

► 专题综述 ◀

# 国内外管道泄漏检测技术研究进展

付道明\* 孙 军

(塔里木油田分公司开发事业部)

贺志刚

(北京安东奥尔工程技术有限责任公司)

喻西崇

(中国科学院力学所)

**摘要** 对国内外近 10 年中管道泄漏检测技术的研究状况做了跟踪分析。泄漏检测分为直接检测技术和间接检测技术 2 类,前者分为 8 种,后者分为 9 种。简要分析了各种检测技术的检测原理和优缺点;对各种检测方法进行了比较,得到各种检测方法的适用范围。由于工作环境、工作对象的不同,应选择合适的检漏方法。如在长距离管道检测中,应采用机载红外线检测法、压力点分析法、压力波法、质量平衡法等,而在油田管网或场内管网的短距离管道输送中,宜采用 PPA 法、压力波法、噪声检漏法和空气取样法等。

**关键词** 管道 泄露 检测技术 研究进展

## 引 言

我国有很大一部分管道使用时间已超过 20a,管道强度和涂层完整性都已进入危险期,整个油田网络也进入事故高发期。与此同时,我国油田管道人为穿孔盗油现象十分严重,成为我国油田管道泄漏问题的重点,这不仅会造成巨大的财产损失,污染环境,且威胁人身安全。因此,对管道泄漏检测尤为重要,有必要加强检漏技术的开发和研究。

随着管道建设规模的扩大,泄漏检测技术也得到发展。目前已有的检漏方法,从最简单的人工分段沿管段巡视发展到较为复杂的计算机软硬件结合的方法。从陆上检测发展到海底检测,甚至利用飞机进行空中对地下管线的检测。现对国内外管道泄漏检测技术研究进展做如下阐述。

## 直接检漏法

### 1. 检漏电缆系统法

一种检漏电缆系统法是采用附有易被碳氢化合物溶解的绝缘材料的两芯电缆沿管线埋设。这种电缆与渗漏油接触就会发生电缆间的阻抗变化。在管

道一端通过对阻抗分布参数测量处理确定管道状态及渗漏位置。

另一种检漏电缆系统法是用非透水性但有透油性的材料制成的同轴电缆,沿管道铺设,从电缆一端发射脉冲,脉冲碰到被油浸透的电缆处会反射脉冲,通过检测反射脉冲信号,可检测管道泄漏位置。这种方法的优点是不需在管道上配设任何地面检测设备,不需要过多的检测员,就能快速而准确地检测出管道的微小渗漏及渗漏位置。

还有一种是由 Chevron 管道公司开发的 LASP 空气取样系统<sup>[1]</sup>。常规的泄漏检测系统缺乏令人满意的灵敏度,但该系统不受运行瞬态的影响,所以系统灵敏度很高。

这 3 种方法的共同点是都具有很高的灵敏度,但又都存在造价高,缺乏使用连续性,设备更换困难的缺点,限制了它们的推广使用。

### 2. 导电高聚物检漏法

这种方法应用于绝缘管道的检漏。Trace Tek 检测系统可以探测管道绝缘层的浸水点和泄漏点。外包导电高聚物的导线作为探测电缆的一部分用来探测沿线的浸水及泄漏位置。探测电缆中的探测导线通过检测电缆中水蒸气的存在,及早检测出水的进入,使操作者在管道腐蚀前采取修补措施<sup>[2]</sup>。

\* 付道明,高级工程师,生于 1966 年,现为石油大学 2000 级在职研究生,任开发事业部技术部主任。地址:(841000)新疆库尔勒。电话:(0996) 2172336。

(收稿日期:2003-08-03;修改稿收到日期:2003-09-23)

探测电缆可沿其长度探测到存在于任何部位的电导液。探测电缆由2根常规绝缘导线和2根探测导线组成，外包特种导电高聚物。2根导线用不导电的含氟聚合物单丝编织在一起，以提高其强度和韧性，同时具有很好的抗化学性，探测电缆外部套以编织物，允许流体流入探测电缆，还可防止电缆与其它金属构件的偶然接触。多数情况下，浸过水溶液的探测电缆可重复使用，只需将其干燥，用前擦拭干净即可。

