文章编号: 1007 - 6069(2011) 01 - 0148 - 05

核 2 级调节阀的抗震分析及试验研究

周文霞[1],张继革[1],宋志平[2],张 洁[2],王德忠[1]
(1. 上海交通大学 核能科学与工程学院,上海 200240; 2. 上海自动化仪表七厂,上海 202150)

摘 要: 基于 ANSYS 有限元分析软件,在模态分析基础上,采用等效静力法对调节阀的抗震性能进行分析,分析了调节阀在开启和关闭状态下对 SL1(运行安全地震动) 的应力响应,并分析了调节阀在开启状态下对 SL2(安全停堆地震动) 的应力响应,分析得知支架拐角、阀盖-中法兰连接的弯角处和阀体中腔为薄弱部位,其最大应力值均小于许用应力。对调节阀分别进行两次 SL1 地震和一次 SL2 地震试验,测定调节阀的自振频率、阻尼等振动参数和加速度、应力等地震响应参数,试验结果表明调节阀具有足够的刚度和强度,满足抗震设计强度要求。试验结果与有限元分析结果对比,误差小于 10%。

关键词: 调节阀; 抗震试验; 有限元; 抗震分析
中图分类号: TL353; P315. 96; P315. 97 **文献标志码**: A

Experiments and seismic analyses of nuclear safety class 2 control valve

ZHOU Wenxia[1], ZHANG Jige[1], SONG Zhiping[2], ZHANG Jie[2], WANG Dezhong[1]

(1. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2. No. 7 Factory Of Shanghai Automation Instrumentation Co., Ltd, Shanghai 202150, China)

Abstract: By using finite element analysis software ANSYS, modal analysis of a control valve is carried out, and on the base of modal analysis results, the seismic response analysis of the controled valve in opening and closing states under SL1 (operating basis earthquake) and that of the contral valve is opening state under SL2 (sate shutdown eathquake) are carried out by the equivalent static method. The analysis results show that the corner bracket, the corner of valve cover-flange connection and the valve body are weak parts, and their maximum stress values are less than allowable stress. Two times SL1 and one time SL2 seismic experiments on the control vavle were performed in each composite direction to determine its natural frequency, damping and other parameters. The experiment results show that the valve has sufficient stiffness and strength to meet the seismic design strength requirment. Comparing the experiment results with analysis results, the largest error is less than 10%.

Key words: control valve; seismic experiment; FEA; seismic response

引言

核岛单座调节阀是核电站中量大面广的水压设备,它的主要功能是以一定的精度保持流量、压力、温度、水位等规定需要调节的参数。调节阀是核电站安全运行的关键附件,设计规范[1]要求对它进行抗震分析,其结果可以用来衡量在经历运行安全地震和安全停堆地震期间或其后,调节阀是否可以按照要求正常工

收稿日期: 2009 - 08 - 16; **修订日期**: 2009 - 11 - 10
作者简介: 周文霞(1985 -) ,女,硕士,主要从事核设备的抗震分析和转子动力学研究. E-mail: zhouwenxia@ snerdi. com. cn
通讯作者: 王德忠(1962 -) ,男,教授,博士生导师,主要从事核设备的抗震分析等方面的研究. E-mail: dzwang@ snerdi. com. cn

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

作[2]。

抗震分析广泛应用于核电厂核级设备的安全评价,如核电站环形吊车[3]、反应堆贮液容器[4],核电专用桥式起重机等[5]。核安全级阀门同样要求进行抗震分析,张征明, 吴莘馨等人[6,7]对核安全级阀门进行了结构静力学分析,孙英学[8]对核电站稳压器阀门接管进行了应力分析。对于结构比较复杂的设备,一般采用质点模型[9],但误差较大,文中基于 ANSYS 有限元分析软件对调节阀的 3 维实体模型进行抗震分析,结果更为准确。

目前,抗震分析的方法主要有 3 种: 等效静力法、响应谱法和时间历程法。其中,时间历程法的计算结果最为准确,但是该计算方法比较复杂,计算时间长,而等效静力法与响应谱法计算方法相对简单,同时也能较为准确地反映结构的响应特性。当结构的第 1 阶固有频率大于 33Hz 时,可采用等效静力法,该方法比响应谱法计算更为简单,因此应用十分广泛。文中采用等效静力法对调节阀进行抗震分析。

1　有限元抗震分析

1.1　有限元分析模型

在进行有限元分析时,如图 1 的调节阀结构示意图,其中阀体进出口接管法兰相距 210mm,法兰内径 25mm,外径 124mm,阀门总高 538mm,上下膜盖的外圆直径为 285mm。对该 3 维模型进行简化,忽略弹簧,螺栓等小结构,阀体、阀盖、支架和膜盖之间采用刚性连接,采用 10 节点、solid92 单元对简化模型进行网格划分,单元数为 273 473,节点数为 52 161。支架、阀盖和阀体的材料分别为 ZG230 – 450、P280GH 和 20M5M,在 260℃下的许用应力 S 分别取 117.5 MPa、117.5 MPa 和 112.5 MPa,取弹性模量为 2.0×10^{11} N/m^2,泊松比为 0.3,密度为 7 900kg/m^3。

