840;  
3. Power System Engineering Company, Shaanxi Diesel Heavy Industry Co., Ltd., Shaanxi Xian 710077)

**Abstract:** According to the relevant national standards, seismic test was carried out to verify the performance of auxiliary high temperature water circulating pump for emergency diesel generator set in one nuclear power station. The natural frequency and damping ratio of high temperature water circulating pump has been measured using white noise signal as input excitation. According to the specific position of the high temperature water circulating pump, the corresponding earthquake response spectrum was selected, and 5 times of operation basis earthquake tests and 1 time of safe shutdown earthquake test were carried out. The results show that the high temperature water circulation pump has enough anti-seismic intensity, and able to run normally under the conditions of prescribed seismic conditions, thus could meet the seismic requirements.

**Key words:** emergency diesel generator set; high temperature water circulating pump; seismic test; natural frequency

## 0 引 言

地震情况下, 核电站的内部电源有可能发生断

电故障, 此时反应堆堆芯内产生的大量热量如果得不到及时有效的冷却, 将可能导致堆芯融化甚至爆炸, 后果极其严重。因此在核电站的设计中必须要

收稿日期: 2017-06-06

作者简介: 孙志宏(1970-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为核电站 1E 级应急柴油发电机组生产与科研, E-mail: sunzhihong@sxinfo.com.cn。

有一种相对独立、安全可靠的外部动力电源来驱动相关负荷的正常运行,从而保证反应堆在地震发生时能够及时有效的将多余的热量从堆芯中导出,确保核电站在地震发生时仍处于安全运行状态。这种独立的外部动力电源就是应急柴油发电机组(EDG, Emergency Diesel Generator Set)<sup>[1]</sup>。高温水循环泵是应急柴油发电机组正常工作的重要辅助设备,主要用于冷却运行状态下 EDG 的缸套和经过废气涡轮增压后的进气,以此来保证柴油机的正常工作并提高其热效率;同时用于在 EDG 处于停机状态时预热柴油机缸套和滑油,保证 EDG 能够随时快速进入工作状态,提供有效的外部电源来驱动相关负载正常运行。按照核电设备相关抗震规范<sup>[2]</sup>的规定,核电应急柴油发电机组及辅助用高温水循环泵均属于抗震 1 类物项。对于抗震 1 类设备应按照相关抗震标准<sup>[3-4]</sup>的要求进行抗震鉴定试验。

目前抗震鉴定的主要方法有分析计算法、试验法、经验反馈法等。对于一些结构复杂,很难通过合理的分析计算来验证其抗震性能的设备,必须进行抗震鉴定试验。本文根据相关规范<sup>[5]</sup>的要求,对福建福清核电站 5&6 号机组 EDG 辅助用高温水循环泵进行抗震鉴定试验,验证其在要求的地震工况下的安全性和可靠性。

## 1 试验对象及试验设备

福建福清核电站为 6 台百万千瓦级二代改进型压水堆核电机组,本次抗震试验对象为其 5&6 号机组 EDG 辅助用高温水循环泵。根据 EDG 对高温水系统流量和压力的要求,选用 ESLH40-180/E12 型离心泵作为其动力来源。如图 1 所示,它是一款卧式、三相电机驱动的离心泵,主要由离心式泵头、三相电机、公共底座三部分组成,其主要性能参数见表 1。

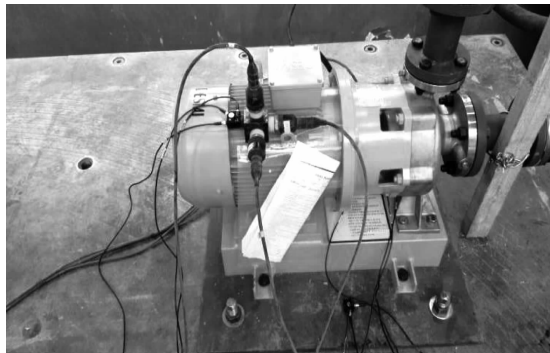


图 1 高温水循环泵及在地震台上的安装

表 1 ESLH40-180/E12 离心泵主要参数

| 流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ) | 压力/kPa | 功率/kW | 质量/kg |
|-----------------------------------------|--------|-------|-------|
| 12                                      | 300    | 5.5   | 130   |

