



清华大学学术专著

---

# 流体输送管道的泄漏 检测与定位

---

王桂增 叶昊 著

---



清华大学出版社

清华大学学术专著

---

# 流体输送管道的泄漏 检测与定位

---

王桂增 叶昊 著

---

清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

使用管道运输流体是一种经济、方便的运输方式,在石油、天然气以及其他流体输送中占有重要的地位。及时对流体输送管道的泄漏进行检测和泄漏点的定位,防止泄漏事故的进一步扩大,具有重要的经济意义和社会效益。自20世纪80年代初以来,作者所在科研组在液体输送管道的泄漏检测和定位方法方面进行了系统、深入的研究,取得了丰富的理论研究成果,并研究和开发出了液体输送管道泄漏检测系统,对我国在这一领域的研究和应用起到了促进作用。

本书从动态模型的建立、状态估计、信号处理和模式识别等方面全面和系统地介绍了液体输送管道的泄漏检测和定位方法,并从应用的角度简要介绍了泄漏检测系统的组成,探讨了系统的性能评价指标。

本书是作者和研究生20多年来在液体输送管道的泄漏检测与定位方面的研究和应用成果的总结与提炼,对广大从事油气储运及其自动化的工程技术人员和高等院校相关专业的教师、研究生均具有参考价值。所介绍的方法对其他领域从事自动化和技术系统故障诊断研究的工程技术人员、高等学校的教师与学生也具有参考价值。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

流体输送管道的泄漏检测与定位/王桂增,叶昊著.—北京:清华大学出版社,2010.2  
(清华大学学术专著)

ISBN 978-7-302-20443-5

I. ①流… II. ①王… ②叶… III. ①流体输送—管道—检漏(管道) ②流体输送—管道—定位探测 IV. ①U178 ②TE973.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第106478号

责任编辑:王一玲

责任校对:白蕾

责任印制:孟凡玉

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦A座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质 量 反 馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印 装 者:三河市春园印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:175×245 印 张:13 插 页:2 字 数:276千字

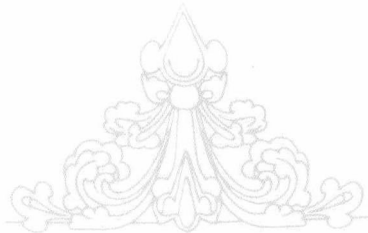
版 次:2010年2月第1版 印 次:2010年2月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:39.50元

---

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:029479-01



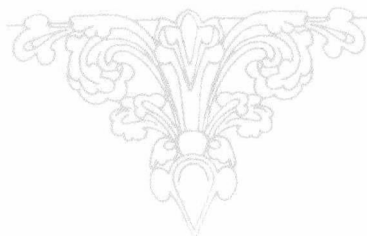
## 作者简介



**王桂增** 汉族, 1941年生, 江苏靖江市人。1965年毕业于清华大学, 1981—1983年赴美国进修。清华大学自动化系教授、博士生导师。曾任清华大学自动化系主任、中国自动化学会理事、中国自动化学会过程控制专业委员会常务委员、中国自动化学会技术过程故障诊断与安全性专业委员会主任。长期从事过程控制和故障诊断方面的教学与研究, 曾讲授“过程控制系统”、“高等过程控制”和“动态系统故障诊断”等课程, 参加编写教材《过程控制》, 主编教材《高等过程控制》。曾获国家教委科技进步(基础研究类)一等奖、中国石油化工集团公司科技进步二等奖、中国石油化工集团公司科技进步三等奖、中国航天工业总公司科技进步三等奖, 并获国务院颁发的特殊津贴。在国内外重要学术刊物和学术会议上发表论文140余篇。



