

“西气东输”一线管道地质灾害风险监测预警体系

么惠全¹ 冯伟¹ 张照旭¹ 魏东²

1. 中国石油西气东输管道分公司 2. 北京科力华安地质灾害监测技术有限公司

么惠全等.“西气东输”一线管道地质灾害风险监测预警体系.天然气工业,2012,32(1):81-84.

摘 要 为了对“西气东输”一线管道地质灾害风险进行有效的监测和预警,减少管道安全运营成本,利用历史数据和“事故危害系数”的概念,直观地论证了管道地质灾害风险监测的必要性,探讨了管道地质灾害的渐变特征和管道失效的力学判据,阐明了管道地质灾害风险监测及预警在理论与技术上的可行性。基于“承灾体重于致灾体、前期监测重于灾后监测、长期监测重于短期检测、经济合理重于技术领先”的原则,建立了长输管道沿线地质灾害风险监测预警体系——管道地质灾害前期监测网。该监测网在“西气东输”一线干线及支线的管道地质灾害高风险区上布设了近百个隐患监测点,及时发布了 3 起预警并 2 次触发应急预案,监测成果直接支持了 7 处隐患点的治理工作。实际应用效果表明,该监测网具有灾害预报预警、支持灾害治理方案、校准灾害治理过程的功能,甚至还可用于评价灾害治理效果、合理调配灾害防治资源,能使管道完整性管理工作真正落到实处,有效降低管道运营方的经营成本。

关键词 “西气东输”一线 管道地质灾害 事故危害系数 完整性管理 监测预警 应力应变监测

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2012.01.017

长输油气管道沿途的地质灾害种类多、成因复杂、范围广,所导致的管道事故又极易诱发严重的次生灾害,其直接和间接损失往往比其他类别的事故更大^[1-2]。美国交通部数据显示,1991—2010 年虽然美国由于地质灾害导致管道破坏的统计频率仅为 5.7%,但是由其带来的经济损失却高达 13.6 亿美元,占全部经济损失的 26.76%;如果将“事故危害系数”(Accident Hazard Index,简称 AHI)定义为“该类事故损失金额占全部损失的比例”除以“该类事故占全部事故的比例”,并以此对比平均每发生 1 次事故所带来经济损失的大小,可得到 1991—2010 年美国天然气管道事故危害系数统计表(表 1)。

表 1 1991—2010 年美国天然气管道事故危害系数统计表

管道破坏原因	事故比例	经济损失/美元	损失比例	事故危害系数
自身及第三方破坏	24.30%	528 125 569	10.39%	0.43
错误操作	6.10%	69 484 159	1.37%	0.22
材料缺陷	17.10%	719 967 837	14.16%	0.83
自然力量的破坏	7.70%	1 872 203 536	36.83%	4.78
其中:地质灾害	5.70%	1 360 302 224	26.76%	4.69
闪电	0.58%	31 251 464	0.61%	1.05
狂风	0.54%	446 900 478	8.79%	16.28
其他自然力破坏	0.88%	33 749 367	0.66%	0.75
腐蚀	18.42%	539 818 372	10.62%	0.58
撞击、火灾等	5.20%	212 240 894	4.18%	0.80
其他	21.18%	1 141 058 710	22.45%	1.06

注:数据来源于美国交通部网站 <http://primis.phmsa.dot.gov/comm/reports>。

作者简介: 么惠全,1960 年生,高级工程师,硕士;中国石油西气东输管道公司总经理助理,主要从事管道完整性管理工作。地址:(200122)上海市浦东新区福山路 458 号同盛大厦 19 层。电话:(021)58849955。E-mail:yaohuiquan@petrochina.com.cn

若不考虑管道架空受狂风的影响,表 1 中各类地质灾害的事故危害系数高达 4.69,远高于其他事故的危害系数,这也是管道完整性管理体系将管道环境与地质灾害风险评价列入管道整体风险性评价任务的主要原因^[3]。实际上,如果考虑由于地面移动等地质灾害所诱发的材料缺陷和腐蚀等事故放大效应,地质灾害的事故危害系数还将增大。

中国是世界上地质灾害较为严重的国家之一。随着长输油气管道里程的逐年增长、沿线各种人类工程的扰动和自然环境突发事件的越发频繁,管道地质灾害已无可避免地呈多发态势,管道运行安全与管道地质灾害之间的矛盾日益凸显。因此,建立对长输油气管道地质灾害风险的监测预警体系,已经势在必行。

1 管道地质灾害监测预警的理论基础

尽管对管道地质灾害的研究尚无完整的理论体系,但国内外在地质灾害成因与防治、管道的力学特征等方面已有大量的研究成果可供借鉴。以此为基础,再综合众多实际经验,就可对管道地质灾害的监测预警提供一定的指导作用。