如图 2 所示,本次试验在西安建筑科技大学结构工程与抗震教育部重点实验室的三向六自由度地震模拟振动台上进行。该振动台的台面尺寸为  $4.1 \text{ m} \times 4.1 \text{ m}$ ,最大承重负荷为 30 t,台面三个方向的最大输出加速度分别为水平  $X$  向  $4.0 \text{ g}$ 、水平  $Y$  向  $3.8 \text{ g}$ 、竖向  $Z$  向  $6.0 \text{ g}$ ,工作频率范围为  $0.1 \sim 100 \text{ Hz}$ 。试验中采用 PCB 公司生产的三轴压电式加速度传感器采集被测试件的振动响应信号,其频响范围为  $0.5 \sim 100 \text{ Hz}$ ;采用 LMS 公司的 128 通道 LMS Test Lab 智能动态信号采集仪分析处理数据。

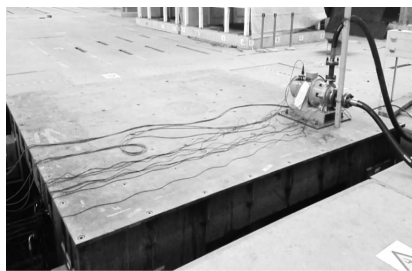


图 2 三向六自由度地震模拟振动台

## 2 试件安装及测点设置

首先检查高温水循环泵结构的完整性,确认其内外部各部件无松动脱落,并用橡胶软管连接好泵的出入口。开启电源,进行泵的功能性试验;待泵运行稳定后,监测其压力、流量等参数并与表 1 中的数据进行对比,确定其是否运行正常。如图 1 所示,在功能性试验正常的情况下采用 M16 螺栓将高温水循环泵安装在刚性公共底座上,然后用 M25 螺栓将泵的组合体与振动台台面进行刚性连接。

本次试验共设置 2 个测点:第一个测点设置在振动台表面,用于测量振动台输入的加速度信号;第二个测点设置在高温水循环泵的顶部,用于测量外部激励情况下试件顶部的加速度响应信号。每个测点均固定一个三轴压电式加速度传感器,并与数据采集仪连接。见图 1。按照右手螺旋定则,规定泵轴的方向为  $X$  方向,与  $X$  向垂直的水平方向规定为  $Y$  向,竖直方向为  $Z$  向。

## 3 试验目的

根据 HAF. J0053-1995<sup>[5]</sup>的相关规定,对于抗震 1 类设备,其抗震试验主要有以下目的:

(1) 通过动态特性探查试验测定高温水循环

泵 X、Y、Z 三个方向的固有频率和阻尼比；

(2) 通过抗震性能试验验证高温水循环泵在要求的地震作用下能否保证其结构的完整性和功能的正常性；

(3) 通过最终检验性试验测定高温水循环泵在抗震试验后的固有频率和阻尼比的变化情况，以验证其结构在抗震试验后是否发生改变和破损。

## 4 动态特性探查试验

### 4.1 动态特性探查试验的基本原理

对于一个线性时不变系统而言，设其输入与输出函数分别为  $x(t)$ 、 $y(t)$ ，则  $y(t)$ 、 $x(t)$  的拉氏变换  $Y(s)$ 、 $X(s)$  之比  $H(s)$  称为这个系统的传递函数：

$$Y(s) = H(s)X(s) + G(s) \quad (1)$$

这里  $G(s)$  为系统初始条件下的状态，若初始条件为 0，则有：

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} \quad (2)$$

这里复变量  $s = a + j\omega$ ，当复变量的实部  $a$  为 0，虚部  $\omega$  为角频率时， $H(s)$  就是系统的频率响应函数<sup>[6]</sup>。

