

核电厂风冷散热器抗震分析与试验研究

尤国英¹, 张建栋², 周 钦¹, 刘银芳¹, 冯 其¹

¹中国船舶集团有限公司第七〇三研究所无锡分部, 江苏 无锡

²中核霞浦核电有限公司, 福建 宁德

收稿日期: 2023年2月13日; 录用日期: 2023年2月27日; 发布日期: 2023年4月10日

摘 要

风冷散热器是核电厂备用柴油发电机组配套的重要辅助设备之一, 属于抗震I类设备, 必须经过抗震鉴定。采用分析与试验组合法对某核电厂风冷散热器进行抗震鉴定。描述了风冷散热器抗震分析的力学模型、材料参数、载荷条件和计算结果, 并依据RCC-M规范进行应力评定。介绍了风冷散热器进行抗震试验的样机设计、试验内容与要求和试验结果。对抗震试验结果和抗震计算结果进行了分析讨论, 验证了计算分析模型和试验样机设计的合理性。鉴定结果表明, 风冷散热器的抗震性能满足规范要求。采用的鉴定方法对核电厂大型设备的抗震鉴定有一定的借鉴意义。

关键词

风冷散热器, 抗震分析, 有限元法, 抗震试验, 核电厂

Seismic Analysis and Test for Air Cooler Radiator in a Nuclear Power Plant

Guoying You¹, Jiandong Zhang², Qin Zhou¹, Yinfang Liu¹, Qi Feng¹

¹Wuxi Division of No. 703 Research Institute of CSSC, Wuxi Jiangsu

²China National Nuclear Xiapu Nuclear Power Co., LTD., Ningde Fujian

Received: Feb. 13th, 2023; accepted: Feb. 27th, 2023; published: Apr. 10th, 2023

Abstract

The air cooler radiator is an important auxiliary equipment of standby diesel-generator unit in a nuclear power plant. It is a seismic category I equipment and must be qualified. Seismic qualification was conducted on an air cooler radiator in a nuclear power plant by combining analysis with test. The mechanical model, materials parameters, load conditions and calculation results for

seismic analysis were introduced, and structural stress was evaluated according to RCC-M standard. The design of test sample, test contents and requirements and test results for seismic experiments were introduced. The rationality of calculating model and design of test sample were verified by analysis of calculating results and seismic test results. Qualification results show that seismic performance of the air cooler radiator satisfies the requirements of relevant standards. Qualification methods have some reference significance for the seismic qualification of large-scale equipments in a nuclear power plant.

Keywords

Air Cooler Radiator, Seismic Analysis, Finite Element Method, Seismic Test, Nuclear Power Plant

Copyright © 2023 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

核电厂设备运行的安全性极为重要。安全级设备或安全重要非安全级设备都有抗震要求, 必须经过抗震鉴定[1] [2] [3]。抗震鉴定的目的是证明设备在承受安全停堆地震(SSE)作用力期间和(或)之后能够维持结构完整性和可运行性, 并执行其安全功能的能力。设备的抗震鉴定方法通常有四种: 试验法、分析法、分析与试验组合法、经验法[4] [5] [6] [7]。机械设备大多采用分析法鉴定, 电气设备因不确定因素太多一般采用试验法鉴定。对于大型设备, 因无法直接安装在试验台上进行试验鉴定, 故一般采用分析鉴定。抗震分析主要验证结构完整性, 对能动设备难以验证其功能完整性(即可运行性)。

风冷散热器是核电厂应急或备用柴油发电机组的重要辅助设备之一, 其主要功能是为柴油发电机组提供循环冷却水, 以保证机组的安全运行。本文采用分析与试验组合法对某核电厂风冷散热器进行抗震鉴定, 先进行抗震分析验证结构完整性, 再对设备的关键部件进行抗震试验, 验证其能动部件(风机)的可运行性。通过对计算结果和试验结果的对比分析, 验证了计算分析模型和试验样机设计的合理性。鉴定结果表明: 风冷散热器的抗震性能满足规范要求。

