

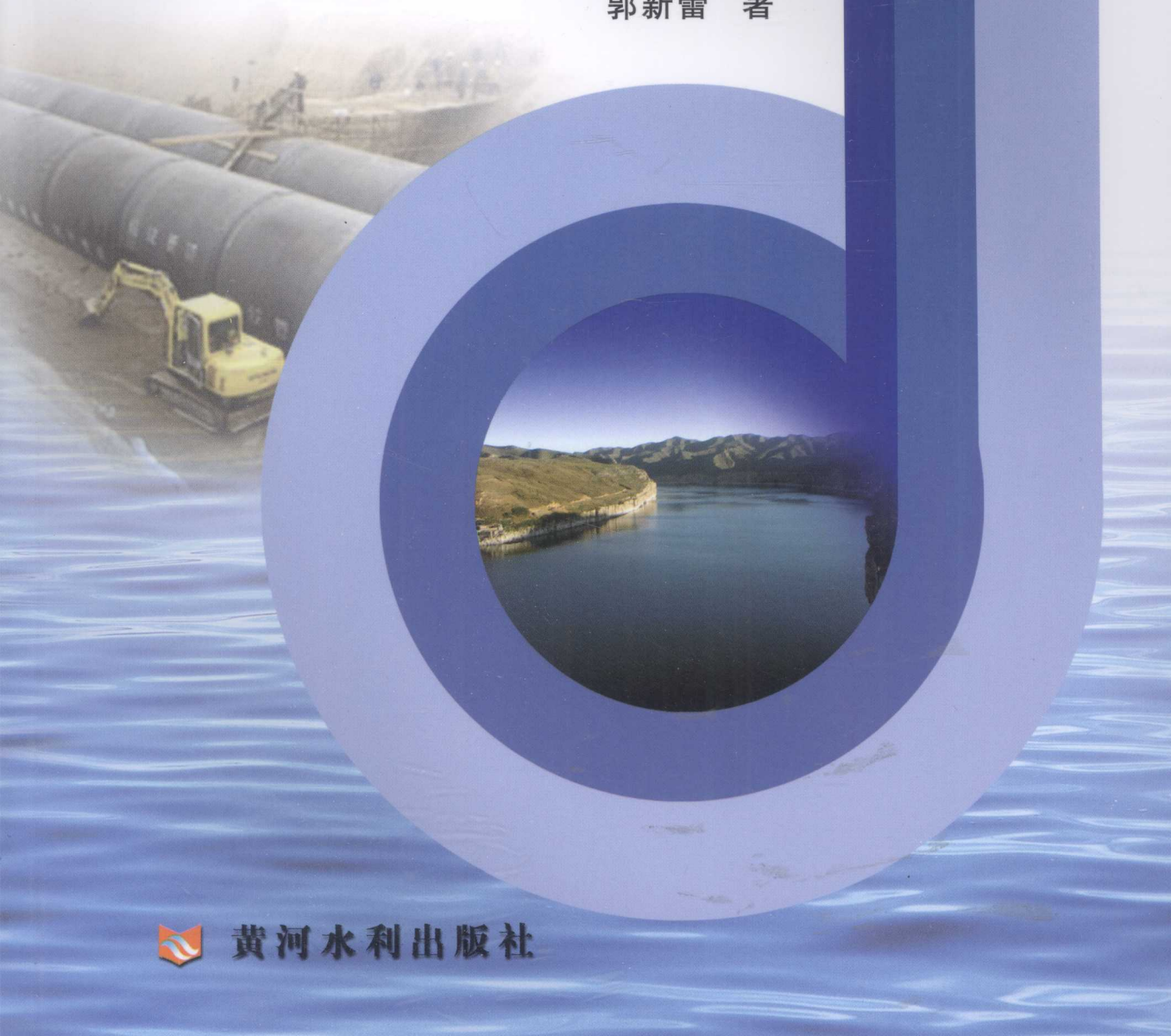


中国水利水电科学研究院
研究生培养基金资助出版

调水工程

管道系统泄漏检测的 全频域法

郭新蕾 著



黄河水利出版社

中国水利水电科学研究院研究生培养基金资助出版

调水工程管道系统泄漏检测的全频域法

郭新蕾 著

黄河水利出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

管道泄漏检测是目前国际水利工程领域的一个热门研究课题。本书综合近期该领域的最新研究进展,系统地介绍了基于水力瞬变全频域分析的调水工程管道泄漏检测方法及典型的检验算例和试验实例,研究工作涉及水力瞬变、泄漏检测理论、模型试验和滤波技术等。

