

基于状态空间模型的管路结构损伤识别系统^{*}

吴宗辉 舒泽宇 李家璇 何建

(哈尔滨工程大学航天与建筑工程学院 哈尔滨 150001)

摘要: 为避免管路系统事故发生,对管路系统的服役情况进行实时监测,以期及时发现装置结构隐患。本研究采用状态空间模型,以某高压蒸汽管路系统为研究对象,开发了一个科学、有效的损伤识别监测系统,基于振动信号检测管路系统中的失效与故障,全面地掌握管路系统的健康状态并进行预警。研究表明,在某些特殊情况下,系统能够很快予以调研且实时的输出监测信息,测试平均响应时间 4.436 s 与损伤识别准确率 80% 分别满足设计要求的响应时间小于 20 s 以及准确率大于 70%,且由于基础理论和结构的适应性,该系统适用于各种类型的管道,并且可以针对一种或多种失效模式,具备较强的应用价值。

关键词: 管路系统;振动监测;谐波响应分析;状态空间模型;结构健康监测系统

中图分类号: TP **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 130.20

Damage identification system of pipeline structure based on state space model

Wu Zonghui Shu Zeyu Li Jiaxuan He Jian

(College of Aerospace and Civil Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: A damage identification system of pipeline structure based on state space model is proposed for avoiding accident and real-time monitoring in this paper. This scientific and effective system is based on vibration signals to detect failures and faults in piping systems and aimed to comprehensively grasp the health status of piping system and give early warning. The results show that this system can response immediately in some special case, and the average response time of 4.436 s and the damage identification accuracy rate of 80% meet the design requirements, the response time is less than 20 s and the accuracy rate is more than 70%, respectively. This system can be adopted to various kinds of pipelines and deal with one or more failure mode thanks to the adaptation of fundamental theory and structure.

Keywords: piping system; vibration monitoring; harmonic response analysis; state space model; structural health monitoring system

0 引言

在实际工程中,管路成立体交叉布置,跨越较长,施工人员密集,一旦发生管路或设备内部故障与失效,将会造成漏水、失火和爆炸等诸多恶性事故,因此在不影响设备运行和改变现场条件的情况下,对管路系统的服役情况进行实时监测与损伤预警,及时发现设备结构隐患以防止事故的发生,对提高设备的稳定性与安全性具有重要意义。

在整个管路结构健康监测技术的发展过程中,从最开始的不借助其他技术,诊断信息仅仅根据结构监测领域专

家的视觉感官与专业经验进行简单的处理与判断,到借助多类型的传感器与动态测试技术,开发出一系列信号处理与数学模型技术,对结构的健康情况进行更为客观的评价,并做出合理的维修决策。随着社会的不断发展,更多大型且复杂的结构出现,一般的技术已不能满足诊断要求,因此结构健康监测理论和技术也在持续发展,如今已经发展成为数据和知识处理相融合的智能化的发展阶段,但在我国,由于部分管道检测技术不成熟,长期以来对于管道的安全评估基本上依赖于经验判断与进行定期检查防范,针对于管路的维护还处于“发生事故后维修”、“事后防治”的被动状态。

收稿日期:2022-08-27

^{*} 基金项目:国家自然科学基金面上项目(52278297)资助

随着信息技术的发展,国外学者还将相关计算机技术引进了管道检测中;美国开发的管道 SCADA 系统(监控控制和数据采集系统)^[1]初步达到专业化和智能化水平,不仅可以进行数据收集并对设备进行监控,还可以起到信号报警等多项功能,能够自动检测管道泄漏并确定泄漏位置,为管道损伤监测带来极大便利;德国国立材料科研中心(MPA)研制出来的 ELBA 专家系统,被应用到带纵向裂纹管道中。

20 世纪 80 年代后期,我国学者对于管道检测技术的研究逐渐开始,对于漏磁检测方法,金建华等^[2]和刘志平等^[3]早在 20 世纪的 80 年代中期,便已在开始分析磁化技术检测与磁信号检测的理论;李路明等^[4]对漏磁信号的处理方法实施了归纳,且对漏磁场由于几何缺陷而产生的影响进行了深入研究;胡浪涛等^[5]对漏磁检测数据进行大容量高保真数据压缩方法进行了研究。