由于系统的传递函数是系统本身属性的反映，而与输入量的大小无关，因此对于固定系统而言，当输入  $X(s)$  确定后，系统的输出  $Y(s)$  也是不变的，这种情况下可以通过对系统输入已知的激励信号，并研究相应的输出信号的试验方法，来对系统

的动态特性进行研究，如确定系统的固有频率和阻尼比等，这正是动态特性探查试验的原理。

### 4.2 动态特性探查试验过程

在动态特性探查试验中采用频率范围为 0.5 ~ 50 Hz，加速度为  $0.2 g_n$  的白噪声作为振动台台面的输入信号，对高温水循环泵的 X、Y、Z 三个方向同时进行激励。为了保证各个方向固有频率测定的精度，白噪声信号持续时间不小于 30 s。试验过程中可以将测点一的加速度信号视为振动台给予高温水循环泵的激励信号，将测点二的加速度信号视为高温水循环泵在此激励下得到的响应信号，二者之比即为传递函数。

如图 3 所示，分别对应高温水循环泵 X、Y、Z 三个方向上的传递函数曲线，它实际上是横坐标为频率，纵坐标为传递函数的曲线。根据动态特性探查试验原理，曲线上第一个比较明显的峰值即为物体自身的一阶固有频率。因此可知高温水循环泵在三个方向上的固有频率分别为 40.68 Hz、37.26 Hz、81.49 Hz，与其对应的阻尼比经过系统计算分别为 0.94%、0.20%、0.74%。也即抗震试验前高温水循环泵的固有频率及阻尼比，见表 2 所示。

表 2 动态特性探查试验中各个方向的固有频率及阻尼比

| 激励信号                                          | 坐标方向 | 固有频率/Hz | 阻尼比   |
|-----------------------------------------------|------|---------|-------|
| 频率为 0.5 ~ 50 Hz，<br>加速度为 $0.2 g_n$ 的<br>白噪声信号 | X    | 40.68   | 0.94% |
|                                               | Y    | 37.26   | 0.20% |
|                                               | Z    | 81.49   | 0.74% |

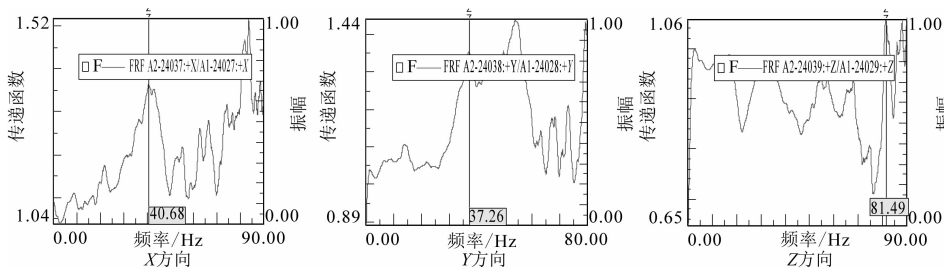


图 3 动态特性探查试验各方向的传递函数曲线

## 5 抗震性能试验

### 5.1 抗震性能试验要求

(1) 抗震性能试验主要是考核核电设备能否在规定的地震作用下按照正常的功能工作并保证结构的完整性。抗震试验时，要根据设备所在具体楼层的位置，选定对应位置在试验中所要求的加速度反应谱值曲线 (RRS, Required Response Spectrum)。若实际中给出的是横轴为频率的加速度曲线，则在实际试验中通常利用傅里叶变换将其转化为横轴为时域的加速度

曲线，并作为激励信号输入振动台台面。

(2) 本文中应急柴油发电机组辅助高温水循环泵安装于福清核电站厂房内<sup>[7]</sup> - 4.80 m 标高层，因此在试验中选用相应层高的加速度反应谱曲线作为激励信号输入，如图 4、7 所示。

