

文章编号:1006-1355(2021)01-0082-07

# 大型液压阻尼器仿真建模及静动态性能试验研究

孔金震<sup>1</sup>, 钱亚鹏<sup>2</sup>, 贺 枫<sup>2</sup>, 朱翊洲<sup>3</sup>, 谢永诚<sup>3</sup>, 彭志科<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学 机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240;

2. 常州格林电力机械制造有限公司, 江苏 常州 213119;

3. 上海核工程研究设计院有限公司, 上海 200240)

**摘 要:** 液压阻尼器是一种对速度反应灵敏的振动控制装置, 具有抗冲击和减振性能, 被广泛使用在核电厂中来支撑主设备。大型液压阻尼器的正常运行对保证核电厂的安全运行有着重要意义。本研究借助(Advanced modeling environment for performing simulation of engineering systems) AMESim 软件建立液压阻尼器的仿真模型并验证其准确性, 针对阻尼器的不同工况开展仿真研究, 以内泄漏为例对其进行故障模拟, 并对阻尼器在正常工况、存在外泄漏工况、存在内泄漏工况、存在阻尼阀堵塞工况四种不同工况下的监测信号进行定性分析, 得出其中的逻辑关系。为进一步的液压阻尼器故障诊断系统研究及实际应用提供理论基础和指引。

**关键词:** 振动与波; 液压阻尼器; AMESim; 仿真分析; 故障模式; 核电厂

中图分类号: TH703.62

文献标志码: A

DOI 编码: 10.3969/j.issn.1006-1355.2021.01.016

## Simulation Modeling and Static and Dynamic Performance Test of Large Hydraulic Dampers

KONG Jinzhen<sup>1</sup>, QIAN Yapeng<sup>2</sup>, HE Feng<sup>2</sup>,  
ZHU Yizhou<sup>3</sup>, XIE Yongcheng<sup>3</sup>, PENG Zhike<sup>1</sup>

(1. The State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

2. Changzhou Gepm Power Machinery Manufacturing Co., Ltd., Changzhou 213119, Jiangsu, China;

3. Shanghai Nuclear Engineering Research and Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200240, China)

**Abstract :** Hydraulic damper is a vibration control device which is sensitive to speed. It has the performance of shock resistance and vibration reduction, and is widely used in nuclear power plants to support main equipment. A normal operation of large hydraulic dampers is important to ensure the safe operation of nuclear power plants. In this paper, by using AMESim software, a simulation model of hydraulic dampers is established and its accuracy is verified. Simulation investigations of the hydraulic dampers are conducted for different operating conditions. And then a fault simulation is conducted by taking internal leakage as an illustrative example. In addition, qualitative analysis of monitoring signals of dampers under four different operating conditions, including normal condition, external leakage, internal leakage and damping valve blockage, is carried out, and their logical relationships are accordingly obtained. This work provides a research foundation for a further study of hydraulic damper fault diagnosis and its practical applications.

**Key words :** vibration and wave; hydraulic damper; AMESim; simulated analysis; fault mode; nuclear power plant

液压阻尼器是一种对速度反应灵敏的振动控制

装置, 其对速度变化具有敏感性, 并且可利用液压油提供运动的阻力来消耗外部振动和冲击造成的运动能量, 从而可避免外界过大能量对设备造成的破坏, 进而起到保护重要装备的作用。由于液压阻尼器具有减振和抗冲击的性能, 它被广泛地使用在核电厂、火电厂等大型工业环境中<sup>[1]</sup>。冯虎田等<sup>[2]</sup>分析并设计了火箭发射系统插拔机构中所用的液压阻尼器, 以保证火箭发射过程中的安全性。张欢等<sup>[3]</sup>研究了液压阻尼器在反应器出料系统中的应用。Alan<sup>[4]</sup>研

收稿日期: 2020-04-04

基金项目: 大型先进压水堆及高温气冷堆核电站重大专项:  
机电一体化关键技术研究课题(CAP1400)