### 3. 油检测元件法

这种方法是沿管道外层设置一种导电性粉体元件，当泄漏的油接触到该元件时，其电阻会急剧变化，在管道端部，通过测量处理电阻变化参数，可以确定泄漏位置。

### 4. 油溶性压力管法

将充注压缩空气的油溶性软管缠在管道外围，当有溶油时软管溶解产生漏洞断裂，压缩空气外泄，管内压力下降，由此即可测知泄漏。这种方法只有一次性使用，发现泄漏后，该处软管即损坏，更换非常困难。

### 5. 气体法

这种方法通过检测在输油管道沿线有无可燃性气体来实现，当超过规定的浓度阈值时，可判断存在油品的泄漏。阈值大小可控制系统检漏的灵敏度。煤气管道常采用此法检漏。

### 6. 机载红外线法

这一技术由美国 OIL TON 公司开发。方法是应用直升机吊一航天用的精密红外摄像机沿管道飞行，通过判读输送油料与周围土壤的细微温差成像确定是否有油料泄漏。美国佛罗里达技术网络公司用直升机以 160 km/h 的速度沿线飞行，机上载有红外线摄像装置，记录埋地输油管到周围某些不规则的地热辐射效应，利用光谱分析可检测出较小泄漏位置。原苏联曾用美国研制的机载远距离激光分析仪沿输送天然气的管道飞行，可发现大小为几米，乙烷体积分数仅为百分之一的气体云，分析结果记录在摄像机内，且直升机飞行速度快。这种方法可用于长管道微小泄漏的检测<sup>[3]</sup>。

### 7. 封入气体压力检测法

这种方法是在双层管的两管间隙内密封一定压力的氮气，当内管泄漏时，氮气压力上升；而当外管泄漏时，氮气压力下降，由此即可检漏。如果双层管较长时，可采用加间隔的办法，利用两隔开管段间的压力差检漏。这种方法只能用于少量的双层管段，应用范围较小。

## 8. 水面监视法

对于海底管道及横穿各种水路的管道，可采用监视布设管道上方水面的方法。当发现水面有油污出现时，可判断泄漏产生。根据当时的水流、密度等参数，可估算泄漏位置。这种方法的精度很差，一般难以满足工业要求，只能做粗略判断。

## 间接检漏法

### 1. 质量平衡检漏法

质量平衡检漏法是一种人们较熟悉的检漏法，国内外的资料很多。其工作原理为：对于一条分批输送一种或多种石油产品的完整管道，在一段时间  $t$  内，测量的流入质量可能不等于测得的流出质量<sup>[4]</sup>。这种差异归因于流量测量误差和对管道内所存油品质量估计。

经现场试验测试，质量平衡检漏法的有效性得到了验证。但从试验数据和理论公式可见，管道泄漏定位算法对流量测量误差十分敏感，管道泄漏定位误差为流量测量误差的 6~7 倍，因此流量测量误差的减小可显著提高管道泄漏检测定位精度。提高流量计精度是一种简便可行的方法，但造价十分昂贵，同时还会带来其它一系列问题。北京大学的唐秀家教授于 1996 年 11 月首次提出了采用三次样条插值拟合腰轮流量计误差流动曲线，动态修正以腰轮流量计滑流量为主的计量误差的方法<sup>[5]</sup>。此方法能显著提高管道泄漏检测的灵敏度和泄漏精度。

### 2. 水力坡降线法

水力坡降线法的技术不太复杂。这种方法是根据上游站和下游站的流量等参数，计算出相应的水力坡降，然后分别按上游站出站压力和下游站进站压力作图，其交点就是理想的泄漏点。但是这种方法要求准确测出管道的流量、压力和温度值。对于间距长达几十或百公里的长输管道，由仪表精度造成的误差可能使泄漏点偏移几公里到几十公里，甚至更远，给寻找实际泄漏点带来困难<sup>[6]</sup>。因此，应用水力坡降线法寻找长输管道泄漏点时应考虑仪表精度的影响。压力表、温度计和流量计等的精度对泄漏点的判定都有直接关系。把上、下游站这 3 种仪表的最大和最小两种极端情况按照排列组合方式，可以构成 64 种组合，其中有 2 种组合决定泄漏区间的上、下游极 endpoint。目前这种方法较少采用。