(3) 按照 HAF J0053 中第 8.2.7 的规定，为了保证在抗震试验中实际输入的加速度反应谱值曲线 (TRS, Test Response Spectrum) 能够将相同阻尼比的 RRS 完全包络，在试验中输入的 TRS 应该比 RRS 大 10%<sup>[5]</sup>，且运行的时间应该大于 30 s；其

中振动值达到最大峰值 25% 以上的强震信号持续时间应大于 10 s；在输入的激励信号中至少有超过 6 个峰值信号（正的或者负的）达到最大峰值的 70% 以上。

(4) 按照 HAF J0053 中第 8.2.7 的要求，为了保证抗震试验中振动台台面输入的不同方向的激励信号相互独立，它们之间的互相关系数的绝对值应小于 0.3<sup>[5]</sup>。

## 5.2 抗震性能试验过程

按照 HAF J0053 中第 8.2.1 的规定，结合 5.1 中的要求，采用 -4.80 m 标高层对应的加速度反应谱曲线，利用傅里叶变换分别生成三个正交方向的人造地震波，并按要求增加一定的裕量作为振动台台面的输入信号，依次进行 5 次运行基准地震试验（OBE，Operating Basis Earthquake）和 1 次安全

停堆地震试验（SSE，Safe Shutdown Earthquake）。在试验过程中监测高温水循环泵的流量、压力等参数的变化情况。

### 5.2.1 5 次运行基准地震试验（OBE）

如图 4 为 5 次运行基准试验中 X、Y、Z 三个方向上所要求的加速度反应谱曲线（RRS）和实际试验中输入的反应谱曲线（TRS）。将图 4 中要求的以频率为自变量的 RRS 放大 10% 作为实际试验中输入的 TRS，可以看出在 0.1 ~ 100 Hz 范围内，TRS 完整地包络了 RRS。然后通过傅里叶变换将 TRS 转换成以时间为自变量的加速度时程曲线，并作为振动台三个方向的输入信号，如图 5 所示。在本次试验中 X、Y、Z 三个方向的加速度峰值分别为 0.40  $g_n$ 、0.40  $g_n$ 、0.43  $g_n$ ，频率范围为 0.1 ~ 100 Hz。

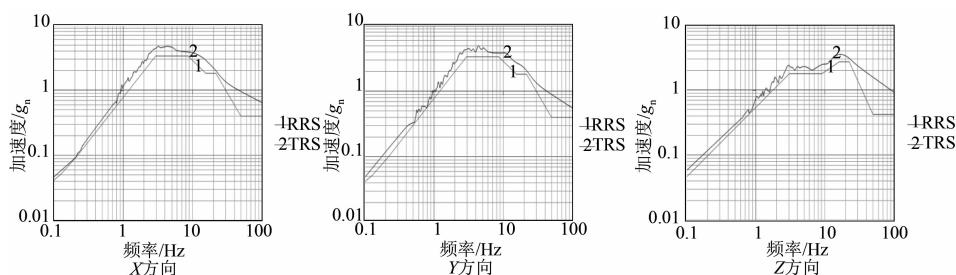


图 4 运行基准地震试验加速度反应谱曲线（频域）

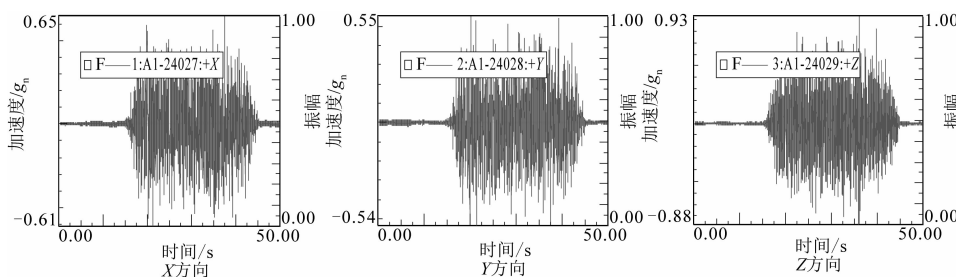


图 5 运行基准地震试验实际输入加速度反应谱（时域）

试验开始前应先将泵组开启，在其正常运行 15 ~ 30 s 后再输入地震载荷；另外，为了避免每次振动试验的激励效用不致叠加，在 5 次试验之间要有一定的时间间隔。基于规范<sup>[5]</sup>中对于强震部分输入信号独立性的要求（不同方向的输入信号互相关系数的绝对值应小于 0.3），如图 6 给出了三个方向输入信号之间的互相关系数曲线，从图中可以看出：三个方向之间的互相关系数的绝对值均小于 0.3，这说明振动台不同方向的输入信号彼此独立。

