



油气管道科技丛书

6

油气管道安全预警 与泄漏检测技术

中国石油管道公司 © 编

石油工业出版社

油气管道科技丛书

油气管道安全预警 与泄漏检测技术

中国石油管道公司 编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书包括安全预警和泄漏检测两方面的内容,第一篇在分析目前油气管道安全问题的基础上,介绍了分布式光纤预警技术、声波监测预警技术、地震波监测预警技术、光纤光栅地质灾害预警技术。第二篇结合我国油气管道的现状,介绍了负压波和声波泄漏检测方法。

本书可供管道设计、施工、运营相关工程技术人员使用,也可供油气管道科研及管理人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

油气管道安全预警与泄漏检测技术/中国石油管道公司编.
北京:石油工业出版社,2010.7

油气管道科技丛书

ISBN 978-7-5021-7876-5

I. 油…

II. 中…

III. ①油气运输-管道工程-安全技术-研究
②油气运输-管道工程-泄漏-检测-研究

IV. ①TE832 ②TE973

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 119832 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里2区1号 100011)

网 址:www.petropub.com.cn

编辑部:(010) 64523697 发行部:(010) 64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:中国石油报社印刷厂

2010年7月第1版 2010年7月第1次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:11

字数:268千字

定价:48.00元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

《油气管道科技丛书》编委会

主任：姚 伟

副主任：崔 涛 杨祖佩 赵丑民 艾慕阳 张秀杰

委员：刘玲莉 康力平 权忠舆 佟文强 刘广文

郝建斌 李 立 李 莉 刘建平 张一玲

张惠芬 王禹钦

《油气管道安全预警与泄漏检测技术》编写组

编写人：谭东杰 陈朋超 蔡永军 许 斌 王立坤 周 琰

熊 敏 马云宾 王洪超 余东亮 宋 宁 邱红辉

孙 昊 孟 佳 李 俊 南立团 苗国顺 郑 军

刘凤权 宋建河 董红军 张存生 伍 焱 张 晶

杨喜良 李柏松

审核人：艾慕阳 刘建平

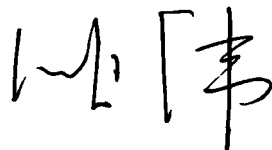
序

今年是“八三”管道建设40周年。40年前的8月3日，经党中央、国务院批准，大庆经铁岭至抚顺和秦皇岛输油管道工程建设领导小组召开了第一次会议，并将这项工程命名为“东北八三工程”。由此，拉开了我国长距离输油气管道建设的序幕，开创了油气管道运输的一个新的时代。40年来，中国的油气管道从小到大、由弱到强，特别是近10年来得到了突飞猛进的发展，现已成为国家能源重要战略基础设施，为国民经济和社会发展做出了巨大贡献。

回顾40年来我国油气管道的发展历程，既是一部艰苦创业史，更是一部科技创新史。自“八三”管道开始，几代管道人以敢为天下先的精神，以大无畏的英雄气魄，迎难而上，努力拼搏，使我国起步较晚的管道事业有了长足进步。其间，科技进步成为发展的助推器。当年在冻土带管道建设、严寒条件下管道防腐、三高原油工艺参数确定等方面开展了大量艰苦细致的科学试验，为管道的顺利建设提供了技术保障，建立了管道勘察、设计、施工及运营的技术标准，为中国管道运输业的发展奠定了基础。此后，在密闭输送、节能降耗、提高效率等技术改造过程中，科技进步始终发挥着支撑和引领作用。

历史表明，科技创新是推进企业发展的巨大动力。随着经济社会发展和国家油气资源战略的实施，油气管道正进入新一轮大发展时期。面对快速发展中的瓶颈技术和当前制约安全生产的难点问题，必须依靠科技进步加以解决。通过科技创新，加快经济发展方式的转变，提高全面协调可持续发展能力，实现管道事业又好又快发展。

