

地震响应反演核电管道中结构参数方法对比研究

薛睿渊, 俞树荣*, 张希恒

(兰州理工大学 石油化工学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 本文研究了以地震响应与地震激励的比值和管道振动控制方程误差为目标特征值时, 利用地震响应反演管道中结构参数的可行性与差异。推导了两种方法可通用的迭代数学模型, 利用地震响应反演某管道有限元模型中的结构参数。结果表明: 合适条件下二者反演结果具有类似的精度, 但基于地震响应与地震激励比值的方法具有更高的鲁棒性, 适合使用位移响应; 基于振动控制方程误差的方法对反演参数初始估计的依赖性更低, 适合使用加速度响应。

关键词: 有限元模型修正; 结构参数; 地震激励; 反演分析; 管道

中图分类号: TH113.1; O327; TL37

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2020)08-1476-11

doi: 10.7538/yzk.2020.youxian.0163

Comparative Study on Method of Inversion Analysis of Structure Parameter in Nuclear Power Pipeline System Using Seismic Response

XUE Ruiyuan, YU Shurong*, ZHANG Xiheng

(College of Petrochemical Technology, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: The feasibility and difference of using seismic response to invert the structure parameters of the pipeline were studied when the ratio of seismic response to seismic excitation and the vibration control equation error were taken as the target eigenvalues in this paper. The iterative mathematical model which could be shared by the two methods was derived, and then the structure parameters in finite element model of pipeline were identified by using the seismic response. The results show that the inversion results of the two methods have similar accuracy under certain conditions. The method based on the ratio of seismic response to seismic excitation has higher robustness, and is suitable to use displacement response. The method based on the vibration control equation error has lower dependence on the initial estimation of the updated parameters, and is suitable to use acceleration response.

Key words: finite element model updating; structure parameter; seismic excitation; inversion analysis; pipeline

收稿日期: 2020-03-13; 修回日期: 2020-05-19

作者简介: 薛睿渊(1993—), 男, 甘肃定西人, 博士研究生, 化工过程机械专业

* 通信作者: 俞树荣, E-mail: yusr@lut.edu.cn

网络出版时间: 2020-07-08; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2044.TL.20200707.1046.002.html>

随着人类对地震认识的加深,对核电站中的系统和设备提出了新的抗震要求,主要包括对现役和在建核电站进行抗震裕度分析^[1-2]和对关键设备在高频激励下破坏形式的研究^[3]。对于核电站中被划分为抗震重要等级的管道而言,一个准确的动力学有限元模型(FEM)可解决其在服役过程中无法进行试验的问题,对于其健康检测、损伤诊断也是必不可少的。由于管道在加工制造和安装过程中的不确定性,其FEM必然存在一些参数的取值难以准确确定,如支撑为系统提供的约束强度、管道连接件的刚度等。对这些参数的不准确取值会导致实际结构与FEM之间存在偏差。在工程实践中,利用基于模态的FEM修正方法对机械结构模型中的结构参数进行反演分析是一种普遍方法。郭勤涛等^[4]总结了FEM修正方法的发展、应用和技术难点。费庆国等^[5]指出模态频率和反共振频率是FEM修正过程中优选的两种参数。为减少利用模态进行反演分析的计算量,近年来代理模型法得到了广泛运用^[6-7]。但对于核电站中完整的管道而言,准确提取足够数量的模态存在很大难度,因此不能直接使用基于模态的FEM修正方法来反演其模型中的结构参数。

核电站中相对容易获得的与管道相关的振动测量数据是在其服役或模拟运行试验过程中监测到的地震响应。在桥梁工程领域有大量直接利用从环境振动试验中测得的加速度响应进行桥梁寿命和损伤监测的实例^[8-10],但本质使用的试验数据依然是从加速度响应中提取的模态,提取模态的数量和精度对反演过程有很大限制。文献^[11-12]报道了直接利用时域振动响应进行参数反演、损伤识别的方法,但这些方法在机械结构中的实际应用还未得到探索。Lin等^[13]将结构在基础激励下的响应与激励的比值定义为一种新形式的频响函数(FRF),然后提出基于FRF残差的可直接使用基础激励下响应数据的FEM修正方法,推导过程中激励与响应均为位移,且假设只有固定节点受力。该方法在航天器FEM修正方面得到广泛运用^[14-15]。而管道的相对位移测量难度大、精度低,且地震过程中系统的每个节点均受到惯性力的作用。

本文参考文献^[13],将地震响应与地震激励的比值定义为一种新形式的FRF,以FRF和管道振动控制方程误差为目标特征值,推导二者可通用的基于灵敏度的FEM修正模型。然后基于两种方法利用地震模拟试验测量数据对某管道FEM中的结构参数进行反演分析,对比二者在实践运用中的可行性与差异。

1 修正数学模型推导

基于灵敏度的FEM修正过程的第1步是建立理论和试验特征值之间的偏差与修正参数之间的数学关系,然后通过迭代求解对修正参数进行识别。这种关系可表示为:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{b} - \boldsymbol{A}d\boldsymbol{\theta} \quad (1)$$

式中: $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为FEM的建模误差; \boldsymbol{b} 为理论与试验特征值之间的偏差; $d\boldsymbol{\theta}$ 为修正参数的变化向量; \boldsymbol{A} 为修正参数取值发生波动时对目标特征值的影响程度,称之为修正参数对目标特征值的灵敏度矩阵。

构造 $d\boldsymbol{\theta}$ 关于 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 的罚函数,并对修正参数进行加权同时引入参数的初始估计信息,可得:

$$J(d\boldsymbol{\theta}) = \|\boldsymbol{\varepsilon}\|^2 = (\boldsymbol{b} - \boldsymbol{A}d\boldsymbol{\theta})^T (\boldsymbol{b} - \boldsymbol{A}d\boldsymbol{\theta}) + (\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\theta}_0)^T \boldsymbol{W}(\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\theta}_0) \quad (2)$$