1.1 管道地质灾害的定义

管道地质灾害并非一般的地质灾害。以滑坡、崩塌、泥石流等导致灾害发生的不良地质环境为“致灾体”,以遭受致灾体破坏的长输油气管道为“承灾体”,管道运营方从风险管理和工程控制的角度,将“管道地质灾害”定义为:“以各类地质灾害为致灾体、以管道本体及其附属设施为承灾体的一种成灾过程”。与以往将其表述为一种地质作用或者地质现象的定义不同,该定义具有以下 3 个特点:①将管道是否受到威胁作为管道地质灾害的判断标准,若地质灾害的发生并不影响管道安全,就不应列为管道地质灾害;②强调了管道地质灾害的特殊性,与一般地质灾害相比,管道地质灾害具有灾害放大效果,更易导致严重的次生灾害;③将管道地质灾害表述为一种成灾过程,使管道地质灾害风险监测与预警具备了介入的时间和空间。

1.2 管道地质灾害的渐变特征

灾害监测的关键是及时发现灾变前兆,进而做出预报预警。地质灾害的“致灾性”难以逆转,但管道地质灾害是典型的、致灾体与承灾体之间明显相关的“因果型灾害链”,只要适时掌握其应变释放的过程性指征和指标,就有可能及时预警,“防患于未然”。图 1 以管道滑坡灾害链为例,勾勒了管道滑坡从应变积累到应变释放的交互作用和演进过程^[4],这一过程也给灾前预警和灾害治理提供了理论依据。

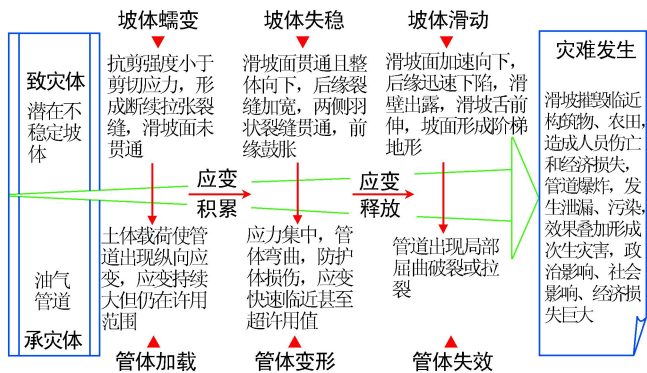


图 1 管道滑坡灾害链示意图

图 1 同时表明:无论地质灾害的成因如何复杂多变,对管道造成的危害总是直接体现为管道的变形和失效。由于管道在力学上的失效判据相对较为清晰,那么只要通过应力应变监测获取管体的相关数据,就可以准确地定量描述灾害条件下管道的力学表现,据此判定管道的临灾力学状态,进而支持管道地质灾害的预报预警。

1.3 管体失效的力学判据

关于管道失效的力学判据,国内外所采用的标准基本一致,主要包括以下 2 种。

1.3.1 基于应力的判据

当管道的变形处于弹性区间,宜使用基于应力的判据来校核管道的安全状态。滑坡、沉陷(含采空、岩溶)、冻土等地质灾害条件下,受约束管道的强度应同时满足以下 2 个条件:

1) $|S_L| = |S_p + S_T + S_x + S_B| \leq 0.8\alpha$ ^[5], 其中 S_L 为受约束管道或管件由永久荷载、可变荷载所产生的轴向应力之和; S_p 为管道由内压产生的轴向应力; S_T 为管道由温差产生的轴向应力; S_x 为除内压和温差之外的其他轴向荷载产生的轴向应力; S_B 为管道由于重力和其他外部荷载产生的名义弯曲应力; α 为管道标准屈服强度。

2) 当 S_L 为负值时,管道组合当量应力(S_E)应满足: $S_E = S_H - S_L \leq 0.9\alpha$ ^[6], 其中 S_H 为内压产生的环向应力。

1.3.2 基于应变的判据

当管道的变形已进入弹塑性区间,宜使用基于应变的判据来校核管道的安全状态。管道的应变能力可归纳为对拉伸应变、压缩应变的限制,用因子化的载荷—阻力设计(load resistance factorized design)公式表达^[7]:

1) 轴向合成拉伸应变 $\epsilon \leq [\epsilon]$; 其中 $[\epsilon]$ 为轴向

许用拉伸应变,而 $[\epsilon]_t = \varphi_t \epsilon^{crit} \varphi_t$ 为拉伸应变承载系数,取 0.7; ϵ^{crit} 为钢管及组焊管道的极限拉伸应变,按实测值或保守取值 0.75%^[8]。

