

21世纪 | 21 SHIJI LILUN
CHUANGXIN XILIE CONGSHU
理论创新系列丛书

气体管道泄漏故障诊断研究

Qiti Guandao Xielou Guzhang Zhenduan Yanjiu

◎姚志英 著

中国物资出版社

21世纪 | 21 SHIJI LILUN
理论创新系列丛书

气体管道泄漏故障诊断研究

姚志英 著

中国物资出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

气体管道泄漏故障诊断研究/姚志英著. —北京: 中国物资出版社,
2010.4

(21 世纪理论创新系列丛书)

ISBN 978-7-5047-3342-9

I. 气… II. 姚… III. 气体—管道—检漏 (管道)—研究
IV. U173.92

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 042042 号

策划编辑 胡郁林

责任编辑 王佳蕾

责任印制 何崇杭

责任校对 孙会香 梁 凡

中国物资出版社出版发行

网址: <http://www.clph.cn>

社址: 北京市西城区月坛北街 25 号

电话: (010) 68589540 邮政编码: 100834

全国新华书店经销

三河市西华印务有限公司印刷

开本: 850mm×1168mm 1/32 印张: 5.25 字数: 146 千字

2010 年 4 月第 1 版 2010 年 4 月第 1 次印刷

书号: ISBN 978-7-5047-3342-9/U·0064

定价: 12.00 元

(图书出现印装质量问题, 本社负责调换)

序 言

流体管道泄漏检测与定位是一个跨领域、多学科的综合课题，它结合现代故障诊断、模式识别、人工智能、信号处理等多门学科。由于输气管道的泄漏检测模型很难精确求解，因此一直是流体管道故障诊断领域中的一个难题。其中突发动态泄漏（以下简称动态泄漏）检测与已有稳态泄漏（以下简称稳态泄漏）检测是两个重要的研究内容。现有流体管道泄漏检测与定位的研究大多针对液体管道的动态泄漏进行检测，输气管道的研究工作还只限于理论分析和仿真，很少有进一步的实验研究。本书创造性地将模式识别理论与方法应用于气体管道的泄漏诊断中，着重研究如何实现气体管道动态泄漏和稳态泄漏的检测与定位。

第1章介绍管道运输现状及其故障诊断的现有方法，并综述国内外在流体管道泄漏检测与定位方面的研究现状。

第2章介绍黏性流体动力学理论，研究不可压缩流体和可压缩流体的管内流动模型。深入分析输气管道的稳态、动态特性，设计气体管道泄漏的近似模型，为气体管道动态泄漏、稳态泄漏的故障诊断研究奠定理论基础。

第3章研究和验证本书提出的气体管道泄漏诊断方法的有效性，设计气体管道动态泄漏、稳态泄漏的实验测控系统，包括气动回路和数据采集系统以及应用虚拟仪器平台开发的相应软件系统。

第4章在研究输气管道动态特性的基础上提出采用首末端压力、流量数据特征诊断气体管道的动态泄漏。为避免建立复杂的气体管道泄漏模型，本研究采用径向基网络设计分类器实现气体管道泄漏

工况的辨识。由于暂态区域对于辨识泄漏工况作用较大,采用小波变换捕捉、分析强噪声下管道发生泄漏的暂态区域并提取有效特征向量输入神经网络分类器,实现气体管道动态泄漏检测定位及泄漏量的估计。

第5章针对现有研究大多只能检测流体管道动态泄漏的缺陷,提出一种新的主动施扰法检测气体管道已有的稳态泄漏。通过对管道末端电磁开关阀的开关操作向管内流体施加扰动引入瞬变流,根据不同泄漏工况下瞬变流的特点实现泄漏工况的辨识。

第6章为了提高故障诊断系统的主动自学习能力,研究动态聚类分析在气体管道动态泄漏和稳态泄漏检测与定位上的应用。针对气体管道动态泄漏和稳态泄漏分别设计了诊断泄漏工况的分类器,采用C-均值动态聚类算法实现分类器的无监督学习。为了避免动态聚类算法陷入局部最优的可能性,将生物免疫思想引喻到模式识别的聚类分析中,设计免疫聚类算法实现气体管道稳态泄漏的故障诊断。实验研究证明,免疫聚类算法能够明显提高气体管道泄漏检测与定位的准确率。