式中: J 为 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 的罚函数; $\boldsymbol{\theta}$ 、 $\boldsymbol{\theta}_0$ 和 \boldsymbol{W} 分别为修正参数的当前估计向量、初始估计向量和加权矩阵。为向变化较大的参数分配较小的权重, \boldsymbol{W} 可取参数估计值协方差矩阵的逆。求解 J 关于 $d\boldsymbol{\theta}$ 最小值的方法是计算 J 关于 $d\boldsymbol{\theta}$ 的偏微分并令其等于0,可得:

$$d\boldsymbol{\theta} = [\boldsymbol{A}^T \boldsymbol{A} + \boldsymbol{W}]^{-1} (\boldsymbol{A}^T \boldsymbol{b} - \boldsymbol{W}(\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\theta}_0)) \quad (3)$$

式(3)中当修正参数性质不同时,有必要对参数进行归一化处理以改善修正过程的数值条件。此外,当参与修正的频点计算得到的 $[\boldsymbol{A}^T \boldsymbol{A}]$ 接近奇异时,式(3)难以求得符合实际的解,为提高修正过程的成功率,此处利用Marquardt方法求解式(3),即将一个正定的对角矩阵与 $[\boldsymbol{A}^T \boldsymbol{A}]$ 相加。规定 $\boldsymbol{\kappa}_{i+1} = d\boldsymbol{\theta}_i / \boldsymbol{\theta}_i$, i 为当前迭代步数,数值条件改善后,用于反演分析的迭代数学模型如下:

$$\boldsymbol{\kappa}_{i+1} = [(\boldsymbol{A}\boldsymbol{\theta}_i)^T (\boldsymbol{A}\boldsymbol{\theta}_i) + \boldsymbol{W} + \lambda \boldsymbol{I}]^{-1} \cdot ((\boldsymbol{A}\boldsymbol{\theta}_i)^T \boldsymbol{b} - \boldsymbol{W}(\boldsymbol{\kappa}_i - \boldsymbol{\kappa}_0)) \quad (4)$$

式中: \boldsymbol{I} 为单位矩阵; λ 为Marquardt方法中需要设置的常数。修正过程 λ 的取值需根据每一

步的迭代结果进行调整,在保证修正过程顺利完成的前提下尽可能地提高达到收敛的速度。相对于以往修正方法中使用最小二乘法对迭代公式进行求解,这样虽增加了计算量,但大幅度提高了顺利完成修正过程的可能性。

将地震响应与地震激励的比值定义为一种新形式的 FRF,修正过程以这种 FRF 的残差为目标特征值时, b 和 A 的数学模型如下:

$$b = -B(H_t - H_a) \quad (5)$$

$$A = \frac{\partial B}{\partial \theta} H_t + \frac{\partial M}{\partial \theta} e \quad (6)$$

式中: B 、 M 和 e 为修正模型的动刚度矩阵、质量矩阵和单位向量; H_t 和 H_a 分别为实测与理论的 FRF 向量,可按下式进行计算:

$$H_t = p/\dot{u}_g \quad (7)$$

$$H_a = -B^{-1}Me \quad (8)$$

式中: \dot{u}_g 为以加速度形式采集的地震激励向量; p 为相对加速度响应或相对位移响应向量。

当以振动控制方程误差为目标特征值时, b 和 A 具有以下形式:

$$b = -M\ddot{u}_g - Bp \quad (9)$$

$$A = \frac{\partial B}{\partial \theta} p + \frac{\partial M}{\partial \theta} \ddot{u}_g \quad (10)$$

对于上述两种方法而言,当 p 为加速度响应时:

$$B = M - \omega^{-2}K \quad (11)$$

当 p 为位移响应时:

$$B = K - \omega^2 M \quad (12)$$

式中: K 为修正模型的刚度矩阵; ω 为用于反演分析的频率向量。

综上利用地震响应对核电管道模型中的结构参数进行反演分析的流程如图 1 所示。

可以观察到上述两种 FEM 修正方法在推导过程中均不涉及任何模态信息,仅需测量实际结构的地震响应即可完成 FEM 中结构参数的反演分析。此外,上述修正过程未考虑阻尼,这是因为目前流行的两阶段 FEM 修正方法^[16]已证明阻尼可在建立起准确的动刚度矩阵后通过不同方式进行单独识别,因此本文只对比这两种方法在反演和动刚度矩阵相关参数过程中的差。

2 试验数据采集与管道模型建立

2.1 地震模拟试验

为验证上述两种 FEM 修正方法在实践运用中的可行性和差异,搭建如图 2 所示的管道结构并对其进行地震模拟试验。图 2 所示管道结构总长 3.5 m,由两段重 3.78 kg/m、 $\phi 48 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$ 规格的镀锌焊接管通过管接头连接而组成,管接头附近焊接一重为 5 kg 的法兰盘作为负重。管道与支架通过螺母连接,支架底板通过 8 个 M20 螺栓固定在振动台台面。采用电液伺服地震模拟振动台为系统提供水平 y 方

