

浅谈基于振弦监测技术在供热管线关键位置健康监测系统的设计和应用

赵卓远

(北京北燃特种设备检验检测有限公司, 北京 100000)

【摘要】设计并开发一套基于振弦监测技术的供热管线关键位置监测系统,该系统由硬件和软件组成,其单元构成如下:信息采集单元、信息处理单元、信息存储单元、信息显示单元、信息导出接口单元和远程传输单元(选配)等,其中选配了应力应变采集传感器、温度采集传感器和振弦和温度采集模块。该系统成功应用到5条供热管道上面,监测了供热管线供热期间应力应变和温度变化数据,为管线管理提供了有力的数据参考。

【关键词】振弦传感器;应力应变;监测技术

引言

压力管道在工作过程中,由于温度、压力、流体产生的振动等诸多因素,其金属结构易产生裂纹。裂纹的萌生和扩展,降低了金属结构的受力抗性和整机的完整性,极大地影响了管道的安全运行,同时也给重大事故的发生埋下了隐患。

管道结构关键部位应力状态监测可以实时掌握管道在规定工况或机构动作中的局部应力分布状态以及长周期内的变化情况。通过对管道结构关键部位的应力及温度监测可以测定关键受力部位和较大应力点应力状况,不仅可以确定其在指定工况和动态工况等状况下的结构承载能力,计算实际安全系数,验证设计计算结果的正确性、也可以为通过实时应力谱的采集采用雨流计数法计算其测点部位的疲劳寿命。

供热管道有如下的特点,供热介质为高温高压的热水,管道长期处于高温高压的工作状态;供热管道输送介质为水,水在常温下具有较低的粘度、较高的热导率,在高温高压下,容易使管道变形、产生泄漏等;供热管道材质为钢管,钢管具有较高的强度、施工方便、热损失小、使用寿命长等优点,可以适应不同的工作压力和输送介质;供热管道在输送过程中会产生大量热量,因此保温性能是非常重要的。高品质的供热管道应具有较低的导热系数和较好的隔热性能,能够有效减少热损失。供热管道系统是一项涉及人民群众生命财产安全的工程,因此其安全性也是非常重要的。

一、总体设计

基于振弦监测技术的供热管线关键位置健康监测系统由硬件和软件组成,其构成如下:传感器模块、采集单元(模块)、信息存储单元、信息显示单元、信息导出接口单元和远程传输单元(选配)等。基于

振弦监测技术的供热管线关键位置健康监测系统拓补图,如图1所示。

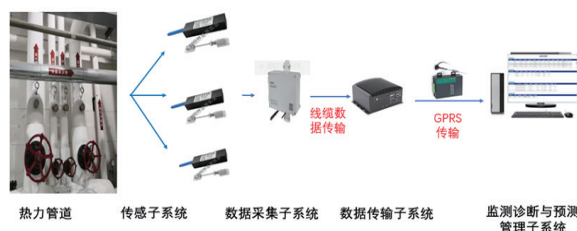


图1 基于振弦监测技术的供热管线关键位置健康监测系统拓补图

基于振弦监测技术的供热管线关键位置健康监测系统主要由温度监测和应力应变监测两部分组成。在设备电气室中,配备健康监测主机,用于对已安装传感器现场管道健康状态进行数据采集、存储、报警等操作。

二、健康监测系统硬件设计

(一) 传感器选取

选取点焊应变计,该由应变计、点焊安装基片、观测电缆等组成。点焊应变计电路采用耐高温电缆线,有效提高了点焊应变计抗机械磨损、抗干扰、防雷击、耐高温的能力。

(二) 传感器工作原理

当被测结构物发生变形时,将带动点焊应变计产生变形,变形通过前、后端座传递给振弦转变成振弦应力的变化,从而改变振弦的振动频率。电磁线圈激励振弦并测量其振动频率,频率信号经电缆传输至读数装置,即可测出被测结构物变形的应变值,同时可同步测出布设点的温度值。

(三) 计算方法

1. 当外界温度恒定表面应变计仅受到轴向变形

时, 其应变变量 ε 与输出的频率模数 ΔF 具有如下线性关系:

$$\varepsilon = k \times \Delta F$$

$$\Delta F = F - F_0$$

式中: ε —点焊应变计的测量值, 单位为 10^{-6} ;

k —点焊应变计的测量灵敏度, 单位为 $10^{-6}/F$;

ΔF —点焊应变计实时测量值相对于基准值的变化量, 单位为 F ;

F —点焊应变计的实时测量值, 单位为 F ;

F_0 —点焊应变计的基准值, 单位为 F 。

2. 当点焊应变计不受外力作用时 (点焊应变计两端标距不变), 而温度增加 ΔT 时, 表面应变计有一个输出量 $\Delta F'$, 这个输出量仅仅是由温度变化而造成的, 因此在计算时应给以扣除。实验可知 $\Delta F'$ 与 ΔT 具有如下线性关系:

$$\varepsilon' = k \times \Delta F' + b \times \Delta T = 0$$

$$k \Delta F' = -b \times \Delta T$$

$$\Delta T = T - T_0$$

式中: b —表面应变计的温度修正系数, 单位为 $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$;