作者简介: 孔金震(1995-), 女, 山东省济宁市人, 博士研究生, 主要研究方向为设备故障诊断及健康管理。

E-mail: kongjinzhen@sjtu.edu.cn

通信作者: 彭志科, 男, 教授, 博士生导师。

E-mail: z.peng@sjtu.edu.cn

究了液压阻尼器在改善铁路安全和稳定方面的应用等。

在核电厂中,大型液压阻尼器用于支撑蒸汽发生器、主泵等主设备,并且属于核安全1级设备,因此,大型液压阻尼器的正常运行对保证核电厂的安全运行有重要意义<sup>[5]</sup>。国内外大部分对核电厂大型液压阻尼器的研究还停留在对大型液压阻尼器的设计、制造及应用等方面<sup>[6-7]</sup>。用于国和一号和华龙一号等核岛主设备的大型液压阻尼器<sup>[8]</sup>的研发促进了我国核电设备国产化的进程。液压阻尼器性能试验台架设计也取得了一定进展<sup>[9-10]</sup>,这对阻尼器的性能改进有重要意义。在液压阻尼器的故障模式研究及售后维护方面,王振久<sup>[11]</sup>提出了液压阻尼器的监测系统。谢洪虎等<sup>[12]</sup>对液压阻尼器的关键密封件进行延寿可行性研究。但总的来说,对液压阻尼器故障模式的研究目前仍处在起步阶段。一方面是由于核电厂对于阻尼器的故障诊断研究不够重视,另一方面是由于阻尼器参数信息分散在设计、调试、检修等不同环节的负责人手中,不完整的数据信息增加了对液压阻尼器故障诊断研究推进的难度。

目前核电厂只能通过定期对液压油进行检查和更换来对阻尼器进行维护保养,无法实际判断运行中的阻尼器性能参数是否仍满足设计要求。阻尼器性能一旦失效就会引起主设备动态反应的变化,这些影响则会通过连接的管道传播,进而对整个核电厂系统的设备造成潜在的破坏威胁,给核电厂运行带来严重安全隐患。由此,有必要开展阻尼器故障诊断技术研究,实时监测阻尼器性能参数,识别阻尼器的主要故障模式,开展阻尼器寿命预测,为核电厂智能运维提供科学依据而可减少运维成本,提高核电厂的可靠性和经济性。

大型液压阻尼器的失效模式主要包括性能失效与密封失效两种形式。密封失效主要包含由阻尼器密封件老化、零件磨损等引起的内泄漏与外泄漏;性能失效包括超极限载荷等导致的结构件断裂、阻尼孔堵塞及液压油性能退化。大型液压阻尼器故障原因、故障模式以及失效模式总结如图1所示。本文将借助适用于多学科领域建模的 AMESim(Advanced modeling environment for performing simulation of engineering systems)软件建立液压阻尼器的仿真模型,对仿真模型的准确性进行验证,进一步以泄漏成因造成的密封失效故障为例进行模拟并得出阻尼器的监测信号与工作状态之间的紧密关系,为液压阻尼器故障诊断系统研究及实际应用提供理论基础与指引。

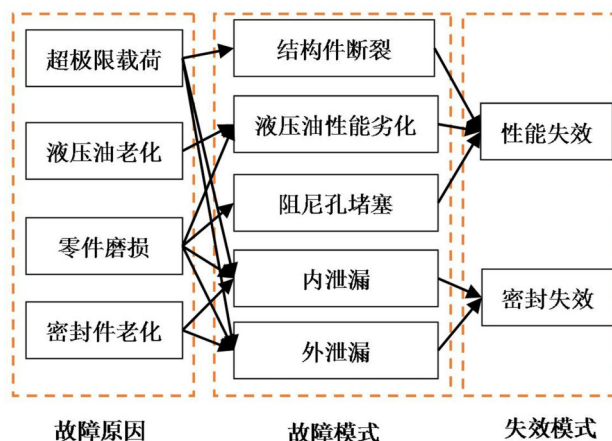


图1 大型液压阻尼器故障原因、故障模式以及失效模式

## 1 基于 AMESim 的液压阻尼器仿真建模

### 1.1 AMESim 平台简介

AMESim 是一款多学科综合的建模与仿真分析软件,可对液压及机械复杂系统等进行建模、仿真计算及动力学分析,研究系统的动态性能等<sup>[13]</sup>。在建模过程中,它可以将实际中难以建模的部分,如摩擦、油液特性、气体特性等考虑在内,并可与 Matlab 等软件进行联合仿真,分析功能强大。该平台中的不同模型库可协同使用,各应用库之间完全兼容,不需要大量的编程即可实现复杂系统的多学科交叉建模与仿真。由于这款软件在多学科领域的系统建模的优势突出,已在工程机械、航空航天、车辆等领域得到广泛的应用<sup>[14]</sup>。

