

doi: 10.7690/bgzd.2015.03.020

基于直角应变花的输油管道应力监测系统

杨军凯¹, 陈彦¹, 王护利²

(1. 北京航空航天大学物理科学与核能工程学院, 北京 100191;

2. 南京炮兵学院反坦克导弹系, 河北 廊坊 065000)

摘要: 为监测长输油管线受各种因素影响而产生的管道形变、断裂等安全隐患, 研制一种应力检测系统。通过采集粘贴在管道表面的电阻应变花随管道变形而产生的电阻变化, 确定主应力方向及应力大小, 并通过 GSM 网络远程传输数据到主控中心, 实现对管道应力的实时监测。结果表明: 该系统稳定可靠、安装调试方便、成本低廉, 适用于大规模野外无人值守情况下的长输油管道应力检测和天然气的远距离传输系统中。

关键词: 直角应变花; 输油管道; 应力

中图分类号: TP277 **文献标志码:** A

Stress Detection System for Oil Pipeline Based on Rectangular Rosette

Yang Junkai¹, Chen Yan¹, Wang Huli²

(1. School of Physics & Nuclear Energy Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Department of Anti-Tank Guided Missile, Nanjing Artillery Academy, Langfang 065000, China)

Abstract: For monitoring the deformation, fracture and other security risks of long oil pipeline affected by various factors, design a stress detection system. Through the acquisition of resistance change which is the result of pipe deformation, of the resistance rosette pasted in pipeline surface, making sure the direction and size of strain, and through the GSM to transfer data remotely, it can realize the real-time monitoring of the pipe stress. The results showed that the system is reliable, easy to install and debug and its low cost, which can apply to the system such as long pipeline stress monitoring in large scale and unattended situation, and natural gas long-distance transmission system.

Keywords: rectangular rosette; oil pipeline; stress

0 引言

长输油管道沿线地质地貌错综复杂, 自然条件恶劣, 管道经常遭受山体滑坡、水灾、地震和冰冻等各种环境因素的影响, 极易造成整体移位、局部变形或应力集中, 从而导致较大的位移应力、屈伸或蠕变, 严重时甚至导致管道断裂破坏。为监测长输油管道受高风险因素影响而存在的隐患, 笔者研制了长输油管道应力监测系统, 可实时监测管道应力应变状态, 为管道安全运营提供保障^[1]。

1 总体设计

根据管道铺设沿线情况复杂、距离长, 且长期无人值守等特点, 系统设计中需要考虑: 1) 各采集点需使用成熟可靠的无线传输方式, 这样不仅可以降低施工难度、而且维护方便; 2) 部分采集点可能无法采用市电, 因此采集模块必须降低功耗; 3) 管道沿线环境差别大, 要尽量减少环境温度对采集精度的影响^[2]。

根据上述特点, 通过 GSM 网络实现数据远程

传输既可缩短开发周期, 且由于多数地区已实现信号覆盖, 因此也可降低系统成本。在管道沿线布设一定数量的采集点(如图 1 所示), 每一个采集点布设 4 个采集模块和 1 个主控模块(如图 2 所示), 应变片围绕管道表面粘贴, 以确保管道任何方向的形变都能被检测到。粘贴在管道表面的电阻应变花(如图 1 所示)随管道变形其阻值将会产生相应的变化, 通过桥式测量电路(如图 3 所示)将电阻值的变化转为微弱的电压信号, 然后经 AD623 滤波放大, 并通过模数转换电路变为数字信号送入采集模块上的 CPU。各采集点的主控模块通过 RS485 总线以轮询方式获取应变片数据, 再通过 GSM 模块发送给监控主机。