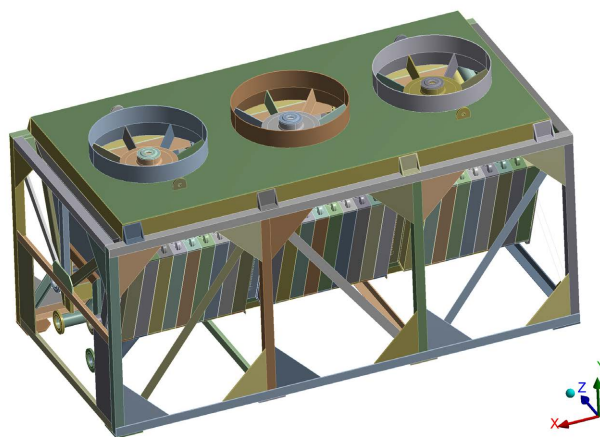


Figure 1. Structure of the air cooler radiator

图 1. 风冷散热器结构

2. 设备描述

某核电厂风冷散热器的设备等级为安全重要非安全级(即 F-SC3 级), 抗震类别为 I 类, 必须经过抗震鉴定。该风冷散热器主要由 3 组换热模块及钢结构框架、端部封板、上平台及连接管道等部件组成, 其外形尺寸为: 长 5188 mm × 宽 2600 mm × 高 2684 mm, 总质量约 11,750 kg, 结构如图 1 所示。每一组换热模块主要由一台风机、一个高温水散热芯组、一个低温水散热芯组组成。钢结构框架由型钢、钢板焊接而成。换热模块通过连接螺栓固定在框架上部横梁上。框架立柱底部与基础预埋板焊接固定。

3. 抗震分析

3.1. 力学模型

采用 Solidworks 三维设计软件[8]建立风冷散热器的几何模型, 将几何模型导入 ANSYS Workbench 有限元分析软件[9], 进行材料设置、网格划分、分析参数设置、载荷施加, 最后进行求解及结果后处理。

采用 SOLID186 及 SOLID187 实体单元进行划分网格, 有限元整体网格模型如图 2 所示。风机的电机采用质量块模拟。框架的 8 根立柱底部钢板与基础预埋板焊接固定, 设置为固定边界条件, 约束节点的 6 个方向的自由度。

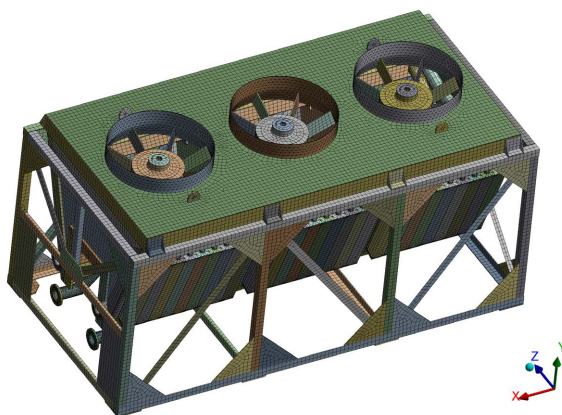


Figure 2. Finite elements model of the air cooler radiator
图 2. 风冷散热器有限元模型

3.2. 材料参数

风冷散热器各主要部件的材料及其力学性能参数见表 1。

Table 1. Materials property parameters

表 1. 材料的性能参数

部件	材料	弹性模量/GPa	泊松比	基本许用应力/MPa
散热芯组	06Cr19Ni10	195	0.3	130
平台及封板	Q355GNH	203	0.3	123
框架	Q235B	206	0.3	94

3.3. 载荷条件

依据 RCC-M 规范[10], 考虑两种载荷工况分别对应 A 级和 C 级两种载荷准则:

- 1) 正常工况(A 级准则), 载荷: $DW + P$;
- 2) 事故工况(C 级准则), 载荷: $DW + P + SSE$ 。

其中, DW 、 P 、 SSE 分别表示重力载荷、设计压力载荷、地震载荷。地震载荷采用风冷散热器安装位置的楼层反应谱的包络谱(见表 2, 阻尼比取 4%), 三个坐标轴方向同时施加。