由于液压阻尼器既涉及到机械领域的相关知识,又与液压系统密不可分,因此本文所涉及到 AMESim 平台中的应用库包括的机械库、液压库及信号控制库,结合液压元件设计库(HCD)等对液压阻尼器进行仿真建模。机械库用于设计液压阻尼器的基础机械结构,HCD 用于设计液压阻尼器的特殊结构,液压库用于构建液压相关的部分。在此基础上,通过调节物理参数等,对液压阻尼器的不同运行状态进行仿真分析。如调节泄漏模块的直径间隙等参数模拟液压阻尼器的泄漏工况,调节阻尼孔的直径模拟液压阻尼器阻尼孔的堵塞等。大型液压阻尼器主要由拉方向阻尼阀、压方向阻尼阀、主油缸及辅油缸等组成。当被支撑设备受到外界冲击时,液压阻尼器的阻尼阀关闭,产生阻尼力,此时阻尼器变成近似刚性的连接元件,以抵抗外界冲击力,起到减振作用,保护设备。

### 1.2 液压阻尼器仿真模型建立

大型液压阻尼器简图及其工作原理示意图如图

2、图3所示。本文中,仿真模型主要由液压阻尼器和液压加载试验系统两部分组成。前者是根据液压阻尼器的工作原理来构建的,模型中各模块的尺寸参数依照液压阻尼器真实尺寸来设置;后者是为了模拟真实情况中的液压加载,以便于液压阻尼器的静、动态试验的仿真。详细模型如图4所示。图中模型主要用于静态性能仿真,动态性能仿真在此模型的基础上进行了一些调整。阻尼器的重力也被考虑在此部分模型中。

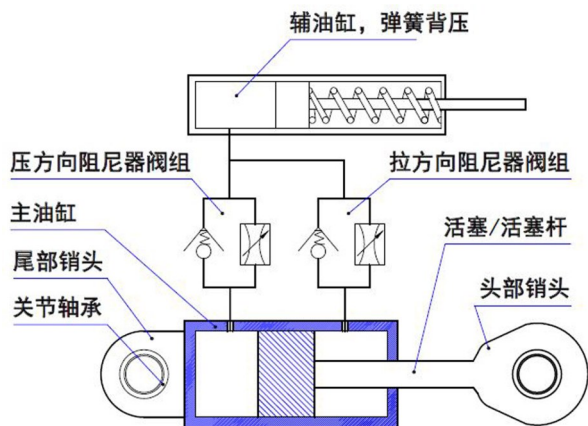


图2 液压阻尼器简图

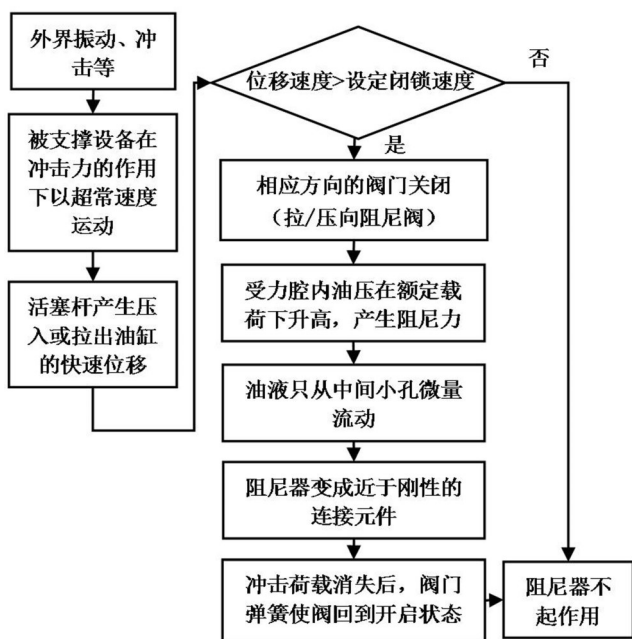


图3 液压阻尼器工作原理示意图

由图2可知,液压阻尼器部分用于模拟液压阻尼器本体,由无杆腔、有杆腔、活塞、拉向阻尼阀、压向阻尼阀等元件组成。由此,图4的模型中建立了阻尼器缸体(1、2)、阀芯小孔(3)、弹簧(4)、阀芯(5)等。其中,阻尼器缸体采用BAP12子模型,阀芯部分采用BAP35子模型,阀芯小孔采用BHORF0子模型,阀芯质量采用MAS005带阻力和限位质量的模型,弹簧采用BAP016模型。液压加载系统模型的