为纪念“八三”管道建设40周年，梳理和总结40年来管道科技发展成果，中国石油管道公司组织编写了这套《油气管道科技丛书》。全套丛书共有9个分册，分别对油气管道运行工艺、化学添加剂、流动保障、完整性管理、腐蚀控制、安全预警与泄漏检测、地质灾害风险管理、检测与修复及国内外技术标准等进行了介绍。这套技术丛书，既是对以往管道运行管理技术的回顾和总结，也是对未来管道科技工作的规划和展望。期冀此套丛书成为管道科技发展的新起点，为管道安全运行提供支撑和保障。



2010年5月 于廊坊

前 言

为了纪念“八三”管道建设40周年，总结40年来管道科技成就，为科研、设计、运营管理、领导决策提供参考资料，中国石油管道公司组织专家学者和科技人员共计200余人，历时两年编制了这套油气管道科技丛书。全套丛书共分为9个分册，包括：《油气管道运行工艺》、《油气管道化学添加剂技术》、《油气管道流动保障技术》、《油气管道完整性管理技术》、《油气管道腐蚀控制实用技术》、《油气管道安全预警与泄漏检测技术》、《油气管道地质灾害风险管理技术》、《油气管道检测与修复技术》、《国内外油气管道标准对比分析》。本书是丛书的第6分册。

管道作为长距离输送石油、天然气最安全、经济的运输方式，成为工业经济的命脉。由于油气的易燃、易爆及毒性等特点，一旦管道发生事故，容易引起污染环境、中毒、火灾及爆炸等恶性后果，特别在人口稠密地区，此类事故往往会造成严重伤亡及重大经济损失和恶劣的社会及政治影响，因此管道的安全运行非常重要。

管道企业除了采用了人工巡线、警示牌、沿途宣传、设卡、水工保护等人防措施，减小管道安全事故以外，还应该采用先进的管道安全监控技术，针对第三方破坏、地质灾害及管道泄漏事件进行及时报警并精确定位，从而及时抢险抢修，阻止次生灾害的进一步扩大，具有更加重要的意义。

本书系统地论述了油气管道运营中所遇到的各种安全问题，以及针对这些问题国内外所开发的一系列的技术手段。这些技术有效地实现了管道安全监测、报警及定位。根据管道是否遭到实质性破坏并发生泄漏，将这些技术分为泄漏检测和安全预警两大类。由于这两项技术在原理和实用性上存在较大区别，因此本书将分两篇分别介绍安全预警和泄漏检测技术。

本书第一篇在分析目前油气管道所遇到的安全问题的基础上，根据新建管道、在役管道、重点跨越段和地质灾害管段所受威胁类型的不同，选择了具有代表性的分布式光纤预警技术、声波监测预警技术、地震波监测预警技术、光纤光栅地质灾害预警技术进行介绍。同时，详述了各种技术的发展历程、原理、关键技术及应用场合，并结合现场应用进行实例分析。为了更好地评价各种管道安全技术监测的效果，本书探索性地构建了一套油气管道安全预警技术的评价标准及指标体系，提出了一系列在管道安全预警技术开发过程中需要遵守的标准规范。

本书第二篇分析了管道输送中存在的问题及泄漏危害性，对国内外常用的油气管道泄漏检测技术进行了总结。在此基础之上，结合我国油气管道的现状，

重点介绍了应用广泛的负压波和声波检测方法。根据原油管道、成品油管道以及天然气管道的各自特点及其输送工艺差异，分别介绍了负压波和声波泄漏检测方法在原油管道、成品油管道以及天然气管道上的应用案例。

本书的内容有助于企业领导及技术人员较全面地了解油气管道泄漏检测及安全预警技术，为油气管道泄漏检测及安全预警系统的实施和推广提供参考。

本书编者均为从事长输油气管道安全预警与泄漏检测研究的人员。其中，第一篇第一章由陈朋超、苗国顺、孟佳编写；第二章由周琰、郑军、宋宁编写；第三章由邱红辉、孙翼、杨喜良编写；第四章由蔡永军、南立团编写；第五章由马云宾、李俊、李柏松编写。第二篇第一章由熊敏、张存生编写；第二章由许斌、宋建河编写；第三章由王立坤、董红军编写；第四章由王洪超、刘凤权、张晶编写；第五章由余东亮、伍焱编写。第一篇由蔡永军统稿，第二篇由许斌统稿，全书由艾慕阳、谭东杰统稿，刘建平审稿。

