

振弦式管道应变监测系统在长输管道方面的应用

张克宁（中国石油天然气管道工程有限公司上海分公司，上海 200127）

李文斌（国家石油天然气管网集团有限公司西气东输分公司，上海 200122）

摘要：本文介绍了当前国内天然气长输管道地质灾害检测设备的设置要求。具体对振弦式管道应变监测系统的技术原理、系统组成、关键设备参数进行了详细介绍，该系统可实时监控管道应力应变状态，为管道运营管理提供现实依据，在具体项目中得到了应用，对今后在长输管道中有效地监测管道应变具有一定的参考价值。

关键词：长输管道；地质灾害；振弦式管道应变监测系统

1 引言

随着国家管网智能管道、智慧管网运行模式的推广，对长输管道保护及安全运行提出了更高要求，需要有减缓风险的措施和方法。现在一种“新兴”的振弦式管道应变监测系统已经逐渐成为经过现场验证的管道应变检测方案，它可实时监控管道应力应变状态，为管道运营管理提供现实依据。提高了管道应变检测的准确性，并将报警信息通过无线传输在区域调度中心显示，供生产人员决策，保证了输气管道的安全。

2 长输管道地质灾害检测设备设置的规范要求

关于天然气长输管道地质灾害监测目前国内国标规范上基本无相关要求，本文列举当前几本相对有指导意义的行业规范及企业规范文本条款，具体规范文本条款见下：

《输气管道工程设计规范》（GB50251-2015）的第4.1.2 章节规定：输气管道应避开滑坡、崩塌、塌陷、泥石流、洪水严重侵蚀等地质灾害地段，宜避开矿山采空区及全新世活动断层。当受到条件限制必须通过上述区域时，应选择危害程度较小的位置通过，并采取相应的防护措施。

表1 监测点重要性分级

监测站 (点) 分级	说明
I 级	风险等级为高和较高但难以实施工程防治措施的灾害点。需进行应急防治的灾害点
II 级	除第一种情况外的风险等级为高或较高的灾害点
III 级	风险等级为中及以下的灾害点

《油气管道地质灾害风险管理技术规范》（SY/T 6828-2017）的第4.3.3 章节规定：对重大地质灾害点、地址灾害易发区和施工可能诱发地质灾害的地段，应优先采用避让措施，对不能避让的，应采取防治和监测措施；第7.1.4 章节规定：专业监测站（点）按表1

进行监测点重要性分级；I 级监测站（点）宜采用多种方法进行监测，并形成合理的监测内容组合，宜实现实时监测、远程预警。II 级监测站（点）应根据需要确定监测内容。III 级监测点可只进行简易监测。

《采空区油气管道安全设计与防护技术规范》（Q/SY1487-2012）的第8.3 章节规定：对于能预计塌陷范围的采空区，应在最大压缩土体应变、最大拉伸土体应变和最大凸形弯曲出现的地方布设监测截面，并尽可能覆盖这些危险区域；对于难以预计塌陷范围的采空区，宜均匀布设监测截面，监测截面之间的距离不应大于管道最大允许的悬空长度；应变监测截面上应至少布置3 个轴向监测点。

《西气东输管道地质灾害监测技术规范》（Q/GGWXQ 213-2021）的第5.2 章节规定：管道地质灾害监测等级依据风险等级划分为一级监测、二级监测、三级监测。分级标准见表2；第8.1.2 章节规定：应变监测以监测管道的轴向应变变化为主，重点监测管道弯头、弯管等应力集中区和潜在管道变形显著段。第8.1.3 章节规定：应变传感器的选型应考虑长期稳定性、准确可靠性和环境适应性，宜采用振弦式应变传感器和光纤光栅传感器。

表2 管道地质灾害监测等级

监测等级	风险等级	监测方式	监测内容
一级监测	高	专业监测	灾害体变形监测、管道应变监测
二级监测	中	专业监测	管道应变监测
三级监测	低	人工监测	灾害体变形监测

行业的标准规范很明确指出了天然气管道监测系统的监测内容，即根据单体管道地质灾害风险分级确定监测等级，然后再设置相关的监测设备，但具体采用方式各规范要求有所不一致导致实际情况是，在不同项目设计时也有所区别。通过国内外泄漏监测技

术现状的分析及对比,目前,输气管道工程中振弦式管道应变监测系统应用于管线上的监测方案已得到应用,是国际公认有应用前景的管道应变监测方法。

3 振弦式管道应变监测系统的设计

3.1 振弦式管道应变监测基本原理概述

一般各种地质灾害会使管道的弯曲应变和纵向应变增加,并影响管道的纵向强度。因此,通过测量管道沿纵向的应变变化,来校核纵向应力是否满足管道的可接受条件。通常管道在外力作用下,当应力或应变到达某一临界值时,即产生失效。通过监测数据能够掌握管道在外力作用下的力学行为,因此与操作条件下荷载(内压、温差)引起的应力或应变和管道弹性敷设产生的弯曲应力或应变进行组合,与容许应力或容许应变进行比较,就可以对管道的力学状态进行监测。