作用是模拟液压阻尼器在实际工况下所受的外部载荷情况。主要包括加载液压缸(6)、换向阀(7)、溢流阀(8)、单向阀(9)、液压源(10)等部分。加载液压缸采用HJ001双出杆结构模型,换向阀采用三位四通换向阀模型,用于控制加载液压缸的运动方向。

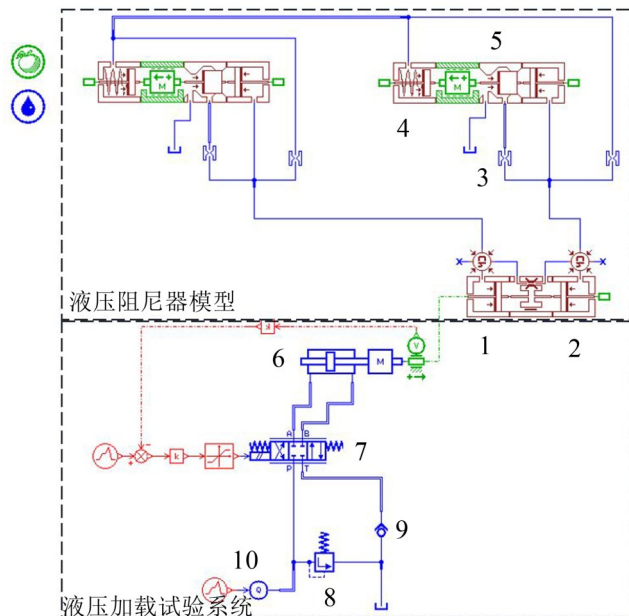


图4 液压阻尼器AMESim仿真模型建模

### 1.3 模型参数及环境参数设置

根据液压阻尼器的结构及尺寸,相应设置仿真模型中各参数。模型中重要元件的部分初始参数如表1所示,以压向阻尼阀参数为例。元件编号与图4中的编号相对应。(未列出的参数取软件模块中默认值。)

表1 阻尼器元件参数列表

元件编号	参数含义	值
1	活塞直径	580 mm
	活塞杆直径	250 mm
	有杆腔缸体初始长度	70 mm
2	活塞直径	580 mm
	活塞杆直径	0 mm
	无杆腔缸体初始长度	70 mm
5	提升阀直径	32 mm

依据液压阻尼器实际工作条件及经验,设置环境参数(液压油特性参数等)。其中,油液温度设置为25°C,油液密度设为1 072.4 kg/m<sup>3</sup>,绝对黏度设为214.91 cP。在此模型中,重力加速度取9.806 65 m/s<sup>2</sup>。(未列出的其他参数取默认值。)

## 2 仿真模型验证及故障模拟

仿真模型建立完毕后,为了验证模型的正确性与可靠性,对液压阻尼器的性能试验进行仿真<sup>[9-10]</sup>。



将仿真得到的结果与格林提供的外推阻尼器试验报告中的结果对比,以验证模型的正确性。由于现实中运行过程存在着不可避免的摩擦阻力、元件之间存在加工误差等无法控制的情况,软件仿真结果与现实情况允许有一定的差别。

## 2.1 动、静态性能试验仿真

### 2.1.1 静态性能试验仿真

参考液压阻尼器生产厂家格林公司提供的外推阻尼器试验报告中的试验设置,对主要的静态性能试验(闭锁速度试验)进行仿真。室温下,使阻尼器活塞由低速运动,逐渐增大运动速度,观察阻尼器活塞速度的变化及载荷的变化情况。调整仿真模型中液压加载系统模型部分的参数,使其输入为5 000 kN。得到如图5所示的仿真结果,图中展示出了活塞杆速度及载荷随时间的变化情况。