本书可供水利水电、管道工程、输水规划和设计等专业的工程技术人员阅读,亦可供大专院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

调水工程管道系统泄漏检测的全频域法/郭新蕾著.
郑州:黄河水利出版社,2010.6
ISBN 978-7-80734-829-0

I. ①调… II. ①郭… III. ①调水工程-管道-检
漏(管道) IV. ①TV682

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 091239 号

组稿编辑:马广州 电话:0371-66023343 E-mail:magz@yahoo.com

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail:hhslebs@126.com

承印单位:河南省瑞光印务股份有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:8.75

字数:202 千字

印数:1—1 000

版次:2010 年 6 月第 1 版

印次:2010 年 6 月第 1 次印刷

定价:25.00 元

前 言

管道输水是一种常见的调水工程输水方式,由于管道老化、断裂、腐蚀、磨损等原因,泄漏在所难免。管道的泄漏常伴随着巨大的资源浪费和严重的环境污染,因此研究和解决流体输送管道泄漏检测与定位方法的理论问题及实现技术,不但对于输水管线的安全运行及管理具有重要意义,而且具有关乎国计民生的社会现实意义。随着调水工程自动化、信息化程度的提高,调水工程泄漏检测越来越受到重视。

本书综合近期该领域的最新研究进展,以调水工程管道系统为背景,系统地研究了基于水力瞬变分析的泄漏检测方法,重点研究了全频域法,主要工作涉及水力瞬变、泄漏检测理论、模型试验和滤波技术等,并着力解决了目前在实际调水工程中应用瞬变时域、频域法检测泄漏所存在的一些问题,通过大量数值模拟和物理模型试验对提出的方法进行了验证和应用。本书的主要研究工作和取得的成果如下:

(1) 综述目前泄漏检测方法的研究进展,指出国际研究热点以及在调水工程领域存在的主要问题。

(2) 基于水力瞬变分析的管道泄漏检测首先需要准确模拟管道的非恒定流。研究了当前几类非恒定摩阻模型,分析各类模型的优缺点,通过算例验证表明与瞬时加速度有关的 IAB 模型能够模拟出整个时间段上压力波的幅值衰减和畸变,并给出该模型的离散网格和特征线插值解法。

(3) 瞬变检测法必须产生激励信号,利用阀门迅速全关或全开产生流量脉冲或等幅正弦周期扰动、方波扰动在设计、运行中不容许。本书检测法的下游阀门激励方式是靠阀门小开度位置的快速关闭产生。基于此激励方式和 IAB 模型,分析了不同泄漏参数对瞬变水击波的影响,建立泄漏的瞬变反问题分析模型并给出求解方法。

(4) 针对调水工程长距离管道输水系统的特点,建立了适合各种边界条件的管道水击频域数学模型,并应用拉氏变换原理导出了实测离散函数,如阀门流量、管道测点水压的频域数学模型。该模型完全在频域内分析,不需要涉及微分方程,求解时只需要进行复数的代数运算。在此基础上,提出基于水力瞬变全频域数学模型的泄漏检测反问题分析方法,称为管道泄漏检测的全频域法。通过大量的数值模拟和与时域特征线法的对比研究表明,基于水力瞬变全频域数学模型分析的管道泄漏检测是一种有效的新方法。

(5)设计泄漏检测的物理模型进行试验研究。对管道系统特性进行辨识,分析测量信号中的噪声来源,在对比研究传统小波去噪、改进神经网络去噪、最小二乘拟合去噪等方法的基础上,提出了信号预滤波结合阈值自学习小波去噪的综合滤波方法。对部分瞬变工况实测数据进行泄漏时域、全频域模型的验证,验证结果良好,并对频域模型的辨识结果进行分析。

(6)研究了上游动水位边界条件下的全频域数学模型及该模型的抗噪性,提出在泄漏反问题求解过程中仅选取特定的频率范围,将有较大影响的频率(扰动频率)去掉,来实现泄漏辨识模型的求解。最后对泄漏瞬变检测时域、频域法的性能进行了分析研究。