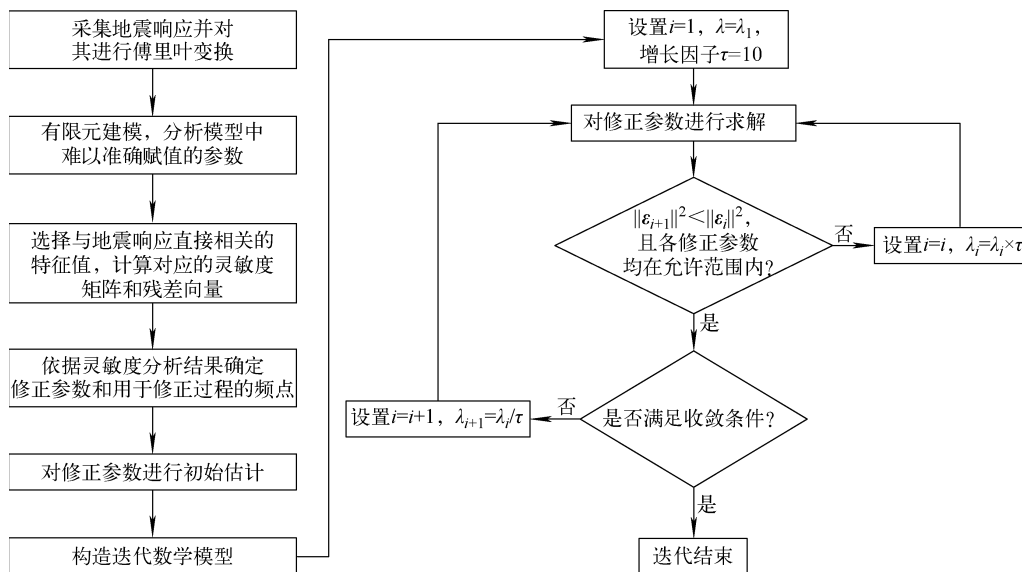


图 1 结构参数反演分析流程图

Fig. 1 Flow chart of structure parameter inversion analysis

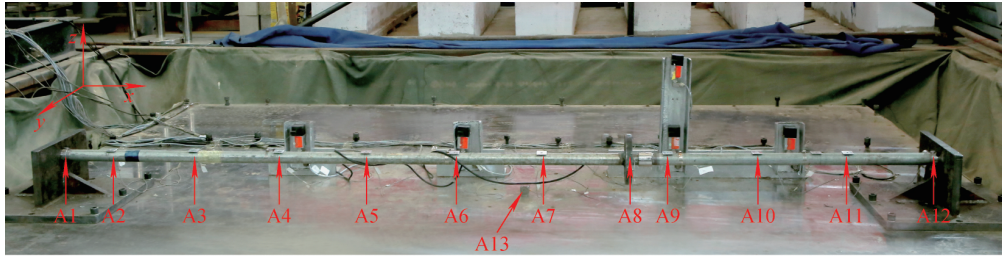


图2 试验结构及测点布置

Fig. 2 Test structure and arrangement of test point

向的人工地震波激励,12个加速度计(A1~A12)吸附在管道上测量试验过程中的加速度响应,同时在地震台台面上吸附1个加速度计(A13)监测台面振动加速度时程。A13测得的人工地震波如图3所示,测点A1~A12测量数据减去A13测量数据即可得到修正过程所需的相对加速度响应。试验管道在人工地震波激励下仅表现出第1阶固有频率,为17.33 Hz。

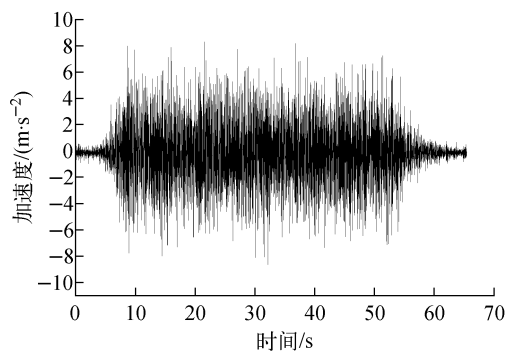


图3 人工地震波

Fig. 3 Artificial seismic wave

2.2 建立管道 FEM

用无质量的管单元模拟管件,支撑以线性弹簧模拟,建立试验结构的集中质量 FEM 如图4所示,由15个单元、16个节点构成,模型

中节点与试验结构测点一一对应。由于试验管道质量较小,分配于各节点的质量只能在小范围内变化,而这种幅度的变化对管道的动态特性几乎没有影响,因此可认为 FEM 中质量矩阵是近似确定的。管道左右两端支架如图 5a、b 所示,由 30 mm 厚的钢板焊接而成,具有足够的刚度将振动台提供的激励传递至管道,但考虑到支架与管道连接部位在制造和安装过程的不确定性,支架对系统提供的约束强度是随机的,即 FEM 中线性弹簧刚度的取值是未知的。此外系统左右两端管道外伸出支架的长度是不一致的。单元 8 对应的管接头位置如图 5c 所示,管接头制造安装过程中的不确定性、管接头与管件之间螺纹连接松动及外径不均匀等因素造成单元 8 的弹性模量和惯性矩取值也是未知的。综上,图 4 中取值未知的结构参数包括左右两端线性弹簧的平动刚度 K_{t1} 、 K_{t2} ,转动刚度 K_{r1} 、 K_{r2} 及单元 8 的抗弯刚度 W 。 W 为单元 8 弹性模量与惯性矩的乘积。

为反演分析过程的顺利完成,需从上述参数中进一步挑选修正参数,且还需从测得的地震响应中挑选用于反演分析的频点,因此需对上述参数进行灵敏度分析。各参数对 FRF 残差的灵敏度如图 6 所示,对振动控制方程误差的灵敏度如图 7 所示。