基于弹性理论,对于一半径为 r 的管子来说,在图 1 所示截面圆周上三个相隔 90° 圆弧位置 A、B、C 三个位置处设置应变传感器,通过传感器测得单轴纵向应变,能求解管子横截面圆周上任何一点的纵向应变,任意点的纵向应变为 Z 。

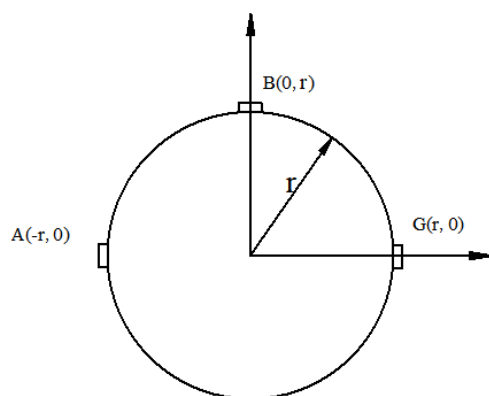


图 1 三个相隔 90° 管道点位振弦式应变计排列示意图

《采空区油气管道安全设计与防护技术规范》(Q/SY1487-2012)规定的纵向应变 Z 的计算公式为(1)~(3)

$$Z = \frac{A+C}{2} + \left(\frac{C-A}{2}\right)\frac{x}{r} - \left(\frac{A+C-2B}{2}\right)\left(\frac{1}{r}\right)(r^2-x^2)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$\frac{x}{r} = \frac{C-A}{\sqrt{2A^2+2C^2+4B^2-4AB-4BC}} \quad (2)$$

$$\frac{y}{r} = \pm \sqrt{1 - \left(\frac{x}{r}\right)^2} \quad (3)$$

式中: z —管体最大纵向应变值; x, y —最大或最小应变出现的位置。

振弦式应变传感器由前后端安装模块、传输电缆、钢弦及激振电磁线圈、保护套管等组成。把一根钢弦张拉在两块安装模块之间,安装模块焊接在待测管道表面。当被测管道外部的应力发生改变时,应变传感器同步受到变形,变形经过前、后端安装模块传导给钢弦转变成钢弦应力的改变,从而转变钢弦的振动频率。电磁线圈激振钢弦并检测其振动频率,频率信号通过电缆传输至后端数值处理装置,便可测出管道外部的变形位移。再通过管道轴向允许附加应力及应变的关系式,可以建立基于管道纵向监测应力的应力预警级别模型。

3.2 振弦式管道应变监测系统组成与功能

振弦式管道应变监测系统由振弦式应变传感器、数据传输子系统和数据处理与监控子系统部分组成,如图 2 所示。在管道现场侧埋设振弦式应变传感器,通过数据传输子系统不间断地采集管道应变位移信号,并将相关数据通过数据传输子系统上传到数据处理与监控子系统(数据中心服务器)进行处理和分析,判断管道是否发生变形,当监测数值超过设定阈值时会自动报警。

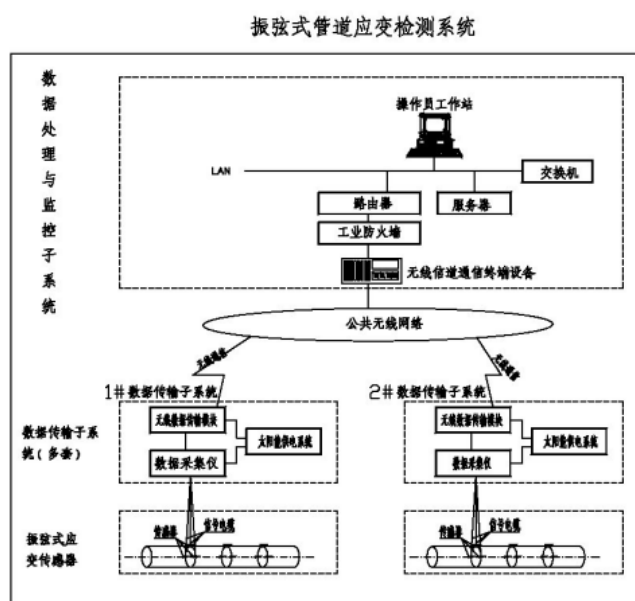


图 2 振弦式管道应变监测系统示意图

3.3 振弦式应变传感器

振弦式应变传感器安装在管道本体,用于测量钢结构构件上的应变。①振弦式应变传感器主要性能参数:量程范围: $3000 \mu \varepsilon$; 精确度: $\leq 2\% \text{ FSR}$; 稳定性: $\leq 0.1\% \text{ FS}$; 工作温度: $-30^\circ\text{C} \sim +70^\circ\text{C}$; ②振弦式应变传感器安装:应安装在管道金属表层,不能破坏