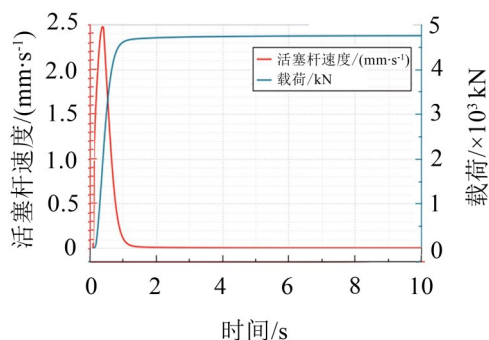


图5 静态性能仿真结果

由图5可以看出,在外界加载下,活塞速度逐渐增大,当其到达一定值后会急剧下降,此时对应阻尼器的闭锁过程,其速度峰值即为阻尼器的闭锁速度。当阻尼器发生闭锁后,载荷的值也到升至5 000 kN附近,同时还存在一定的闭锁后速度。与阻尼器的实际静态性能试验曲线对比,仿真曲线的走势及特征与其相似,因此可初步从静态性能的角度确定模型的准确性。

### 2.1.2 动态性能试验仿真

参考液压阻尼器生产厂家格林公司提供的外推阻尼器试验报告中的试验设置,对主要的动态性能试验进行仿真。室温下,对阻尼器输入不同载荷、频率的正弦信号,观察阻尼器活塞的位移及载荷,得到位移-载荷的关系图,并分析其特征。对仿真模型进行一些调整,可直接对阻尼器输入正弦力,调整其参数,此处以频率1 Hz、幅值为5 000 kN的正弦输入为例展示仿真结果。得到如图6所示的仿真结果,图中展示了活塞杆的位移及其载荷随时间的变化情况。

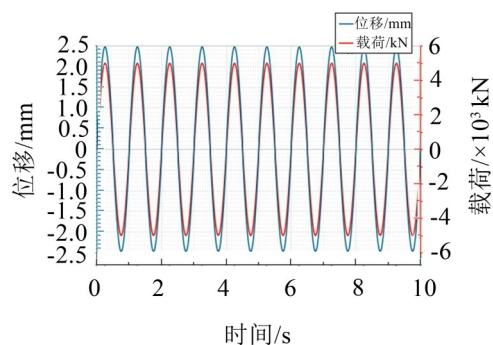


图6 动态性能仿真结果

由图6可以看出,活塞杆的位移与载荷是同相位变化的。进一步分析,得到如图7所示的力-位移曲线,可以得出阻尼器有刚度特性的结论,通过计算得知其平均刚度值为2 019 kN/mm。与阻尼器的实际静态性能试验曲线对比,仿真曲线的走势及特征与其相似,因此可初步从动态性能的角度确定模型的准确性。

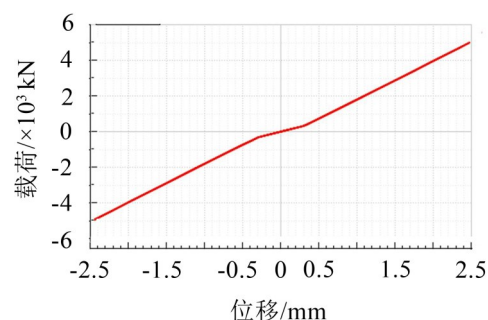


图7 力-位移曲线

### 2.1.3 性能试验仿真小结

由上述仿真,阻尼器仿真模型的动态性能及静态性能都与真实情况的试验结果相符合,进一步验证了模型的可靠性,同时也对阻尼器的各项特性有了更加深入的理解,为故障模拟等工作打下基础。

## 2.2 仿真模型的故障模拟

在验证了仿真模型的可靠性后,进行阻尼器的故障模拟试验的仿真。主要包含阻尼器的内泄漏故障、外泄漏故障以及堵塞故障的模拟。此处以内泄漏故障为例来介绍。在AMESim软件中的泄漏模块中,对参数直径间隙进行调整,可进行阻尼器内泄漏故障的模拟。将参数直径间隙由小调大,闭锁速度上升,闭锁后速度上升,载荷下降。即需要更大的外界速度输入才能使阻尼器闭锁,而且闭锁后的阻尼力也相应变小。

## 3 监测信号与阻尼器工作状态逻辑关系

本研究采用的监测点如图8所示。监测量包含

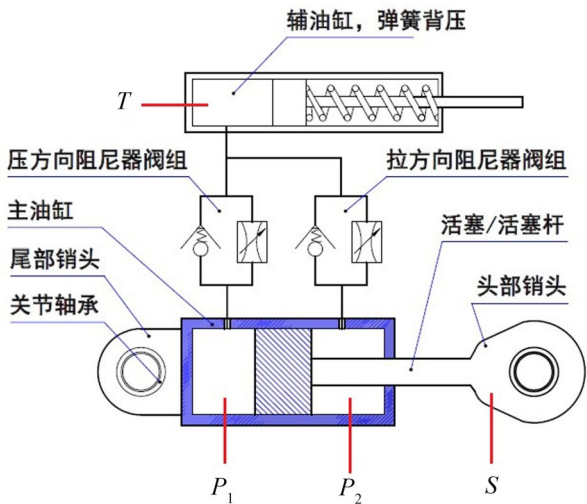


图 8 液压阻尼器工作原理图及本试验方案的监测点  
有杆腔和无杆腔的压力  $P_1$ 、 $P_2$ ，活塞杆的位移  $S$ ，阻尼器温度  $T$  等。