本书在编写过程中，参考了许多同领域专家、学者的著作和研究结果，在此表示衷心的感谢。由于编者水平有限，书中难免存在疏漏和错误之处，敬请读者批评、指正。

编者
2010年5月

目 录

第一篇 油气管道安全预警技术及应用

第一章 绪论	3
第一节 国内外管道安全预警现状	3
第二节 管道安全预警技术的发展趋势	9
参考文献	10
第二章 分布式光纤预警技术	11
第一节 光纤传感技术的发展	11
第二节 光纤管道预警技术原理	14
第三节 光纤微振动检测系统设计	16
第四节 光纤微振动检测定位技术	20
第五节 光纤微振动信号识别	23
第六节 现场工业应用情况	34
参考文献	36
第三章 声波监测预警技术	38
第一节 概述	38
第二节 埋地管道中声波传输机理分析	39
第三节 管道声波检测和处理技术	44
第四节 管道声波预警中的模式识别技术	50
第五节 嵌入式管道声波监测预警系统的实现	53
第六节 管道声波预警系统关键技术	57
第七节 现场工业应用情况	62
参考文献	63
第四章 管道地震波监测预警技术	64
第一节 概述	64
第二节 地震波检测基本理论	65
第三节 基于地震波检测技术的管道监测系统设计	69
第四节 现场工业应用情况	73
参考文献	76
第五章 基于光纤光栅传感的管道滑坡预警技术	77
第一节 概述	77
第二节 光纤光栅传感技术概述	78
第三节 光纤光栅传感原理	82
第四节 滑坡机理分析	87

第五节	基于光纤光栅的管道滑坡监测系统	91
第六节	预警系统传感器设计	94
第七节	现场工业应用情况	96
	参考文献	97
第六章	管道安全预警技术的评价	99
第一节	安全预警技术的部署	99
第二节	管道安全预警技术的实施流程	101
第三节	管道安全预警技术的评价指标	103

第二篇 油气管道泄漏检测技术及应用

第一章	油气长输管道泄漏检测概论	107
第一节	长输油气管道泄漏检测的发展现状	107
第二节	常用管道泄漏检测方法	108
第二章	负压波检测技术	113
第一节	管道泄漏引起的水击	113
第二节	负压波技术基本原理	114
第三节	负压波定位技术	118
	参考文献	127
第三章	原油管道泄漏检测系统的应用	128
第一节	长输原油输送管道的输送特点	128
第二节	原油管道泄漏检测系统设计	133
第三节	长输原油管道泄漏检测系统实例	136
	参考文献	147
第四章	成品油管道泄漏检测系统的应用	148
第一节	成品油管道输送	148
第二节	多传感器融合技术	150
第三节	成品油管道泄漏检测系统应用案例	153
第五章	天然气管道泄漏检测系统的应用	155
第一节	天然气管道输送	155
第二节	天然气管道泄漏检测技术	157
第三节	天然气管道泄漏检测系统应用案例	165
	参考文献	168



第一篇



油气管道安全预警 技术及应用



第一章 绪 论

第一节 国内外管道安全预警现状

一、概述

国外油气管道的安全运行技术和防护技术的研究和应用始于 20 世纪 70 年代的美国,至 90 年代初期,美国的许多油气管道都已应用了安全评价与防护管理技术来指导管道的维护工作。随后英国、加拿大、墨西哥等国家也先后于 90 年代加入了开发和应用行列,至今为止已经取得了一定的成果。目前,针对管道的安全防护问题,国内外除了采用传统的人工巡线、警示牌、重点路口设卡和免费电话报警等人防措施外,所采取的技防手段就是在管道上加装检测流体泄漏后所引起的特性变化进行报警和定位的泄漏检测技术。

近年来,由于我国管道的老龄化和第三方破坏形势的日益严峻,传统的泄漏检测技术已经不能够满足当今安全生产的实际需求,如何利用各种新方法、新技术能够在管道因打孔盗油、机械开挖以及滑坡、泥石流等威胁事件所导致的泄漏之前给出预警信息并准确定位,从而对泄漏事故防患于未然,是我国管道安全运行和发展所面临的重大挑战。