本书研究工作自始至终是在恩师杨开林教授的悉心指导和严格要求下完成的,同时也得益于国家自然科学基金(50679085)以及国家社会公益专项基金(126301041003)、中国水利水电科学研究院专项基金(水集05KY01)的大力支持。在此,谨向提供上述基金资助的单位表示衷心的感谢。

在本书研究工作期间,水力控制研究室的谢省宗教授、董兴林教授始终给予热情的支持与指导,并提出了许多宝贵意见,在此表示衷心感谢。在模型试验的安装及调试过程中,郭永鑫工程师给予了极大的支持,在此表示感谢。作者还得到了陈文学高级工程师、王涛工程师、乔青松博士、崔巍博士、付辉工程师、余闽敏工程师、夏庆福高级工程师以及同班同学肖伟华博士、赵海镜博士等热情无私的帮助,在此一并表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中疏漏之处在所难免,敬请广大读者指正。

作者

2010年2月

目 录

前 言	
第 1 章 绪 论	(1)
1.1 课题的提出及研究意义	(1)
1.2 管道泄漏检测技术综述	(2)
1.3 管道泄漏检测的国内外研究现状及问题分析	(5)
1.4 本书的研究内容、目标及主要工作	(10)
第 2 章 泄漏检测瞬变流非恒定摩阻模型	(12)
2.1 基本假设和控制方程	(12)
2.2 非恒定摩阻模型的研究进展	(13)
2.3 管道泄漏检测中的瞬变流模型	(14)
2.4 泄漏对瞬变水击波的影响	(19)
2.5 遗传算法求解泄漏反问题	(25)
2.6 小 结	(31)
第 3 章 管道泄漏检测的全频域法	(32)
3.1 管道水力瞬变全频域数学模型	(32)
3.2 离散函数的频域模型	(34)
3.3 激励信号的频域模型	(37)
3.4 泄漏边界条件频域模型	(39)
3.5 管道泄漏检测的全频域法	(41)
3.6 泄漏检测点的最少理论设置数量	(45)
3.7 算例研究	(46)
3.8 阀门周期扰动条件下的全频域法	(54)
3.9 小 结	(62)
第 4 章 管道泄漏检测模型试验	(63)
4.1 模型试验布置	(63)
4.2 管道系统参数的率定	(65)
4.3 实测数据的滤波	(67)
4.4 IAB 模型的试验验证	(74)
4.5 时域法试验验证及分析	(78)
4.6 全频域法试验验证及分析	(82)
4.7 小 结	(89)
第 5 章 动边界条件下全频域分析及其抗噪性研究	(91)
5.1 动边界条件下全频域法的数值模拟	(91)

5.2	全频域模型的抗噪性研究	(100)
5.3	小 结	(104)
第6章	瞬变检测的性能分析	(105)
6.1	泄漏检测的最佳测点	(105)
6.2	边界条件的选择	(106)
6.3	初始条件的匹配	(108)
6.4	传递函数的频域周期分析	(112)
6.5	小 结	(116)
第7章	总 结	(117)
7.1	主要结论	(117)
7.2	创新点	(118)
7.3	不足及工作展望	(119)
附 录	(120)
附录1	Matlab 与 C 语言混合编程	(120)
附录2	管道有、无泄漏时沿程水压变化过程	(123)
附录3	驻波原理检验法	(124)
参考文献	(127)

第1章 绪论

1.1 课题的提出及研究意义

我国水资源时空分布变化大,人均占有量小,紧缺形势日益加剧,据统计,我国水资源人均占有量不足 $2\ 200\text{ m}^3$,不到世界人均水资源占有量的 $1/3$ (吴基胜、葛成茂,1997)。北方地区只有 990 m^3 ,不到世界人均值的 $1/8$ 。全国660多个城市有400多个存在不同程度的缺水问题,其中严重缺水的城市114个,日缺水 $1\ 600\text{ 万 m}^3$,每年因缺水造成的直接经济损失达2 000亿元。根据水利部《21世纪中国水供求》分析(张国良,1999),2010年我国工业、农业、生活及生态环境总需求水量在中等干旱年为 $6\ 988\text{ 亿 m}^3$,缺水 318 亿 m^3 ,据预测,2030年全国缺水 $4\ 000\text{ 亿 m}^3$ 左右。这表明,从2010年我国将开始进入严重缺水期,水资源的短缺问题也成为制约我国区域发展的重要因素之一。目前我国正在大规模修建调水工程,以解决部分城市和生态缺水问题。