在管道检测系统方面,近年来我国同样进行了大量研究。林浩等^[6]基于 LabVIEW 和 C#,建立了泥浆管道系统的实时监测系统;曹建树等^[7]根据激光超声检测原理,设计了以 LabVIEW 平台为基础的燃气管道检测系统,系统的关键模块是数据采集、运动控制与数据分析等,实现了油气管道各种缺陷的快速检测目的;石明江等^[8]运用一种磁记忆检测方法,对油气输送金属管道进行监测;杨晓惠等^[9]采用一种弱磁检测方法对埋地管道的多种损伤进行监测;刘浩等^[10]基于物联网技术设计了一种管道漏失检测电路;李绍星等^[11]运用时域差值分析监测算法微小缺陷特征,有效地解决了实际管道在这一检测的过程中,微小缺陷信号会被复杂结构的特征回波淹没而有所漏检,并搭建了基于磁致伸缩超声导波的管道损伤远程监测云平台,实现了自动化、数字化、智能化的管线在线监测;张虹蕾^[12]编制开发了 SPAMMS 系统,即一种新型的低成本、有较大的扩展性、可定制的传感器系统,它将 RFID 系统与移动传感器和机器人结合在一起,并且对其进行了相关的维护工作。诸多学者^[13-15]也对管道监测系统进行了研究,但先前研究结果的自动化程度不高,且检测系统的普适性较低。

本文以管道系统状态空间模型为基础,开发科学、有效的管系结构损伤识别系统,实时检测管道中的失效,全面地掌握管道的健康状态,在某些特殊情况下,系统可以迅速进行调研且实时的进行信息的监测;系统实现结构在突发情况下发现这些信息并且加以识别,提出相关的维修决策和维修报告,为管理策略与维护运营等提供了一定的理论。此外,由于基础理论和结构的适应性,它适用于各种类型的管道,并且可以针对一种或多种失效模式,具备较强的科学和现实意义。

1 数值模型

1.1 试验模型

本研究中的试验模型为某高压蒸汽管路系统缩比模

型,其构成为管道、弹簧支架、阀门以及模拟管段设备的钢盒,5 个弹簧支架的安装位置如图 1 所示。

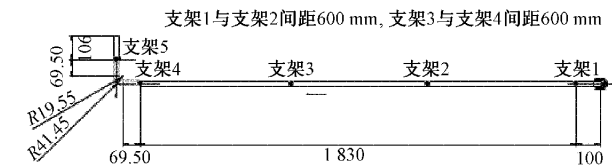


图1 管道系统支架位置

管路系统的几何参数如表 1 所示。管路及设备材料选用 304 不锈钢,阀门选用 Q235 钢,其物理性能如表 2 所示。

表1 管路系统几何物理参数/m

整体模型尺寸	管路外径	管路内径
$2.174 \times 0.448 \times 0.401$	0.022	0.016

表2 管路系统材料参数

材料名称	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比
304 不锈钢	7 930	193	0.3
Q235	7 850	210	0.3

使用 ABAQUS 软件进行管路系统模型的建立,装配后的模型如图 2 所示。为确保有限元模型的合理性与模态参数的准确性,还需要运用实验模态分析的方法,进行管路系统的振动测试与模态参数识别,并将测得的结果与有限元分析的结果进行对比,结果如图 3 所示。

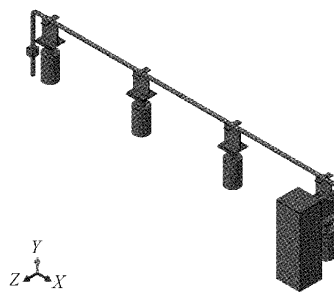


图2 管路系统有限元模型

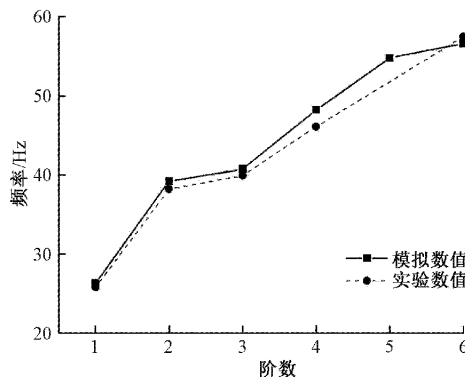


图3 管路系统各阶模态模拟数值与实验数值对比

由图 3 可得,计算所得的管路系统各阶模态中,除第五阶模态无法识别被遗漏外,其余几阶模态均能在实验模态分析结果中找到相对应的模态,且对应值相比误差较小,最大百分比误差不超过 5%,说明该有限元模型已经能够较准确地反映出管路系统的实际状态。