管道安全预警技术主要针对管道运行过程中所遭受到的人为破坏、机械挖掘以及滑坡、泥石流等自然灾害,通过远程实时监测管道沿线的状态变化和信号识别,从而对管道安全威胁事件进行报警和定位。管道安全预警技术的目标是及时发现管道沿线的第三方破坏及地质灾害威胁事件,为避免管道破坏事件的发生赢得时间。

二、管道第三方破坏预警技术

管道第三方破坏预警技术主要针对管道运行过程中所遭受到的人为破坏、机械挖掘等威胁管道安全事件,通过远程实时监测管道沿线的状态变化和信号识别进行报警和定位。管道安全预警技术的目标是及时发现管道沿线的威胁事件,为避免管道破坏事件的发生赢得时间。下面介绍目前国内外针对长输管道第三方破坏安全预警领域相关的主要技术。

1. 分布式光纤预警技术

分布式光纤预警技术依靠与管道同沟埋设的光纤监测非法挖掘等威胁事件导致的土壤微振动,因此会导致两条传感光纤中传播的相干波束会分别产生相位变化,从而引起两光纤汇合处所形成的干涉光的变化,通过监测干涉光的变化即可以监测光纤沿途的振动信号。基于分布式光纤干涉原理的长距离管道安全预警系统首先由澳大利亚的 Future Fiber Tecnology 公司于 1994 年提出,其创始人 E. Tapanes 博士有多项相关专利,开发的 FFT Secure Pipe 管道



安全预警系统，可以实现 30km 的管道沿线的微振动监测。该公司在国外有机场围栏的应用案例，但是没有埋地管道的实际应用案例，而且该系统只能实现触碰报警，不能够对振动信号进行分类。美国的 Optellios 公司也开发了一套 Fiber patrol 1100 系列光纤巡逻系统，可以实现长达 100km 的超长距离的围界入侵报警，目前已经成功地应用于美国和墨西哥边境隔离墙的电子围栏工程。其系统只能实现入侵报警，不能够判断是否为威胁信号并分辨出不同威胁信号的种类。

国内的王延年、赵玉龙在 2003 年提出了一种利用分布式光纤传感器对输送管道泄漏进行实时监测的技术，输送管道发生泄漏以及管道附近的机械施工和人为破坏等事件产生的振动、压力或温度变化信号作用于光纤时，光波在光纤中传输时产生的损耗具有不同的信号特征。分布式光纤传感器可以同时获取损耗的空间分布及其随时间的变化，利用入射端光时域反射技术和在输出端光功率监测，可实现光纤上各点静态与动态损耗的测量和定位。2005 年陈伟民、谭靖发明了一种用于长输管线安全监测的光纤干涉型自动监测方法及系统，利用并行铺设在长输管线附近的单模光纤，或被监测光缆中的备用单模光纤作为分布式传感元件；当管线有泄漏或外界对管线有破坏行为时，光纤的传输特性会发生改变，使激光在两条光纤中的光程差发生变化；利用光干涉方法探知这种变化，用频谱分析的方法分析外界对管线所施加作用的频域特征，以此为依据判断管线所受破坏的类型；同时，利用外力对单模光纤背向散射的影响，精确定位外力在管线上的作用位置；将多个监测系统组建成网络，可以实现超长距离管线的高灵敏度、远程、实时、自动监测。

2004 年以来，天津大学精密仪器与光电子学院和管道研究中心联合攻关，利用 Mach-Zehnder 光纤干涉仪对振动敏感的特性进行管道安全预警技术研究，成功开发出一套分布式光纤管道安全预警系统，并先后在石家庄国家压力容器检测中心、廊坊安全预警试验场、秦京管线进行了现场测试，并率先结合实际长输管道开始了事件识别和威胁事件库积累工作，目前正在港济枣成品油管道上得到应用。

2. 管道声波预警技术

管道声波预警技术的基本原理是：当不法分子在管道上进行铲除防腐层、焊接套管、打卡子、钻孔等活动时，不可避免地会撞击到管道，产生声波，并且沿着管道向两边传播，利用安装在管道上的高灵敏度传感器采集到这种信号，经过判断最终传到监控中心进行报警。

