

热煨弯管管道应力应变及偏移监测系统的应用

罗星刚 马龙飞 何 梦 叶海龙 (淮河能源燃气集团有限公司, 安徽 淮南 232000)

摘 要: 主要利用安徽某管道工程建设过程中使用的热煨弯管, 选取 15° 、 45° 、 75° 、 90° 等不同角度的热煨弯管若干, 采用电阻式应变传感器, GIS 数据传感器, 在弯管处安装应力应变及偏移监测系统, 对热煨弯管应变数据及 GIS 数据进行实时采集及传输, 对长达一年的监测数据进行分析, 由于埋地使用及角度不同, 应力应变及位置偏移会存在明显的区别, 需对管道进行长期的监测分析。

关键词: 热煨弯管; 监测系统; 管道

1 引言

管道是石油和天然气的主要运输方式, 热煨弯管作为管道工程中的重要组成部分, 其运行状态对于管道工程的安全和稳定性具有重要影响。

热煨弯管的制造工艺是将直管加热到一定温度, 然后通过弯曲机器将其弯曲成一定角度的弯头。可以根据需求, 制作成不同角度, 用于石油、化工、天然气、电力、造船、航空航天等行业。热煨弯管的制造工艺相对于其他制造工艺来说, 具有成本低、生产效率高、弯曲角度范围广等优点, 因此在管道工程中得到了广泛的应用。热煨弯管埋地后受到温度、压力、地质条件等因素的影响, 随运行时间增加会产生的偏移、变形和应力变化等问题。为了保证管道运行的安全, 可以采用定期监测的方法, 及时发现管道的异常情况, 采取相应的措施进行修复和维护, 保障管道的安全运行。同时, 也可以根据监测数据对管道的设计和制造进行优化, 提高管道的质量和性能, 延长其使用寿命。

2 监测系统

应力应变及偏移监测系统包含应力应变数据采集, 硬件设备包括应力监测采集, 地理位置坐标数据采集, 数据终端采集传输系统。软件系统包括应力数据监测和位移数据监测, 在软件端实现数据分析、历史数据读取、数据分析报表等功能, 可以做到实时监测, 随时分析研究, 通过移动端口掌握热煨弯管安全信息, 为管道安全运行保驾护航。

2.1 硬件装置

2.1.1 应变传感器

为了保证应变传感器的精度, 综合考虑选择技术精确度、可靠性、经济性、成熟性兼得的电测式应变测试方法, 主要是将被测应变变量转换成对应电量变化而进行测量的办法。选取高精度 $1/4$ 桥 2 线电阻应变

计, 该应变计选型需匹配被测材料, 自带温补, 再将被测表面的形变转化为应变传感器的阻值变化, 通过电阻-电压信号放大模块输出电压值, 进而分析应变情况。该应变片采用改性酚醛基底、康铜箔制成、全封闭结构。敏感栅是应变片中把应变量转换成电阻变化量的敏感部分, 它是用金属丝或半导体材料制成的单丝或栅状体。引线是从敏感栅引出电信号的丝状或带状导线。

电阻应变片能将力学量转变为电学量是利用了金属导线的应变——电阻效应, 电阻导线的电阻 R 与其长度 L 成正比, 与其截面积 A 成反比, 即:

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

ρ 是导线的电阻率。

如果导线沿其轴向方向受力产生形变, 则其电阻值也随之发生变化。

$$\frac{dR}{R} = \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A} + \frac{d\rho}{\rho}$$

式中 $\frac{dL}{L}$ 为金属导线长度的相对变化, 用轴向应变 ε 表示, 即 $\varepsilon = \frac{dL}{L}$; $\frac{dA}{A}$ 是截面积的相对变化。 $A = \pi r^2$ (r 是金属导线的半径), $\frac{dA}{A} = 2 \frac{dr}{r}$, $\frac{dr}{r}$ 是金属导线半径的相对变化, 即径向应变 ε_r 。导线轴向伸长的同时径向缩小, 所以轴向应变 ε 与径向应变 ε_r 有下列关系:

$$\varepsilon_r = -\mu \varepsilon$$

μ 为金属材料的泊松比。

金属材料电阻率相对变化与其体积的相对变化之间的关系为 $\frac{d\rho}{\rho} = C \frac{dV}{V}$, C 为金属材料的一个常数。

由 $V = AL$ 我们可以导出:

$$\frac{dV}{V} = \frac{dA}{A} + \frac{dL}{L} = 2\varepsilon_r + \varepsilon = -2\mu\varepsilon + \varepsilon = (1 - 2\mu)\varepsilon$$

由此得出:

$$\frac{d\rho}{\rho} = C \frac{dV}{V} = C(1 - 2\mu)\varepsilon$$

$$\frac{dR}{R} = C(1 - 2\mu)\varepsilon + \varepsilon + 2\mu\varepsilon = [(1 + 2\mu) + C(1 - 2\mu)]\varepsilon = K_s\varepsilon$$