1.2 状态空间模型

状态空间模型是一种建立不可观测变量、系统内状态两者之间存在的客观关系的一类模型,针对不同状态向量给予一定的估计,继而实现相应结果,由于本文研究的是管道系统的振动特性,管道系统属于多自由度机械系统,它必然会出现一些阻尼因素,例如结构阻尼、粘性阻尼等,把各个种类的阻尼变成等效粘性阻尼,对于有阻尼的多自由度系统,根据振动理论,其振动方程为:

$$\begin{cases} \mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{B}\mathbf{u} & \mathbf{x} \in \mathbf{R}^n \\ \mathbf{Y}_e = \mathbf{C}_d\mathbf{x} + \mathbf{C}_v\dot{\mathbf{x}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{x}$ 为位移矢量, $\mathbf{u}$ 为外部输入向量, $\mathbf{Y}_e$ 为节点输出向量, $\mathbf{M}$ 为质量矩阵, $\mathbf{D}$ 为阻尼矩阵, $\mathbf{K}$ 为刚度矩阵, $\mathbf{C}_d$ 为输出速度矩阵, $\mathbf{C}_v$ 为输出位移矩阵。由于文中的系统状态矩阵由每个模态的固有频率值和阻尼值组成,因此需做式(2)处理:

$$\begin{cases} \ddot{\boldsymbol{\eta}} + 2\Delta\dot{\boldsymbol{\eta}} + \Omega^2\boldsymbol{\eta} = \mathbf{B}_m\mathbf{u}(t) \\ \mathbf{Y}_e = \mathbf{C}_{md}\boldsymbol{\eta} + \mathbf{C}_{mv}\dot{\boldsymbol{\eta}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\boldsymbol{\eta} = \Phi\mathbf{q}$, Φ 为模态矩阵, Ω 为模态固有频率的对角矩阵, Δ 为模态阻尼矩阵; $\mathbf{B}_m$ 为模态输入矩阵, $\mathbf{C}_{md}$ 为输出模态位移矩阵; $\mathbf{C}_{mv}$ 为输出模态速度矩阵。

对于输出矩阵“C”,当其设定为基于管道系统加速度输出,且考虑系统为线性时不变系统,将上述方程进行处理后得到了参数为 $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$, $\mathbf{C}$, $\mathbf{D}$ 的扩展状态空间模型,结构的扩展状态空间表示为点力作为输入,点加速度作为输出,如式(3)所示:

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\Omega^2 & -2\Delta\Omega \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{B}_m \end{bmatrix} \mathbf{u} \quad (3)$$

$$\mathbf{Y}_s = [-\mathbf{C}_{md}\Omega^2 - 2\mathbf{C}_{md}\Delta\Omega] \mathbf{x} + \mathbf{C}_{md}\mathbf{B}_m \mathbf{u}$$

式中: Ω 为模态固有频率的对角矩阵, Δ 为模态阻尼矩阵; $\mathbf{B}_m$ 为模态输入矩阵; $\mathbf{C}_{md}$ 为输出模态加速度矩阵。

经过上述的推导过程,首先建立状态空间系统矩阵“ $\mathbf{A}$ ”,由于模态方程是从已知的状态空间方程出发的,因此可以自动建立状态空间方程。系统矩阵的组成部分包括各模态的特征值与阻尼项,各模态是沿对角线方向的 2×2 子矩阵。

当设置输入矩阵“ $\mathbf{B}$ ”时,本文的输入激励为力的形式,通过对模态矩阵的转置进行预乘,来获得主坐标中的力矢量。由于输出矩阵与状态矩阵的行数需要一致,因此力的状态空间形式主坐标中的矢量是用 0 填充的力坐标,以生成与状态矩阵行数相同的矩阵。因此状态方程的表达式如式(4)所示。

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & \cdots & \cdots \\ -\Omega_1^2 & -2\Delta_1\Omega_1 & 0 & 0 & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & -\Omega_1^2 & -2\Delta_1\Omega_1 & \cdots & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ F1 \\ 0 \\ F2 \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} \mathbf{u} \quad (4)$$

对于输出矩阵 $\mathbf{C}$,将其设定为基于管道系统加速度与位移输出构建,加速度输出可以预先乘以适当的模态矩阵,以产生物理坐标中的加速度矢量。位移输出能够预先乘以适宜的模态矩阵,以形成物理坐标中的位移矢量。

直连矩阵 $\mathbf{D}$ 是直接用来进行传送的矩阵,因为通常较少有输入量直接传输到相关的输出端,因此 $\mathbf{D}$ 阵近似于零阵。

为验证基于状态空间模型的结构响应估计方法是可行和有效的,利用 1.1 节所建立的管道系统有限元模型计算管道系统的实际响应,并与模型估计响应计算结果进行对比,实际响应与模型计算响应对比结果如表 3 与 4 所示。