Table 2. Envelope of floor response spectrum

表 2. 楼层反应谱的包络谱

水平方向(X、Z)		垂直方向(Y)	
频率/Hz	加速度/ $m \cdot s^{-2}$	频率/Hz	加速度/ $m \cdot s^{-2}$
0.2	1.7	0.2	1.1
1.3	12	1.8	11
2.8	44	3.0	28
6.0	46	5.5	28
7.5	26	7.0	22
12	26	12	22
20	12	23	8
50	8.1	50	6.1

3.4. 应力限值

根据 RCC-M 规范要求, 采用线弹性分析方法, 按最大主应力进行应力评定。A 级准则和 C 级准则的应力限值见表 3, 其中, P_m 为一次总体薄膜应力, P_b 为一次弯曲应力, S 为材料基本许用应力。对于实体单元, 通过应力线性化方法获得薄膜应力和弯曲应力。

Table 3. Stress limits

表 3. 应力限值

载荷准则	应力类别	应力限值
A 级	P_m	$1.0 \times S$
	$P_m + P_b$	$1.5 \times S$
C 级	P_m	$1.2 \times S$
	$P_m + P_b$	$1.8 \times S$

3.5. 计算结果

3.5.1. 固有频率

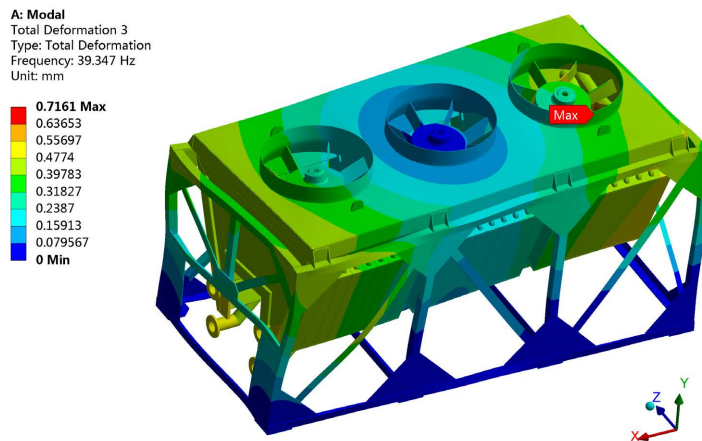
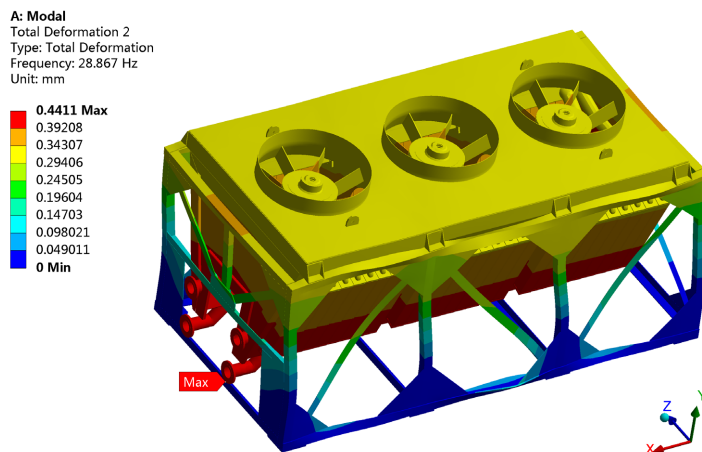
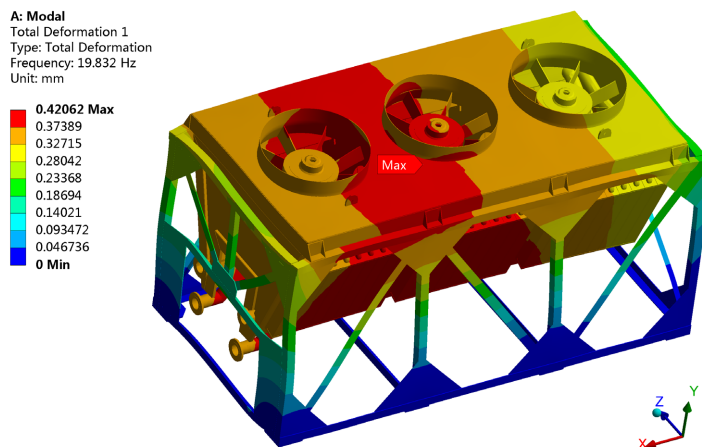
采用兰索士法(Lanczos method)求得结构 100 Hz 以内的所有频率。结构前 4 阶固有频率见表 4, 对应的模态振型见图 3。