国内利用这一原理对管道第三方破坏信号进行监测的研究相对较少，天津大学靳世久（1994）讨论过输送管道因外力诱发应力波并在管壁内传播，包含声频成分、超声成分，由于管壁的阻尼作用，只有某些频率的波才能传播较远距离。中国石油大学（北京）的张朝晖（2001）和中原油田的张勇（2003）曾在埋地管道上做过试验，但对于管道 TPD 信号传播的机理分析和信号处理方法均没有进行深入研究。近年来，随着高精度声波传感技术和无线通信技术的发展，管道声波预警技术得到了飞速的发展。2004 年南京航空大学的陈仁文、周红梅等作者针对输油管道的应力波检测技术进行了深入的研究，2005 年浙江大学的周泽魁、王强等人提出了一套完整的基于声信号检测的管道第三方破坏预警系统，2006 年，中国石化储运公司和北京科创三思技术公司也通过网络媒体公布了一套基于声波的管道预警系统并申请了一种“输油、气管道防盗预警装置”专利，系统主要采用太阳能供电，无线

通信电台传输数据。这种一点对多点的无线电台方式只适合于油田的片状集输管网，而不适合于站间距很长的长输管道。另外，系统实时采集各子站数据需要耗费大量的电量，暴露在外面的太阳能供电方式本身就带来了许多的安全隐患。中国石油管道研究中心近年来利用 GPRS 无线通信技术研发了一套管道声波预警系统，系统采用了双 CPU 处理结构和休眠唤醒技术以及两级三次的判断方法，使得系统功耗大大降低，并已经开始工业应用。

国外利用声学技术检测长输管道第三方破坏的早期工作是美国 Battelle 研究所从 1991 年开始的，在能源部的资助下做了大量的开拓性工作。研究人员将传感器置于管道外壁接收传播来的声信号，宣称能检测到间距 3mile 外的管道附近挖掘机作业活动所产生的信号。接着英国天然气公司 (British Gas) 开始在工业管道上利用管壁作为声信号传播介质来接收信号并进行实验，接收器是嵌入在管壁上的。日本天然气公司 (Tokyo Gas) 则将传感器伸入到管道中，利用输送介质作为信号的传播介质来进行接收信号。此外，国际上许多研究所，如捷克的 ETOS Acoustics 公司研发的 ETOS 检测系统也在开展相关的研究工作。近年来，法国 LDS 公司研发的 LDS 声音震击检测系统，通过电缆进行信号传递和供电，可对泄漏和第三方破坏进行监测；美国 GE 公司开发了一套管道冲击监测系统 (Threat Scan Impact Detection System)。该技术主要针对非法机械开挖，采用的传感器为水听器，需要在线开孔，检测管道内液体的声波情况。2008 年国际管道会议上，瑞士 ROSEN 公司也开始这方面的相关研究。国外的这些系统主要针对意外过失破坏，不适合国内人为故意破坏的国情，因此限制了系统的应用。

3. 地震检波器预警技术

地震检波器预警技术利用埋设在土壤中的地震检波器阵列作为信号的捕获传感单元，利用同沟埋设的电缆进行各放大单元的供电和通信，利用报警中心的计算机进行信号监控和识别。Hadas 为以色列一家基于声波信号分析技术和地球物理学感应技术、整合现有安防资源，从而提供全天候、实时边界安全解决方案的公司，其研发的 Terra Sonic HPG 油气水管线预警系统为管线安全的保障提供了前所未有的创新解决方案，对于管线的破坏和盗窃活动几乎达到了 100% 的预警率。该系统是一个无源系统，利用一系列阵列传感器（地震检波器预警技术）通过探测和分析人、车辆、设备等在地上及地下进行挖掘、钻探及其他可疑活动等所产生的声波来对潜在的安全威胁进行甄别和定位。Hadas 在信号采集和处理方面，特别是其独一无二的信号分析算法和软件，是该系统的预警性和定位精度远高于其他系统的基础和保证。该系统强大的系统兼容能力亦可将之与现有的安防系统整合从而极大地提高系统的探测精度和预警能力。