表 3 实际响应与模型计算加速度响应对比结果

响应类型	阶数	频率/ Hz	实际响应/ (10^5 mm/s^2)	模型响应/ (10^5 mm/s^2)	误差/ %
Y 方向 加速度	1	26.30	1.221	1.254	-2.70
	2	39.33	0.123	0.119	3.25
	3	48.47	0.212	0.221	-4.25
	4	56.76	0.422	0.420	0.47
	5	67.36	0.053	0.048	9.43
Z 方向 加速度	1	26.30	0.572	0.554	3.15
	2	39.33	0.317	0.306	3.47
	3	48.47	-0.200	-0.208	4.00
	4	56.76	-0.328	-0.317	-3.35
	5	67.36	-0.150	-0.147	-2.00

表 4 实际响应与模型计算位移响应对比结果

响应类型	阶数	频率/ Hz	实际响应/ mm	模型响应/ mm	误差/ %
Y 方向位移	1	26.30	4.456 64	4.384 91	1.61

结果表明,管道系统实际响应与模型计算响应结果吻合较好,除 Y 方向第 5 阶加速度响应外,百分比误差均低于 5%,证明了该模型对管道系统加速度、位移响应预测的准确性。

2 损伤识别系统

2.1 整体方案

管系结构损伤识别系统预期实现的功能为:先自动读取振动信息,然后提取信息特征值,对信息进行自动区分,根据损伤的结构安全判断准则进行安全判定,然后根据程序判定结果进行绿/黄/红三级预警,系统分析产生的预警文件也会实时传送至指定邮箱,实现用户在

远程移动设备上可直接查看预警信息及具体的异常数据,并在判定损伤后根据损伤情况进行反馈并确定维修措施。

针对系统的研究目标,首先对系统进行了方案设计,根据监测系统的各部分功能上的不同,软件系统可划分为8个子系统:数据采集系统、数据传输系统、数据分析系统、损伤诊断系统、损伤预警系统、健康管理系统、信息管理系统和数据存储系统。系统整体设计如图4所示。