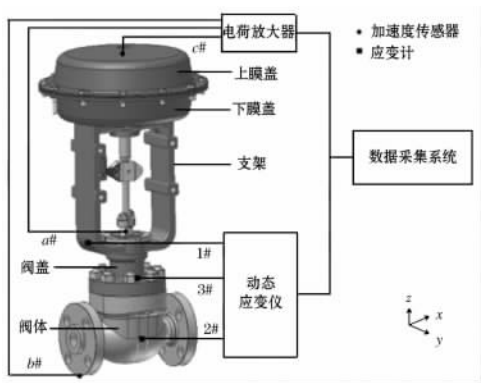

图 1　核 2 级气动单座调节阀及抗震试验系统示意图

Fig. 1　Nuclear safety class 2 pneumatic positioner valve and schematic model of seismic experiment system



图 2　地震载荷作用下阀体的应力分布图

Fig. 2　Stress distribution under SL1 and SL2

1.2　载荷施加、约束条件及求解

对调节阀阀体接管两端施加全位移约束,采用 Block Lanczos 求解法提取 3 阶模态[10]。

在进行抗震分析时,采用等效静力法,施加载荷包括自重、内压和地震载荷,分别计算在 SL1 地震下调节阀开启和关闭状态下调节阀的地震响应,以及调节阀在 SL2 地震载荷下调节阀开启状态下的地震响应,其中 SL1 地震载荷下的最大加速度为 3.3g,SL2 地震载荷下的最大加速度为 5g。

1.3 固有频率结果分析

有限元模态分析得到第 1 阶固有频率为 49Hz,振型为垂直于流道方向摆动,第 2 阶固有频率为 61Hz,振型为沿流道方向摆动; 第 3 阶固有频率为 198Hz,振型为绕竖直中心轴扭转。从 3 个方向的 1 阶固有频率可以看出,垂直于流道方向的整体刚度最小,这是与调节阀自身的结构特性,各部件的质量与大小分布有关的。

1.4　抗震计算结果分析

SL1 地震下调节阀开启和关闭状态时的应力分布图如图 2(a) 与 2(b) 以及在 SL2 地震载荷下调节阀开

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

启状态时的应力分布图如2(c) 所示,应力值保守采用 RCCM B 级准则校核。

从图2(a) ,2(b) 和2(c) 可以看出,支架的拐角处,阀盖 - 法兰连接的弯角处以及阀体中腔部分为应力值较大区域。如图2(a) 所示的应力分布图,支架拐角处的应力最大值为9.95MPa,阀盖 - 法兰连接的弯角处应力最大值为14.6MPa,阀体中腔的应力最大值为22.1MPa。如图2(b) 所示,支架拐角处的应力最大值为9.46MPa,阀盖 - 法兰连接的弯角处应力最大值为14.2MPa,阀腔处的最大应力值为28.4MPa。如图2(c) 所示支架拐角处的应力最大值为16.6MPa,阀盖 - 法兰连接的弯角处应力最大值为22.1MPa,阀腔处的最大应力值为49.6MPa。支架拐角处的最大应力是由于结构不连续造成的,属于应力集中,它的最大应力远小于结构的许用应力。在调节阀关闭时,阀盖 - 法兰连接处的最大应力也是因为结构不连续造成的,但是在调节阀开启时,由于阀盖内部存在内压,因此其应力最大值是由于结构不连续和内压共同作用造成的,阀体中腔的最大应力是由于阀腔内部的内压所造成的,阀体和阀盖的最大应力均远小于许用应力值126.8MPa。

2 调节阀抗震试验

2.1 调节阀的安装、试验设备及测点布置

本试验在中国核动力设计院的电动振动台上进行,将调节阀安装在振动台夹紧装置上,保证调节阀的三正交轴与激振轴在同一条直线上,试验系统示意图如图1 所示。

试验采用电荷式加速度传感器和电荷放大器测量台面和调节阀上的加速度,应变测量采用5 ×3mm 泊式应变计和 MCC - 16 型动态应变仪,数据采集用 DEWE 2010 型数据采集仪。

试验中分别在调节阀重心(*a*#) 、振动台台面(*b*#) 和顶部(*c*#) 各布置一个加速度传感器,并且在调节阀薄弱部位(支架弯角1#、阀体中腔2#和阀盖 - 中法兰连接弯角处3#) 布置3 个应变计来测量其在地震过程中的应变响应。