ΔT —温度实时测量值相对于基准值的变化量, 单位为 $^{\circ}\text{C}$;

T —温度的实时测量值, 单位为 $^{\circ}\text{C}$;

T_0 —温度的基准值, 单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。

3. 布设在管道结构物或其它结构物表面的点焊应变计, 受到的是变形和温度的双重作用, 此时的温度修正系数应为点焊应变计的温度修正系数与结构物的线膨胀系数之差, 因此表面应变计一般计算公式为:

$$\varepsilon_m = k \times \Delta F + b' \times \Delta T = k \times (F - F_0) + (b - \alpha) \times (T - T_0)$$

式中: ε_m —被测结构物的应变变量, 单位为 10^{-6}

α —被测结构物的线膨胀系数, 单位为 $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。

热力管道的线膨胀系数通常取值为: $\alpha \approx 12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。

4. 点焊应变计的工程值乘以被测结构物的弹性模量得出被测物的应力值。 $\sigma = [k \times (F - F_0) + (b - \alpha) \times (T - T_0)] \times E$

式中: σ —被测结构物的应力值, 单位为 MPa ;

E —被测结构物的弹性模量, 单位为 MPa 。

三、软件系统设计

系统采用 .NET 为开发平台, 通过标准工业协议和以太网建立通讯, 采用当前流行的界面。系统平台包括基础平台、应用系统与数据库三大部分。将所有监测数据传输至远程云计算中心, 远程云计算中心

可将海量监测数据进行整理计算分析, 并将分析结果以云平台的形式展现给用户, 云平台的功能有人性化登入界面、系统预报警、监测数据历史曲线查看、监测列表数据及报表导出、和监测日报及自动导出推送等功能。

四、监测数据分析

(一) 监测时间

数据分析基于统计监测周期为 2023 年 2 月 19 日 -2 月 28 日的数据 (供热关键期间, 天气较冷)。

(二) 应变监测数据分析

本监测周期内, 对每天监测数据取最大、最小值, 采集间隔为 30min, 以评估管道稳定运行情况。根据监测数据统计显示, 监测周期内管线 1.1 监测位置应变最大值是 $-59.70 \mu\varepsilon$, 最小值 $-88.84 \mu\varepsilon$; 管线 1.3 监测位置应变最大值 $-52.68 \mu\varepsilon$, 最小值 $-83.82 \mu\varepsilon$; 管线 1.4 监测位置应变最大值是 $-44.95 \mu\varepsilon$, 最小值 $-80.62 \mu\varepsilon$; 管线 1.5 监测位置应变最大值 $-43.00 \mu\varepsilon$, 最小值 $-76.86 \mu\varepsilon$; 管线 1.6 监测位置应变最大值 $-20.69 \mu\varepsilon$, 最小值 $-81.74 \mu\varepsilon$ 。

由于热力管道在项目施工期间无法停运, 本项目中相关传感器是在管道运行状态下进行的安装, 监测数据表征的是管道应力、温度的波动情况。考虑管道运行初始应力, 结合 22C1023-QQ01《北辰时代蒸汽管线超标缺陷合于使用评价报告》中有限元分析结果, 以缺陷所在位置轴向拉力作为管道在稳定运行工况下的测点的轴向拉力初始值, 以此为基准点对管道监测位置轴向拉应力进行分析计算。管线材质为 20# 钢, 其弹性模量参考 22C1023-QQ01《北辰时代蒸汽管线超标缺陷合于使用评价报告》材料性能参量取值表。测点位置轴向拉力、初始轴向应力值见表 1。

综合考虑监测位置管道轴向应力初始值、管道应力波动监测数据, 对监测周期内每天监测数据取最大值、最小值, 以评估管道稳定运行情况。分析结果显示, 管线 1.1 监测位置轴向应力最大值为 -3.65 MPa , 最小值为 -9.13 MPa ; 管线 1.3 监测位置轴向应力最大值为 -4.23 MPa , 最小值为 -10.15 MPa ; 管线 1.4 监测位置轴向应力值最大为 -2.76 MPa , 最小值为 -9.54 MPa ; 管线 1.5 监测位置轴向应力最大值为 -4.65 MPa , 最小值为 -11.08 MPa ; 管线 1.6 监测位置轴向应力最大值为 2.64 MPa , 最小值为 -8.96 MPa 。