Magal 安防有限公司研发的 PipeGuard 管道安全预警系统，该系统能够收集和分析声波信号，将“噪声”信号与威胁事件信号分离，并能威胁事件的性质进行识别确定（比如噪声背景中人工挖掘和汽车发动机声音信号的分离和同时识别）。探测并识别车辆行驶、步行、人工或机械挖掘、开凿、钻孔、泄漏和其他所有能定义的威胁事件的声波信号。该系统一个主要特性是其自学能力，能够分辨声波类型，每当新的威胁事件被探测到，这种险情的波谱便会被增添到系统数据库以扩大检测波谱数据库的容量。探测到威胁后，系统会用一种科学精准的算法对所采集信号进行详细的分析分类，以决定：威胁的性质，发生的地点，威胁事件点的三维坐标。对大多数的威胁事件点的定位误差为正负两米。从事件发生、发出连



续信号到触发警报的响应时间不超过 3.5s。系统对于威胁事件的响应时间可通过调整系统参数而进行调整,灵活性高。智能盒依次与中心安全系统相连。每个智能盒最多可连接 96 个地震检波器。系统可选择的通信方案包括:有线,铜缆解决方案,有线;光纤解决方案;无线,射频信号;无线,卫星传输。PipeGuard 利用一种新型的独特技术对埋地管道进行防护,不论管道的长短,并且能够在潜在的破坏发生之前给有关方面发出警示。该系统的适用于油气田、各类管道、通信电缆等领域。PipeGuard 的系统主要硬件构成有:传感器,电缆,计算处理器,不需要昂贵的基础设施;系统开放性及兼容性强,可以与现有的安全系统整合,以扩大探测和监测范围;软件可升级。典型的体系结构包括一组与智能盒相连的地震检波器。国外的 Homeland intelligent technologies 公司研发了一套综合的管道预警系统。该系统能够对潜在的危害进行预测和监控,并能实现远距离监视。

国内关于这方面的研究相对较少,主要集中的应用在重要区域防护上,进入 20 世纪 90 年代以来,北京理工大学、南京理工大学、西安 212 所等多家单位共同合作,开展了“多传感器与控制网络系统技术”的预研课题,研究了地面传感器与控制网络系统,希望能够全天候地对区域进行监视,探测行进中的目标和人员,并能够对于战场弹射进行有效监控。而对长输管道上的应用还未见报道,2007 年,中国石油管道公司与 HADAS 公司联合研发了一种管道重点跨越预警系统,并成功地在中石油涩宁兰管道盐锅峡和八盘峡跨越实施,系统可以对各种非法入侵、敲击、挖掘进行区域报警,有效地保护着管道安全。

4. 电磁波预警技术

埋地长输管道一般采用阴极保护,对于刚埋入地下或防腐层大修后的管道,防腐层质量较好,阴极保护所需电流较小。随着管道埋地时间的增长,防腐层老化,防腐层绝缘电阻下降,导致阴极保护电流增加,有时甚至某些管段达不到保护的效果,特别是由于外力原因对管道防腐层造成的破坏持续时间短、危重大,如果通过检测和监测防腐层的好坏,从而对管道因各种原因造成的破坏进行预警,并根据一定的标准及时采取相应的措施,比如,对于我国长输管线上存在着不法分子打孔盗油现象。不法分子打孔安装阀门时,首先要破坏管道的防腐层,电磁脉冲方法的原理是依靠给管道与大地所构成的回路施加某一特征的电磁信号,监测同一端回波或者接收端的波形状况,根据变化情况进行比较分析,从而进行报警和定位。

国外目前已经存在利用阴极保护点动态监测阻抗的方法,即强制交互式循环电流 (Impressed Alternating Cycle Current, IACC) 方法,并通过管道防腐层缺陷检测提供客观依据,从而来监测和报告管道附近的第三方接触和活动。国内天津大学李健、陈世利、靳世久发表的基于神经网络的埋地管道防腐层缺陷检测介绍了一种对埋地管道施加小幅度恒电流阶跃信号检测防腐层状态的电化学测试方法,提出利用人工神经网络对检测的响应数据进行智能判断,建立了防腐层状态判断网络模型圈。目前,国外这种 IACC 方法也还处于进一步开发阶段,对良好的实验管道的测量得到了好的实验结果。通过对 IACC 信号激励和处理参数的提炼改进,可以提高 IACC 方法监测范围,减少外部噪声源的潜在干涉,包括从 CP 系统来的噪声。如果想准确定位缺陷,需要对防腐层缺陷(破损和剥离)的性质,管道沿线土壤性质和信号沿线的衰减做进一步研究。国外日本东京天然气公司公布一种利用电磁波探测埋地管道缺陷的实时监测系统,提出了一种探测防腐层缺陷的在线监控系统。该系统能够监视管