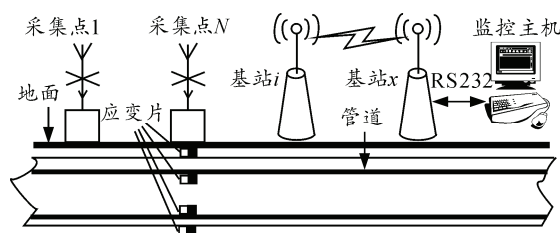


图 1 系统示意图

收稿日期: 2014-09-17; 修回日期: 2014-10-28

作者简介: 杨军凯(1990—), 男, 福建人, 在读硕士, 从事测试计量技术及仪器研究。

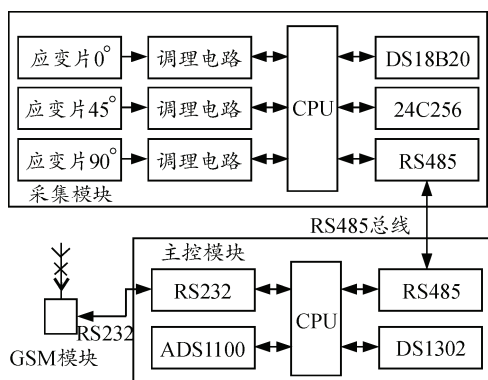


图2 采集与主控模块框图

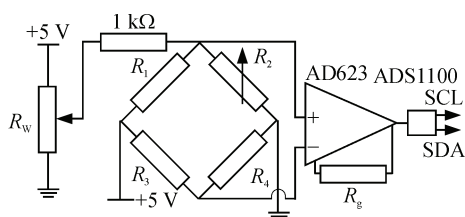


图3 桥式测量电路框

2 应变片选择

考虑到管道上主应力方向未知，所以采用三轴直角应变花检测应变变量。主应变的大小和方向可以先用三轴直角应变花的各敏感栅测得各个方向应变，然后按照公式算出。主应力的方向，可以用各敏感栅测得的应变以及被测构件材料的弹性模量和泊松比按公式算出。

设计的三轴直角应变花各方向微应变如图4。

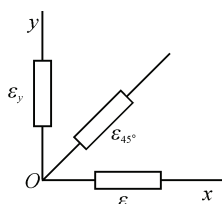


图4 应变花示意图

3 桥式测量电路设计

应变片可以将管道形变转换为电阻的变化，但实际上，应变片的电阻变化随温度影响很大。为了尽可能减少温度的影响，在采集电路中采用电桥作为测量电路，如图3所示， R_2 为测量桥臂， R_1 、 R_3 、 R_4 与 R_2 为同一材质、同样阻值的应变片，且与 R_2 处在同一环境下，由于 R_1 、 R_3 、 R_4 没有粘贴到被测管道上，因此不会随管道变形而发生阻值变化，但是可以补偿环境温度带来的影响。

另外，所使用器件的实际值与标称值也有一定的偏差，为了消除此类偏差，在桥式电路中使用了

X95840 数字电位器，在需要的时候可以通过软件调整 R_w (即 X95840)，使电桥在管道未发生形变的情况下得到修正，以达到电桥的平衡。

4 数据处理

根据图2，针对二维平面应力状态分析，设某点处的应变状态为 ϵ_x 、 ϵ_y 、 ϵ_{xy} 。其中 ϵ_x 、 ϵ_y 为正应变， ϵ_{xy} 为切应变。利用位移变换关系与应变的定义可知，与 x 轴成 β 角方向的正应变 ϵ_β 及相应的切应变 γ_β 与 ϵ_x 、 ϵ_y 、 ϵ_{xy} 的关系^[3-5]为：

$$\epsilon_\beta = (\epsilon_x + \epsilon_y) / 2 + \cos(2\beta)(\epsilon_x - \epsilon_y) / 2 + \sin(2\beta)\epsilon_{xy} / 2 \quad (1)$$

$$\gamma_\beta = -\sin(2\beta)(\epsilon_x - \epsilon_y) + \cos(2\beta)\epsilon_{xy} \quad (2)$$

取 β 分别为 0° 、 45° 、 90° 得：

$$\epsilon_{0^\circ} = (\epsilon_x + \epsilon_y) / 2 + (\epsilon_x - \epsilon_y) / 2 = \epsilon_x \quad (3)$$

$$\epsilon_{45^\circ} = (\epsilon_x + \epsilon_y) / 2 + \epsilon_{xy} / 2 \quad (4)$$

$$\epsilon_{90^\circ} = (\epsilon_x + \epsilon_y) / 2 - (\epsilon_x - \epsilon_y) / 2 = \epsilon_y \quad (5)$$

$$\tan(2\beta) = \epsilon_{xy} / (\epsilon_x - \epsilon_y) \quad (6)$$

通常称满足式(6)的 β 角对应的方向为主应变方向，主应变 $\epsilon_{\beta, \max}$ 、 $\epsilon_{\beta, \min}$ 为：

$$\epsilon_{\beta, \max} = (\epsilon_x + \epsilon_y) / 2 + \sqrt{(\epsilon_x - \epsilon_y)^2 + \epsilon_{xy}^2} \quad (7)$$

$$\epsilon_{\beta, \min} = (\epsilon_x + \epsilon_y) / 2 - \sqrt{(\epsilon_x - \epsilon_y)^2 + \epsilon_{xy}^2} \quad (8)$$