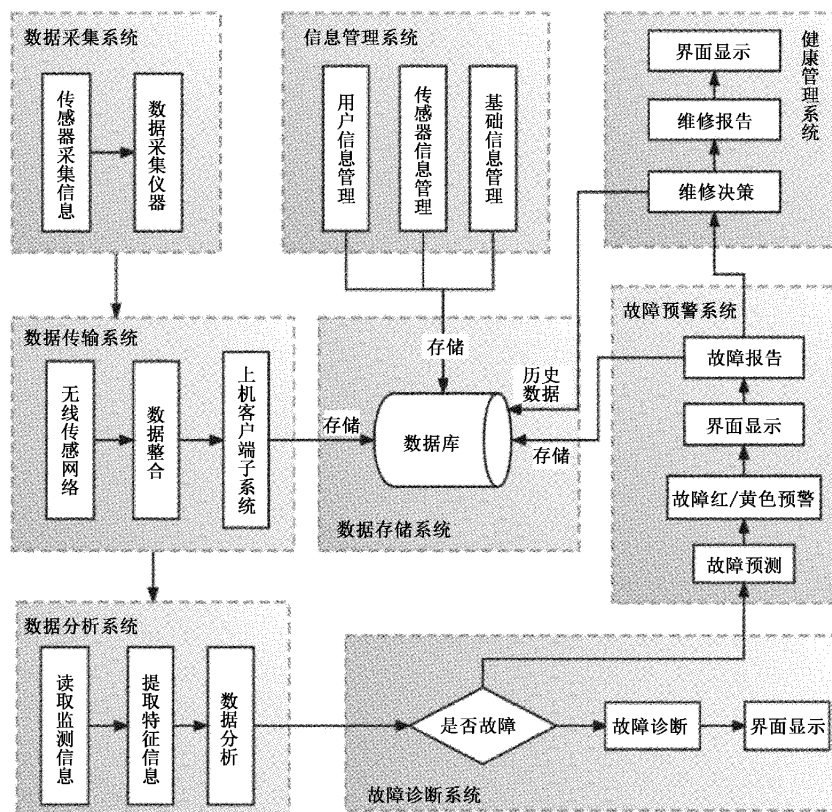


图4 系统整体设计

1) 数据采集系统

管道的振动信号采用加速度传感器和动态信号分析软件来进行采集,将加速度传感器进行集中布置,加速度传感器的型号及参数可在信息管理系统中输入。

数据采集系统的功能是在给定的时间间隔内自动保存仪器读取的数据,并将数据存放至指定文件夹。若在时间间隔外读取数据,则实时显示数据,同时将数据存放至指定文件夹。

2) 数据传输系统

数据传输系统的功能包括监测信息的传输和预警信息的传输。它主要实现3个方向的数据传输:(1)通过网络将监测信号传输至监测系统软件工作目录下,监测系统软件分析模块接收到信号后,会对信号进行读取与分析,若结构中存在损伤,则会产生预警信息;(2)将所有的监测信息和预警信息传输至MySQL数据库,监测软件会

自动连接MySQL数据库,分析模块完成分析后,监测信息与预警信息会自动传输至数据库中备份,为健康管理系统的维修决策提供支持;(3)将预警信息传输至指定邮箱内,由分析模块产生的预警信息会被传输至指定邮箱中,此部分的输出意在支持用户在远程移动通信设备中直接读取预警文件,提高预警信息读取的即时性与便捷性。

3) 数据分析系统

数据分析系统的功能为:将接受到的数据进行区分,并分别提取激振力输入数据及加速度传感器输出数据,将提取出的激振力输入数据导入建立好的状态空间模型中,得到输出加速度数据与位移数据,将状态空间模型加速度输出数据与实测加速度传感器输出数据进行对比,将状态空间模型位移输出数据与最大允许位移值进行对比,并将对比结果发送至损伤诊断系统。

4) 损伤诊断系统

损伤诊断系统的功能是对数据分析系统传递的对比结果进行判定,若对比结果在安全许可范围内,则将“结构安全”的信息传递给预警系统,若对比结果超出安全许可范围,则分别将相应的损伤信号传递给损伤预警系统。

5) 损伤预警系统

损伤预警系统的功能为对损伤的情况进行输出并显示在系统界面中。若损伤诊断系统传递的信息为“结构安全”,则显示绿色信号,表示结构安全;若信息为管道系统加速度数值异常,则判断数据波动是否超过安全极限值,若超过安全限值,则进行红色预警,否则,进行黄色预警,预警窗口显示文件名与加速度-频率曲线对比图。在进行损伤预警后,将所有预警报告发送至数据存储系统,作为后续管道健康管理的依据。

6) 健康管理系统

健康管理系统的功能是对损伤预警系统提供的信息做出反馈:如果伤害报告为黄色警告,则将从数据库中获取损坏报告和损坏维护报告的历史数据,并将信息发送给管理人员,管理者将分析数据,找出安全隐患,进行损坏调查和维护,绘制维护报告,存储在数据库中。如果损坏报告为红色警告,将从数据库中获取损坏报告和损坏维护报告的历史数据,并将信息发送给管理人员,管理层将立即进行安全检查,进行结构维护或更换,绘制维护报告,将其存储在数据库中。

7) 信息管理系统

信息管理系统的功能主要分为两部分:第 1 部分是管理用户信息,为参与管道系统监测与维修的工作人员提供信息读取权限,实现登陆用户名和密码的添加、修改和删除功能;系统管理员可以对其他角色用户进行管理,并可对其他角色用户的权限进行操作。而其他角色只能在分配的权限内进行操作。如图 5 所示。第 2 部分是管理各监测对象传感器信息,可以达成传感器信息的增删改等功能,可以输入传感器相应参数,管理各构件信息。

权限	操作	系统管理员	设施员	监测员	专家
用户/角色/部门管理	查询/添加/修改/删除	√			
结构信息/传感器信息	查询/添加/修改/删除		√		
传感器监测信息	查询			√	√
预警信息	查询			√	√
故障维修决策	添加				√
历史数据	查询			√	
结构健康评估	查询			√	√

图 5 用户权限管理

8) 数据存储系统

数据存储系统的功能是存储数据采集系统、损伤预警系统和信息管理系统产生的各类型数据信息,并能够为健

康管理系统提供损伤维修报告历史数据,为健康管理系统的维修决策提供支持。系统后台采用数据库来保存监测数据,采用数据库可以实现数据共享、实现集中数据控制以减少数据冗余,方便数据的存储和读取,且能确保数据的稳定性与可靠性。此项目中,主要是通过 MySQL 数据库来完成的。