道的抗坏性,通过该系统中分析管道-土壤阻抗来识别管道的防腐层损伤并确定防腐层的位置。通过模拟现场防腐层的缺陷来对该系统进行检验。

由于这种方法需要管道的防腐层状况良好,并且与管道直径、土壤状况等因素有关,因此国内利用这种方法进行管道安全预警研发较少。天津大学李健等人利用这种技术建立了数学模型,并搭建模拟系统进行管道泄漏状况的实时监测;中国石油管道研究中心曾利用这一技术进行了模拟实验,结论是当防腐层状况完好的时候,系统能够实时保护的距离为1~2km,一般情况下仅能传输的距离为300m左右。

5. 智能传感保护带预警技术

中国石化储运公司和江阴市盾强科技有限公司公布了一种智能传感保护带预警技术。该技术的传感部分以埋入土壤的防护带为载体,在防护带内部按一定间距嵌入金属丝对,防护带携金属丝对沿管道轴向延伸(缠绕于管道或与管道平行);每隔一定的距离在金属丝对上连接特定阻值的电阻,组成并联电阻监控回路。当防护带遭到破坏时,内部的金属丝断开,整个金属丝回路的电阻值就会发生变化,通过对电阻值的监测就可以对威胁事件进行预警,并根据欧姆定律计算出威胁点的精确位置。该技术整合了复合材料制造加工、管道冷缠胶带防腐、信息网络、卫星定位等技术,适合于新建管线和防腐层大修管线。其优点是反应迅速、漏报和误报较少,缺点是施工较为繁杂。

三、管道地质灾害预警技术

我国幅员辽阔,地理地质条件错综复杂,长距离输油或输气管道输送距离可达数千公里,穿越众多地质地貌单元,常不可避免地要穿过地质条件复杂的地区,如山区、冻土区等。管道建设、人为破坏、自然灾害等因素都会诱发滑坡,在山区敷设的管道受到活动滑坡的严重威胁。目前,国内外应用较广泛的地质灾害预警监测技术主要有全球定位系统(GPS)、合成孔径雷达干涉测量技术、地面三维激光扫描技术等。

1. 全球定位系统(Global Positioning System, GPS)

GPS已广泛应用于国内外岩土体变形监测中,其基本原理是用GPS卫星发送的导航定位信号进行空间后方交会测量,确定地面待测点的三维坐标。在滑坡监测中,在变形区外稳定地区设置1~3个基准点,变形区设置若干监测点,通过测量监测点相对于基准点的位移监测岩土体的变形情况。按载波频率分类,GPS接收机可分为单频和双频两种,用于精密相对定位时,其双频接收机精度可达 $5\text{mm} \pm 1\text{ppm}$;单频接收机在一定距离内精度可达 $10\text{mm} \pm 2\text{ppm}$,用于差分定位其精度也可达 $5\text{mm} \pm 1\text{ppm}$ 。单频接收机价格低,可用于建立小范围监测网监测单个滑坡或附近多个滑坡(基准点到监测点距离不宜大于15km),其应用较广;双频接收机则可用以建立数千公里范围的监测网,成本较高,目前三峡库区已用来建立大范围地表变形监测网,其采用两个基准点时监测精度水平位移优于2.5mm,垂直位移优于3.2mm。

2. 合成孔径雷达干涉测量技术(INSAR)

INSAR是近年来迅速发展起来的一种微波遥感技术,利用合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar)的相位信息提取地表的三维信息和高程变化信息的一项技术,主要应用地形制图、生成大范围高精度的DEM数字高程模型及坡度测量。该技术进一步发展出差分干涉技