在满足 $\tan(2\beta) = \epsilon_{xy} / (\epsilon_x - \epsilon_y)$ 的条件下由式(2)中的最大切应变和最小切应变为：

$$\gamma_{\beta, \max} = \sqrt{(\epsilon_x - \epsilon_y)^2 + \epsilon_{xy}^2} \quad (9)$$

$$\gamma_{\beta, \min} = -\sqrt{(\epsilon_x - \epsilon_y)^2 + \epsilon_{xy}^2} \quad (10)$$

根据广义胡克定律可推导出主应力及其方向：

$$\sigma_x = \frac{E}{1 - \mu^2} (\epsilon_x + \mu\epsilon_y) \quad (11)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1 - \mu^2} (\mu\epsilon_x + \epsilon_y) \quad (12)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{E}{2(1 + \mu)} \epsilon_{xy} = G\epsilon_{xy} \quad (13)$$

式中： E 和 μ 为弹性体材料的弹性模量和泊松比； G 为切变弹性模量。

5 软件设计

软件分为上位机管理系统、采集模块软件和主控模块软件3个部分。

上位机管理系统基于 SQL Server 2005 数据库，实现采集点的增加、修改、删除，采集数据收集、

应力计算、数据报表查询打印和异常数据报警等。

采集模块通过粘贴在管道外壁上的应变花，采集管道上径向、轴向和 45°的应力变化(如图 5(b))，并通过 DS18B20 采集环境温度变化，然后将数据传送到主控模块(如图 5(c))。

主控模块以一定的时间间隔收集 4 个采集模块采集的数据，并通过 GSM 模块将数据以短信或 GPRS 方式发送给主控计算机(如图 5(a))。

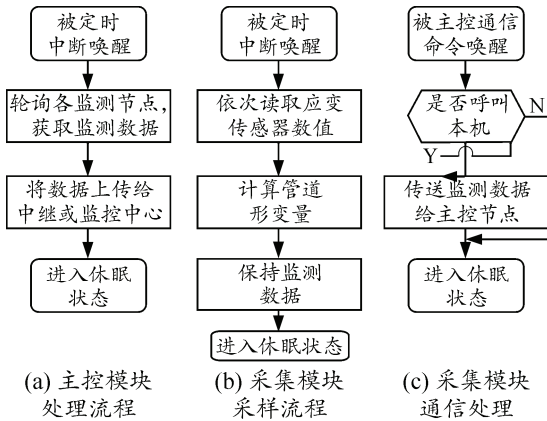


图 5 模块程序框图

考虑到有些采集点存在供电困难，需要用电池供电，因此可以根据需要调整各个采集点的采集时间间隔，在采集间歇各主控节点和采集模块均处于休眠状态^[6]。

6 结论

通过桥式测量电路检测管道应力，根据 DS18B20 获取的环境温度，对实验数据进行修正。结果证明：该系统不仅稳定可靠且安装调试也比较方便，成本低廉。通过成熟稳定的 GSM 网络传输数据，降低了施工成本。自 2011 年投入应用以来，已稳定运行近 4 年，实践结果表明，该系统既可适用于大规模野外无人值守情况下的长输油管道应力监测，又可用于天然气的远距离传输系统中。

参考文献：

- [1] 郭禄浩. 输油管道泄漏检测技术发展研究[J]. 化工管理报, 2014(12): 87.
- [2] 张永健, 方来华, 关磊. 输油管道监控系统设计与开发[J]. 中国安全生产科学技术, 2009(3): 68-72.
- [3] 樊尚春. 传感器技术及应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004: 80-86.
- [4] 张少杰, 马铁华, 沈大伟. 基于直角应变花的爆炸冲击波应力测试及分析[J]. 弹箭与制导学报, 2011, 31(6): 92-94.
- [5] 吴勇明. 任意角度应变花主应变与主方向的计算机方法[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2001, 39(3): 95-97.
- [6] 安家荣. 长距离输油管道设计计算机软件的开发[J]. 油气储运, 2000(2): 20-24.