2.2 系统界面

良好的界面和简单的操作方法是系统高效、便捷使用的基础。本研究所设计的管系结构健康监测系统具有良好的人机交互页面,工作职员能够在屏幕提示和系统支持下快速的了解到系统的功能和组成,而且可以轻松、直观、简要的查看这些数据库,如对数据可记录的增删查改等。还可以完成对于结构的分析计算、图形生成、报告生成等功能,为管路系统的检测维修工作提供了很大的便利。

正式进入管系结构健康监测系统的登陆页面,具体可以参考图 6,在登陆页面中录入用户名和密码等信息即可进入分析界面。



图 6 结构健康监测系统登陆界面

登陆后的结构健康监测系统初始界面如图 7 所示,其研究页面详细涵盖 3 个功能模块:设置模块、操作模块和信息查看模块。

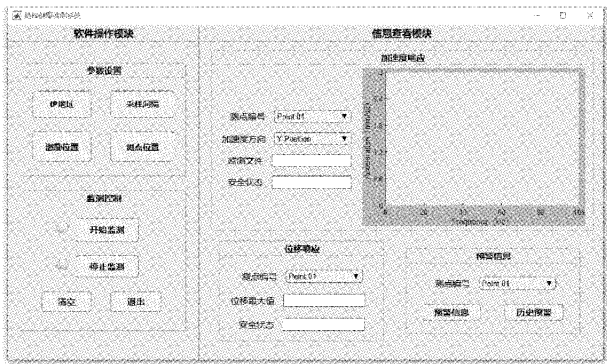


图 7 结构健康监测系统初始界面

3 系统可行性验证

为验证本监测系统的可行性和可靠性,本研究基于管

道系统实体模型进行了实验测试,测试的目的主要是在进行整体系统运行时,各模块运行正常,能完整地对实时在线监测数据同时进行数据读取、分析、判别、预警与储存,并且能够满足各项技术指标的要求。

实验中以所研究的管道系统为研究对象搭建的实验模型如图8所示,为高压蒸汽管道系统的缩比模型,由管端设备(模拟管端设备的钢盒)、管道、阀门(模拟阀门的立方体)、弹簧支架4部分组成。同时考虑采集仪器通道,选取7个测点。

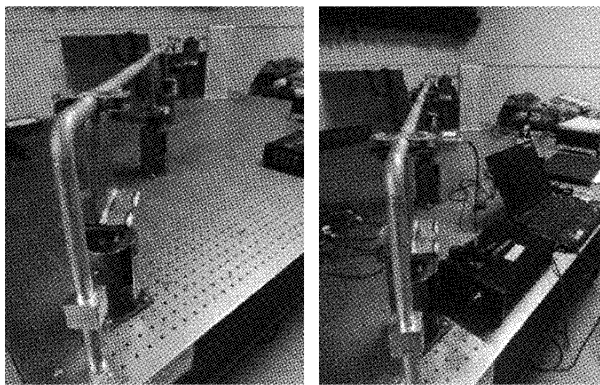


图8 实验模型

本次测试大致分为两部分,分别为系统功能模块测试与系统技术指标测试。失效工况选为支座2失效的情况,采集100组支座2失效时的管道振动监测信息作为损伤识别的数据基础,进行系统对于管道系统失效监测的准确性判断。

系统功能模块测试指依次对系统功能模块、数据传输模块、数据存储模块进行测试,测试流程如表5所示。

表5 测试流程

测试顺序	测试模块	测试内容
1	系统功能模块	1)各功能按钮的使用 2)实时监测与损伤预警
2	数据传输模块	1)监测数据传输至系统 2)预警信息及监测信息传输到数据库 3)预警信息传输至指定邮箱内
3	数据存储模块	1)监测信息、预警信息在数据库中的存储与调用

技术指标测试主要依照以下两点技术指标进行:

1)在对装置中结构关键部位振动响应进行实时监测时,响应时间一般不超过30s;在考虑装置在实际运行中发生多重事故的可能时,通过对多重事故进行测试,得出为保证多重事故测试中装置整体的效率,单一模块在进行实时监测时响应时间应在25s以内。因此本次测试取20s为上限。

2)当结构的平均损伤概率大于70%时,有理由推测结构发生了损伤。为了与之相匹配,关键装置结构的安全评估程序在对管系结构损伤进行判别时,判别的准确率不得小于70%。