### 5.2.2 1 次安全停堆地震试验（SSE）

在运行基准试验正常完成以后，进行安全停堆试验。如图 7 所示为安全停堆地震试验所要求的 RRS 和实际试验中输入的 TRS。与运行基准试验一样，将图

7 中各个方向上的 RRS 放大得到相应的 TRS。

如图 8 所示为将图 7 中 TRS 通过傅里叶变换转化成时间历程的反应谱曲线，并作为振动台台面的输入信号进行安全停堆地震试验。其中 X、Y、Z 三个方向的加速度峰值分别为 1.16  $g_n$ 、1.16  $g_n$ 、1.13  $g_n$ ，频率范围为 0.1 ~ 100 Hz。如表 3 所示，在整个运行基准地震试验和安全停堆地震试验中，通过读取泵组连接管系上压力表和流量计参数，实时对泵的运行过程进行监控。

表 3 抗震试验中高温水循环泵参数

| 试验工况   | 流量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ) | 压力/kPa |
|--------|------------------------------------------|--------|
| 运行基准地震 | 11.85                                    | 312    |
| 安全停堆地震 | 11.93                                    | 307    |

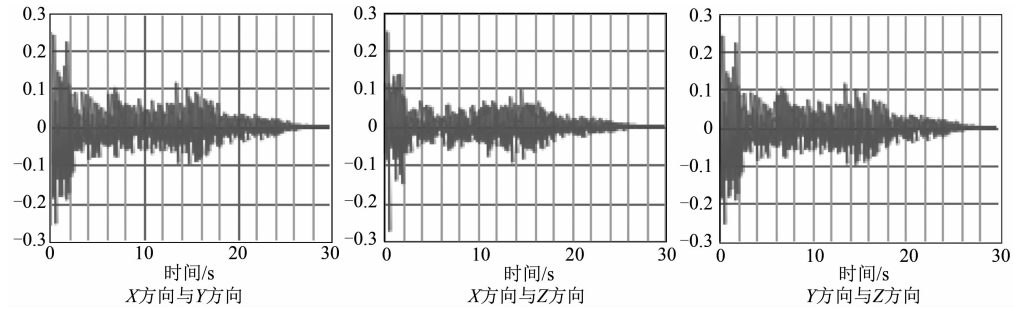