管道原有金属特性,安装方法可采用无损焊接方式,也可以用环氧或其他高强黏结剂把它们粘接到管道金属表面;安装完成的传感装置采用合理保护措施,防止土体位移剪切而破坏,采用覆盖橡胶板等措施。

在每个管道上分多个截面观测,监测断面间距宜 50m,同时热煨弯管处需设置监测断面(弧线顶部以及热煨弯管两端环焊缝附近)。

3.4 数据传输子系统

数据传输子系统包括太阳能供电系统、通信模块、数据采集仪等设备,数据传输子系统具备功能如下:

①数据采集仪具备就地显示,能满足自动、连续、定时数据采集与传输;②数据采集频率可根据监测分析要求设置不同的采样频率;③数据采集与传输设备可使用太阳能直流电源供电;④数据传输子系统一般采用集成设计,设备防护及防爆等级需满足现场使用环境选要求;⑤以表格形式存储的数据应带有时间标记和记录标号。数据采集仪采用多通道设计,可接受多个(目前最大 32 个)振弦式应变传感器的数据,传感器与数据采集仪采用 RS485 通信进行数据传输,数据采集仪通过通信模块(4G 网络形式)把信息上传至数据处理与监控子系统。

3.5 数据处理与监控子系统

数据处理与监控子系统由上位机、报警软件和服务器等设备构成,数据处理与监控子系统具备数据管理、可视化管理、设备管理、监测点管理、预警分析、应急指挥、仿真分析模块等。

3.5.1 软件主要功能

软件采用智能识别和算法等技术,通过智能识别技术排除误报警;可实时显示各监测点实时应力、实时信息;保存全部事件数据日志;具备报警分级功能;系统能对事故和操作过程进行记录;支持连接到第三方控制系统,如 SCADA 系统等。

3.5.2 服务器主要性能参数

硬件不应低于:英特尔至强 2.1G, 8C/16T; 8GB RDIMM; 2×1TB 硬盘; 2 个 1Gb/s 以太网接口; 配套显示器。

3.6 项目案例

目前在中俄东线(长岭-永清)、西气东输固原-原洲管道工程等项目上的管道地质灾害高风险区域设置了振弦式管道应变监测系统,其中中俄东线(长岭-永清)项目已完成施工,中俄东线(长岭-永清)项目管道应变监测长度约 2.73km,在每个管道上设置多

个截面观测,监测断面间距 50m,同时热煨弯管处需设置监测断面(弧线顶部以及热煨弯管两端环焊缝附近),共计监测断面约 50 处,每个监测断面设置 3 个振弦式应变传感器,目前振弦式管道应变监测系统设备运行平稳,检测效果良好。西气东输数据处理与监控子系统设置在地区公司上海生产调度中心,各项目可根据实际情况设置。目前通过对管道地质灾害高风险区域进行分析,综合确定振弦式应变传感器在管线监测断面间距宜 50m 设置一组,为了保证报警信号设定值的准确性,各项目监测点布放的位置及数量需合理确定,保证能够满足现场使用及报警需求,并节约产品采购成本和安装维护成本。

4 结束语

管道能源安全是关系国家经济社会发展的全局性、战略性问题,对国家繁荣发展安全至关重要。管道通过地质灾害区域的部分管线通常要承受增长的纵向应变,因此获取管道纵向应变的变化是管道力学监控的主要内容。振弦式管道应变监测系统通过测量管道本体变形从而实现对管道的力学状态监测,通过与预设值比较,可以建立基于管道中纵向监测应力的报警,提示运行人员。该系统在中俄东线的成功应用,为今后长输管道如何在地灾区域及关键地点设置管道本体变形监测提供了参考借鉴。

参考文献:

- [1] 魏海生,等.振弦式监测系统背景采集系统的应用[J]. 人民黄河,2013,32(4).
- [2] 杨士梅,赵伟涛,杜春龙,应变监测系统在冻土区原油管道中的应用效果分析[J]. 中国石油和化工标准与质量,2020(01).
- [3] GB50251-2015. 输气管道工程设计规范[S]. 北京:中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局 2015.
- [4] SY/T6828-2017. 油气管道地质灾害风险管理技术规范[S]. 国家能源局,2017.
- [5] Q/SY1487-2012. 采空区油气管道安全设计与防护技术规范[S]. 北京:中国石油天然气集团公司,2012.
- [6] Q/GGWXQ 213-2021. 西气东输管道地质灾害监测技术规范[S]. 全国石油天然气标准化技术委员会,2021.

作者简介:

张克宁,南京工业大学,本科,自动化专业,现从事油气储运设计工作。