**叶 昊** 汉族, 1969年生, 天津市人。分别于1992年和1996年在清华大学自动化系获得学士和博士学位, 毕业后留校任教至今, 曾于1999年和2003年两次赴德国进行访问研究。现为清华大学自动化系教授, 博士生导师, 清华大学自动化系过程控制工程研究所所长, 中国自动化学会技术过程故障诊断与安全性专业委员会秘书长。长期从事动态系统故障诊断和过程控制方面的教学和研究, 讲授“系统辨识基础”、“高等过程控制”等课程。曾任第6届国际自动控制联合会(IFAC)故障诊断专题会议NOC秘书长, 第7届IFAC故障诊断专题会议IPC委员。在国内外重要学术刊物和学术会议上发表论文50余篇, 其中包括IEEE Transactions on Automatic Control, Automatica等著名国际杂志。曾获全国过程控制会议首届张钟俊优秀论文奖一等奖, 中国石油化工集团公司科技进步一等奖, 中国航天工业总公司科技进步三等奖。



# 前 言

使用管道运输流体是一种经济、方便的运输方式,在石油、天然气以及其他流体输送中占有重要的地位。但是由于管道设备老化、地理条件的变化(如滑坡、地震等)以及人为破坏等原因,管道泄漏事故经常会发生。

管道一旦出现泄漏,不仅会因流体的流失造成直接经济损失和环境污染,严重情况下,还可能发生爆炸和引起火灾,造成设备损坏和人员伤亡。因此,及时对流体输送管道的泄漏进行检测和泄漏点的定位,防止泄漏事故的进一步扩大,具有重要的经济意义和社会效益。

20世纪80年代初,在方崇智教授的领导下,清华大学自动化系成立了从事故障诊断方法和应用研究的科研小组,作为研究课题之一,开始长距离液体输送管道的泄漏检测与定位方法的研究,并在实验室建立了液体输送管道泄漏检测与定位模拟试验台。20多年来,作者所在的科研组在国家自然科学基金和国家863项目的支持下,在液体输送管道的泄漏检测与定位方法方面进行了系统和深入的研究,取得了丰富的理论研究成果。在理论研究和模拟装置实验研究的基础上,1991年与东北输油局沈阳管道设计研究院合作,在新民站—黑山站之间的输油管道上进行了国内首次输油管道泄漏检测与定位方法的工业性试验,取得了较为满意的结果。90年代中期,科研组开始研究和开发液体管道计算机泄漏检测系统,并相继在一些输油管道上应用,取得明显的经济效益和社会效益,对我国液体输送管道的泄漏检测与定位方法的研究和应用起到了促进作用。

本书以3篇11章的篇幅,从动态模型的建立、状态估计、信号处理和模式识别等方面全面和系统地介绍了液体输送管道的泄漏检测与定位方法,并从应用的角度简要地介绍了泄漏检测系统的组成,探讨了系统的性能评价指标。

本书所涉及的内容是作者所在科研组的老师与研究生20多年来在液体输送管道泄漏检测与定位方面的研究和应用成果的总结与提炼,对广大从事油气储运及其自动化的工程技术人员、高等院校相关专业的教师与研究生均具有参考价值。所介绍的方法对其他领域从事自动化和技术系统故障诊断研究的工程技术人员、高等学校的教师与学生也具有参考价值。

清华大学自动化系杨佃福副教授、张福义教授和萧德云教授,已毕业的硕士研究生秦泗钊、董东、王可非、杨军、张布悦、王海生、陈悦、张正伟、杨杰、陈华立、胡蓉、朱

晓星、邵煜、程岳、周海旭,已毕业的博士研究生陶洛文、葛传虎、杨红英和已出站的博士后吕琛等均对本书的内容作出了贡献。葛传虎博士承担了第2章、第9章和第11章大部分内容的写作,昆明理工大学自动化系胡蓉副教授承担了第7章的写作。在此谨对他们致以衷心的感谢!