### 3. 泄漏音频检漏法

它是通过音频传感器沿输油管道进行检测，在发现存在泄漏音频信号时，沿管道选 2 个测量点，

根据2个测量点音频频谱中2个频率分量的功率强度可计算出泄漏的位置。这种方法虽被提出,但因为背景噪声的影响,其精度难以保证,妨碍了它的工业应用。

#### 4. 声信号分析法

德国IBP和TWS协作,开发并试验了一种有效的相关分析法检漏的声学技术(德文缩写为LOKAL)。油品在高压下通过漏孔时,会发出噪声,检测这些噪声就可以判断是否有管道穿孔。LOKAL的特点是在管线上借助漏孔两侧的传感器对漏孔定位的相关技术。从原理上可以用一简单的模拟相关器来实现。将其中的一个时间信号延迟一个 $\tau$ 值,并乘以另一个时间信号,相乘的结果在长时间内作平均。相关函数在 $\tau$ 处出现峰值与两个测点处接受到的两个声信号时间差是一致的。通过相关峰出现的位置就可算出漏点的位置。只需知道两个传感器之间管段的准确长度以及在该测量管线上的准确声速即可。研究表明,如果在测量管段的另一端,安装1个声反射体,原则上,只需1只传感器的信号做自相关就足够了<sup>[7]</sup>。声信号检漏法是一种有效的微漏检测法,但无法用于长输管道。

#### 5. 统计检漏法

壳牌公司开发了一种不带管道模型的检漏系统。该系统根据在管道的入口和出口测取的流体流量和压力,连续计算泄漏的统计概率。对于最佳的检测时间,使用序列概率比试验(SORT)方法。当泄漏确定后,可通过测量流量和压力及统计平均值估算泄漏量,用最小二乘方算法进行泄漏定位。自1990年12月以来,该系统已成功应用于几条运行管道中<sup>[8]</sup>。

运行经验表明,壳牌公司的管道检漏统计系统适用于气体和液体管道,也适用于多级入口和多级出口管道,在正常的管道运行期间,可检测出很小的泄漏量。由于该系统无需复杂的管道模型,只需很少的工作就可使该系统满足各种运行要求。该系统可根据入口和出口所测的压力及流量进行设计,计算技能低于传统的软件系统,系统的维护简单易行。

#### 6. 基于神经网络的检漏方法

基于神经网络的管道泄漏检测方法,是由北京大学力学与工程科学系的唐秀家和颜大椿共同开发研究的,为中国博士后科学基金资助项目。由于有关管道泄漏的未知因素很多,采用常规数学模型进行描述存在较大困难,用于泄漏检测时,常因误差很大或易漏报误报而不能用于工业现场。基于人工

神经网络检测管道泄漏的方法,不同于已有的基于管道准确流动模型描述的泄漏检测法,能够运用自适应能力学习管道的各种工况,对管道运行状况进行分类识别,是一种基于经验的类似人类的认知过程的方法。试验证明这种方法是十分灵敏和有效的。

理论分析和实践表明,这种检漏方法能够迅速准确预报出管道运行情况,检测管道运行故障并且有较强的抗恶劣环境和抗噪声干扰的能力。泄漏引发应力波适当的特征提取指标能显著提高神经网络的运算速度。基于神经网络学习计算研制的管道泄漏检测仪器简洁实用,能适应复杂工业现场。神经网络检测方法可推广应用到管道堵塞、积砂、积蜡、变形等多种故障的检测中,对于管网故障诊断有广泛的应用前景。

#### 7. 压力波检漏技术

压力波检漏技术是目前各国优先发展的新型检漏技术,也是我国重点发展技术<sup>[9]</sup>。这种技术以检测压力波为依据。当管道发生泄漏事故时,在泄漏处立即有物质损失,并引起局部密度减小,进而造成压力降低。由于管道中流体不能立即改变流速,会在泄漏处和其任一端流体之间产生压差。该压差引起液流自上而下流至泄漏处附近的低压区。该液流立即挤占因泄漏而引起密度及压力减小的区域在临近泄漏区域和其上、下游之间又产生新的压差。同样,产生液流朝泄漏处流动。这一连锁事故作用的结果是低压波离开泄漏处沿管道上下传播,该低压波称为“扩张波”,又称“压力波”。

试验结果表明:压力波检测法检测管道的泄漏是一项有效而实用的技术。这种方法具有感漏精度高,漏点定位准确和反应迅速的优点。但对于缓慢增加的泄漏反应弱,甚至无效。据国外报道,把不同介质的管道应用对比,如将原油管道与成品油管道相比,前者因粘度高和结蜡的影响,其感漏精度和准确性有所下降。尽管如此,这种方法也不失为一种优良的方法。随着我国管道运输业的飞速发展,它将有广阔的应用前景。