管道输水是一种常见的调水工程输水方式,输水管道一般具有线路长、直径大的特点,埋深一般 $2\sim 3\text{ m}$ 。例如,南水北调北京段(杨开林、石维新,2003)采用 80 km 管涵输水,管道直径 4 m ,最大流量 $60\text{ m}^3/\text{s}$,埋深 $2\sim 10\text{ m}$ 。内蒙古锡林郭勒盟为了开发当地煤炭资源和恢复生态环境,正在规划的引渤济锡海水西送工程(杨开林等,2007)线路总长 617 km ,其中玻璃钢管管道线路长 305 km 以上,管道直径 3.2 m ,加大流量为 $13.3\text{ m}^3/\text{s}$ 。

管道输送方式在输水方面具有特殊的优势,它具有输送平稳连续、安全可靠、水质易保证、占地面积少、运输费用低等特点,所以目前作为与公路、铁路、航空、水运并驾齐驱的五大运输行业之一,在国民经济发展中发挥着重要的作用(冯健,2005)。

管道泄漏是一种常见的事故。即使管道在铺设时达到了设计质量标准,但由于老化、断裂、腐蚀、磨损等原因,泄漏在所难免。据统计报告(Witness et al,2001),美国相对新的城市管网泄漏损失一般在 25% ,英国泄漏损失在 $30\%\sim 40\%$ 。在我国,大部分城市水的漏失率都在 20% 以上,一些供水管网中水量净漏失率达到 14% ,远远超过了国家要求控制在 6% 以下的标准。如果我国可以将漏失率减少到国际水平,一年至少可以节约近十亿立方米的水资源,相当于一个南水北调工程所能提供的水量(文静,2007)。所以,管道系统一旦发生泄漏,除了会影响正常的生产外,还会因流体流失直接造成巨大的经济损失,以及对环境产生污染等后果,特别是当输送液体有较强腐蚀作用时,如海水等。以南水北调中线北京段为例,如果泄漏量为 1% ,则一天的泄漏量达到 5 万 m^3 ,即使水费按2元计算,每天的经济损失也达10万元。随着调水工程自动化、信息化程度的提高,调水工程泄漏检测越来越受到重视。如正在修建的引黄入晋工程、引滦入津改造工程等在设计阶段就对泄漏的自动化监测提出了要求。

不仅在调水工程输水方面,随着西部和海上油气田资源的开发,特别是西气东输、中

俄和中哈等大型管道工程的启动,管道油气运输优势更得到充分体现。西气东输管道将通过以计算机为核心的监控系统实现全线操作参数采集、管道泄漏检测和定位、全线运行调度等,其自动化系统的整体水平将达到国际先进监控水平(杨开林、石维新,2003;潘家华,2003)。

综上所述,由于管道泄漏常伴随着巨大的资源浪费和严重的环境污染(Colombo et al,2002;Brunone et al,2004),因此研究和解决流体输送管道泄漏检测及定位方法的理论问题与实现技术,不仅对于水及油气输送管线的安全运行与管理具有重要意义,而且具有关乎国计民生的社会现实意义。

1.2 管道泄漏检测技术综述

管道泄漏检测技术较早研究的是输油管道。国外输油管道管理先进的国家,如美国、英国、法国等,自20世纪70年代以来,就在许多油气管道中安装了泄漏检测系统,效果显著。我国在20世纪90年代以来,数家单位相继开展了流体管道泄漏检测的研究工作,对流体的性质、流体的流动、传热及过程控制系统进行了研究(王占山等,2003)。虽然对管道泄漏检测和定位方法的研究已有几十年的历史,但由于管道输送介质的多样性、管道所处环境的多样性、泄漏形式的多样性及检测的复杂性,使得目前没有一种简单可靠、通用的方法解决管道泄漏检测和定位问题。国内总的来说,管道实时监测技术目前处于从国外引进吸收、研究开发的阶段,但就国内已有的技术能力,还没有一个长期运行的、集泄漏检测与定位为一体的管道监控系统。利用综合监测方法可以解决实时监测和泄漏报警问题,但是对微小缓慢泄漏的检测仍然没能很好地解决。