3.5.2. 结构应力

正常工况下的结构应力直接由静力分析计算得到, 最大应力值 79.554 MPa; 地震响应采用反应谱分析计算得到; 事故工况下结构应力由反应谱分析结果与静力分析结果叠加得到, 最大应力值 111.36 MPa。两种工况下结构最大主应力分布见图 4, 正常工况下的最大应力出现在框架中间一个立柱的顶部位置, 事故工况下最大应力出现在框架四角一个立柱的顶部位置。

Table 4. Natural frequencies
表 4. 固有频率

阶次	固有频率/Hz	振型主要特征
1	19.832	横向(Z 向)振动
2	28.867	纵向(X 向)振动
3	39.347	绕垂直轴转动
4	48.676	垂向(Y 向)振动



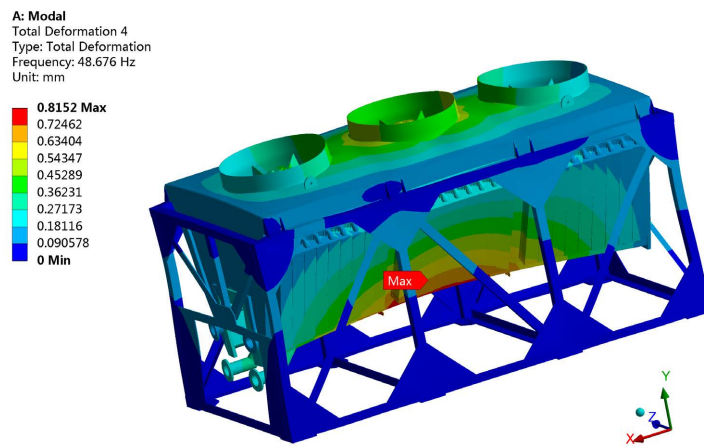


Figure 3. Modal modes
图 3. 模态振型

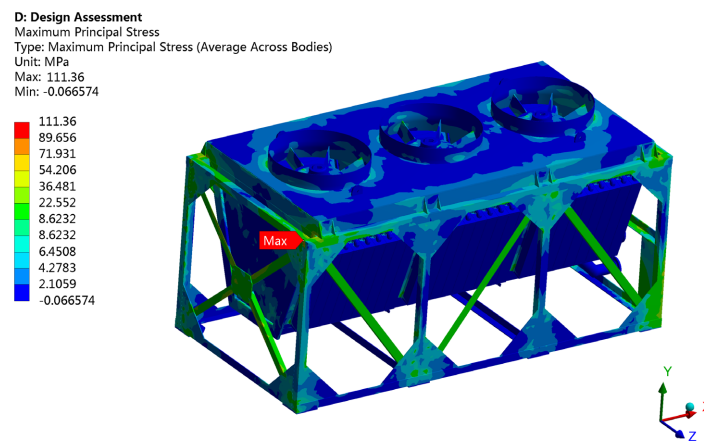
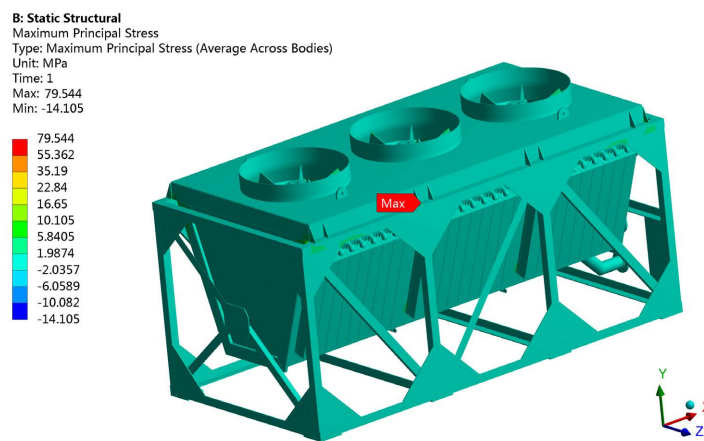