本书在现有研究的基础上提出采用模式识别的方法实现气体管道突发动态泄漏、已有稳态泄漏检测与定位的研究主题并对所研究内容进行了实验验证,希望本书可以为气体管道泄漏故障诊断提供一定理论依据和实用参考价值。由于作者水平有限,加之时间仓促,书中如有不妥之处,望读者批评指正。

作 者

2010年2月

目 录

1 绪 论	1
1.1 管道运输现状及其泄漏故障的概述	1
1.1.1 管道运输的发展现状	1
1.1.2 管道运输中存在的问题及其泄漏检测与定位的必要性	2
1.1.3 管道泄漏智能诊断的目标及特点	5
1.2 管道泄漏故障诊断的研究现状	6
1.2.1 管道泄漏检测方法概述	6
1.2.2 国外研究现状	11
1.2.3 国内研究现状	13
2 黏性流体动力学理论及管内流体流动模型	15
2.1 引言	15
2.2 不可压缩流体的管内流动	16
2.2.1 管内不可压缩流体流动基本方程	17
2.2.2 黏性流体运动的一般性质	18
2.2.3 流体在管内流动的流态	19
2.3 可压缩流体的管内流动	24
2.3.1 管内可压缩流体动力方程组	24
2.3.2 可压缩流体的一维定常流动	28
2.4 输气管道的稳态特性分析	30
2.4.1 稳态下平坦输气管道的基本公式	30
2.4.2 沿程摩阻系数的计算公式	31
2.4.3 输气管道的温度变化	31



2.5 输气管道的动态特性分析及气体管道泄漏近似模型	32
2.5.1 气体管道的动态仿真	33
2.5.2 管道瞬变流	36
2.6 本章小结	39
3 气体管道泄漏检测与定位的实验系统	40
3.1 引言	40
3.2 实验系统的设计	40
3.2.1 实验气动回路	40
3.2.2 主要元件的选取	41
3.3 实验系统组成	42
3.3.1 硬件系统	42
3.3.2 软件系统	44
3.4 本章小结	46
4 气体管道动态泄漏检测与定位的研究	47
4.1 引言	47
4.2 气体管道突发动态泄漏的实验研究	47
4.3 基于小波神经网络的气体管道动态泄漏检测与定位	53
4.3.1 基于小波变换的过渡流奇异区域检测	53
4.3.2 小波神经网络用于气体管道泄漏检测与定位	66
4.4 气体管道动态泄漏诊断软件系统	71
4.5 本章小结	72
5 基于主动施扰的气体管道稳态泄漏诊断研究	74
5.1 引言	74
5.2 基于主动施扰法的实验研究	75
5.2.1 主动施扰法原理及实验设计	75
5.2.2 主动施扰法实验结果及分析	75
5.3 基于动态径向基网络的稳态泄漏诊断	79

5.3.1 动态径向基网络设计	79
5.3.2 稳态泄漏检测与定位结果分析	81
5.4 气体管道稳态泄漏主动诊断软件系统	89
5.5 本章小结	90
6 基于人工免疫聚类的气体管道泄漏检测与定位的研究	92
6.1 引言	92
6.2 基于动态聚类分析的气体管道泄漏检测与定位	92
6.2.1 聚类分析的基本算法	93
6.2.2 动态聚类分析算法	94
6.2.3 动态聚类在气体管道动态泄漏检测与定位中的实例分析	98
6.2.4 动态聚类在基于主动施扰的气体管道稳态泄漏检测与 定位中的实例分析	115
6.3 基于人工免疫聚类的气体管道泄漏检测与定位的研究	133
6.3.1 人工免疫原理	134
6.3.2 基于人工免疫进化的动态聚类算法	138
6.3.3 实例分析	140
6.4 本章小结	146
参考文献	148

1 绪 论

管道运输从 19 世纪中叶开始经过 100 多年的发展已逐步成为与铁路、公路、航空、水运并驾齐驱的五大运输行业之一,在我国国民经济和国防工业中发挥着越来越重要的作用。输气管道是国家能源工业的重要组成部分,对其故障检测及监控和管理的水平标志着国家能源技术发展水平。气体管道泄漏故障智能诊断方法的研究是流体运输与现代故障诊断理论等多学科相结合而产生的一门新兴的交叉学科,管道泄漏的检测和泄漏点的定位是该研究中的两个重要内容。