目前,国际已有的管道泄漏检测与定位方法大体上可分为两大类:直接检测法和间接检测法(陈华敏等,2003)。前者可以是沿管线巡查(Weimer,1992),或者沿管线安装对碳氢化合物敏感的光纤或绝缘电缆传感器,利用这些传感器直接感应泄漏液体或气体(Martin,1993;Modisette,1995;Rapaport,1992),泄漏检测系统马上进行报警。此法需预先在管道周围埋设大量传感器和传输装置,费用较高,只能对已经泄漏的地点进行报警。后者常用计算机对管道进行监测,然后利用各种仪表、数据采集系统检测管内流体参数比如压力、流量和温度等作为计算分析方法的已知输入,根据泄漏引起的流量、压力等物理参数发生的变化,通过计算机仿真计算判断管道是否发生泄漏(王占山等,2003)。也就是说,此类方法是充分依靠计算机并利用控制理论、信号处理或某种运算策略,利用泄漏所引起的传输质在管道内或管壁上产生的信息进行泄漏检测和定位。

1.2.1 直接检测法

直接检测法主要包括人工在线观察或巡查法、声学方法、物理化学方法、光纤检漏法等,其主要特征是借助生物视觉或各种特殊传感装置直接感知管道泄漏的存在。

1.2.1.1 人工在线观察或巡查法

对一定的供水区域来说,一个较好的表征管道泄漏的方法是观察其夜间用水量的变化大小,Campbell等(1970)就曾通过比较昼夜间水量差别来推测是否发生泄漏。Cole

(1979) 还曾给出一个相对量化的标准, 即当夜间用水量与白天用水量的比值小于 30% 时, 区域管网不太可能发生泄漏, 如果比值大于 50%, 那么就发生了泄漏, 由此可见该法主观性太强。人工巡查即通过富有经验的人员沿管线逐段巡逻, 通过视觉观察看是否存在泄漏, 该法直观但费时费力, 且对于海底、沙漠或埋地管线无法实施。这类方法已经过时, 某些仅能在特定场合应用。

1.2.1.2 声学方法

声学检测法利用声音传感器来检测泄漏, 当管道发生泄漏时, 从泄漏孔流出流体会发出低频稀薄的声波 (Ellul, 1989; 龚斌等, 2007; 李善春等, 2007), 声波向管道两端传播, 利用外部的传感器检测和记录该信号, 分析信号根据时间的相关性和检测响应位置确定泄漏。该法由 Fuchs 等 (1991) 提出, 随后 Miller 等 (1999) 通过分析检测数据, 建立了管道基准声音图谱, 并给出了参考标准。如果声音信号较大的偏离了管道基准声学图谱, 则发出泄漏报警信息。该法须沿管线每隔一段固定距离安装, 距离泄漏点越近, 检测声音信号越强, 定位效果越好。声学检测法的优点是受测量环境温度影响较小, 不像其他压力方法因波速会随着温度衰减造成误差增大 (Rocha, 1988), 不足是泄漏声信号易与人为或环境噪声相混淆 (Brodetsky et al, 1993), 且它不能检测同时发生的多点泄漏。

1.2.1.3 物理化学方法

该法将一种能与油气进行某种反应的电缆沿管道铺设, 泄漏发生时泄漏油气与电缆发生反应, 改变电缆的特征阻抗并将此信号传回检测中心。电缆既是传感器又是信号传输设备, 利用阻抗、电阻率、长度之间的物理关系确定泄漏位置及大小 (夏海波等, 2001)。日本 20 世纪 80 年代开发的同轴电缆法也类似这种原理, 电缆接触泄漏化合物的部分也导致电缆中能量脉冲的传输阻抗发生变化。管道正常运行时, 电缆传输阻抗特性图谱将会预先存储, 泄漏时, 电缆会浸泡在泄漏流质中, 从而使传输阻抗发生变化, 通过与正常图谱对比发出报警信息。基于物理化学方法的泄漏检测法的优点是检测准确性和定位精度较高, 缺点则是设备投资较大, 运行费用较高, 此外, 信号电缆一旦发生故障, 泄漏检测就没法保证。

1.2.1.4 光纤检漏法

利用地下或附着于管道壁的光纤传感器, 当输送管道发生泄漏时所产生的泄漏噪声会对泄漏点处的光纤发生扰动, 导致传输光波相位发生变化, 两束光相位差的大小与泄漏点位置、泄漏噪声引起光波相位变化速率成比例, 由此可实现对泄漏点进行定位, 该法一般用于气体泄漏检测, 它能够避免普通传感器带来的信号传输衰减、电磁干扰, 以及仪器供电、维护等问题, 同时不需要布置得很密集, 成本较低。