Figure 4. Maximum principal stress
图 4. 最大主应力分布

3.6. 应力评定

正常工况下结构最大主应力为 79.554 MPa，小于薄膜应力限值 94 MPa (A 级准则)；事故工况下结构最大主应力为 111.36 MPa，小于薄膜应力限值 112 MPa (C 级准则)。因此，无需应力线性化即可确定：结

构的薄膜应力、薄膜 + 弯曲应力均小于各自的应力限值，强度满足规范要求。

4. 抗震试验

4.1. 试验样机设计

因地震模拟振动台尺寸限制，原风冷散热器无法直接安装在振动台上进行试验。取原设备的三分之一结构进行抗震试验，即取一组换热模块(包括一台风机)及缩短的钢结构框架(长度约为原尺寸的 1/3，宽度、高度尺寸保持不变)组成试验样机，并配置了水箱、手动加压泵、阀门、压力表、管道、电源、电缆等辅助设施，满足样机在抗震试验时的运行工作条件。抗震试验布置见图 5，图中的 MA1、MD1、MS1 等分别表示加速度、位移、应变传感器的测点编号。

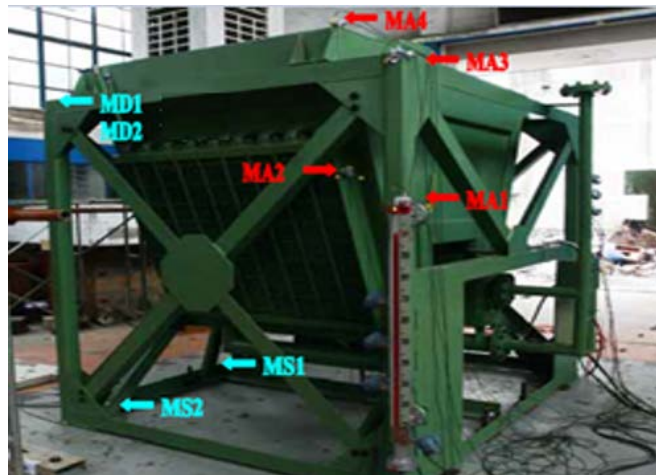


Figure 5. Seismic test array picture
图 5. 抗震试验布置图

4.2. 试验内容与要求

1) 抗震试验前的功能试验(即基准性能试验)，已在制造厂完成。现场进行密封性试验，检查确认各密封点没有泄漏。

2) 动态特性探查试验，测定结构的自振频率、振型。用加速度幅值为 0.2 g 的白噪声随机波在三个方向进行扫描，扫描时间不低于 3 分钟。

3) 抗震鉴定试验，验证设备的可运行性。按试验要求响应谱构造人造地震波(加速度时间历程)作为试验台的实际输入激励。人造地震波对应的试验反应谱应包络试验要求反应谱，且有 10% 的裕度。先进行 5 次运行基准地震(OBE)鉴定试验，为考核设备在地震过程中执行安全功能的能力，其中二次 OBE 试验期间进行风机启动运行，其余三次保持运行；最后进行一次 SSE 地震鉴定试验，期间也要求风机启动，验证电机和风扇的可运行性。

4) 抗震试验后的功能试验和最终检验，返厂进行并与基准性能试验进行对比。现场采用目测方法检查试验样机的结构完整性。

4.3. 试验结果

经过 5 次 OBE 地震和 1 次 SSE 地震考核试验，结果表明：风机正常启动并正常运行，结构件未见损伤及变形，螺栓、螺母没有松动、脱落，焊缝也无撕裂。因此，风冷散热器样机满足抗震性能要求。最