由于作者水平所限,书中的不足和错误在所难免,恳请读者批评指正。

王桂增 叶昊

2009年10月于清华园

# 目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 管道泄漏检测的意义	1
1.2 流体输送管道泄漏检测方法概述	1
1.2.1 外部环境检测	1
1.2.2 管壁状况检测	2
1.2.3 管内流动状态检测	3
参考文献	9

## 第一篇 基于模型的泄漏检测与定位方法

第 2 章 液体管道的动态模型与仿真	13
2.1 管内瞬态流动的基本方程	13
2.1.1 动量方程	13
2.1.2 连续性方程	14
2.1.3 能量方程	15
2.1.4 状态方程	15
2.2 液体管道模型及其特征线解法	16
2.2.1 液体管道模型	16
2.2.2 特征线解法	17
2.2.3 有限差分方程	18
2.2.4 边界条件	20
2.2.5 分叉连接	21
2.3 瞬变流能量损耗对仿真的影响	21
2.3.1 管道切应力模型	22
2.3.2 管道拟二维模型和二维模型	24
2.3.3 能量损耗对管道仿真的影响	26
2.4 泄漏仿真	28

2.4.1	泄漏量大小的影响	28
2.4.2	泄漏位置的影响	29
2.4.3	泄漏形成时间的影响	29
2.5	基于实时模型的泄漏检测	31
2.5.1	基于直接比较的泄漏检测方法	31
2.5.2	基于修正项的质量/流量平衡方法	31
2.6	瞬变流计算中的几个问题	34
2.6.1	插值问题	34
2.6.2	流动参数的确定	35
2.6.3	管道入口段的流动问题	37
2.6.4	管道高程差的问题	38
	参考文献	40
<b>第3章</b>	<b>基于状态估计的泄漏检测与定位</b>	<b>42</b>
3.1	Kalman 滤波的基本原理	42
3.2	管道状态方程的建立	43
3.3	自适应 Kalman 滤波	49
3.4	基于 Kalman 滤波的泄漏检测与定位	50
3.5	试验结果	52
	参考文献	53

## 第二篇 基于信号处理和模式识别的泄漏检测与定位方法

<b>第4章</b>	<b>随机过程的基本知识</b>	<b>57</b>
4.1	基本概念	57
4.1.1	事物变化过程的分类	57
4.1.2	随机过程的样本与状态	58
4.1.3	集合(总体)平均	58
4.1.4	时间平均	59
4.2	随机过程的数字特征	59
4.2.1	数学期望	59
4.2.2	方差	60
4.2.3	自相关函数	60
4.2.4	互相关函数	61
4.2.5	功率谱密度函数	62



4.3 随机过程的分类	63
4.3.1 连续型随机过程和离散型随机过程	63
4.3.2 连续时间参数随机过程和离散时间参数随机过程	64
4.3.3 平稳随机过程与非平稳随机过程	64
4.3.4 尔格过程(各态遍历性过程)	64
4.3.5 独立随机过程	65
4.4 白噪声过程及其性质	65
参考文献	66
<b>第5章 基于时域分析的泄漏检测与定位</b>	<b>67</b>
5.1 基于相关分析的泄漏检测与定位	67
5.1.1 基于压力波分析的泄漏检测与定位原理	67
5.1.2 泄漏检测与定位的相关分析方法	68
5.1.3 基于广义相关分析的泄漏检测与定位	71
5.2 基于时间序列分析方法的泄漏检测与定位	78
5.2.1 时间序列与系统状态的关系	78
5.2.2 时间序列信号建模	79
5.2.3 判别函数	80
5.2.4 泄漏检测与定位的时间序列分析方法	86
5.3 基于仿射变换的泄漏定位	89
5.3.1 仿射变换的基本原理	89
5.3.2 泄漏定位的仿射变换方法	90
参考文献	93
<b>第6章 基于时频分析的泄漏检测与定位</b>	<b>95</b>
6.1 引言	95
6.2 小波变换的基本原理	96
6.2.1 Mallat 小波变换的定义	96
6.2.2 利用小波变换检测信号边沿的原理	96
6.3 基于小波变换的泄漏检测与定位	98
6.3.1 基于小波变换的泄漏检测	98
6.3.2 基于小波变换的泄漏定位	99
参考文献	102
<b>第7章 基于模式识别和图像处理的泄漏检测与定位</b>	<b>103</b>
7.1 支持向量机的基本概念	103

