

核设施安全级离心风机的相似法抗震鉴定

张振兴, 黄 婧, 吴 静

国防科工局核技术支持中心, 北京
Email: zhangzx_chn@163.com

收稿日期: 2021年3月7日; 录用日期: 2021年3月29日; 发布日期: 2021年4月9日

摘 要

核设施中的能动机械设备结构复杂、零部件装配要求高, 在安全停堆地震下不仅要保证其结构完整性, 还可能要保持其可运行性。近年来, 借助已鉴定样机通过相似法开展待鉴定样机的抗震鉴定由于时间短、花费少, 受到设计单位、制造单位、营运单位和监管部门的高度关注。本文论述了采用相似法抗震鉴定的基本要求、补充分析评定的评定准则, 并结合安全级风机的主要失效模式给出了采用相似法和补充分析法进行抗震鉴定的示例。

关键词

能动机械设备, 风机, 抗震鉴定, 相似法

Seismic Qualification of Centrifugal Fan Used in Nuclear Facilities by Similarity Analysis

Zhenxing Zhang, Jing Huang, Jing Wu

Nuclear Technology Support Center, State Administration of Science, Technology and Industry for National Defense, Beijing
Email: zhangzx_chn@163.com

Received: Mar. 7th, 2021; accepted: Mar. 29th, 2021; published: Apr. 9th, 2021

Abstract

Due to the complex structure and high assembly requirements of the active mechanical equipment used in nuclear facilities, it is necessary to ensure its structural integrity and maintain its operability under the safe shutdown earthquake. With the help of the identified prototype, the seismic evaluation of the prototype to be evaluated by similarity method is highly valued by the design unit, manufacturing unit, operation unit and supervision unit due to its short time and low cost.

This paper discusses the basic requirements of seismic appraisal by using similarity method and the evaluation criteria of supplementary analysis. Combined with the main failure modes of safety grade fans, an example of seismic appraisal by using similarity method and supplementary analysis is given.

Keywords

Active Mechanical Equipment, Centrifugal Fan, Seismic Qualification, Similarity Analysis

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

核设施中的能动机械设备是指包含运动部件,且通过运动部件的机械运动(或停止机械运动)执行规定功能的机械设备[1],典型的包括泵、控制棒驱动机构、风机、阀门等。能动机械结构复杂、零部件装配要求高,当按抗震 I 类进行设计时,在安全停堆地震下不仅要保证其结构完整性,还可能要保持其可运行性。由于地震载荷可能会严重影响到能动机械设备规定的安全功能的执行,其抗震鉴定历来受到设计单位、制造单位、营运单位和监管部门的高度关注。抗震鉴定的方法可以采用分析法、试验法、相似法等,对于能动机械设备的抗震鉴定,相关法规和标准[2]明确规定对于首次使用的机械设备应优先采用试验法进行鉴定。近年来,借助于已通过鉴定的样机通过相似法开展待鉴定样机的抗震鉴定由于时间短、花费少而广受欢迎,然而由于标准规范中未给出采用相似法进行抗震鉴定的示例,如何进行还缺少统一认识的尺度。本文以核设施中常见的离心风机为例,结合相关核安全法规的要求论述了采用相似法抗震鉴定的基本要求、及补充分析法的评定准则、离心风机的主要失效模式和评定内容,并给出了采用相似法和补充分析进行抗震鉴定的示例。本文可以作为其它能动机械设备采用相似法进行抗震鉴定的指导和参考。

2. 采用相似法抗震鉴定的基本要求

采用相似法抗震鉴定的基本要求如下:

1) 应有已鉴定合格的设备(比如鉴定样机)作为相似性比较的依据[3]。已鉴定合格的样机应已经被国家核安全局或国防科技工业局等核安全监管单位审查通过并认可,对于制造厂自行开展制造及鉴定的样机,原则上不认为是已鉴定合格的样机。

2) 应进行适当的分析,证明被鉴定设备与已鉴定合格的设备在设计和使用条件上相似,相似包括功能、激振、物理和动态特性上的相似。

3) 应针对激振、物理系统和功能参量建立定量的相似性准则,以作为判定能动机械设备合格的依据。功能特征对应的设计输入参数的偏离不应超过 10%,超过的需要对该偏离的影响进行评价,即补充分析法进行鉴定。物理参数有任一项超过 $\pm 15\%$,超过的应对刚度、质量分布、边界条件、固有频率、阻尼等进行评价。