K_s 称为金属丝灵敏系数,其物理意义是单位应变引起的电阻相对变化。 K_s 由两部分组成,前一部分是由金属丝的几何尺寸变化引起的,一般金属的 μ 在 0.3 左右,因此 $(1 + 2\mu) \approx 1.6$,后一部分为电阻率随应变而引起变化的部分,它除与金属丝几何尺寸有关外还与金属本身的特性有关。 K_s 对于一种金属材料在一定应变范围内是一常数,于是得出:

$$\frac{\Delta R}{R} = K_s \frac{\Delta L}{L}$$

为表示应变片的电阻变化与试件应变的关系,引入应变片的灵敏系数 K ,定义为:试件受到一维应力的作用时,如应变片的主轴线与应力方向一致,则应变片的电阻变化率 $\frac{\Delta R}{R}$ 和试件主应力方向 ε_x (即 $\frac{\Delta L}{L}$) 之比称为应变片的灵敏系数,即:

$$K = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon_x}$$

由于粘结剂传递形变的失真与应变片的横向变形等因素的影响,应变片的灵敏系数 K 总是小于金属丝的灵敏系数 K_s 。 K 值由生产厂家给出。

应变片的敏感栅受力后使其电阻发生变化,将其粘贴在试件上,利用应变——电阻效应便能把试件表面的应变直接变换为电阻的相对变化量。

2.1.2 数据采集终端

数据采集终端采用模块化设计,主要由 BF350 电阻—电压信号放大模块、DAM-3918 模数转换器、TS501 数采仪模块构成,均使用 RS485 总线协议通信。BF350 信号放大模块支持最多 4 路信号输入,每个 BF350 最多支持 4 个应变传感器连接,采样频率设置为 1Hz,并支持模数转换器拓展,通过 TS501 数采仪的 GPRS 模块将数据上传至指定服务器。

2.1.3 基于 RTK 差分系统的 GNSS 定位模块

运用实时载波差分技术,依靠 GNSS 接收机接收载波相位信号。本项目利用多基站网络 RTK 技术建立的连续运行卫星定位服务综合系统,直接登录 CROS 账号,即可实现移动站坐标的测量。更进一步的,通过长时间段的数据包可解析出毫米级的定位精度,实现高精度地理偏移监测,对弯头出现的偏移做到实时监控,实时报警。具有更好的环境适应性和数据稳定性。设备搭载智能算法,可以自动化、高精度地感知

监测对象的三维形变信息。

2.1.4 监控主机和监测软件

监控主机是该系统的核心设备,与数据采集终端通信,采集各终端监测数据。同时可通过数据传输协议提供对外数据接口,将该系统监测数据发布至监测软件控制中心及其他管理系统。监控主机采用主流工作站,Windows 操作系统,运行预警软件,具备数据通信、数据库管理、远程参数设置、管道应力应变超限报警、历史数据读取。图表分析等功能。

2.1.5 供电系统

该监测系统中,需要电源供电的设备包括应变传感器、BF350 电阻—电压信号放大模块、DAM-3918 模数转换器、TS501 数采仪、基于 RTK 技术的 GNSS 定位系统、监控主机。监控主机安装在控制中心,电源获取比较容易且稳定;应变传感器和数据采集终端的电源均由现场太阳能供电系统提供。

弯头监测的地点多为偏远地区,地区外电接入困难,除常规电源外考虑到现场的日照、风能等因素考虑其他供电方式,在日照条件充足时,采用太阳能发电装置配套蓄电池作为供电电源。

2.2 应力监测软件

数据监测分析平台是用于监测并记录管道应变对输出的电压值,每隔 30s 监测设备向服务器端发送一次测量值,项目人员可以在软件端查看不同点位不同通道的电压变化,通过数据变化分析管道受到的应力情况。数据监测分析平台分为数据采集模块、数据存储模块、数据分析模块三个部分。数据采集模块采用 HJ212 协议接收 TS501 数采仪发送的数据。数据存储模块采用 ClickHouse 数据库底端存储。数据分析模块采用 Grafana 用于数据的分析展示。

2.2.1 数据采集模块采用 HJ212 协议接收数据

HJ212 协议是在环保行业中使用的数据传输协议。数据终端、采集终端、环保仪等终端设备把采集好的数据发送到环保平台使用这个协议。这个协议是环保行业的标准协议。所以实现了各种终端和平台之间的完美对接。只要符合协议标准的设备和平台,都可以互联互通。HJ212 协议是一种字符串协议,数据传输通讯包主要由包头、数据段长度、数据段、CRC 校验、包尾组成,其中“数据段”内容包括请求编码、系统编码、命令编码、密码、设备唯一标识、总包数、包号、指令参数。请求编码为请求的时间戳,系统编码 ST 统一规定为 22,命令编码 CN 为该数据包的时间类型,访问密码、设备唯一标识在对接时由平台提供,