图 6 三个方向输入信号的互相关系数

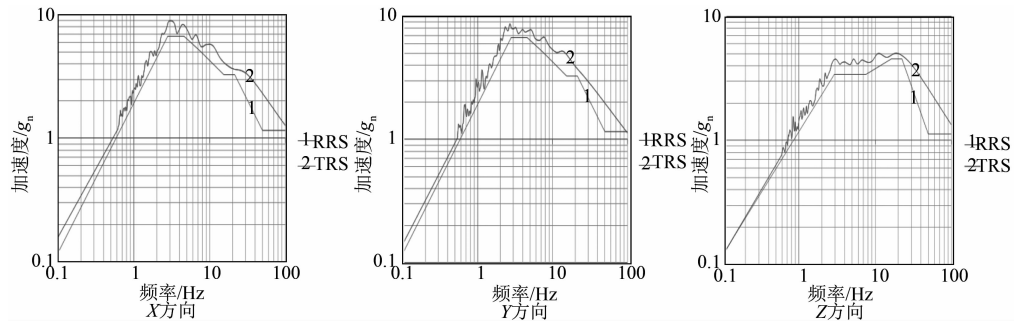


图 7 安全停堆地震试验加速度反应谱（频域）

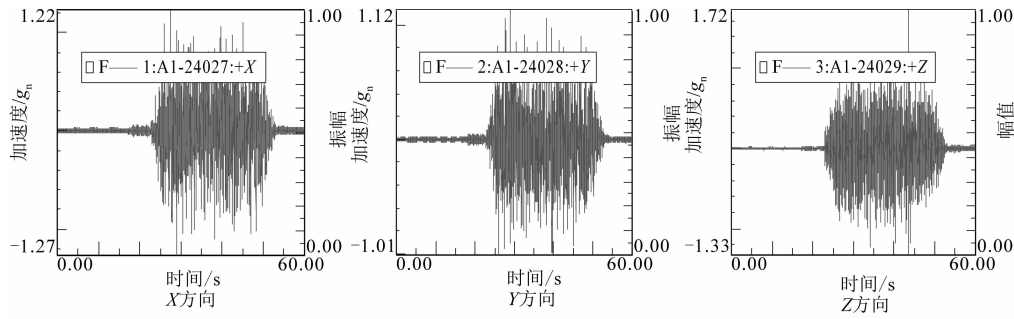


图 8 安全停堆地震试验加速度反应谱（时域）

6 检验性试验

任何机械在其结构不发生改变的情况下其固有频率是唯一不变的，因此在抗震性能试验结束后重新对高温水循环泵进行一次固有频率和阻尼比的检验性试验，以验证其在抗震试验结束后的结构是否发生破损，功能是否正常。

同样采用频率范围为 0.5 ~ 50 Hz、加速度为 0.2  $g_n$  的白噪声作为输入信号，对高温水循环泵进行三个方向的激励。如图 9 所示为在上述激励的作用下，高温水循环泵各个方向的传递函数曲线。通过分析 X、Y、Z 三个方向的传递函数得到抗震试验后高温水循环泵的固有频率和阻尼比，见表 4。

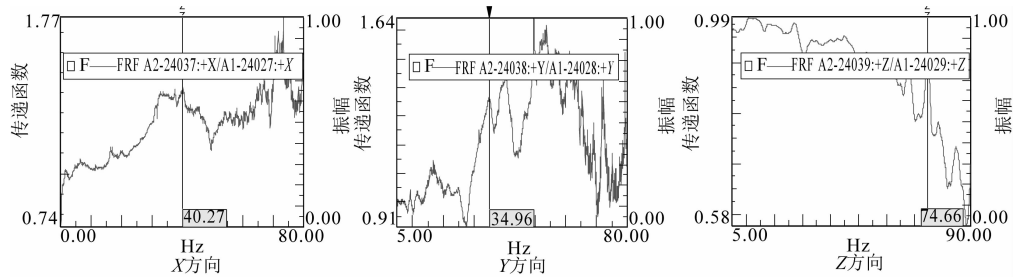


图 9 检验试验各方向的传递函数曲线

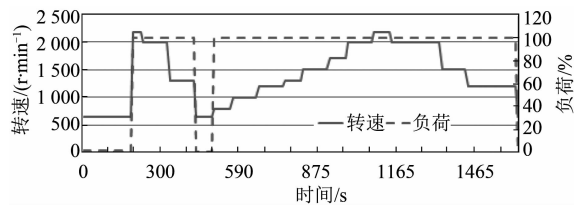


图9 试验工况

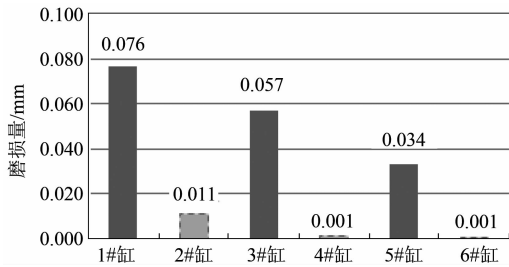


图10 原始方案和改进方案气门导管磨损量对比

### 3 小 结

针对某型天然气发动机气门导管偏磨问题，结

(上接第45页)