需要说明的是,对于核设施中使用的同一系列设备,每台设备均应通过相似性分析和样机鉴定结果的扩展得到鉴定。对于重量、体积过大的设备,可通过缩比模型进行试验,然后通过补充分析,将鉴定结果扩展到实际设备上[4]。

3. 补充分析法的评定准则

对于需开展补充分析法鉴定能动机械设备，主要开展的补充评定是结构和密封部件的完整性评定、以及动静等部件间的变形评定。

在评定准则方面，结构和密封部件的完整性评定的评定准则是采用包络应力准则来校核地震工况下的应力状态，如在有安全停堆地震时的第 IV 类工况采用 B 及或 A 级使用限制来进行校核，我国通常借鉴美国 ASME 标准或法国 RCCM 标准采用 B 级使用限制进行评定(下表 1)。

变形评定的准则是设计基准地震工况下设备动静等部件之间弯曲和变形带来的间隙变化仍满足不丧失其预期功能所能承受的最大变形。关于变形的具体限制，目前还没有统一的量化指标，下表 1 给出的要求可以作为参考[5]。需要说明的是设备不会丧失预定功能所承受的最大变形 d_{max} 需要通过分析或试验确定，但对于轴的变形不能超过叶片和外壳间径向间隙的 90%。

Table 1. The limitation of use and deformation by supplementary analysis method

表 1. 动设备补充分析法评定的使用限制、变形限制

使用工况	使用限制	变形限制
设计和 A 类使用工况	A 级使用限制	$d \leq 0.6 d_{max}$
B 类使用工况	B 级使用限制	$d \leq 0.6 d_{max}$
C 类使用工况	B 级使用限制	$d \leq 0.9 d_{max}$
D 类使用工况	B 级使用限制	$d \leq 0.9 d_{max}$

4. 离心风机主要失效模式及补充评定内容

离心风机是核设施中广泛采用的能动机械设备之一，在不同的核设施中起到的作用可能包括排出余热、维持工艺间事故下通风或维持热室和手套箱中负压状态等。运行及鉴定经验表明，离心风机主要失效模式主要包括转子与定子的刮擦失效、轴承的过载、风机支座的过大应力、紧固螺栓的强度失效等。

对于风机的相似法抗震鉴定，当功能特征、物理参数等偏差不满足要求时，需补充分析法进行鉴定，其中轴承的过载分析、连接螺栓强度在转子系统过载分析、连接螺栓强度可单独计算，采用相似法鉴定的主要内容是风机支座的应力评定，以及转子与定子等部件的变形评定。

5. 相似法和补充分析法抗震鉴定实例

某已鉴定合格的风机与待鉴定风机的规定功能相同，属于同系列产品，设计参数对比见下表所示。

Table 2. Design input parameters of the identified prototype and the one to be identified

表 2. 已鉴定样机与待鉴定样机设计输入参数

样机类型	运行压力(Pa)	风量(m ³ /h)	转速(rpm)	功率(Kw)	扭矩(N·m)	推力(N)
已鉴定样机	5700	52,000	985	110	1066.5	1375
待鉴定样机	4800	11,000	1480	37	238.8	562

由上表 2 可知，已鉴定样机和待鉴定样机功能特征对应的设计输入参数的偏离已超过 10%，需要对该偏离的影响进行评价。

5.1. 风机支座的应力评定

采用相似法进行抗震鉴定，待鉴定样机的支座应力应不大于已鉴定样机的支座应力。计算时可把轴

承支座看成杆结构，杆截面为空心矩形，载荷主要为地震惯性力引起的弯矩作用，通过公式分别计算 X 方向和 Y 方向加速度引起的应力值分别见下表 3 所示，通过应力比值可知待鉴定样机的支座应力小于已鉴定样机的支座应力，满足验收要求。

Table 3. Calculation results of bearing stress caused by acceleration in X and Y directions