7.2 基于支持向量机的泄漏检测与定位 .....	106
7.2.1 基于支持向量机的泄漏检测方法 .....	106
7.2.2 基于图像边缘检测的泄漏定位方法 .....	111
7.3 基于图像处理的泄漏检测与定位 .....	118
7.3.1 基于主元分析的泄漏检测方法 .....	118
7.3.2 基于非负矩阵因子分解的泄漏检测方法 .....	122
7.3.3 基于最大互信息的泄漏定位方法 .....	125
参考文献 .....	130
<b>第8章 管网的泄漏检测与定位</b> .....	<b>132</b>
8.1 基于模式识别的管网泄漏检测 .....	132
8.1.1 基本思路 .....	132
8.1.2 泄漏检测 .....	133
8.2 基于模式识别的管网泄漏定位 .....	133
8.3 仿真实验 .....	136
参考文献 .....	138
<b>第9章 基于声波信号的泄漏检测与定位</b> .....	<b>140</b>
9.1 引言 .....	140
9.2 泄漏声波的产生 .....	141
9.2.1 泄漏开始阶段——冲激波声源产生的声压 .....	141
9.2.2 泄漏持续阶段——活塞声源产生的声压 .....	141
9.3 管道中泄漏声波的传播模式 .....	142
9.3.1 管道声学方程 .....	142
9.3.2 管内液体中的纵波 .....	144
9.3.3 管壁中的纵波 .....	145
9.4 管内声波频率响应分析 .....	145
9.4.1 管内频率响应的机理分析 .....	145
9.4.2 管内频率响应辨识 .....	146
9.4.3 仿真结果及分析 .....	146
9.4.4 实验验证 .....	148
9.5 基于 Duffing 振子的声波信号检测 .....	150
9.5.1 Duffing 振子简介 .....	150
9.5.2 基于 Duffing 振子的周期信号检测 .....	154
9.5.3 基于 Duffing 振子的天然气管道泄漏检测 .....	155
参考文献 .....	157

### 第三篇 流体输送管道泄漏检测系统

<b>第 10 章 流体输送管道泄漏检测系统的组成</b> .....	163
10.1 系统的体系结构 .....	163
10.1.1 系统的拓扑结构 .....	163
10.1.2 系统的网络结构 .....	164
10.2 系统的软件结构 .....	167
10.2.1 RTU 程序 .....	168
10.2.2 服务器程序 .....	168
10.2.3 远程客户端程序 .....	169
10.3 远程数据单元 .....	169
10.4 数据通信 .....	169
10.5 GPS 对时 .....	169
参考文献 .....	170
<b>第 11 章 管道泄漏检测系统的性能评价</b> .....	171
11.1 一般故障诊断系统的性能评价 .....	171
11.2 管道泄漏检测系统的性能指标 .....	172
11.2.1 泄漏检测灵敏度 .....	172
11.2.2 泄漏点的定位精度 .....	174
11.2.3 抗工况扰动能力 .....	177
11.2.4 系统响应时间 .....	180
11.2.5 影响系统性能的其他因素 .....	181
11.2.6 性能指标认知上的问题 .....	181
11.3 通过信息融合提高定位精度 .....	182
11.4 最小可检测泄漏量的分析与计算 .....	185
11.4.1 泄漏点压力变化与泄漏量的计算 .....	186
11.4.2 负压波的传播过程 .....	187
11.4.3 最小可检测泄漏量的计算 .....	193
11.4.4 泄漏灵敏点的分析 .....	196
参考文献 .....	198

# 第 1 章 绪论

## 1.1 管道泄漏检测的意义

使用管道运输流体是一种经济、方便的运输方式,和其他运输方式相比,它具有高效、安全、经济、便于控制和管理等多项优点,因此在石油、天然气以及其他流体输送中占有重要的地位。截至 2008 年底,据不完全统计,我国目前已经建成的各类输送管线长度已达到 60000 余千米。但是由于管道设备老化,地理条件的变化(如滑坡、地震等)以及人为原因(如施工、盗油和破坏等),管道泄漏事故经常会发生。