根据仿真结果，通过定性分析，探究在阻尼器不同的工作状态下监测信号之间的逻辑关系。在本研究中考虑四种不同的阻尼器工况，包括：正常工况、

存在外泄漏工况、存在内泄漏工况、存在阻尼阀堵塞工况。关于阻尼器的正常工作模式，结合被支撑设备的运行工况，有以下四种：热位移模式、静止模式、偶发冲击模式、振动模式。以监测信号与阻尼器正常工作状态的逻辑关系作为一个参照，总结如表 2。

3.1 存在外泄漏工况

外泄漏会导致阻尼器储油箱油量减少，严重时导致工作腔缺油。除外泄漏导致阻尼器储油量减少外，阻尼器长期工作及其工作模式也会使储油量减少。根据储油量损耗对该故障模式进行以下分级：轻微（指储油量下降最初值的 20 % 或以下）、一般（指储油量下降最初值的 20 % ~ 60 %）、严重（指储油量下降最初值的 60 % ~ 90 %）、失效（指储油量下降最初值的 90 % 以上；全部消耗时背压会突然消失）。监测信号与阻尼器存在外泄漏工况的逻辑关系如表 3 所示。

可以得出，阻尼器存在外泄漏的工况下，背压会下降，随故障级别的上升，背压下降的趋势增大，活塞杆速度只有在发生失效、处于偶发冲击及持续振

表 2 监测信号与阻尼器正常工作状态的逻辑关系

工作模式		压力 $P$ /载荷 $F$		位移 $S/\text{mm}$	速度 $V/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$
		拉 $P_1/F_1$	压 $P_2/F_2$		
热位移	拉	极小 <sup>+</sup>	极小	热位移量	热位移速度小
	压	极小	极小 <sup>+</sup>		
静止		$P_1=P_2$ , 极小		0	0
偶发冲击	闭锁-拉	极小至极大	极小	$\leq 5$	由 0 变至 $V_{\text{闭}}$
	闭锁-压	极小	极小至极大		
	闭后-拉	极大	极小	小	小
	闭后-压	极小	极大		
持续振动		极小至极大之间循环		总振幅 $\leq 5.8$	变化值小

表 3 监测信号与阻尼器存在外泄漏工况的逻辑关系

故障级别	工作模式	压力 $P$ /载荷 $F$		位移 $S/\text{mm}$	速度 $V/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$		
		拉 $P_1/F_1$	压 $P_2/F_2$				
轻微	热位移	背压轻微下降		与正常状态无异	与正常状态无异		
	静止						
	偶发冲击						
	持续振动						
一般	热位移	背压略下降		与正常状态无异	与正常状态无异		
	静止						
	偶发冲击						
	持续振动						
严重	热位移	背压明显下降		与正常状态无异	与正常状态无异		
	静止						
	偶发冲击						
	持续振动						
失效	热位移	背压消失		与正常状态无异	与正常状态无异		
	静止						
	偶发冲击			正常或无压力		正常或大	正常或无速度突变
	持续振动			正常或无压力		正常或大	—

动时才会有增大的趋势,其他指标与正常状态无异。

### 3.2 存在内泄漏工况

内泄漏是指阻尼阀闭锁后,活塞两边的液压油除了通过预先设定的溢流通道流动外,还可通过其他部位流动的工况。该故障模式仅影响整机性能中旁路速度(使变大)及动态刚度(使变小)指标(极其严重时可能影响闭锁速度,但几乎不可能出现,不予研究对策)。

本项目将该故障模式划分为以下两个级别:一般(旁路速度大于出厂测试值且达到规范书要求上限值的90%)、严重(旁路速度大于规范书要求上限值)。监测信号与阻尼器存在内泄漏工况的逻辑关系如表4所示。可以得出,存在内泄漏的工况下,当系统处于偶发冲击模式、振动模式的工作模式时,活塞杆的速度及位移相对于正常状态略大,其他指标与正常状态无异。