指令参数为数据内容。

2.2.2 数据存储模块采用 ClickHouse 数据库底端存储

本系统存储的是数据采集模块采集的电压数据,数据定时采集,采集到的数据既有下列特征:①数据结构相对简单,主要包含三列,时间、标签、值;②数据生成具有稳定的节奏,5秒一次;③数据一次写,多次查询,少更新;④数据量极其巨大,同时对于存储成本又很敏感;⑤时间是数据分析统计中一个很重要的维度;以上数据特征决定了数据非常适合采用时序数据库来进行存储。时序数据库是一类专门用于存储和分析时间序列数据的数据库。时间序列数据通常包含时间戳和对应的指标值,用于监控和分析某个目标的变化趋势。时序数据库需要高效存储大量时间序列数据,并支持相关的分析与运算,如聚合、下采样、滚动窗口等。时序数据库的起源可以追溯到20世纪70年代。随着工业控制和SCADA系统的兴起,人们需要存储和处理大量时间序列数据。这促进了时序数据库的出现。数据量方面,项目现状是5个点位,每个点位1个数采仪接3个传感器,按采样点:200个,采样频率:5秒1次,采样格式:时间,采样点,采样值则每天的数据量为 $12 \times 60 \times 24 \times 200$ 。

2.2.3 数据分析模块采用了 Grafana

Grafana是一款开源的数据可视化工具,使用Grafana可以非常轻松的将数据转成图表的展现形式来做到数据监控以及数据统计。Grafana专注于时序类图表分析,而且支持多种数据源,如ClickHouse、InfluxDB、Elasticsearch、Mysql、K8s、Zabbix等。本系统的监测对象为时序的电压数据,非常适合用Grafana进行分析展示。考虑到数据安全性,系统采用了混合云部署形式,私有云和腾讯云中各自独立部署,数采仪同时发送数据到各个数据采集模块,处理后各自保存分析。尽可能提高系统的可用性。

3 监测系统的安装

3.1 监测点位的选取

综合梁理论与实际现场情况,为了监测不同角度的弯头在相同的环境和相同角度的弯头在不同的环境下的形变和偏移,对选定的现场进行多次勘察后,对正在建设中的管道利用专业软件进行模拟分析,最终确定 15° 、 45° 、 75° 、 90° 等角度的弯头作为监测对象。

3.2 应变传感器安装

应变传感器是监测系统组成的关键部分,且由于

其长期埋地,不仅需要应变片精确测量,还需要长期且稳定,考虑现场埋地管道施工的工艺及系统长期监测的需求,对应变片传感器的粘贴工艺进行了改进,以达到的防水、防潮及防护效果。

为了避免管道现场焊接产生的高温变形及焊接后形成的残余应力影响,在焊接完成自然时效一段时间后,再进行应力传感器安装,其次为了增加精度,在每个弯头选择安装3组应变传感器,每组8个应变片,在统一横截面均匀分布,以便完整反应弯管开始、弯管中间、弯管结束及焊缝接口处的应力变化情况。

3.3 数据采集终端安装

在完成应变传感器的安装后,应变片连接到BF350数据采集器,把电阻信号转换为电压信号输出,然后通过DAM-3918模数转换器将电压信号转换为数字信号通过RS485协议输出,最后通过TS501数采仪将数据采集后通过4G进行发送至云端服务器,在完成模组安装后,通过箱体将设备固定,在通过灌软硅胶做到防水绝缘,保证其在地底的稳定正常工作。

3.4 电源的安装

因电源属于地面设施,考虑到有自然或人为破坏的风险,太阳能发电装置的基座采取混凝土安装处理,现场的设备安装采取不锈钢防盗盒保护电池,并通过安装监控摄像头,警示牌等方式来确保安全问题,并选择阳光日照条件充足的地点进行安装。

4 应力应变及偏移数据监测

完成论证和设备安装后,确保功耗的情况下,点位数据按次/分钟进行采集,对监测点位进行长达9个月的监测,从监测效果可以得出,在监测点位安装后,施工回填会对应力产生明显的变化,在施工回填完成后由于管道还未正式投入使用,应力及位置基本没有明显变化。

5 结论

经过长达12个月的数据监测,可以确定搭建的电阻式应变器及传感器工作状态良好,在线监测系统运行稳定,供电设备及传输数据模块也未出现问题。随着施工进度推进,能明显感受到应力应变的变化;目前监测时间较短,在监测期内未出现应力堆积及偏移,说明热煨弯头工艺符合标准,管道运行环境和条件比较稳定,依照此类监测数据可以得出,此类热煨弯头能够适应长期埋地的工作情况,但如果需要极限数据及特殊情况测试,需对管道进行更加长期的监测,解决潜在问题,并为以后热煨弯头选型和制造提供参考,更好满足管道需求。