后返厂进行功能试验，并与基准性能试验数据进行对比，结果表明：风冷散热器性能没有异常变化。

以下简单介绍抗震试验的主要测量结果。

1) 测点的自振频率

试验测得的结构整体振动的自振频率见表 5。

Table 5. Natural frequencies by test

表 5. 测点的自振频率

测点	振型方向	自振频率/Hz
MA1~MA4	纵向(X 向)	9.8
	横向(Z 向)	18.2
	垂向(Y 向)	23.2

2) 测点的应变峰值

5 次 OBE 试验和 1 次 SSE 试验得到的应变峰值见表 6 (仅列出最大值)。两个测点位置都靠近框架立柱底部。

Table 6. Strain peak value

表 6. 应变峰值

测点	试验	应变峰值/ $\mu\epsilon$
MS1	OBE	281
	SSE	536
MS2	OBE	222
	SSE	520

5. 计算与试验结果对比分析

5.1. 固有频率对比

比较表 4 和表 5，样机的纵向和垂向的固有频率明显降低，横向固有频率变化很小，说明样机长度尺寸变短对结构纵向和垂向的固有特性影响较大，对结构横向固有特性影响很小，这与实际情况相符。比较结构横向固有频率，试验值为 18.2 Hz，计算值为 19.832 Hz，两者十分吻合。

5.2. 结构应力对比

根据表 6 测得的应变值，乘以材料弹性模量后可以得到结构的应力值。只考虑事故工况(SSE 地震)条件，MS1 测点(位于立柱根部)的应力为 110.42 MPa，与计算模型的结果 111.36 MPa (位于立柱顶部)已很接近。计算模型结果表明：立柱顶部的应力比底部应力大，由此推断，样机立柱顶部的应力应该比计算模型顶部应力还要大些，也就说明试验样机承受的地震载荷比原实际结构更大些。

5.3. 结构模型对比

通过上述分析可知，试验样机(一组换热模块)的固有频率比原结构(三组换热模块)低，结构应力比原结构大，说明试验样机在地震工况下的受载条件比原结构更为苛刻，因此，试验样机的抗震试验鉴定结果可以覆盖原结构的抗震鉴定要求，试验样机的设计是合理的。另一方面，计算模型的横向固有频率与试验样机的实测结果比较接近，验证了计算分析模型的准确性。

6. 结论

采用分析与试验组合法对某核电厂风冷散热器进行抗震鉴定。首先,采用有限元法进行抗震分析,依据 RCC-M 规范进行应力评定,验证了设备在地震时的结构完整性;其次,对风冷散热器(取一组换热模块作为试验样机)进行抗震试验,验证了设备在地震时的可运行性。最后,通过对试验结果和计算结果进行分析,验证了计算模型和试验样机设计的合理性。抗震鉴定结果表明,该风冷散热器结构设计满足规范要求,在地震载荷作用下能够保持结构完整性并执行其安全功能。本文采用的抗震鉴定方法对核电厂大型设备结构的抗震设计和抗震安全评估有一定的参考价值。

参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局. GB50267-2019 核电厂抗震设计标准[S]. 北京:中国计划出版社,2019.
- [2] 国家核安全局. HAD102/02-2019 核动力厂抗震设计与鉴定[S]. 北京:国家核安全局,2019.
- [3] 国家市场监督管理总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T13625-2018 核电厂安全级电气设备抗震鉴定[S]. 北京:中国标准出版社,2018.
- [4] ASME (2017) Qualification of Active Mechanical Equipment Used in Nuclear Power Plants: ASME QME-1-2017. New York, ASME.
- [5] IEEE Power Engineering Society (2004) IEEE Recommended Practice for Seismic Qualification of Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations: IEEE Std 344-2004. New York, The Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- [6] 刘永昌,孙柏涛. 核电站用机电设备抗震性能试验鉴定若干问题[J]. 地震工程与工程振动,1999,19(3): 68-73.
- [7] 国家能源局. NB/T20040-2011 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.
- [8] 杨瑛. Solidworks 基础教程[M]. 北京:机械工业出版社,2016.
- [9] 张洪才,等. ANSYS Workbench 17.0 数值模拟工程实例解析[M]. 北京:机械工业出版社,2018.
- [10] AFCEN (2007) Design and Construction Rules for Mechanical Components of PWR Nuclear Islands: RCC-M-2007. Paris, AFCEN.