### 3.3 存在阻尼阀堵塞工况

阻尼阀堵塞工况是指阻尼阀组(由单向阀+溢流阀构成)遭到异物堵塞从而改变阻尼特性的工况。异物可能是装配前清洗未彻底的机加残留物或长期运行过程产生的磨损粉末等。前者导致单向阀堵塞(颗粒长度大于单向阀)或溢流阀的堵塞;后者堆积可能导致溢流阀的堵塞。单向阀堵塞将使闭锁速度变小,溢流阀堵塞将使旁路速度变小。本项目将该故障模式划分为以下两个级别:一般(闭锁速度或旁路速度达到出厂测试值的60%,或达到规范书要求下限值的1.1倍)、严重(闭锁速度或旁路速度小于规范书要求下限值)。监测信号与阻尼器存在阻尼阀堵塞工况的逻辑关系如表5所示。可以得出,存在阻尼阀堵塞的工况下,当系统处于偶发冲击模式、振动模式的工作模式时,活塞杆的速度及位移相对于正常状态略小,其他指标与正常状态无异。

表4 监测信号与阻尼器存在内泄漏工况的逻辑关系

故障级别	工作模式	压力 $P$ /载荷 $F$		位移 $S/\text{mm}$	速度 $V/(\text{mm}\cdot\text{min}^{-1})$
		拉 $P_1/F_1$	压 $P_2/F_2$		
一般	热位移			与正常状态无异	
	静止			与正常状态无异	
	偶发冲击	与正常状态无异		相对于正常状态略大	
	持续振动	与正常状态无异		相对于正常状态略大	
严重	热位移			与正常状态无异	
	静止			与正常状态无异	
	偶发冲击	与正常状态无异		相对于正常状态明显大	
	持续振动	与正常状态无异		动刚度与频率有关	

表5 监测信号与阻尼器存在阻尼阀堵塞工况的逻辑关系

故障级别	工作模式	压力 $P$ /载荷 $F$		位移 $S/\text{mm}$	速度 $V/(\text{mm}\cdot\text{min}^{-1})$
		拉 $P_1/F_1$	压 $P_2/F_2$		
一般	热位移			与正常状态无异	
	静止			与正常状态无异	
	偶发冲击	与正常状态无异		相对于正常状态略小	
	持续振动	与正常状态无异		相对于正常状态略小	
严重	热位移		上升		与正常状态无异
	静止			与正常状态无异	
	偶发冲击	与正常状态无异		相对于正常状态明显变小	
	持续振动	与正常状态无异		动刚度变大	

## 4 结 语

本文针对大型液压阻尼器的故障模式,利用多学科综合的建模仿真软件 AMESim 平台对大型液压阻尼器进行建模,通过液压阻尼器和液压加载试验系统两部分仿真模型来模拟阻尼器的真实工作状态,并对模型进行了动、静态性能试验仿真,以验证

模型的准确性与可靠性。通过调节仿真模型的参数,如泄漏模块的直径间隙等对仿真模型进行故障模拟并分析。最后,结合被支撑设备的四种运行工作模式(热位移模式、静止模式、偶发冲击模式、振动模式),对阻尼器在正常工况、存在外泄漏工况、存在内泄漏工况、存在阻尼阀堵塞工况四种不同工况下监测信号进行定性分析,得出其中的逻辑关系。存



在外泄漏的工况下,背压会下降,随故障级别的上升,背压下降的趋势增大,活塞杆速度只有在发生失效、处于偶发冲击及持续振动时才会有增大的趋势,其他指标与正常状态无异。存在内泄漏的工况下,当系统处于偶发冲击模式、振动模式的工作模式时,活塞杆的速度及位移相对于正常状态略大,其他指标与正常状态无异。存在阻尼阀堵塞的工况下,当系统处于偶发冲击模式、振动模式的工作模式时,活塞杆的速度及位移相对于正常状态略小,其他指标与正常状态无异。本文的研究可为液压阻尼器进一步故障模式研究及故障诊断系统研究打下良好的理论基础。

#### 参考文献:

- [1] 关岭松. 核电厂 850 吨大型液压阻尼器国产化研制[D]. 上海:上海交通大学,2016.
- [2] 冯虎田,施祖康,张福祥,等. 火箭发射系统插拔机构液压阻尼器分析与设计[J]. 火炮发射与控制学报,2001,(3):36-39.
- [3] 张欢,王全卫. 液压阻尼器在 PDS 系统中的应用[J]. 广东化工,2014,41(19):171-172.
- [4] ALAN HITCHCOX. Hydraulic dampers help improve railway safety and stability[J]. Hydraulics and Pneumatics,

2019.