2.2 实验内容

首先对调节阀做动态特性探测试验,分别在调节阀3 个正交轴向施加不大于0.2g 的正弦扫描信号,扫描频率范围为5 ~250Hz,扫描速度为倍频/分,探测出设备各向的基阶固有频率和阻尼。

按照《核设备抗震鉴定试验指南》的规定,可采用2 次正弦扫描试验代替5 次 SL1 地震试验,第1 次扫频时调节阀处于开启状态,第2 次扫频时调节阀处于关闭状态。试验在调节阀的3 个正交轴向各进行2 次,扫描速度不大于1 倍频/分,扫描频率范围为3Hz ~35Hz,每次扫描后改变调节阀的开关状态,试验中保持工作压力为4.16MPa。在每次 SL1 地震过程中测量各监测点的加速度响应和应变响应。

SL1 试验后分别在调节阀的3 个正交轴向进行1 次 SL2 试验。试验频率在3.18Hz、4Hz、5Hz、6.3Hz、8Hz、10Hz、12.6Hz、16Hz、20Hz、25.2Hz、32Hz 处进行,每个频率施加5 个以上连续正弦拍波,每个拍波的每个拍中含有12 ~15 个周波,每个拍波之间有2s 间隙,拍波的数量由每个频率处的拍波试验时间不小于15s 来决定。调节阀在保持工作压力为4.16MPa 下连续在20% ~80% 行程之间运行1 次循环操作,在每次 SL2 地震过程中测量各监测点的加速度响应和应变响应。

3 有限元结果与实验结果对比及分析

动态特性测量结果为: 调节阀在 *X* 方向(垂直于流道方向) 第1 阶固有频率为47.0Hz,阻尼比为2.94%; 在 *Y*(流道方向) 方向第1 阶固有频率为58.8Hz,阻尼比为4.93%; 在 *Z* 向(竖直方向) 的第1 阶固有频率为189.5Hz,阻尼比为0.46% ,各方向1 阶固有频率均大于33Hz,因此可以认为该调节阀具有足够的刚性。从表1 中比较可以看出,前3 阶固有频率的误差均小于5%。

在 SL1 地震试验中测得各测点的加速度,8Hz 以上频率下重心处加速度响应幅值在三正交轴向均大于3.3g,满足抗震鉴定的输入要求。另外,还测得各测点三正交轴向的应力值,从而可以计算出各测点的总应力,列于表2 中,通过数据对比分析得出,计算值与试验值的误差均小于5%。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　固有频率结果对比

Table 1　The comparison of natural frequencies

阶数	1	2	3
计算值/Hz	49	61	198
试验值/Hz	47	58.8	189.5
误差/%	4.2	2.7	4.5

表 2　SL1 下试验值与计算值比较

Table 2　The comparison of experiment values and the calculated values under SL1

测点位置	开启状态			关闭状态下		
	计算值/MPa	试验值/MPa	误差/%	计算值/MPa	试验值/MPa	误差/%
支架拐角处(1#)	9.95	9.87	-0.758	9.46	9.42	-0.366
阀体中腔(2#)	22.1	22.26	0.726	28.4	28.55	0.5493
阀盖-中法兰连接弯角处(3#)	14.6	14.78	1.246 5	14.2	14.71	3.4743

在 SL2 地震试验中测得各点三正交轴向的加速度和应力最大值。从图 3 中可以看出,频率为 8Hz 以上的重心处加速度幅值均能包络地震鉴定要求输入的加速度幅值。

表 3　SL2 下试验值与计算值比较

Table 3　The comparison of experiment values the calculated values under SL2

测点位置	开启状态		
	计算值/MPa	试验值/MPa	误差/%
支架拐角处(1#)	16.6	15.21	9.0741
阀体中腔(2#)	49.6	48.37	2.5325
阀盖-中法兰连接弯角处(3#)	22.1	24.25	-8.869

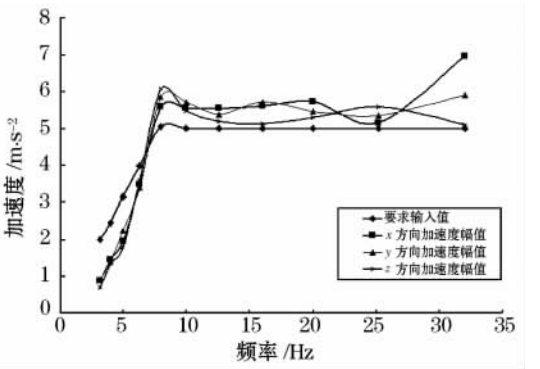

图 3　SL2 下重心加速度响应值

Fig. 3　The acceleration response values of the gravity center under SL2

根据表 3 中数据分析得出,在 SL2 地震下,调节阀中 1#、2#和 3#应变测点最大总应力分别为15.21MPa,48.37MPa 和 24.25MPa,计算值与试验值的误差均小于 10%,这是由于实验测得是调节阀在 20% 到 80% 行程中的应力值,而在有限元分析时采用的是调节阀全部开启下的模型,因此这个误差值大于 SL1 下的误差值。