1.2.2 间接检测法

间接检测法利用计算机技术对管道水力学、热力学特征参数 (如压力、流量、温度等) 进行采集、处理, 再利用仿真软件计算进行泄漏的检测, 该类方法可归结于基于传感器、数据采集系统、仿真软件为一体的检测方法。它主要包括压力波法、压力梯度法、质量或流量平衡法、管道实时模型法等。

1.2.2.1 压力波法

当管道上某处突然泄漏时,泄漏点处的流体因边界条件突然改变,将产生瞬态压力降,该压力波(也叫负压波)以一定速度分别向上、下游传播,压力波衰减速度较缓慢,传播主要受流体黏性、可压缩性、流速等物理性质的影响,当上、下游压力传感器捕捉到特定的瞬态压力波形就可以进行泄漏判断。如果能够准确确定上、下游端压力及接收到信号的时间差,那么根据压力波的传播速度就可以检测出泄漏点的位置。根据这一原理,利用相关分析法和小波变换法进行泄漏的检测与定位,该方法需要在沿线设置能连续测量压力、流量、温度的检测点,记录并远传到主控室,而且对传感器精度、传输电路、计算机及配套仿真软件要求很高,其定位精度的关键是精确估计波峰到达时间。由于一般负压波的传播速度较快,所以该法比较适用于大泄漏量的快速检测,较小的泄漏一般耗时较长且不易检测。

1.2.2.2 压力梯度法

压力梯度法基于管道压力沿管道是线性变化的前提下来进行泄漏检测和定位的(王立宁,1998)。当发生泄漏时,泄漏点前的流量变大,坡降变陡,泄漏点后流量变小,坡降变平,沿线的压力梯度成折线型,交点即为泄漏点,管道上下端的压力梯度在泄漏点处有相同的边界条件,据此可计算出泄漏位置。压力梯度法根据管道上下段的压力梯度信号构成时间序列,该时间序列的统计特性对泄漏量敏感,采用相关分析法对该时间序列进行分析,就可进行泄漏检测。不过由于地形环境、生产的需要和管道支线的增多,使得管道布线结构复杂,或由于泵、阀等操作条件的改变,在无泄漏情况下也可能出现压力梯度曲线异常而产生误报警现象。对于长距离输送管道,由于需要布置较多压力传感器而且还需要有信号同步传输设备,整套检测系统耗资也较大。

1.2.2.3 质量或流量平衡法

质量或流量平衡法是根据质量平衡原理,基于管道出入口的流量是否相等来判断泄漏(Liou,1993,1994,1996)。在一段时间间隔内,流入管道的流质体积一般并不等于管道内流质的测量体积,二者的差值取决于流入、流出流量的不确定性(Dennis,1981)。Zhang(1995,1997,2001)提出用统计分析实时测量数据的方法进行气体和液体管道泄漏实时探测与定位,通过比较正常工况时输入输出流量、压力时程关系,用序贯似然比方法(SPRT)检验泄漏发生的假设是否成立,基于最小二乘估计进行泄漏定位。壳牌(Shell)公司基于此技术研制了一套管道检测系统,采用对管道流量和压力测量值的统计分析技术检验流量与压力之间的关系,当泄漏引起压力和流量变化时,二者间的关系便呈现出一种特殊图形,进而发出报警信息。与实时模型不同的是,这种统计方法不采用数学模型估算管道中流体的流量和压力,而是采用测量数据的统计信息监测流量和压力之间的关系变化,由于实际所测流量与流体的温度、压力、密度等性质及流体的状态有关,使得流量法对任一扰动或管道本身动力学变化都非常敏感,易造成误检。

1.2.2.4 管道实时模型法

实时模型法(Abdulrahman,1995)利用流体的质量、动量、能量守恒方程等建立管内流体动态模型,此模型与实际管道同步执行,定时采集管道上的一组实际值,如管道首末端的压力和流量,应用这些测量值,由模型观测管道中流体的压力和流量值,然后将这些观