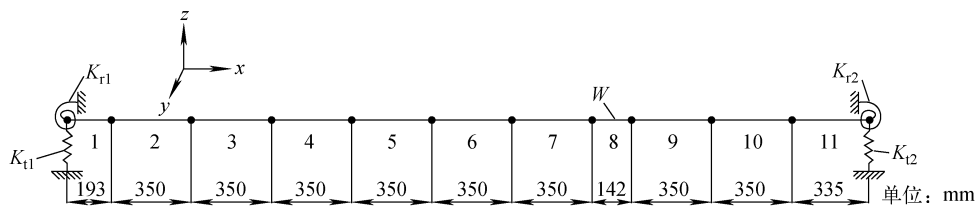
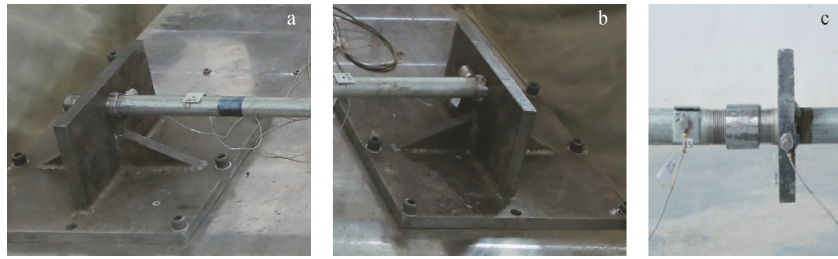


图4 试验结构的集中质量有限元模型

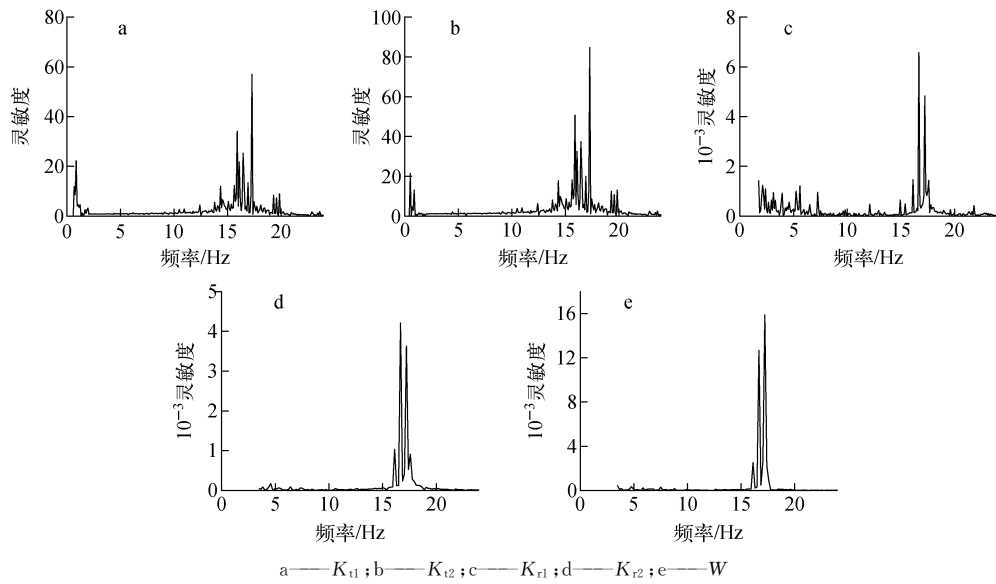
Fig. 4 Lumped mass FEM of test structure



a——左端支架;b——右端支架;c——管接头

图5 试验结构中参数不确定的部件

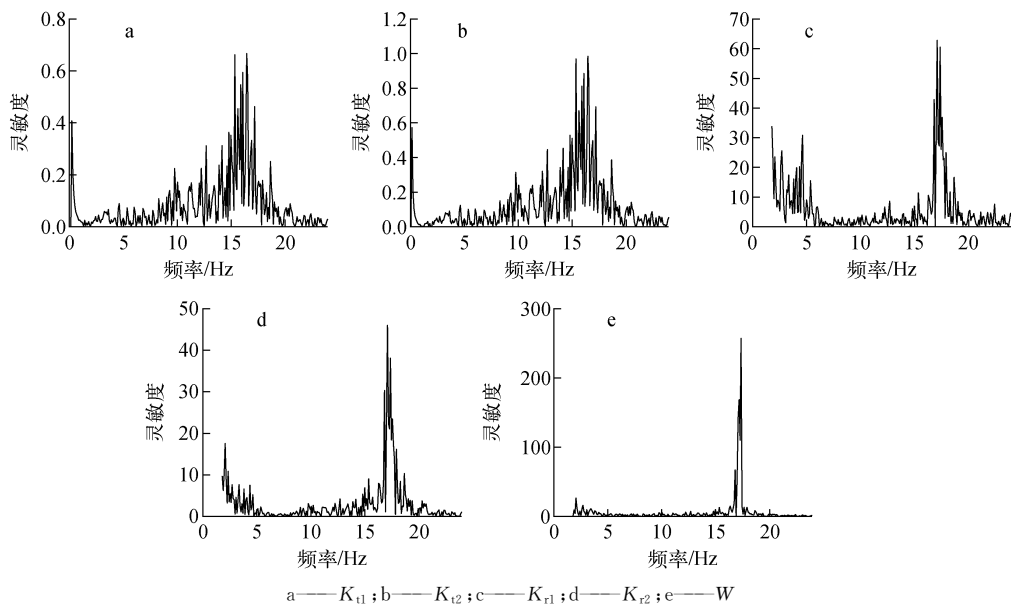
Fig.5 Component with uncertain parameter in test structure



a—— K_{11} ;b—— K_{12} ;c—— K_{r1} ;d—— K_{r2} ;e—— W

图6 结构参数对 FRF 残差的灵敏度

Fig.6 Sensitivity of structure parameter to FRF residual



a—— K_{11} ;b—— K_{12} ;c—— K_{r1} ;d—— K_{r2} ;e—— W

图7 结构参数对振动控制方程误差的灵敏度

Fig.7 Sensitivity of structure parameter to vibration control equation error

由图 6、7 可知,上述各参数对两种特征值的灵敏度曲线有类似的趋势,各参数的最大灵敏度均出现在共振频率附近,灵敏度在 5 Hz 以下也具有较高取值,意味着 5 Hz 以下测量数据受噪声影响较大,灵敏度取值较低的频率范围为 5~13 Hz。不同的是各参数对 FRF 残差的灵敏度是对振动控制方程误差灵敏度的 100 倍。值得注意的是,弹簧的平动刚度对两种特征值的灵敏度均远小于其他参数,参考文献 [17] 的处理方式,反演过程中应将 K_{r1} 、 K_{r2} 的取值设置为无限大。综上选择模型中的修正参数为 K_{r1} 、 K_{r2} 和 W 。