表4 检验试验中各个方向的固有频率及阻尼比

| 激励信号                                               | 坐标方向 | 固有频率/Hz | 阻尼比   |
|----------------------------------------------------|------|---------|-------|
| 频率为0.5~50 Hz,<br>加速度为0.2 g <sub>n</sub> 的<br>白噪声信号 | X    | 40.27   | 0.82% |
|                                                    | Y    | 34.96   | 0.86% |
|                                                    | Z    | 74.66   | 0.77% |

### 7 试验数据分析及结论

(1) 从图4、图7中可以看出：试验中实际输入的TRS将要求的RRS完全包围并留有一定裕量；从图5、图8中可以看出：振动台面输入激励信号产生强迫振动的时间持续了至少30 s；从图6中可以看出：三个坐标方向输入的激励信号的相关数的绝对值峰值不超过0.3，这说明两个正交的激励信号之间是相互独立的。综合以上几点表明：本次试验符合抗震试验规范HAF J0053的要求，是有效的。

(2) 通过对比表4和表2可发现：高温水循环泵在抗震试验前后，其X向、Y向的固有频率基本未发生变化，Z向稍有变化，但幅度不大。这主要是由于实际试验的需要，在高温水循环泵的出入口连接着非线性的橡胶软管，因此其固有频率受到橡胶管附加质量和非线性因素的影响发生一定的变化，但仍处于可接受的范围内。

(3) 对比表3和表1的监控数据可以看出：在规定的地震条件下，高温水循环泵可以正常运行；在抗震试验结束后，高温水循环泵的外形结构

合实物以及相关测量、检测手段进行分析。分析表明：造成导管磨损的主要因素为排温、气门所受侧向力以及缸盖自身结构问题。在此分析的基础上，通过采取变更缸盖本体材质，变更气门导管材质等手段，最终将气门导管磨损降低在一个较为合理的范围，满足使用要求。

### 参考文献

- [1] 郭海涛, 卓斌, 彭健, 等. 发动机配气机构中气门-气门导管摩擦副的润滑研究 [J]. 机械工程学报, 2002, 38 (7): 96-101.
- [2] 郭海涛, 卓斌, 彭健, 等. 气门-气门座的摩擦学设计研究 [J]. 内燃机学报, 2001, 19 (3): 258-262.
- [3] 黄华, 刘佐民. 基于ANSYS-WORKBENCH的气门偏摆落座力研究 [J]. 机械制造, 2010 (6): 36-39.
- [4] 吴国胜, 付晓燕, 李树生. 配气传动件对气门导管的影响分析 [J]. 内燃机与配件, 2011 (3): 11-13.

及连接部件均无破损、松动脱落或变形等情况发生，且仍能够正常启动运行。

(4) 综合以上表明：高温水循环泵有足够的抗震强度，且能够在规定的地震条件下正常运行；ESLH40-180/E12离心泵能够满足规定条件下的抗震要求。

### 参考文献

- [1] 臧希年, 申世飞. 核电厂系统及设备 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [2] 中华人民共和国建设部. 核电厂抗震设计规范: GB 50267-97 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.
- [3] 国家核安全局. 核电厂的抗震设计与鉴定: HAD102/02 [S]. 北京: 国家核安全局, 1995.
- [4] IEEE. IEEE Recommended Practice for Seismic Qualification of Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations [S]: IEEE Standard 344-1987. New York: The Institute of Electrical and Electronic Engineers, Inc., 1987.
- [5] 国家核安全局. 核设备抗震鉴定试验指南: HAF J0053-1995 [S]. 北京: 国家核安全局, 1995.
- [6] NORTON M. P. 工程噪声和振动分析基础 [M]. 盛元生译. 北京: 航空工业出版社, 1993.
- [7] 中国核电工程公司. 福清核电站5&6号机组楼层反应谱 [R]. 北京, 1995.
- [8] 季文美, 方同, 陈松祺. 机械振动 [M]. 北京: 科学出版社, 1985.