#### 8. 两种新型负压波检漏技术

负压波法是近几年来国际上颇受重视的管道泄漏检测方法<sup>[10]</sup>,它利用管道突然泄漏时,会引发在流体中传播的瞬态负压波,通过捕捉负压波到上、下游的时间差来定位。基于负压波的传播理论,提出了两种定位方法:第一,设计了一种能够快速捕捉负压波前锋到达压力测量点的波形特征点的微分算法,并基于此种算法进行漏点定位;第

二，将极性相关引入漏点定位技术，通过确定相关函数峰值点的方法，进行漏点定位。

这两种定位方法是对泄漏时的压力时间序列分别从微分和积分，从瞬态和稳态两方面进行处理，提取特征值。这两种方法配合使用，相互参照，能够提高泄漏点定位的准确度。

### 9. 压力点分析 (PPA) 检测法

PPA 法是利用压力波原理发展的一种新型检漏方法，较其它方法体现了许多优点。PPA 是在大量研究管道发生泄漏前后，能量和动量平衡特性基础上提出来的。该方法依靠分析由单一测点取得数据，极易实现。增添测点可改善性能，但在技术上不是必需的。在站场或干线某位置上安装一个压力传感器，泄漏时漏点产生的负压波向检测点传播，引起该点压力（或流量）变化，分析比较检测点数据与正常工况的数据，可检测出泄漏。再由负压波传播速度和负压波到达检测点的时间可进行漏点定位。

由于 PPA 分析法紧紧围绕伴随泄漏必然出现的物理现状，因此它具有非常高的性能。PPA 具有使用简便、安装迅速等特点，较快的安装一套 PPA 用不了 1 d 时间，运行全部程序最多不超过 1 d，快的不超过几小时。

## 结论与讨论

(1) 由于工作环境、工作对象的不同，应选择合适的检漏方法。如在长距离管道检测中，应采用机载红外线检测法、压力点分析法、压力波法、质量平衡法等方法，而在油田管网或场内管网的短距离管道输送中，宜采用 PPA 法、压力波法、噪声检漏法和空气取样法等。

(2) 直接检漏法虽然存在许多缺点，但其高度的灵敏性比其他间接检漏法无法替代的，尤其在检测微渗中。直接检漏法还将继续存在，它与间接检漏法配合使用，能够使管道得到很好的控制。

(3) 最重要的结论是：单一检漏装置很难满足实际工作的需要，所以在应用中，一定要考虑各种检漏方法的特点，采用几种检测方法配合使用，可组成可靠性和经济性综合的检漏系统。

(4) 展望检漏技术的发展方向，笔者认为随着科学技术的发展，卫星检漏将提上日程；卫星发射费用不断降低，为管道泄漏检测卫星的发射提供了保障。一颗探测卫星能够覆盖全国的管道网，可以保证实时、准确地进行管道检测。高精度的遥感摄像机能够检测到任何的管道泄漏量。

(5) 管道运输业的发展不会离开检漏技术的发展，随着科学的进步，不同学科的成果会大量应用于管道泄漏的检测中。最终，人们能够圆满地解决这个困难，实现全程、实时、准确控制管道的目标。

### 参 考 文 献

- 1 Jay L Speri. Point Arguello 海洋管道的泄漏检测系统. 国外油气储运, 1992, (4): 10
- 2 James Holmes. 导电高聚物在检漏技术中的应用. 国外油气储运, 1992, (2): 10
- 3 陈达彬. 世界天然气管道发展水平. 石油规划设计, 1995, (5): 10
- 4 胡 坚. 用质量平衡法进行管道检漏. 油气储运, 1997, (12): 16
- 5 唐秀家. 提高管道泄漏检测灵敏度和定位精度. 油气储运, 1997, (4): 16
- 6 钱存普, 蒲家宁. 运用微机判定管道泄漏范围. 油气储运, 1987, (4): 6
- 7 贾志富. 声信号分析法检漏技术及检漏仪. 管道技术与设备, 1991, (33): 28
- 8 夏炜东. 气体和液体管道的统计检漏法. 国外油气储运, 1995, (1): 13
- 9 于 达, 胡华松. 用压力波检测法检测管道泄漏技术的研究. 管道技术与设备, 1993, (7): 4
- 10 靳世久, 王立宁. 原油管道漏点定位技术. 石油学报, 1998, (7): 35~37

(本文编辑 王志权)

# 努力把我国建成机械制造强国