4　结论

文中对调节阀进行有限元模态分析,得到调节阀的前 3 阶固有频率分别为 49Hz、61Hz 和 198Hz,与动态特性探测试验结果进行对比,误差小于 5%,调节阀的各阶频率均大于 33Hz,因此可以认为调节阀具有较强的刚度。

对调节阀进行有限元抗震分析,分析了调节阀在开启和关闭状态时 SL1 下的抗震特性,并分析了调节阀在开启状态时 SL2 下的抗震特性,找出了在地震载荷作用下调节阀受力的薄弱部位,主要有支架拐角、阀盖-中法兰连接的弯角处和阀体中腔,应力值按照 RCCM B 级准则校核,校核结果满足准则要求,因此可以认为调节阀具有足够的抗震刚度。

有限元分析结果与试验值进行比较,在 SL1 下应力值的误差小于 5%,而 SL2 下的误差大小于 10%,这是由于在进行 SL2 下的有限元分析时保守地采用了比较简单的调节阀全开模型,而在试验中测得了调节阀开度在 20% ~80% 下的应力值。

采用 ANSYS 对调节阀进行模态分析和抗震分析,误差在允许范围内,说明利用 ANSYS 进行模态分析与抗震分析是可行的,文中结果对调节阀的设计、制造与鉴定具有重要意义。

参考文献

[1]　中国核工业总公司. EJ/T 531 -2001,核电厂专用起重机设计准则[S],2001.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Chin Nuclear Industry Corporation. EJ/T 531 – 2001, Nuclear Power Plant Special Crane Design Criteria [S], 2001.

[2] 法国核岛设备设计制造规则协会. RCC – M 压水堆核岛机械设备设计和建造规则: 第 I 卷 A 和 Z 篇 [S], 2000.
French pressure shell equipment design and manufacture rules association. RCC-M PWR Pressure Shell of Mechanical Equipment Design and Build Rules [S], 2000.

[3] 王 炯, 吴天行. 核电站环形吊车抗震计算分析李增光 [J]. 核动力工程, 2008, (1): 46 – 49.
WANG Jiong, WU Tianxing. Analysis of seismic response of a polar crane in nuclear power plant [J]. Nuclear Power Engineering, 2008(01): 46 – 49.

[4] 张征明, 何树延, 李仲三. 核反应堆贮液容器的抗震分析 [J]. 核动力工程, 2001, (4): 314 – 316.
ZHANG Zhengming, HE Shuyan, LI Zhongsan. Seismic analysis of liquid storage container in nuclear reactors [J]. Nuclear Power Engineering, 2001, (4): 314 – 316.

[5] 朱林剑, 孙守林. 130/10t 核级专用桥式起重机抗震分析 [J]. 起重运输机械, 1997, (7): 7 – 10.
ZHU Linjian, SUN Shoulin. Analysis of seismic response 130/10t nuclear class specialised overhead travelling crane [J]. Hoisting and Conveying Machinery, 1997(7): 7 – 10.

[6] 张征明, 吴莘馨, 何树延. 核安全级阀门的结构力学分析 [J]. 阀门, 2004, (4): 1 – 4.
ZHANG Zhengming, WU Xinxin, HE Shuyan. Structural mechanical analysis of the nuclear safety – related valve [J]. Valve, 2004, (4): 1 – 4.

[7] 张征明, 吴莘馨. 核安全一级阀门的力学分析 [J]. 阀门, 2007, (2): 18 – 22.
ZHANG Zhengming, WU Xinxin. Mechanical analysis of the nuclear safety class 1 valve Institute of Nuclear and new Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China

[8] 孙英学. 核电站稳压器阀门接管应力分析 [J]. 核动力工程, 2000, (2): 112 – 116.
SUN Yingxue. Stress analysis of valve nozzle of pressurizer in NPP [J]. Nuclear Power Engineeing, 2000, (2): 112 – 116.

[9] JIANG Zhengfeng, Zhou Chao, Ding Yufeng. Dynamics analysis of engine valves based on ANSYS [J]. Lubrication Engineering, 2006, (4): 106 – 108.

[10] 周长城, 胡仁喜, 熊文波. Ansys11.0 基础与典型范例 [M]. 电子工业出版社, 2007.
ZHOU Changcheng, HU Renxi, XIONG Wenbo. Ansys11.0.O foundation and typical examples [M]. Electronic Idustry Rress, 2007.

[11] Fanous F, Greimann L, Rogers J. ANSYS 3-D analysis of nuclear steel containment [C]//4th Int ANSYS Conf Exhib 1989 Part 2, 1989: 10.20 – 10.32.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net