(三) 温度监测数据分析

本监测周期内, 对每天监测数据取最大、最小值, 采集间隔为 30min, 以评估管道稳定运行情况。根据

表 1 测点位置管线内力取值

管线编号	缺陷编号	测点编号	弹性模量 E (MPa)	轴向拉力 F (N)	初始轴向应力值 (MPa)	轴向设计应力 (MPa)
1.1	#- 1	101	1.88E5	38093	7.57	17.8
1.3	#-6	102	1.90E5	20173	5.78	16.45
1.4	#-8	103	1.90E5	2884	3.45	11.08
1.5	#- 10	104	1.90E5	2945	3.52	11.08
1.6	#- 13	105	1.90E5	30926	6.57	19.10

表 2 温度 (°C) 监测数据统计

测点	测点 401		测点 403		测点 404		测点 405		测点 406	
日期	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值
2月19日	169.0	168.0	120.6	119.2	103.6	102	108.1	107.2	116.3	114.8
2月20日	168.1	167.1	121.1	119.7	104.1	102.5	109.4	108.5	115.6	114.1
2月21日	169.3	168.3	121.2	118.8	104.4	102.4	109.5	108.9	116	113.3
2月22日	168.6	167.6	121.5	118.9	105.2	103.3	109.8	108.0	116.5	113.9
2月23日	169.7	168.7	121.3	119.1	103.3	101.4	109.8	108.3	116.4	114.3
2月24日	168.4	168.4	121.6	119.9	104.9	102.5	109.8	108.6	116.3	113.5
2月25日	169.2	166.8	121.3	117.9	105.1	101.2	109.7	107.6	116.2	113.3
2月26日	169.3	166.2	121.2	117.8	105.1	101.4	109.5	107.8	116.3	113.1
2月27日	168.4	165.6	121.4	118.3	105.4	102.8	109.9	107.6	116.5	113.3
2月28日	168.7	166.4	121.2	118.1	105.4	101.5	110.3	108.2	116.6	113.1

监测数据统计显示，监测周期内，管线 1.1 监测位置温度最大值 169.7℃，最小值 165.6℃；管线 1.3 监测位置温度最大值 121.6℃，最小值 117.8℃；管线 1.4 监测位置温度最大值 105.4℃，最小值 101.2℃；管线 1.5 监测位置温度最大值 110.3℃，最小值 107.2℃；管线 1.6 监测位置温度最大值是 116.6℃，最小值 113.1℃。具体统计结果见表 2。

五、结论

本系统采用应力、温度等传感手段对编号为 1.1、1.3、1.4、1.5、1.6 的管线 5 个缺陷区域的应力、温度状态进行了监测，本数据分析的监测周期为 2023 年 2 月 19 日 -2 月 28 日。结合管道监测位置轴向应力初始值、管道应力波动监测数据分析计算可知，在本次监测周期内，管线 1.1、1.3、1.4、1.5、1.6 监测位置轴向应力值均未超出设计值，且监测数据连续稳定，未见异常。在本次监测周期内，管线 1.1、1.3、1.4、1.5、1.6 监测位置温度监测数据连续稳定，未超过设计工作温度。

六、结束语

基于振弦监测技术的供热管线关键位置健康监测系统是根据实际需求设计的一套可靠的监测系统，该系统成功应用到 5 条供热管道上面。供热管道在供热期间即便发现安全隐患也无法更换，本系统的开发，成功的监测了运行管道的实时温度和应变数据，确保了含有安全隐患的 5 条管道再供热期间的数据的实时状态分析，为管道的管理提供了强

有力的数据支撑。

参考文献：

[1] 《大坝监测仪器 应变计 第 2 部分：振弦式应变计》（GB/T 3408.2-2008）
[2] 《大坝监测仪器 检测仪 第 1 部分：振弦式仪器检测仪》（GB/T 3412.1-2009）
[3] 《结构健康监测系统设计标准》（CECS 333-2012）
[4] 高友. 振弦式传感器测量过程中干扰问题的解决[J]. 仪表技术与传感器, 2007, 2: 54-55[J].
[5] 李忠龙. 黄侨. 沙学军. 郑宇翔. 徐玉滨. 基于振弦式传感器的桥梁无线测试系统及应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008 年第 12 期 1991-1994 页
[6] 姜印平. 顾营迎. 尹俊杰. 魏军介. 基于振弦式传感器的钢构建筑监测预警系统的设计与应用. 传感技术学报[J]. 2008 年第 12 期 2101-2105 页 共 5 页.
[7] 温宗周. 夏自帮. 李富宁. 振弦式传感器测频技术的研究. 西安工程大学学报[J]. 2012 年 第 1 期 72-76 页 共 5 页.
[8] 杨兴明. 何清平. 张培仁. 远程振弦式传感器测量模块系统设计. 传感器与微系统[J]. 2011 年 第 1 期 94-96 页 共 3 页.
[9] 陈妮. 何华光. 谢开仲. 基于全相位 FFT 的振弦式传感器频率测量系统设计. 电子技术应用[J]. 2016 年第 7 期 53-56 页 共 4 页