3.1 整体方案

1)系统功能模块

点击界面中的开始检测按钮,绿灯亮起,开启监测功能,监测软件会一次性读取工作目录下所有的监测信号,然后对信号进行分析和判定,最后将结果显示在信息查看模块中。当分析模块产生黄色或红色预警时,除在软件界面进行黄/红色预警外,程序还会生成警示窗口,提示用户管道振动监测模块产生了异常预警,在支座2失效的情况下,显示效果如图9所示。警示窗口不会影响监测软件的运行,警示窗口互相之间也不会相冲突,界面可同时显示多个警示窗口。

第2部分为位移响应失效结果查看,首先选择测点编号,在“位移响应”的显示框后显示该测点监测到的位移响应最大值,若数值超过安全极限值,则进行红色预警。显示效果如图9。

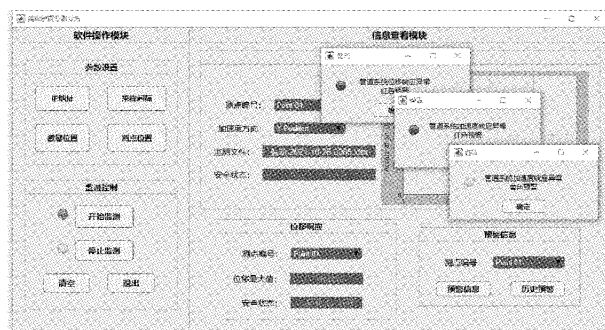


图9 结构健康监测系统异常预警界面

2)数据传输模块

数据传输模块主要实现3个方向的数据传输:(1)通过网络将监测信号传输至原理样机监测软件工作目录下;(2)将所有的监测信息和预警信息传输至MySQL数据库;(3)将预警信息传输至指定邮箱内。

系统测试过程中,对监测数据进行了损伤判定,并将损伤预警结果保存在了历史预警的表格中,因此可证明数据传输模块实现了传输路线1中的数据传输。

MySQL数据库中将振动监测信息进行了汇总,证明振动监测信息成功由传输路线2存储到了MySQL数据库中。

手机用户端接收到预警信息时会收到消息提示,证明数据存储模块实现了传输路径3的数据传输。因此,数据传输模块最终满足数据传输的测试要求。

3)数据存储模块

本系统中数据的存储采用MySQL数据库进行。数据存储模块包括监测信息的存储和预警信息的存储,如图10

所示,图中实框线部分为 MySQL 数据库中建立的数据库名称列表,在本次项目测试中,将管道系统的振动监测信号和数据分析模块产生数据存储在数据库 program_one 中,将各监测模块对应产生的预警信息存储在数据库 program_two 中。

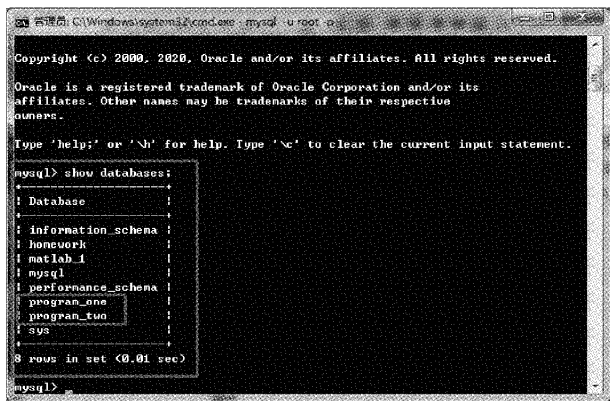


图 10 MySQL 客户端数据库列表显示

图 11 损伤判别监测信息图

3.2 技术指标测试结果

1) 振动监测响应时间

管系结构健康在线监测系统可对管系关键部位的振动响应进行实时监测,响应时间小于 20 s。利用计时器对管道振动监测模块进行计时,对管道振动监测模块的响应时间进行测试,共 10 个测试组,每组各进行 10 次测试,每组的平均值如表 6 所示,10 组测试的响应时间平均值为 4.436 s。

表 6 振动监测响应时间测试值

测试组编号	1	2	3	4	5	6
响应时间/s	4.76	4.44	3.88	4.18	4.04	4.80
测试组编号	7	8	9	10	平均值	
响应时间/s	4.16	4.65	4.56	4.99	4.436	

这表明,整个管道振动监测判定过程:管道振动模块接收到振动监测信号→分析模块进行损伤特征提取和损伤判定→分析判定结果显示在原理样机软件界面中→振动监测信号和预警信息保存至 MySQL 数据库共耗时 4.436 s,满足技术指标中响应时间小于 20 s 的要求。