3 参数的反演分析

3.1 反演条件准备

评价一个 FEM 修正方法性能的两个重要指标是方法的鲁棒性和对修正参数初始估计的依赖性。Kwon 等^[18]的研究成果表明用于反演分析的频点应在灵敏度较低的频率区域内选择。参与修正的频点避开共振频率的另一重要意义在于可最小化忽略阻尼对反演结果的影响,因为阻尼对共振区域的响应幅值最为敏感。本次试验测得的响应数据在频域受噪声影响随频率的升高而降低,因此选取表 1 所列 4 组依

次降低的频率组合用于参数的反演分析,以对比两种方法的鲁棒性。

表 1 参与反演过程的频率组

Table 1 Frequency group used for inversion process

工况编号	参与频点/Hz
1	9.69, 10.39, 10.85
2	6.77, 6.86, 7.09
3	4.81, 5.72, 5.95
4	4.01, 4.21, 4.31

反演分析前还需对修正参数的允许变化范围及初始取值进行估计。由于没有任何工程经验可指导修正参数的取值,应允许各参数在较大范围内变化。修正参数的初始估计列于表 2。初始估计 I 是考虑到管道支架由钢板焊接组成,管接头的存在使管件壁厚增大,因此判断弹簧的转动刚度和管接头部位的抗弯刚度应大于管单元的转动刚度($5.9 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{rad}$)和抗弯刚度($2.86 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{m}^6$),其对应的理论基频为 19.6 Hz。初始估计 II 则是以理论和实测固有频率吻合为目标,经多次调整而确定的较为准确的初始估计,对应理论基频为 17.7 Hz。

表 2 修正参数的初始估计

Table 2 Initial estimation of updating parameter

修正参数	参数取值		
	初始估计 I	初始估计 II	范围
$K_{r1}, \text{N} \cdot \text{m}/\text{rad}$	2×10^6	1×10^6	$1 \times 10^5 \sim 3 \times 10^6$
$K_{r2}, \text{N} \cdot \text{m}/\text{rad}$	2×10^6	1.5×10^5	$1 \times 10^6 \sim 3 \times 10^6$
$W, \text{N} \cdot \text{m}^6$	8×10^4	5×10^4	$2 \times 10^4 \sim 1 \times 10^5$

由于试验过程中管道转动自由度方向没有外界激励,故可利用静力凝聚法消去 FEM 中的转动自由度以解决试验过程各测点转动自由度响应未被测量的问题。按照图 1 所示流程编制程序实现修正参数的迭代求解。

3.2 利用加速度响应进行反演

采用初始估计 I,基于 FRF 残差和振动控制方程误差各参数反演分析结果列于表 3、4。将修正后 FEM 对应的基频与试验结果的相对

偏差 σ 小于 1% 作为反演结果可靠的一个必要条件。由表 3、4 可知,当对修正参数的初始估计不准确时,只有使用测量精度较高的地震响应基于振动控制方程误差的方法才能获得可靠的反演结果,即工况 4-1(表 4 中的工况 1)。这证明基于振动控制方程误差的方法对修正参数的初始估计依赖性低。

当采用初始估计 II 时,基于 FRF 残差和振动控制方程误差各参数反演分析结果列于表 5、6。

表3 采用初始估计 I 基于 FRF 残差的反演结果

Table 3 Inversion result based on FRF residual under initial estimation I

工况编号	$K_{r1}/(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1})$	$K_{r2}/(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1})$	$W/(\text{N} \cdot \text{m}^6)$	基频/Hz	$\sigma/\%$
1	1.51×10^6	3.59×10^5	2.23×10^4	18.46	6.52
2	1.87×10^6	2.06×10^6	2.01×10^4	19.22	10.90
3	1.91×10^6	2.01×10^6	2.01×10^4	19.12	10.32
4	1.01×10^5	1.69×10^6	4.09×10^5	18.02	3.98

表4 采用初始估计 I 基于振动控制方程误差的反演结果

Table 4 Inversion result based on vibration control equation error under initial estimation I

工况编号	$K_{r1}/(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1})$	$K_{r2}/(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1})$	$W/(\text{N} \cdot \text{m}^6)$	基频/Hz	$\sigma/\%$
1	7.79×10^5	1.39×10^5	2.14×10^4	17.31	0.11
2	1.22×10^6	2.51×10^6	2.12×10^4	19.30	11.36
3	3.54×10^5	1.78×10^6	2.08×10^4	18.78	8.36
4	2.09×10^5	1.78×10^6	4.17×10^4	18.71	7.96

表5 采用初始估计 II 基于 FRF 残差的反演结果

Table 5 Inversion result based on FRF residual under initial estimation II

工况编号	$K_{r1}/(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1})$	$K_{r2}/(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1})$	$W/(\text{N} \cdot \text{m}^6)$	基频/Hz	$\sigma/\%$
1	7.25×10^5	1.52×10^5	2.18×10^4	17.35	0.11
2	9.22×10^5	1.53×10^5	2.07×10^4	17.36	0.17
3	9.42×10^5	1.51×10^5	2.00×10^4	17.37	0.23
4	1.01×10^5	1.30×10^5	4.30×10^4	16.26	6.17