管道一旦出现泄漏,不仅会带来因流体流失而造成的直接经济损失和对环境的污染,严重情况下,还可能发生爆炸和引起火灾,甚至造成人员伤亡。例如 1993 年委内瑞拉的一条天然气管道发生泄漏引起火灾,烧死 51 人。因此,及时对流体输送管道的泄漏进行检测和泄漏点的定位,防止泄漏事故的进一步扩大,具有重要的经济意义和社会效益。

自 20 世纪 80 年代初开始,清华大学和天津大学相继开始进行流体管道的泄漏检测与定位方法的研究,取得了丰富的理论成果,并成功地推出长输管道泄漏检测系统,对我国在这一领域的研究起到了引导和促进作用。20 多年来,管道泄漏检测系统已在液体输送管道中得到了比较广泛的应用,提高了管道的运行管理水平,取得了明显的经济效益和社会效益。

## 1.2 流体输送管道泄漏检测方法概述

流体输送管道的泄漏检测方法很多,分类方法也很多,本书从管道外部环境检测、管壁状况检测和管道内部流体状态检测三个方面进行方法分类和介绍。

### 1.2.1 外部环境检测

#### 1. 外部巡视法

早期的管道大多采用人工分段巡视的办法,这种方法的缺点是速度比较慢,且无

法实现连续性检测。

## 2. 油(气)敏线缆

文献[1,33]介绍了一种分布式碳氢化合物传感器电缆(hydrocarbon distributed sensor cable),该电缆对油(气)十分敏感,通过沿管道的外壁铺设该种线缆来进行泄漏检测和定位。该方法非常灵敏,可以连续检测,尤其对于小的和缓慢的泄漏有良好的效果。但是电缆造价昂贵,被泄漏物质沾染过的线缆需要及时更换。

## 3. 检测光纤

### (1) 硅胶包覆石英(PCS)光纤传感器<sup>[2]</sup>

通常的光纤,是由一个玻璃芯和覆盖其上的一层透明物质包层构成的,玻璃芯和包层的折射率不同,匹配适当的时候,光线可以在其中传播而不发生外泄。硅胶包覆石英(PCS)光纤传感器使用了一种含有特定化学成分的可渗透硅胶包层,当泄漏出的被检测物质和包层中的化学成分相遇的时候,发生化学反应,使包层的折射率发生变化,一部分光线就会被反射回来,通过测量发射和反射脉冲之间的时间差,可以确定泄漏点的位置。这种光纤传感器可用于多种油液的泄漏检测,但价格昂贵。

### (2) 光纤温度传感器

原油、天然气等加热输送管道的泄漏会引起周围环境温度的变化。分布式光纤温度传感器可连续测量沿管道的温度分布的变化情况,当沿管道的温度变化超过一定范围时,就可以判断管道发生了泄漏。据报道,YORK公司的DTS系统(分布式光纤温度传感系统),一个光电处理单元可连接几根温度传感光缆,长度达25km,对于温度的变化可在几秒钟内反映出来<sup>[1,3]</sup>。

## 1.2.2 管壁状况检测

### 1. 对管道外壁的检测

当管壁遭到外力破坏时会发出声音,此声音沿管壁向管线两端传播,在管线沿线设置多个声音接收器,以检测管道是否受到破坏。由于声音在管壁中的衰减,每一个声音接收器所能检测的距离只有几千米。

### 2. 对管道内壁的检测

采用管内探测球(也叫智能清管器,PIG)直接对管道内壁进行检测,看是否发生腐蚀或者破裂。

管内探测球(PIG)<sup>[6]</sup>是一种基于漏磁技术或超声波技术、可在管道内随介质漂流的探测工具。探测球沿管线漂流并且进行探测,将探测到的管壁数据存在内置的专用数据存储单元中以便进行分析。文献[6]对两种基于不同技术的管内探测球进行