表 3. X 和 Y 方向加速度引起的支座应力计算结果

样机类型	加速度(m/s ²)		风机质量(kg)	支座高度(mm)	应力值(MPa)	
	X 方向	Y 方向			X 方向	Y 方向
已鉴定样机	117.1	55.85	5575	935	16.1	23.7
待鉴定样机	117.1	55.85	1850	600	8.2	13.8

5.2. 变形评定

根据相似法鉴定要求，待鉴定样机的轴端相对位移应不大于已鉴定样机的相对位移。对于离心风机，轴端的位移包含两部分，一部分是轴伸端本身偏移引起的位移，计算时可它当做悬臂梁；另一方是轴承箱支架引起的位移，计算时把它当作一矩形空心杆。位移的计算可以采用公式法简化计算，也可以采用有限元精确计算，具体计算结果见下表 4，可以明显发现待鉴定样机的相对位移要小于已鉴定样机，满足验收准则。

Table 4. Displacement calculation results of the identified prototype and the one to be identified

表 4. 已鉴定样机和待鉴定样机位移计算结果

样机类型	初始最小间隙	SSE 允许变形 0.9 dmax	OBE 允许变形 0.6 dmax	SSE 轴端位移, mm	SSE 机壳位移, mm	OBE 轴端位移, mm	OBE 机壳位移, mm
已鉴定样机	4.5	4.05	2.7	2.3	1.6	1.63	0.55
待鉴定样机	3	2.7	1.8	0.91	0.62	0.51	0.31

5.3. 激振特征

待鉴定样机与已鉴定样机的激振具有相同的谱特性(频率分布、时程的最大幅度值、最大放大因子)，相同的持续时间(强振动部分均超过 10 秒)，取向轴方向一致且均处于激振位置的支承点，运动测量位置均从风机底部激振，因此可以认为二者的激振是相似的。

5.4. 物理特征

已鉴定样机与待鉴定样机的结构相似，类型相同，可认为二者的动力相似，但通过二者物理参数的对比可以发现，部分项目超过±15%，因此需补充分析评价。一般来说，具有较低固有频率的设备刚度越差，对地震更加敏感，下表 5 给出了已鉴定样机和待鉴定样机计算得到固有频率的对比表，可以看出待鉴定样机的同阶固有频率要远高于待鉴定样机，满足验收要求。

Table 5. Comparison of the natural frequencies of the identified prototype and the one to be identified

表 5. 已鉴定样机和待鉴定样机固有频率对比

样机类型	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶	5 阶	6 阶
已鉴定样机	15.1	16.5	16.5	32.9	41.6	47.2
待鉴定样机	40.04	47.2	48.95	56.18	76	79.9

5.5. 激振与物理相似同时存在

待鉴定样机和已鉴定样机用相同的包络谱，所以存在物理相似的频带宽度，满足验收准则。

综上所述，待鉴定样机满足所有验收准则，可以认为满足抗震鉴定的要求。

6. 结论

本文以核设施中广泛应用的离心风机为例，结合相关核安全法规的要求论述了能动机械设备采用相似法抗震鉴定的基本要求、补充分析法评定内容及评定准则、离心风机的主要失效模式，并给出了采用相似法和补充分析法对离心风机进行抗震鉴定的示例。本文的研究认为：

1) 采用相似法鉴定应考虑功能特征、激振特征、物理特征、激振和物理特征等，对于超过相似要求应补充分析法评定。

2) 采用补充分析法鉴定时应结合设备的失效模式，离心风机相似评定的主要内容是风机支座的应力比及轴端相对位移比。

3) 已鉴定样机与待鉴定样机的结构相似、类型相同，可认为二者的动力相似；待鉴定样机的同阶固有频率高于待鉴定样机可以认为物理特征满足验收要求。

参考文献

- [1] 核工业标准化研究所. NB/T20036.2 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.
- [2] 国家核安全局. HAF J0053 核电设备抗震鉴定试验指南[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
- [3] 美国机械工程师协会. ASME QME-1 核电设施能动机械设备的鉴定[S]. 北京: 中国石化出版社, 2012.
- [4] 国家核安全局. HAD 102/02 核动力厂抗震设计与鉴定[S]. 北京: 原子能出版社, 2019.
- [5] 中国核电工程有限公司. NB/T20039.1 核空气和气体处理规范 通风、空调与空气净化 第 1 部分: 通风机[S]. 北京: 原子能出版社, 2014.