表6 采用初始估计 II 基于振动控制方程误差的反演结果

Table 6 Inversion result based on vibration control equation error under initial estimation II

工况编号	$K_{r1}/(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1})$	$K_{r2}/(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1})$	$W/(\text{N} \cdot \text{m}^6)$	基频/Hz	$\sigma/\%$
1	7.79×10^5	1.39×10^5	2.14×10^4	17.31	0.11
2	8.45×10^5	1.56×10^5	2.04×10^4	17.38	0.29
3	3.96×10^5	1.37×10^5	2.03×10^4	16.98	2.01
4	1.40×10^5	1.33×10^5	4.17×10^4	16.59	4.27

由表5、6可见,反演结果对应的基频与实测基频之间的相对偏差随测量数据受噪声影响程度的增加而增加。当采用相对准确的初始估计 II 时,基于 FRF 残差的方法在利用表1所列的前3组频率组合对应的地震响应可获得较为可靠的反演结果,即工况 5-1、5-2 和 5-3。基于振动控制方程误差的方法利用表1所列的前两组频率组合时能获得可靠的反演结果,即工况 6-1 和 6-2。这说明基于 FRF 残差的方法具有更强的鲁棒性。而工况 4-1 与

6-1 的反演结果完全相同进一步证明了当实测地震响应具有足够的精度时,修正参数的初始估计对基于振动控制方程误差方法反演结果的影响较小。值得注意的是,在工况 4-1、5-1 和 6-2 中各参数反演结果存在明显差异,但对理论基频与试验结果的相对偏差均在 1% 以内,因此有必要通过验证修正后 FEM 计算所得理论响应的功率谱密度(PSD)曲线与实测响应 PSD 曲线之间的吻合程度来判断反演结果的可靠性。

采用 Rayleigh 阻尼模拟该管道的耗能机制。取管道阻尼比为 2%，上下截止频率为 50 Hz 和 5 Hz，依据文献[19]中的公式计算该管道对应的理论质量和刚度阻尼系数分别为 1.097 和 1.14×10^{-4} 。一般地，理论阻尼系数对应的响应与实测响应之间总是存在一定偏差，由于已建立了该管道的质量和刚度矩阵，参考文献[20-21]，采用手动调整的方法，以各测点理论和实测响应峰值相吻合为目标对理论阻尼系数进行修正。最终确定图 4 所示 FEM 中各单元修正后的质量阻尼系数为 1.018，与管接头位置对应的单元 8 的修正后的刚度阻尼系数为 1.428×10^{-4} ，其他各单元修正后的刚度阻尼系数为 8.08×10^{-5} 。由阻尼修正结果可知管接头的存在使该管道阻尼分布表现出一定

的非比例特点。相对 2% 阻尼比下的理论刚度阻尼系数，管接头部位的刚度阻尼系数较大而管道阻尼系数较小。

测点 7、8、10 的理论与实测 PSD 曲线的对比示于图 8。由图 8 可见，与各工况对应的理论 PSD 曲线与实测结果在波形上基本吻合，但理论曲线峰值与实测结果之间依然存在差异。这是由大地脉动和振动台驱动油泵的振动引起的试验结构初始状态不为 0 导致。工况 4-1 对应的理论与实测结果之间吻合程度最高，说明工况 4-1 所示的反演结果是最可靠的。对应理论基频十分接近的参数组合计算所得的 PSD 曲线在幅值上存在明显差异，说明固有频率不能作为反演分析结果可靠的唯一判据，特别是在测得固有频率阶数较少的情况下。

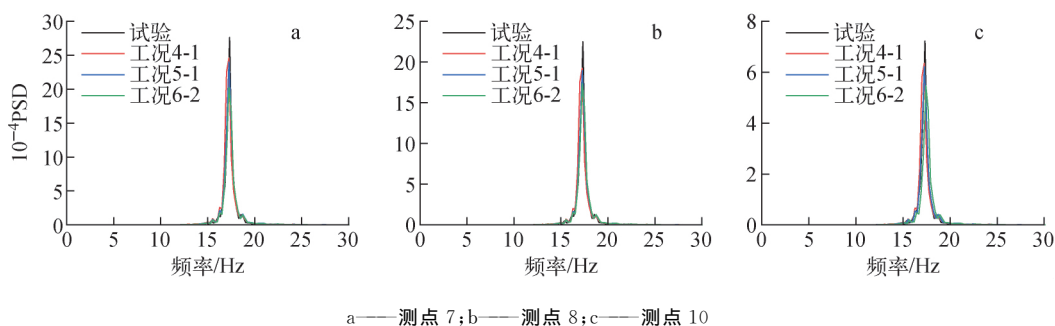


图 8 理论与实测 PSD 曲线对比

Fig. 8 Comparison of theoretical and measured PSD curves

由工况 4-1 反演结果可知管道 FEM 中左右两端线性弹簧转动刚度不同，这意味着管道在两端支架的外伸长度不一致，且固定螺母通过手工加工、手动拧紧导致支架为系统提供了不同强度的转动约束。单元 8 抗弯刚度也小于其他管单元，说明两段管件连接部位相对于其他部位相当于存在一定程度的损伤，管接头的存在并未增加该部位的刚度。