2) 安全评估程序损伤判别准确率

管系结构健康在线监测系统可实现对管系结构损伤的判别,且判别准确率需要大于 70%。

如图 11 所示,选取某段时刻采集的 100 组支座 2 失效时的管道振动监测信息(图中 ID 编号 1 297~1 396)进行损伤判别。如图 12 所示,从数据库中获取其中的预警信息,准确预警的共 77 组,损伤判别准确率为 77%。

对支座损伤位置判别准确率进行测试,共 10 个测试组,每组各进行 10 次测试,每组的平均值如表 7 所示,测试

图 12 振动监测预警信息

的准确率平均值为 80%,满足技术指标判别准确率大于 70%的要求。

表 7 支座 2 损伤识别准确率测试值

测试组编号	1	2	3	4	5	6
准确率/%	76	77	80	81	77	86
测试组编号	7	8	9	10	平均值	
准确率/%	73	75	82	89	80	

4 结 论

本文以状态空间模型为理论基础,为管路系统的缺陷检测提供了一个实用的,用户友好的,低维护和低成本的系统,可以实时检测管道中的失效,并全面地掌握管道的健康状态,节省了时间和成本。且由于基础理论和结构的适应性,它适用于各种类型的管道,并且可以针对一种或多种失效模式,具备较强的科学和现实意义。

本研究所开发的管系结构健康监测系统主要的工作集中在故障诊断上,后续可在软件的基础之上开发可靠性评估、疲劳寿命计算、管路系统退化趋势预测等功能,可以建立更加完善的监测体系,为设备安全运行提供更好的保障。

参考文献

- [1] 田洪波,姜波,武建宏. SCADA 系统在长输管道的应用和发展[J]. 石油化工自动化, 2008, DOI: 10.3969/j.issn.1007-7324.2008.04.003.
- [2] 金建华,康宜华,杨叔子. 漏磁场法测量油管壁厚的研究[J]. 仪器仪表学报, 2001, DOI: 10.3321/j.issn:0254-3087.2001.05.008.
- [3] 刘志平,康宜华,杨叔子. 储罐罐底板漏磁检测仪的研制[J]. 无损检测, 2003, DOI: 10.3969/j.issn.1000-6656.2003.05.003.
- [4] 李路明,黄松岭,李振星. 铸铁件的漏磁检测方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002, DOI: 10.3321/j.issn:1000-0054.2002.04.013.
- [5] 胡浪涛,何辅云,沈兆鑫. 油气管道高速漏磁检测系统中数据压缩研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2009, 32(3): 320-323.
- [6] 林浩,钟卫华,倪福生. 基于 LabVIEW 和 C# 的泥泵输送管道监测系统[J]. 机械与电子, 2020, 38(2): 41-44.
- [7] 曹建树,钟君,李家政. 基于 LabVIEW 的激光超声管道检测系统[J]. 中国测试, 2017, 43(10): 80-85.
- [8] 石明江,陈瑞,冯林. 基于磁记忆的金属管道缺陷检测方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(1): 44-53.
- [9] 杨晓惠,蒲海峰,陈龙. 基于扩展磁荷模型的埋地管道弱磁检测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(5): 218-226.
- [10] 刘浩,谭亮,程晶晶. 一种基于物联网技术的管道漏失检测电路设计[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(5): 94-98.
- [11] 李绍星,唐志峰,吕福在. 基于超声导波的管道损伤监测云系统[J]. 无损检测, 2018, 40(12): 37-41,46.
- [12] 张虹蕾. 基于传感器的管道自主监控与维护系统[J]. 水利技术监督, 2021, DOI: 10.3969/j.issn.1008-1305.2021.10.011.
- [13] 许滨华,何宁,何斌. 基于分布式光纤传感器的管道受弯变形监测试验研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(8): 20-30.
- [14] 李健,陈世利,黄新敬. 长输油气管道泄漏监测与准实时检测技术综述[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(8): 1747-1760.
- [15] 何婷婷,冯翠宁,韩雪艳. 脉冲涡流技术在保温层下管道腐蚀检测的应用研究[J]. 全面腐蚀控制, 2022, 36(9): 118-123,127.

作者简介

吴宗辉,博士研究生,主要研究方向为结构可靠性、机器学习。

E-mail:wuzonghuib@hrbeu.edu.cn

舒泽宇,博士研究生,主要研究方向为结构健康监测、损伤探测。

E-mail:shuzeyu1994@hrbeu.edu.cn

李家璇,硕士,主要研究方向为结构健康检测。

E-mail:lijiaxuan172@163.com

何建(通信作者),博士,教授,主要研究方向为结构灾害响应、健康监测等。

E-mail: hejian@hrbeu.edu.cn