1.1 管道运输现状及其泄漏故障的概述

1.1.1 管道运输的发展现状

经过 100 多年的发展,现代管道运输已成为一种新兴的、经济的运输方式。与其他几种运输方式相比,管道运输具有突出的优点:第一,可大大减少转运换装环节,实现连续运输,运量大、效率高,可避免空车返回的运力浪费并且易于实现自动化管理;第二,管道建设投资省、见效快、占地少,与建设同样长度的铁路相比,管道建设的周期和费用均不到铁路的 $1/2$,占地只有铁路的 $1/9$,并且管道建成投产后,90%的土地可恢复使用;第三,运输过程可实现完全密闭化,效率高、损耗低,燃料消耗是铁路的 $1/2$,是公路的 $1/9$,运输损耗是铁路的 $1/3$,是公路的 $1/2$;第四,可适应各种复杂地形、地貌和气候条件。由于管道运输在运送油气物料时具有平稳连



续、安全性好、运输量大、质量易保证、物料损失小以及占地少、运费低等特点，已成为运输的首选方式。世界各国对清洁能源的重视导致了天然气工业进入飞速发展时期，由于气源一般离人口密集地较远，因此管道成为远距离输送天然气的主要方式。目前，天然气管道的长度超过世界主要管道干线总长度的 $3/5$ ，而且以每年 1 万～5 万多公里的速度在递增。

国外长输天然气管道发展比较早，从 20 世纪 50 年代起，前苏联就开始了长输天然气管道的建设，到 20 世纪 80 年代，苏联建设了 6 条超大型中央输气管道系统，全长近 20000 公里，管径 1220～1420 毫米，是当今世界上最宏大的管道工程。经过半个多世纪的发展，国外长输天然气管道无论在设计、施工、运行管理，还是在管材、压缩机、原动机、储库调峰技术等方面都达到了较高的水平，有许多好的经验和成熟技术可供借鉴。当前，国外输气管道技术的发展主要有以下几个特点：增大管径、高压输送、广泛采用内涂层剪阻技术提高输送能力、采用高级钢管材、完善调峰技术、提高压缩机功率。

国内的天然气管道运输是在 20 世纪 50 年代末从四川省发展起来的。目前，全川的输气管道比较发达，已连接成网，管道总长度 1600 公里。除四川输气管道外，20 世纪 80 年代我国在华北和中原地区的油气田地区也建设了连接附近城市和化工厂的输气管道，如华北至北京线、大港至天津线、中沧线、中开线、天沧线等。至 20 世纪 90 年代中后期，随着大庆油田和新疆地区天然气的开发，国内迎来了输气管道建设快速发展时期。目前，不仅先后建成了陕京线、靖西线和靖银线等输气管道工程，而且正在建设目前输送距离最长、管径最大的新疆塔里木至上海的“西气东输”工程。

1.1.2 管道运输中存在的问题及其泄漏检测与定位的必要性

随着管道的增多、管道运行时间的增长、管壁受到冲刷腐蚀及

人为破坏等原因，管道泄漏事故频频发生，给人民的生命财产安全造成了巨大的威胁。尤其是管道泄漏后，不仅会造成经济上的损失，而且会污染环境，甚至引起火灾和爆炸。管道工业史上的大量数据表明，管道同世界上其他事物一样，事故的发生都遵循“浴缸效应”规律，如图 1-1 所示。

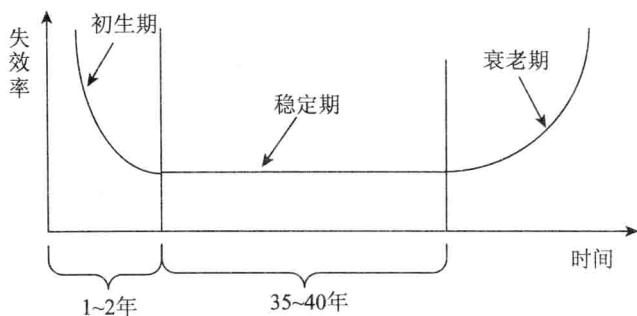


图 1-1 浴缸效应

从图 1-1 可以看出，初生期管道在材质、防腐层、焊口等方面由于施工缺陷（存在未被检查到的缺陷或铺管作业中管体被损伤）或管道周围的环境仍未达到稳定而造成事故发生的概率较高；管道在衰老期，由于腐蚀磨损，管道趋于老化，事故率也会上升。而稳定期事故发生的概率则较低。