3.3 利用位移响应进行反演

Lin 等^[13]提出在基于 FRF 残差的修正方法中，当测量数据为加速度时应将加速度转换为位移完成反演过程。为研究上述两种方法采用不同类型的响应时对反演结果的影响，将表 1 所列 4 组频率对应的加速度响应在频域转换为位移对管道 FEM 中的修正参数进行反演分析。采用初始估计 I 利用两种方法对各参数

反演结果列于表 7、8，采用初始估计 II 利用两种方法对各参数的反演结果列于表 9、10。此时动刚度矩阵采用式(12)的形式。

由表 7~10 可知，采用位移响应进行反演分析时，只有对参数的初始估计足够精确才能获得可靠的反演结果。工况 9-1、9-2 和 9-3 可获得基本相同的反演结果，说明利用位移响应可提高基于 FRF 残差修正方法反演结果的稳定性。工况 9-4、10-3 和 10-4 依然无法获得可靠的反演结果，说明利用位移响应对提高修正方法的鲁棒性没有贡献。此外值得注意的是，在表 9、10 中低频数据对应反演结果的可靠性高于高频，说明利用位移响应进行反演分析降低了测量精度较高的高频响应数据对应反演结果的准确性，从而增加了两种修正方法对修正参数初始估计的依赖性。

表7 利用位移响应情况下采用初始估计 I 基于 FRF 残差的反演结果

Table 7 Inversion result based on FRF residual under initial estimation I by using displacement response

工况编号	$K_{r1}/(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1})$	$K_{r2}/(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1})$	$W/(\text{N} \cdot \text{m}^6)$	基频/Hz	$\sigma/\%$
1	1.55×10^6	1.21×10^5	2.00×10^4	17.11	1.26
2	1.93×10^6	2.01×10^6	2.00×10^4	19.23	10.96
3	1.87×10^6	2.00×10^6	2.03×10^4	19.21	10.84
4	1.00×10^5	1.68×10^6	4.37×10^4	18.04	4.09

表8 利用位移响应情况下采用初始估计 I 基于振动控制方程误差的反演结果

Table 8 Inversion result based on vibration control equation error under initial estimation I by using displacement response

工况编号	$K_{r1}/(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1})$	$K_{r2}/(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1})$	$W/(\text{N} \cdot \text{m}^6)$	基频/Hz	$\sigma/\%$
1	1.06×10^6	1.25×10^5	2.00×10^4	17.09	1.38
2	1.88×10^6	2.07×10^6	2.02×10^4	19.22	10.90
3	6.80×10^5	1.77×10^6	2.14×10^4	19.02	9.75
4	1.01×10^5	1.67×10^6	3.96×10^4	18.02	3.98

表9 利用位移响应情况下采用初始估计 II 基于 FRF 残差的反演结果

Table 9 Inversion result based on FRF residual under initial estimation II by using displacement response

工况编号	$K_{r1}/(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1})$	$K_{r2}/(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1})$	$W/(\text{N} \cdot \text{m}^6)$	基频/Hz	$\sigma/\%$
1	8.46×10^5	1.25×10^5	2.06×10^4	17.07	1.50
2	8.60×10^5	1.52×10^5	2.06×10^4	17.36	0.17
3	8.56×10^5	1.51×10^5	2.08×10^4	17.36	0.17
4	1.00×10^5	1.30×10^5	4.5×10^4	16.31	5.88

表10 利用位移响应情况下采用初始估计 II 基于振动控制方程误差的反演结果

Table 10 Inversion result based on vibration control equation error under initial estimation II by using displacement response

工况编号	$K_{r1}/(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1})$	$K_{r2}/(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1})$	$W/(\text{N} \cdot \text{m}^6)$	基频/Hz	$\sigma/\%$
1	8.52×10^5	1.23×10^5	2.15×10^4	17.07	1.50
2	9.40×10^5	1.52×10^5	2.12×10^4	17.39	0.34
3	3.54×10^5	1.05×10^5	2.01×10^4	16.53	4.61
4	1.04×10^5	1.29×10^5	4.14×10^5	16.23	6.34

4 结论

本文将地震响应与地震激励的比值定义为一种新的 FRF, 分别以 FRF 残差和管道振动控制方程误差为目标特征值, 利用模拟地震响应对某一管道系统 FEM 中的结构参数进行反演分析, 对比二者修正过程得到以下结论。

1) 基于 FRF 残差的 FEM 修正方法具有更强的鲁棒性, 而基于振动控制方程误差的

FEM 修正方法对修正参数的初始估计依赖性较低, 在合适条件下, 二者识别结果具有类似的精度。

2) 采用位移响应可提高基于 FRF 残差修正方法反演结果的稳定性, 但导致两种方法在利用受噪声影响较小的高频响应进行修正时反演结果准确性降低, 反而增加了修正过程对参数初始估计的依赖性。

3) 利用地震响应对核电管道 FEM 中的结构参数进行反演是一种简便可行且更加科学的方法,一方面避免了附加的模式提取试验和传统的 FRF 测量试验,另一方面解决了不同参数组合对应相同模式时反演结果可靠性难以评价的困难。

4) 本文方法并不限于地震响应,也可直接利用其他类型基础激励下的响应来完成核电管道中未知结构参数的反演分析。对于已安装状态的管道系统而言,可实时监测其服役过程中安装楼板位置的振动和管道在楼板激励下的响应来反演其结构参数。对于典型支撑和连接设备应建立其修正后模型的数据库,在类似系统的建模中直接使用。

核电管道在服役过程中的任何振动测量数据都有潜力作为反演其结构参数的试验数据。管道的自激振动是比较常见的,如文献[22]中提到的主蒸汽隔离阀气流诱发的管道振动,只要能构造出管道的振动控制方程,亦可按照本文方法进行修正,难点在于如何确定激励的相关信息,这将是下一步的研究方向。

参考文献:

- [1] 叶逊敏,张征明,万力. 多种影响因素下的设备易损性计算[J]. 原子能科学技术,2018,52(8): 1 453-1 458.
YE Xunmin, ZHANG Zhengming, WAN Li. Calculation of equipment fragility under various influencing factors[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2018, 52(8): 1 453-1 458(in Chinese).
- [2] 白晋华,赵树峰,谌登华,等. 运行核电厂抗震裕度评价研究[J]. 原子能科学技术,2012,46(12): 1 446-1 450.
BAI Jinhua, ZHAO Shufeng, CHEN Denghua, et al. Research on seismic margin analysis of operation nuclear power plant[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2012, 46(12): 1 446-1 450(in Chinese).
- [3] JEONG Y S, BAEK E R, JEON B G, et al. Seismic performance of emergency diesel generator for high frequency motions[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2019, 50: 1 470-1 476.
- [4] 郭勤涛,张令弥,费庆国. 结构动力学有限元模型修正的发展——模型确认[J]. 力学进展, 2006,36(1):38-44.
- GUO Qintao, ZHANG Lingmi, FEI Qingguo. From FE model updating to model validation: Advances in modeling of dynamic structures[J]. Advances in Mechanics, 2006, 36(1): 38-44(in Chinese).
- [5] 费庆国,张令弥,李爱群,等. 基于不同残差的动态有限元模型修正的比较研究[J]. 振动与冲击, 2005,24(4):24-27.
FEI Qingguo, ZHANG Lingmi, LI Aiqun, et al. Evaluation of FE model updating using four kinds of residues[J]. Journal of Vibration and Shock, 2005, 24(4): 24-27(in Chinese).
- [6] 苏忠亭,徐达,李晓伟,等. 步兵战车车体结构有限元模型修正[J]. 振动、测试与诊断,2014,34(6):1 148-1 153.
SU Zhongting, XU Da, LI Xiaowei, et al. Finite element model updating of vehicle structure of infantry combat vehicle[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2014, 34(6): 1 148-1 153(in Chinese).
- [7] 郭俊龙,马立元,李永军,等. 基于 Kriging 代理模型的结构损伤识别新方法[J]. 中国机械工程, 2016,27(9):1 203-1 207.
GUO Junlong, MA Liyuan, LI Yongjun, et al. A new structural damage identification method based on Kriging surrogate model[J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(9): 1 203-1 207 (in Chinese).
- [8] SABAMEHR A, LIM C, BAGCHI A. System identification and model updating of highway bridges using ambient vibration tests[J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2018, 8: 755-771.
- [9] POLANCO N R, MAY G, HERNANDEZ E M. Finite element model updating of semi-composite bridge decks using operational acceleration measurements[J]. Engineering Structures, 2016, 126: 264-277.
- [10] KODIKARA K A T, CHAN T H T, NGUYEN T, et al. Model updating of real structures with ambient vibration data[J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2016, 6: 329-341.
- [11] ZAPICO-VALLE J L, ALONSO-CAMBLOR R, GONZÁLEZ-MARTÍNEZ M P, et al. A new method for finite element model updating in structural dynamics[J]. Mechanical Systems and

- Signal Processing, 2010, 24(7): 2 137-2 159.
- [12] 傅奕臻,魏子天,吕中荣,等. 基于时域响应灵敏度分析的板结构损伤识别[J]. 振动与冲击, 2015,34(4):117-120.
FU Yizhen, WEI Zitian, LV Zhongrong, et al. Damage identification of a plate based on response sensitivity analysis in time domain[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(4): 117-120(in Chinese).
- [13] LIN R M, ZHU J. Finite element model updating using vibration test data under base excitation[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 303(3-5): 596-613.
- [14] 刘荣贺,于开平. 基于基础激励试验数据的卫星结构有限元模型修正[J]. 宇航学报,2013,34(9):1 187-1 194.
LIU Ronghe, YU Kaiping. Model updating for a satellite structure based on basic excitation test data[J]. Journal of Astronautics, 2013, 34(9): 1 187-1 194(in Chinese).
- [15] 王泽宇,刘闯,冯咬齐. 基于振动试验数据的有限元模型修正技术研究[J]. 航天器环境工程, 2010,27(4):472-476.
WANG Zeyu, LIU Chuang, FENG Yaoqi. Research on finite element model correction technology based on vibration test data [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2010, 27(4): 472-476 (in Chinese).
- [16] PRADHAN S, MODAK S V. A two-stage approach to updating of mass, stiffness and damping matrices[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2018, 140: 133-150.
- [17] SINHA J K, RAO A R, SINHA R K. Realistic seismic qualification using the updated finite element model for in-core components of reactors [J]. Nuclear Engineering and Design, 2006, 236(3): 232-237.
- [18] KWON K S, LIN R M. Frequency selection method for FRF-based model updating[J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 278(1-2): 285-306.
- [19] NAKAMURA N. Time history response analysis using extended Rayleigh damping model[J]. Procedia Engineering, 2017, 199: 1 472-1 477.
- [20] SIPPLE J D, SANAYEI M. Finite element model updating of the UCF grid benchmark using measured frequency response functions[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2014, 246(1): 179-190.
- [21] WANG J T, WANG C J, ZHAO J P. Frequency response function-based model updating using Kriging model[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 87: 218-228.
- [22] 徐峥,王德忠,王志敏,等. 核电站主蒸汽隔离阀气流诱发振动与噪声的数值分析[J]. 原子能科学技术,2010,44(1):48-53.
XU Zheng, WANG Dezhong, WANG Zhimin, et al. Numerical analysis for vibration and noise due to airflow of main steam isolation valve in nuclear power station[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2010, 44(1): 48-53(in Chinese).