2) 轴向合成压缩应变 $\epsilon \leq [\epsilon]_v$, 其中 $[\epsilon]_v = \min(0.3\delta/D, \epsilon_s)$, $[\epsilon]_v$ 为轴向许用压缩应变, $0.3\delta/D$ 为薄壁管道开始起皱的压缩应变值, ϵ_s 为管道标准屈服强度对应的应变。

2 “西气东输”一线管道沿线地质灾害前期监测网

自 2003 年投产运行以来,“西气东输”一线管道屡受地质灾害困扰,因灾损失逐年上升。为了切实掌握管道受灾状况,变被动抢险为主动防御,提高灾害防治的针对性以降低灾害防御成本,中国石油西气东输管道分公司(下称西气东输管道分公司)自 2007 年开始建设管道沿线地质灾害前期监测网(下称监测网)。

2.1 监测网建设的基本原则

2.1.1 承灾体重于致灾体

无论是滑坡、沉降、崩塌还是地质断裂带,受其威胁的都是管道本体。无论地质灾害的成因和机理如何复杂,管道的受损程度才是对安全运行的直接威胁。因此,对管道地质灾害风险的监测应以承灾体监测为主,以致灾体监测为辅。

2.1.2 前期监测重于灾后监测

多数地质灾害都有从应变积累到应变释放的渐变过程,这就给灾害的提前预警提供了可能。只要实现灾前预警,就能以相对较小的代价换取较长时期的管道安全,相关的灾害治理成本也总是低于灾后的治理成本。

2.1.3 长期监测重于短期检测

短期检测的技术手段多为临时性措施,无法在长达数十年的管道寿命中发挥连续的预警作用。同时,针对某一具体管道地质灾害的短期检测仅能对检测时点的管道安全作出判断,而难以判断灾害逼近的速度,更无法根据以往的历史数据做出趋势预报。监测网的建设属于长期监测措施,也相当于为短期检测建立了长效机制。

2.1.4 经济合理重于技术领先

任何灾害防御措施都必须考虑效能问题,监测网不应过分追求监测技术的先进性而忽视运营方对减灾成本的控制,而应尽可能延长监测设施的使用寿命以摊薄运营方的年度折旧和费用支出,同时,还应通过对隐患监测点的筛选和分级分类,以科学、辩证的思维将监测手段布设于灾害频发点和高危点。

2.2 监测网建设的技术路线

监测网建设的技术路线示意图如图 2 所示。

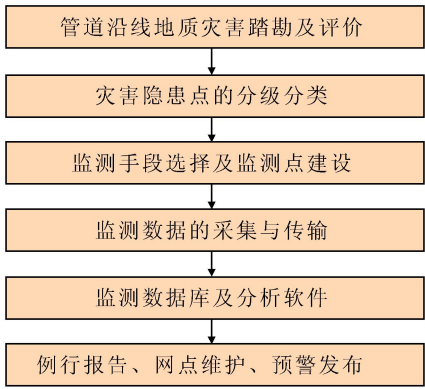


图 2 监测网建设的技术路线示意图

总长近 11 000 km 的“西气东输”一线天然气管道是典型的长距离管道工程,沿线地质灾害隐患具有种类多、范围广、数量大的特点。因此,将高后果区视为管道与地质灾害之间的主要矛盾,将高后果区中的高危管段视为矛盾的主要方面,监测网在技术上以发现管道地质灾害的前期征兆为首要目标,以现有的线路巡护能力和外部专业技术服务为依托,整合针对承灾体的应力应变监测技术和针对致灾体的地表位移监测技术,采用了较为经济且可靠性高的“便携式巡回监测法”。

监测网所采用的便携式激光测距滑坡简易观测技术、全站仪大地位移测量技术、管道应力应变监测技术,要根据地质灾害风险的性质与程度进行组合、匹配,首先确保对高危管段的有效布控,然后再兼顾那些相对次要的隐患点。为进一步节省费用,采用易于掌握的便携式设备读取监测数据,并就近将其发送给相关的巡护人员,尽可能让相邻、相近监测点共用同一设备。

采集的监测数据使用专为监测网开发的软件进行分析处理,并由专业分析人员定期出具监测报告。预警所采用的阈值主要考虑 2 个因素:①绝对值的比较,例如应变监测中当前值与许用值的比较;②相对值的比较,即从变化速率上判断灾害发育的趋势和速度。

3 监测网的实际监测效能

迄今为止,监测网在“西气东输”一线干线及支线的管道地质灾害高风险区上布设了近百个隐患监测点,及时发布了 3 起预警并 2 次触发应急预案,监测成果直接支持了 7 处隐患点的治理工作,取得了明显的监测效果^[9]。