了综述和比较。基于漏磁技术的管内探测球具有 N、S 两极,在两极之间有一个对磁漏敏感的传感器。当金属管壁发生腐蚀甚至破裂时,N、S 两极之间的磁场会发生变化,这种变化能被中间的传感器检测到。基于超声技术的管内探测球向管壁发射超声波信号并接收反射信号,从而得到关于管壁厚度的信息。一般来说,基于漏磁技术的探测球对工况扰动的鲁棒性好,更适用于薄管壁;基于超声技术的探测球更加精确灵敏,更适用于厚管壁。管内探测球敏感性好,定位准确,但是无法连续探测,随介质漂流时容易发生堵塞事故,且价格昂贵。

### 1.2.3 管内流动状态检测

近年来,随着计算机应用的迅速发展,监督控制和数据获取(supervisory control and data acquisition,SCADA)系统在管道上的应用愈来愈普遍,泄漏检测和定位功能逐渐成为 SCADA 系统的一个重要组成部分。泄漏检测和定位系统测量管段上、下游端的压力和流量等参数,所测数据送往中央处理计算机,采用各种算法进行实时分析处理,以此来进行泄漏检测和定位<sup>[14,16,17,31,34]</sup>。以 SCADA 系统为平台的计算机实时泄漏检测系统正成为目前泄漏检测和定位的主流工具,也是本书所要介绍的主要内容。

#### 1. 基于模型的方法

这类方法利用管道中流体的质量平衡方程、动量平衡方程和能量平衡方程等进行机理建模。由于管道系统是一个非线性分布参数系统,所建立的模型为非线性偏微分方程,为便于求解,通常采用差分法或者特征线法等方法将其化为线性差分方程。然后,设计状态估计器对系统状态进行估计,根据估计值和实测值之间的差去进行泄漏检测。状态估计器可以是观测器,也可以是卡尔曼(Kalman)滤波器。根据建立模型的方法不同,可以分为不包含故障的模型方法和包含故障的模型方法。

##### (1) 不包含故障的模型方法

不包含故障的模型方法的基本思路是:建立不包含故障的管道动态模型并设计状态观测器,当泄漏发生时,状态估计值和实际测量值之间会产生偏差,根据偏差进行泄漏检测,图 1-1 为不包含故障模型的状态估计器<sup>[11]</sup>。

##### (2) 包含故障的模型方法

包含故障的模型方法的基本思路是:建立管道模型时预先假定管道有几处指定的位置发生了泄漏,通过对系统的状态估计得到这几个预先假定的泄漏点的泄漏量估计值,运用适当的判别准则便可进行泄漏检测和定位。

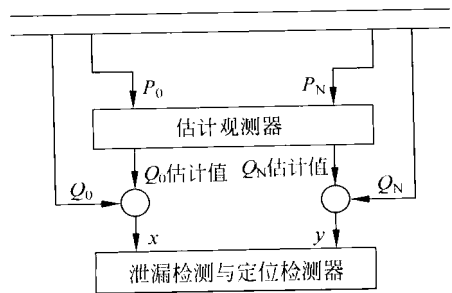


图 1-1 不包含故障模型的状态估计器

文献[12]使用上述方法建模,然后针对每一个假定的泄漏点分别设计一个独立的滤波器,利用各个滤波器的信息,运用统计的方法来进行泄漏检测与定位。该方法由于设计的滤波器太多,计算复杂,不适合实际应用。文献[13,14]将管道等分成  $N$  段,并假定在中间的  $i$  个指定的分段点上的泄漏量为  $L_1, L_2, \dots, L_i$ ,建立包括上述泄漏在内的状态空间离散模型,并设计扩展的 Kalman 滤波器来估计这些泄漏量。Kalman 滤波器的状态变量为各段的压力、流量和预先定义的泄漏量。假定管道只有一个泄漏点,在稳定流动的条件下,利用质量守恒和动量守恒原理,可以得到如下关系式来进行泄漏量估计与定位<sup>[13,14]</sup>。