测值与实测值(常设一定的阈值参数)作比较,若二者不一致,则说明管道发生了泄漏。该法的检测精度依赖于模型和硬件的精度,且泄漏点的定位机理大都是基于压力梯度法。瞬变检测法(杨开林,1996;白莉等,2005)也属于实时模型法的一种,是正在发展的一种检测技术,是目前管道泄漏检测准确性、可靠性较高的一种方法。因为在瞬变条件下,即使微小的泄漏,管道的水压波形也存在着明显差别,与其他方法相比,如压力梯度法、负压波法等,这一特点可以更好地确定泄漏发生位置。它一般由两部分组成:①监控微机及计算机仿真软件;②测量管道中瞬时流量、压力、温度的传感器及将检测数据传输到监控微机的通信设备。在首站和末站进出管道上设置流量、压力、温度传感器,同时在两站之间设置若干压力和温度传感器,以提高泄漏检测的准确性、灵敏度及精度。将首站、末站及管道中检测点的压力、温度等参数传输到装有在线仿真软件的中心计算机,通过中心计算机计算出瞬变过程的数据输出后,供管理人员进行分析和处理。

1.3 管道泄漏检测的国内外研究现状及问题分析

1.3.1 国内研究现状

近年来,国内对于长输管道的泄漏检测技术研究涉及了上述的主要检测方法,不过研究重点仍集中在负压波法检测领域。负压波法原理简单,可迅速检测出10%~20%以上的突发性大量泄漏,在快速诊断中占有较重要的地位。

清华大学的叶昊等(2002)利用负压波法,基于信号处理对输油管线进行了泄漏检测。通过分析管道两端由负压波产生的压力信号判断泄漏的发生,根据压力突降点出现的时间差进行泄漏点定位。为了滤去压力信号和流量信号中的噪声和其他工况扰动成分,采用小波分析方法处理信号,后来该研究组研制的定位系统对32 km的管道进行了在线检测,最小检测泄漏量为 $5 \text{ m}^3/\text{s}$,漏点定位精度为全管长的2%左右。王桂增等(1990)提出基于Kullback信息测度的管线泄漏检测方法并开发了压力点法输油管道泄漏实时监测系统,根据管道进出口附近布置的四点压力测量序列进行时间序列分析,通过分析试验水管管道进出口压力梯度的时间序列能够探测到5%的泄漏,之后又提出对观测序列采用小波除噪技术,以识别泄漏导致的瞬态负压波形。类似地,李剑平等(2006)基于负压波和小波分析将检测应用到山西引黄工程中。张星臣等(2004)基于信号处理,结合小波变换和相关分析二者的优点,提出了小波相关分析法,实际应用中提高了管道泄漏检测的稳定性、灵敏性和准确性。邓鸿英等(2003)基于负压波法并结合定位结构模式识别系统对管道泄漏检测进行了研究,对负压波波形进行分段处理,即在不同的波形段内选用不同的基元形式形成波形结构模式,再与标准负压波模式库进行匹配,从而判断是否有泄漏发生。这种方法克服了用常规数学模型描述泄漏由于内外未知因素多造成误报警率高的弊病,对信号的准确性要求也低得多,缺点是目前还没有比较好的选取基元与描述基元的方法。王立宁等(1998,2000)首次提出了一种考虑沿程温降及对压力波速影响改进的泄漏点压力梯度定位公式,并基于波形的结构模式识别技术,采用小波变换技术捕捉瞬态压力波传播到管道两端的波形拐点形成热输原油管道泄漏监测的瞬态负压波法。夏海波、张