术 (DINSAR), 能够检测出毫米级别的地形变化, 被应用于地面沉降、滑坡变形等地质灾害的监测中。通过雷达卫星在相邻重复轨道上对同一地区进行两次成像, 利用其所记录的相对相位进行干涉处理, 解缠计算获取地形高程数据; 再把同一地区的不同时相的两幅干涉图像进一步地差分干涉处理, 即可得到该地区地面沉降或水平位移的信息。由于 DINSAR 技术容易产生去相干问题, 且易受大气影响, 又发展出永久散射体雷达干涉测量技术 (PSINSAR), 因此可用过机载雷达或地面便携式雷达获取高精度图像。目前, 该技术已成为国际遥感界的一个研究热点。21 世纪 80 年代国外学者已将 INSAR 应用于监测地表形变, 1995 年法国对其境内部分滑坡进行了研究, 随后意大利、加拿大及德国等国家陆续开始对其进行研究。目前已在地质灾害监测中得到广泛应用。国内方面, 2000 年天津市已将该技术应用来监测地面沉降; 游新兆等人在长江三峡工程库区利用欧空局提供的数据进行实验; 2000 年被国土资源部列入“滑坡、崩塌地质灾害监测新技术开发”项目课题; 2002 年三峡库区近坝库段 (西陵峡聚坊至香溪河库岸段) 10 余处滑坡的变形监测中应用到此技术; 2005 年中国地质环境监测院与德国地球科学研究中心在三峡库区重点灾害监测点秭归县多处滑坡体上安装了角反射器进行 INSAR 监测。

3. 地面三维激光扫描技术

该技术是对被测物体进行快速网格式扫描测量, 直接获得激光点所接触物体表面的空间位置等信息, 完整地反映被测物体的表面形态, 其获取地表信息的能力是目前其他监测手段难以替代的。应用于监测岩土体表面变形, 也有其他利用激光测距技术开发出的监测系统、仪器。国外较早将该技术应用在变形监测领域中。2003 年在奥地利, 应用 RIGEL 公司的 LMS2Z420 远程地面三维激光扫描仪对 1000m 以外的阿尔卑斯山雪层、冰川变化进行监测; 2004 年在斯洛伐克, 应用 LEICA 公司的 HDS2500 中程地面三维激光扫描仪对多瑙河上的 Gabčíkovo 水电站船闸蓄水前后的变形进行监测等, 都取得了理想的精度结果和良好的经济效益。在国内, 湖北省岩崩滑坡研究所与武汉大学测绘学院引进美国 Trimble 公司生产的 MensiGS200 中程 (测程 350m, 精度为 3mm) 地面三维激光扫描仪在三峡库区白水河滑坡展开试验; 中国地质科学院水文地质环境地质研究所研制出激光微小位移监测系统, 2001 年已在三峡库区滑坡监测中应用。

4. 时域反射测试技术 (Time Domain Reflectometry, TDR)

该技术的原理为: 同轴电缆发生变形时, 其变形处特征阻抗会发生变化, 从电缆端向同轴电缆内发射的测试脉冲信号在电缆的阻抗特性发生变化时发生反射, 通过测量反射信号的到达时间与振幅幅度, 可分析同轴电缆变形位置及程度。用于滑坡监测时, 将同轴测试电缆垂直埋设在滑坡体内 (穿越滑面), 滑坡变形时会挤压同轴电缆, 导致其发生变形, 通过测试同轴电缆变形位置及程度可得滑坡变形位置及变形大小。该技术在国外从 20 世纪 80 年代初期, 已用于工程地质勘察和监测工作, 如监测地下煤层的变形位移, 监测露天矿边坡的稳定性等; 90 年代以来, 开始应用于崩塌、滑坡等地质灾害的监测工作, 目前在发达国家已得到较广泛应用。

在国内, 中国地质大学等单位受国土资源部 2000 年《长江三峡库区地质灾害监测与预报》项目资助, 研制了相应监测系统; 2004 年中国地质调查局技术方法研究所在玉皇阁崩滑体、向家沟滑坡使用了我国自主研发的 TDR 深部位移监测系统。三峡库区巫山残联滑坡