泄漏量的估计公式为

$$\hat{L} = \sum_{i=1}^{N-1} \hat{L}_i \quad (1-1)$$

泄漏位置的估计公式为

$$\hat{z}_L = \frac{1}{\hat{L}} \sum_{i=1}^{N-1} \hat{L}_i z_{L_i} \quad (1-2)$$

式中,  $\hat{z}_L$  为泄漏点的估计值,  $z_{L_i}$  为管道第  $i$  个分段点的坐标。

通过对  $L$  设置报警限即可进行泄漏检测与报警。文献[14]进一步指出,管道系统为非线性分布参数系统,线性化以后设计的 Kalman 滤波器的过程噪声是时变的。对时变噪声采用带指数加权的噪声估计器进行自适应滤波,可使检测系统的适应能力进一步增强。

该方法的不足之处是:

- ① 检测和定位精度与等分段数  $N$  有关,当实际泄漏点不处于设定泄漏点上时,将会产生定位误差;
- ② 需要设置流量计。

## 2. 基于信号处理的方法

基于模型方法的一个共同特点是需要建立较为准确的数学模型,一些管道上没有安装流量计,使得模型方法的使用受到限制。基于信号处理的方法主要是通过对所检测管道两端的压力和流量信号的分析进行泄漏检测和泄漏点的定位,不需要建立管道的数学模型,更符合我国管道的实际情况,具有更为广泛的应用价值。绝大多数长输管道除首末端安装有供计量用的流量计外,中间管段两端均没有流量计,而目前的管道泄漏检测和泄漏点的定位几乎都是按管段进行的,因而基于信号处理的泄漏检测与定位主要是基于压力信号进行的。对两端安装有流量计的管段,流量信号的引入能使泄漏检测的性能得到改善。

基于信号处理的方法主要包括:

- 基于流量信号的流量平衡法;
- 基于压力信号的压力梯度方法、压力点分析法、统计分析方法和负压波的方法;

- 基于声波的方法。

### (1) 基于流量信号的流量平衡法

根据管道两端出、入口流量是否平衡来检测管道是否发生泄漏,是一种最直观的方法。定义

$$\Delta Q = E\{Q_{in} - Q_{out}\} \quad (1-3)$$

式中, $Q_{in}$ 和 $Q_{out}$ 分别表示管段上游端的入口流量和管段下游端的出口流量; $E\{\cdot\}$ 表示数学期望,在工程上可用一个时间段内的 $(Q_{in} - Q_{out})$ 的平均值来近似; $\Delta Q$ 表示入、出口流量的差。对液体管道来说,近似认为管内介质为不可压缩流体,如管段中间没有分支,则当 $\Delta Q$ 超过一定数值时,就认为管道发生了泄漏。

由于工况条件的变化或者管道内流体参数的变化,也会使流量在动态过程中出现不平衡,因而出现误报。为提高检测的灵敏度和减少误报,文献[9]给出了改进的体积流量平衡法

$$\Delta Q = E\{Q_{in} - Q_{out} - Q_i\} \quad (1-4)$$

式中, $Q_i$ 是考虑了热动态效应引起的管道流体变化量的计算值。为了计算 $Q_i$ ,需要建立与流体温度、压力、比重、黏度以及摩擦等因素有关的管道动态模型。改进的流量平衡法在检漏灵敏度上比一般的流量平衡法有所提高,误报率也有所降低,但它需要建立管道的精确动态模型,增加了复杂性。

该方法直观、简单,但不能对泄漏点进行定位。如果在管道中间增加检测点,将所有点的流量信号汇总构成流量平衡图像,根据图像的变化特征也可以推断出泄漏点的大致位置<sup>[10]</sup>,这种方法不仅增加硬件费用,也给实施带来困难。

### (2) 基于压力信号的方法

① 压力梯度方法。压力梯度方法主要通过分析所检测管段两端的压力梯度的变化来判断管道是否出现泄漏。压力梯度方法又分线性压力梯度法和非线性压力梯度法。

在稳定流动的条件下,近似地认为管内的压力沿管道线性变化。当管道发生泄漏并再次达到稳态后,管内压力分布将如图 1-2 中虚线所示的折线变化。根据 $P_1$ 和 $P_2$ 得到上游端的压力梯度,根据 $P_3$ 和 $P_4$ 得到下游端的压力梯度。当上游端的压力梯度大于下游端的压力梯度时,则认为有泄漏产生。按图 1-3 的原理,不难算出实际泄漏点的位置<sup>[15]</sup>。