- [5] 杨冬. 核岛重要设备和管道液压阻尼器的结构及维护[J]. 中国核电,2014,7(1):54-58.
- [6] DONGQING X, DONG D, CHUANG W, et al. The damper application in nuclear power plants and discussion on key technologies of manufacturing[J]. Nuclear Safety, 2014.
- [7] 陈洪涛,陈元初,纪立军. 核电厂中阻尼器的设计安装探讨[J]. 产业与科技论坛,2017,16(4):83-84.
- [8] 李磊,钱亚鹏,汤臣杭,等. 华龙一号核岛主设备用大型液压阻尼器研发[J]. 科技与创新,2020(5):62-64.
- [9] 杨钢,石邦凯,潘绪文,等. 大型液压阻尼器试验台架设计及分析[J]. 液压与气动,2015(10):91-94.
- [10] 张玉荣,陈永梅. 液压阻尼器综合性能试验台开发与设计[J]. 机械工程师,2011(12):112-113.
- [11] 王振久. 田湾核电站液压阻尼监测系统[J]. 科技视界, 2015(31):113-118.
- [12] 谢洪虎,杨锦春. 核岛主设备支撑用大吨位液压阻尼器密封件延寿可行性研究[J]. 核动力工程,2017,38(1):85-87.
- [13] 付永领,祁晓野. AMESim 系统建模和仿真:从入门到精通[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2006.
- [14] 王琳,周盼,夏孟龙. 基于 AMESim 的船用液压阻尼器结构优化与仿真[J]. 液压与气动,2018(6):94-98.

(上接第 76 页)

(2) 引入波数域窗函数,联合傅里叶连续延拓方法,对 DIC 计算所得含噪位移场结果实现空间滤波;

(3) 计算模态分析与基于 DIC 技术的 OMA 结果吻合良好,空间去噪方法提高了辨识振型的平滑性。

#### 参考文献:

- [1] PHILLIP L. REU, DANIEL P. ROHE, LAURA D. JACOBS. Comparison of DIC and LDV for practical vibration and modal measurements[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017. 86: 2-16.
- [2] WARREN C., NIEZRECKI C., AVITABIL P., et al. Comparison of FRF measurements and mode shapes determined using optically image based, laser, and accelerometer measurements[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2011, 25(6): 2191-2202.
- [3] BAQERSAD J. Photogrammetry and optical methods in structural dynamics-A review[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016 (86): 17-34.
- [4] 苏勇,张青川,伍小平. 数字图像相关技术的一些进展[J]. 中国科学(物理学力学 天文学),2018,48(9):29-53.
- [5] 潘兵. 数字(体)图像相关方法的近期研究进展[C]. 全国实验力学学术会议,2012.

- [6] G JAMES III, T G CARNE, J LAUFER. The natural excitation technique (NExT) for modal parameter extraction from operating structures[J]. Nasa Sti/recon Technical Report N, 1993, 93(4): 260-277.
- [7] 陈伟,宋汉文. 非自伴随动力学系统的工况模态分析[J]. 振动工程学报,2018,31(5):50-57.
- [8] 于亮亮,宋汉文. 环境激励下脉冲响应函数与相关函数的关系[J]. 噪声与振动控制,2017,37(3):14-18+36.
- [9] 傅志方. 振动模态分析与参数辨识[M]. 北京:机械工业出版社,1990.
- [10] LYON M. Sobolev smoothing of SVD-based Fourier continuations[J]. Applied Mathematics Letters, 2012, 25(12): 2227-2231.
- [11] LI J F, J C PASCAL, C CARLES. A new K-space optimal filter for acoustic holography, in: Proc. 3rd Int. Congr. Air-struct. borne sound vib[C]. Montreal, Canada, 1994: 1-8.
- [12] PASCAL J, J LI, X CARNIEL. Wavenumber processing techniques to determine structural intensity and its divergence from optical measurements without leakage effects[J]. shock and vibration, 2002, 9(1-2): 57-66.