3.1 灾害预报预警

将管道运行的即时数据与历史数据、预设阈值进行比较分析后,监测网发布出预警信息,解决了“有灾不治”和灾害治理迟缓的问题。位于山西省境内的某管段曾2次开挖以释放应力,但受煤矿采空所致坡体崩滑的影响,2009年8月5日某监测截面的管道轴向拉伸应力已达467.2 MPa,超过了436.5 MPa的设计容许应力,收到监测网发出的预警后,组织开挖探坑,发现管道实际受损情况很严重:管道最大垂向位移已达1.885 m,且多处管道防腐补口带和补伤片已经卷边、折皱、撕裂。西气东输管道分公司立即启动应急抢险预案,带压抬升后该管段至今仍处于安全状态。

3.2 支持灾害治理方案

监测网可用于判断管道地质灾害所造成管体应力集中的主要部位、主要诱因和对管体的影响,进而支持灾害治理方案设计和方案比选,避免“小灾大治”或“大灾小治”。位于陕西省境内某管段途经的不稳定坡体于2007年10月发生滑坡,山体严重变形,最大剪切裂缝的高差达1.3 m,应急抢险后监测网的监测数据显示:尽管坡体滑塌严重,但位于滑坡体中部的管道新增轴向拉伸应力不足设计容许应力的10%,且在滑坡后处于稳定状态。据此,业主方弃用大型抗滑桩方案,转而采用一般水保措施,节约了数百万元的灾害治理经费。

3.3 校准灾害治理过程

治理过程中对管体以及管体周边致灾体的人为扰动,必然引发管体自身应力应变在该管段的再次平衡。监测网的监测数据可以反映哪些治理措施产生了期望的变化,而哪些治理措施可能导致灾害的进一步恶化,从而解决运营方所担心的“灾害治理失当”问题。在位于山西省境内某管段高风险的带压抬管过程中,监测网启动了即时的管道应力应变动态监测,以包括应变方向在内的监测数据来调整抬管的步骤、位置以及抬升量,取得了较为理想的治理效果。

4 结论

近5年的监测网运行实践不仅为“西气东输”一线管道的运行安全作出了贡献,其理念和思路对国内管

道运营方的管道地质灾害防御工作也具有一定的借鉴作用。

1)在管线力学和灾害地质学相关理论指导下,关注管道地质灾害的主要矛盾和矛盾的主要方面,管道地质灾害的全线组网监测在技术上是可实现的,并且由于其能大幅降低综合治理成本、获取减灾效益,在经济上也是可接受的。

2)尽管管道与地质灾害的耦合关系因各种要素的复杂多变而难以把握,但只要重点关注管体自身的安全状态,掌握管体应力应变的数据和趋势,再辅以必要的致灾体监测手段,就能够发现管道地质灾害的前期征兆,把握灾害治理时机,使灾害防御“事半功倍”。

3)监测网具有灾害预报预警、支持灾害治理方案、校准灾害治理过程的功能,甚至还可用于评价灾害治理效果、合理调配灾害防治资源,使管道完整性管理工作真正落到实处,最终降低管道运营方的经营成本,提高其经济效益。

参 考 文 献

- [1] 贺剑君,冯伟,刘畅.基于管道应变监测的滑坡灾害预警与防治[J].天然气工业,2011,31(1):100-103.
- [2] 罗小兰,向启贵,银小兵,等.关于天然气管道环境风险评价的认识[J].石油与天然气化工,2008,37(6):532-534.
- [3] 姚安林,徐涛龙,李又绿,等.国内油气管道完整性管理应予以重视的问题[J].油气储运,2010,29(10):721-725.
- [4] 潘懋,李铁锋.灾害地质学[M].北京:北京大学出版社,2006.
- [5] 中华人民共和国建设部.GB 50253—2003 输油管道工程设计规范[S].北京:中国计划出版社,2003.
- [6] 中华人民共和国建设部.GB 50251—2003 输气管道工程设计规范[S].北京:中国计划出版社,2003.
- [7] Det Norske Veritas.DNV-OS-F101 Submarine pipeline systems[S].Norway:Hvik,2000.
- [8] 中华人民共和国建设部.GB 50470—2008 油气输送管道线路工程抗震技术规范[S].北京:中国计划出版社,2009.
- [9] 北京科力华安地质灾害监测技术有限公司.西气东输管道沿线地质灾害前期监测网2009年度监测运行报告[R].北京:北京科力华安地质灾害监测技术有限公司,2010.

(修改回稿日期 2011-12-02 编辑 何 明)