压力梯度法只需要在管段两端安装压力表,不需要安装流量计,简单、直观,不仅可以检测泄漏,而且可以确定泄漏点的位置。

由于实际管道沿线压力梯度呈非线性分布,工况条件的变化对压力分布的影响和仪表测量的精度等因素均会影响压力梯度法的定位精度。此外,测点 $P_1$ 和 $P_2$ , $P_3$ 和 $P_4$ 之间的距离直接影响检测的灵敏度。针对这些缺点,文献[7]提出增加上下游的压力测点数目,利用曲线拟合的方法来进行定位。

② 压力点分析法(pressure point analysis,PPA)。管道正常运行时,其压力值呈现连续变化的稳定状态。当泄漏发生时,泄漏点处出现压力突降,破坏了原有的稳态。



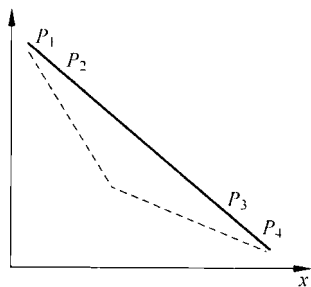


图 1-2 泄漏对管内压力分布的影响

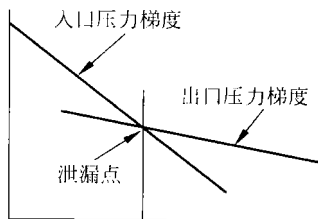


图 1-3 压力梯度法定位原理

并向新的稳态过渡。泄漏点处产生的负压波以声速沿管道向两个方向传播,同时把失稳的瞬态传递到管道的沿线各点,管道的沿线各点都会出现向新稳态过渡的过程。通过在管道沿线设置压力检测传感器,并用统计的方法分析所检测到的压力信号值,提取压力变化曲线,并与管道处于正常运行状态时的曲线作比较,根据两者之间的差别来检测泄漏<sup>[19]</sup>。

PPA 法不需要建模,存储数据量和计算量都比较小,其最大的缺点在于需要在管道沿线设置多个压力传感器。

③ 基于统计分析的方法。文献[20]提出了一种基于统计分析的方法。管道一旦发生泄漏,压力和流量都会发生变化(压力会下降,进出口处的流量会产生偏差),原来管道中的压力和流量的关系就不再成立。统计分析的方法采用一种“顺序概率测试”(sequential probability ratio test)的假设检验方法,从实际测量到的流量和压力信号实时计算泄漏发生的置信概率。

统计上,流入的流量均值  $u_1$  与流出的流量均值  $u_2$  之间会有一定的偏差,但大多数偏差在可以接受的范围之内,只有一小部分偏差属于异常偏差。通过计算标准偏差和检验零假设,对偏差的显著性进行检验,来判断是否出现故障。

作如下假设:

假设  $H_0$ :  $u_1$  等于  $u_2$

假设  $H_1$ :  $u_1$  不等于  $u_2$

利用“顺序概率测试”的方法进行假设检验,如果检验假设  $H_0$  被拒绝,就可判定发生了泄漏故障。泄漏发生后,采用最小二乘算法进行定位<sup>[21]</sup>。

该方法不需要建立管道模型,计算量比较小,误报警率低,对工况条件变化的适应能力比较好。其缺点在于该方法需要流量信号,且对仪器精度要求比较高。

④ 负压波方法。当管道上某处突然发生泄漏时,在泄漏处将引起瞬态压力下降,形成一个负压波。该负压波以一定的速度向管道两端传播,经过若干时间后,分别传到上下游端,根据上下游端的压力传感器所捕捉到的特定的瞬态压力信号即可进行泄漏检测,根据压力传感器接收到的负压波的时间差,即可进行泄漏点定位。为了抑制噪声的影响,提高泄漏检测的灵敏度和泄漏点定位的精度,可采用相关分析法