统计资料表明，目前世界上总管网 50% 已经用了 30 年甚至更长时间。由于腐蚀、意外损坏等原因，管道事故发生的概率增大，泄漏事故时有发生。此问题任何国家都必须面对，而且会日趋严重。一方面，由于所输介质的危险性和污染性，一旦发生事故会造成巨大的生命财产损失和环境污染；另一方面，长输管道长度一般都在几百公里以上，多经过条件恶劣的无人区，发生泄漏事故之后难以及时发现或确定泄漏地点，可能酿成更大的事故。

在国外，俄罗斯的油气管道老化情况较为严重，恶性管道事故

频繁发生。1989年6月,由于西西伯利亚—乌拉尔—伏尔加地区的成品油管道破裂使液化气漏失,造成起火爆炸事件,致使573人丧生,623人受伤;1998年10月17日尼日利亚南部城市瓦里附近的一个村庄,由于输油管道被破坏,造成大量石油泄漏,突然发生大火并导致输油管道爆炸,有300多人当场死亡。

我国目前已建成油气管道达400多条,其中很多管线已经接近或超过20年,有的甚至处于超龄服役阶段,因此油气管道泄漏事故时有发生。据统计,我国管道事故发生率比发达国家要高很多倍,其中除了自然腐蚀穿孔漏油和外部机械撞击等因素外,人为打孔破坏管道的事故还占相当大的比例。例如,2000年6月3日《北京青年报》第9版报道:据统计,大庆油田1999年因盗抢原油损失20多万吨,总价值2亿多元,其中,在输油管线上打孔盗油案件发生23起,损失原油3000多吨,价值400万元。

以上数据充分说明,管道泄漏造成的经济损失、环境污染及人身伤害是巨大的。如果能够及时发现泄漏、准确定位泄漏点,就能有效减轻泄漏事故造成的损失和危害。因此,管道运行状况的维护管理、泄漏的检测等已成为世界上重要的研究课题并日益受到重视。

虽然世界上很多发达国家从20世纪50年代就开始管道泄漏系统的检测及定位的研究工作,而且相关技术和产品也逐步趋于成熟,一些公司开发了管道泄漏检测方面的软件包,如ATMOSPIPE, ATS, Logica, Scicon Trans, Industrial Date Processing TDS, Newmark等提供基于SCADA系统的管道泄漏检测软件包,但这些系统的价格一般在数百万美元;Ed Farmer&Associates Inc提供一种小型管道泄漏检测系统PPA,其价格为30万美元,而一个带仪表的整套系统价格为700万美元以上,由此可见引进费用极其昂贵。同时由于我国油气管道具有其自身特点,因此仅靠引进国外产品并不能解决我国管道故障诊断的需求。

随着经济的快速发展,我国必将成为一个世界管道大国,对管

道泄漏检测系统的要求也日益迫切,因而利用现代故障检测诊断技术,研制开发适合我国管道状况的泄漏检测与定位系统,对于促进我国经济发展、提高安全生产效率将具有重要意义。

1.1.3 管道泄漏智能诊断的目标及特点

管道泄漏智能诊断的研究属于管道监控领域的故障诊断技术,它的任务是了解、掌握并监控流体管道输送系统在运行过程中的实时状态,并判断当前工况是否正常,以便及时发现泄漏故障,从而实现准确报警的目标。

对于一条输送管道,究竟采用哪一种方法实现泄漏检测与定位,取决于多种因素,这些因素包括管道特征、流质特性、仪器仪表装置、通信能力和经济条件等。由于不同的管道系统在物理特征和实现功能上区别很大,尚没有一种普遍适用的方法具备全部泄漏检测与定位所需的性能指标,但通常情况下系统应尽可能多的包含下列期望功能:

(1) 适应性强。可适用于气体或液体管道,对管道长度、直径、所处地理环境、运行状态等没有限制。

(2) 要求的基本信息少。一般只要求管道的长度、直径、仪表安装的位置、精度、流量和压力的额定范围等。

(3) 误报警率低,识别功能强。可自动区分管道泄漏与分流时的正常运行变化,自动适应和识别管道在线仪表失灵或数据通信错误。

(4) 灵敏性高。检测系统可以检测到的最小泄漏量。

(5) 定位精度高。发生泄漏时,系统检测到的泄漏点位置与实际泄漏位置的误差范围小。

管道泄漏检测定位技术与信息技术、故障诊断技术密切相关,它不仅包括数据采集、数据分析处理和状态识别三个基本环节,也包括故障机理和对诊断对象的研究等。因此管道泄漏故障诊断技术



是建立在检测技术、信号处理、识别理论、决策预报、计算机技术等现代科学基础上的一门综合学科。

1.2 管道泄漏故障诊断的研究现状

1.2.1 管道泄漏检测方法概述

上文介绍的管道泄漏故障诊断目标之间有时会有冲突,比如敏感性与可靠性。因此需针对具体管道运行情况、实施项目的要求进行折中。实际使用中,为了提高系统的综合性能,当一种泄漏检测方法不能同时满足所有要求时,通常将几种方法综合使用。下面对已有管道泄漏检测方法进行简单的介绍。

1. 电缆检漏法和光纤检漏法

电缆检漏法多用于液态烃类介质的泄漏检测。将电缆与管道平行铺设,当泄漏的物质渗入电缆后,电缆的特性会发生变化。目前已研制的电缆有以下几种:油溶性电缆、渗透性电缆、分布式传感电缆等。这些电缆接触到泄漏的烃类物质后,电缆的阻抗特性会发生变化,通过电缆电阻的变化可以判断管道是否发生泄漏并定位泄漏的位置。

光纤检漏法主要包括:准分布式光纤检漏、多光纤探头遥测法、塑料包覆石英(PCs)光纤传感器检漏、光纤温度传感器检漏等。它们的基本原理都是根据光探测器接收的光强或温度(如光纤温度传感器)来确定管道是否泄漏。

电缆检漏法和光纤检漏法的优点是定位准确、能检测微小泄漏,但由于它们是利用检测元件与传输介质直接接触时其物理、化学特性发生改变,根据检测到的变化来诊断泄漏的,因此人为盗窃时可能无法发出报警。并且这些方法成本过高、重复利用性差。所以在实际中这些直接检漏法应用较少。

2. 声波法

管线由于腐蚀、人为打孔等原因破裂时,管道内外产生的压力差使泄漏流体到达管道外部时形成涡流,该涡流产生振荡变化的应力波或声波。应力波和声波沿管壁传播,其噪声强度随传播距离按指数规律衰减。通常情况下,管壁的阻尼作用使只有特定频率的波才能传播到较远处,因此当管道泄漏引发的应力波与管道共振时才能传播较远距离。在管道上安装相应传感器可以检测到应力波,对该应力波分析处理就能确定是否存在泄漏并定位泄漏位置。此种装置一般制成便携式,由管线维护人员携带沿管线检测,通过信号的强度可指示噪声源。早期的应力波检漏仪称为听漏仪,一般应用于城市供水和煤气管网的泄漏检测,但随着城市噪声的显著增加,听声法已经逐渐被淘汰。由于应力波受阻尼作用的影响,衰减很快,因此能够检测到的距离有限。若要对长距离管道泄漏检测则必须沿管道安装许多传感器,对于埋地管道,这种衰减作用更加明显,因此该方法不适于埋地长输管道的泄漏检测。

3. 基于管道模型泄漏检测法

该方法是根据瞬变流水力模型和热力模型及沿程摩阻的达西公式建立管道的实时模型,以实际管道的压力、流量等参数作为边界条件对管道沿线参数在线估算,通过比较估算值和测量值来诊断泄漏故障。

随着各种信息处理方法的发展,现有管道模型方法大都以传统数学模型为基础,结合现代控制理论和现代优化方法为指导,利用各种观测器、Kalman 滤波器、状态估计器等方法估计管道运行参数并与实测值比较以判断管道是否泄漏并实现定位。由于气体在管道中的流动状态比较复杂,在建模过程中需要考虑温度、压力、密度、黏度以及摩擦等多种因素才可以得到准确的模型。而且该方法运算量大、对仪表要求高,所以不易推广。

4. 压力梯度法

在稳定流动的条件下，管道泄漏将导致管道沿线的压力梯度分布呈折线变化，如图 1-2 所示，在泄漏点上游和下游分别设置两个压力传感器测出它们的压力梯度，就能算出实际泄漏位置。

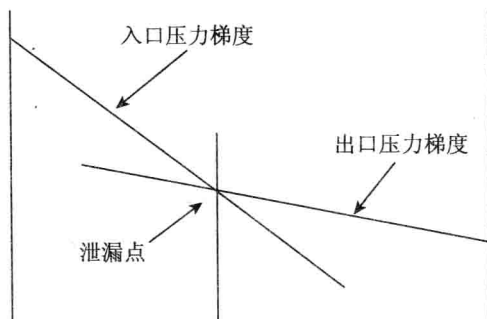


图 1-2 压力梯度法定位示意

该方法原理简单，计算量小，只需在管道两端安装压力表即可进行检测。但是该方法没有考虑温度对管道中流体的黏度、摩阻及密度等参数的影响（通常管道首末端温度相差很大），而实际情况下管道沿线压力分布是非线性的，因此该方法定位精度较低。为了改善上述不足，通常建立反映管道沿线热力变化的综合模型，通过非线性压力梯度分布定位泄漏以提高定位精度。

5. 质量流量平衡法

质量流量平衡法利用管道中流体的质量平衡原理，即没有泄漏时进入管道的质量流量和流出管道的质量流量相等。如果入口流量大于出口流量则管道中间有泄漏存在，即没有泄漏时满足 $M_{入口} = M_{出口}$ 或 $M_{入口} - M_{出口} \leq \text{阈值}$ 。

该方法的检测精度受到流量计精度的制约，而对于加热输送的管道，还需计算沿程温降对流体密度和体积的影响。所以进多少出多少的简单系统在某些应用中不够完善。同时由于该方法不能实现

泄漏定位,因此需要与其他方法配合使用。目前与质量流量平衡法相结合的方法很多,效果比较好的有 SPRT (序贯概率比检验) 方法,它利用概率论、数理统计和随机过程等理论根据流量差信号变化的数学描述实现泄漏检测。此方法同样依赖于流量信号的准确性,因此对设备精度要求较高。

6. 负压波方法

管道发生泄漏时,泄漏点处的流体由于管道内外压差而迅速流失,泄漏点两边的流体由于存在压差而向泄漏点处补充,这一过程依次向上下游传递,相当于泄漏点处产生了一个负压波(减压波),并以一定的速度向上下游传播。根据该负压波传播到上下游的时间差和负压波的传播速度可以实现泄漏定位,如图 1-3 所示。

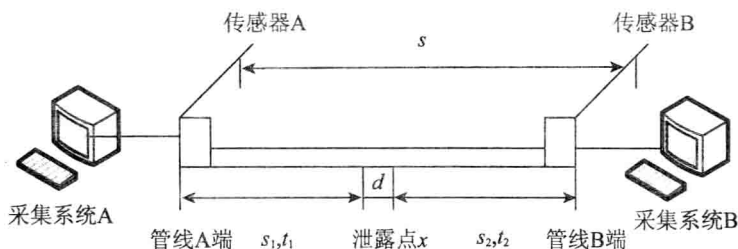


图 1-3 负压波检测泄漏原理

设:站间管道长度为 s (m), 泄漏点距上端站点的距离 x (m), 负压波在管道传输介质中的传播速度为 v (m/s), 上下游传感器接收到负压波的时间分别为 t_1 , t_2 , 则有:

$$x = \frac{1}{2} [s + v \cdot (t_2 - t_1)]$$

管内负压波的传播速度和其传播到上下游传感器时间差的确定是负压波定位方法的关键。确定负压波传播到上下游传感器的时间差,需要准确捕捉检测信号的突变点。实际工况下由于工业现场电磁干扰、输气泵振动等因素的存在,采集到的压力波形序列含有大