来斌等(2003)研制了一种基于负压波技术的双扭环泄漏检测仪,之后进一步讨论了利用双扭环不间断采集和GPS时间同步技术进行液体管道小泄漏检测的改进方法。朱晓星等(2005)基于负压波法,应用仿射变换的方法,对瞬态压力曲线进行变换和分析,提取瞬态压力曲线上的关键特征量,能够较准确地检测出负压波下降的始点,算法较为简单。唐秀家等研究了管道泄漏引发应力波在管壁中的传播机理,引入神经网络理论,通过对管道泄漏应力波和正常管道信号的自学习、自联想建立对管道故障的自判断能力,同时管道泄漏检测系统也能根据环境变化和误报警纠正后,自动更新网络参数以适应复杂管网现场。类似地,文静等(2004、2006)、路炜等(2007)把泄漏时管壁的振动声信号作为检测信号,根据泄漏声波到达安装在管道上的两个传感器的时间差来估计泄漏位置,定位公式也类似于负压波法,并根据检测信号特性,提出相应的自适应时延估计方法和周期非均匀采样的重构方法,用于提高检测性能,近期该小组又采用盲系统辨识方法(2007)估计泄漏信号传播信道响应函数,从中提取源信号从漏点传播到采集点的时间信息,不依赖泄漏声信号传播速度定位漏点。王潜龙等(2003)和张建利等(2007)也采用声信号分析,前者结合小波包理论对泄漏点进行定位,后者利用傅立叶变换的相关分析算法实现泄漏检测。陈仁文等(2005、2007)将人为打孔盗油看成是对管道施加了冲击激励,激励引起管道产生应力波在管壁中传播,此信号波形的奇异性和噪声的奇异性存在明显差别,利用小波理论对该信号进行分析处理,有效地去除了信号中的随机噪声。陈华立等(2005)针对现有的基于负压波的检测和定位方法当中存在着容易误报和漏报的缺点,研究了一种基于图像处理的方法。将负压波中的压力数值转化为图像灰度值,将压力曲线上的负压波起始点定位等价于图像处理中的边缘检测。经过近似灰度拉伸变换后,压力下降更为凸显,便于突变点的定位,该法对基于负压波检测和定位方法中的小波分析法与相关分析法引起的漏报问题有一定的改善。蔡正敏等(2002)基于质量守恒原理,对管道进出口流量差进行监测,将统计检验中的序贯概率比检验法应用到泄漏检测中,引入泄漏识别因子,有效地将非泄漏因素引起的管道流体流动特性变化与泄漏引起的特性变化区分开来。但在泄漏定位上需要修正计算公式,这样无疑降低定位的准确度。郭亚军等(2003)在分析负压波形成及传播特性理论基础,提出了基于3个传感器的相关定位算法,以减少传统2个传感器检测中传播速度误差和距离误差对精确定位带来的影响,能够提高泄漏点定位的精度。冯健、张化光等(2003、2004)设计出了一种新型的基于非线性观测器的连续小波变换故障检测方法,该观测器具有通用的逼近性能,能有效地克服现有方法中对噪声干扰信号突变特征点不易辨识的难点,之后又结合负压波定位理论,提出了一种管道泄漏的实时检测策略。杨开林等(1995、1996)分析了瞬变泄漏检测法用于管网的可行性,同时建立了瞬态检测法的数学模型及误差准则,并利用二分法来求解数学模型辨识泄漏。白莉等(2005)将管道流动的瞬变流模型转化为状态空间模型,利用扩展的卡尔曼滤波器结合传统恒定摩阻瞬变流方程的特征线解法估计泄漏尺寸及位置。伍悦滨等(2005)提出了基于瞬变分析的漏失数值模拟理论框架,指出该问题实质就是求解系统辨识反问题进行参数的识别。因为管道中的一个泄漏将明显地改变瞬变压力波的幅值衰减,通过改变泄漏参数来最小化压力实测与计算值的差别,可以辨识泄漏。王通、阎祥安等(2005、2006)研究了类似瞬变频域检测方法,应用行波法和传递矩阵法计算管道系统的激励响

应信号,不过最终仍转化到时域,通过小波分析激励时域波形的奇异点确定泄漏信号到达管道末端的时间,实现泄漏定位。

国内目前现有的基于负压波的检测和定位方法中存在着一个共同的问题,即由于负压波波形非常复杂,并叠加着随机的噪声,系统很容易出现误报和漏报,如果泄漏波形幅度较小或波形缓慢,相关分析法(Beck et al,2005)和小波分析法经常会出现漏报,小波分析法在强噪声和阈值过低的情况下经常会出现误报。同时这种检测方式太被动,对管道老化、腐蚀、结合部件不严密等原因导致的持续性缓慢泄漏或已经发生的泄漏,负压波法一般不能检出,这是其局限性(靳世久等,1997、1998)。同时该法的最大挑战是提高对微小的缓慢泄漏量检测的灵敏度以及对泄漏点定位的精度。瞬变检测法是国际上近年发展起来的研究课题,我国在这方面的研究尚处于起步阶段(伍悦滨、刘天顺,2005)。

1.3.2 国外研究现状

国际上近年来对管道输水系统的泄漏检测研究也越来越重视,研究的物理模型(Covas et al,2005;Mpesha,1999)一般可简化为上游固定水位(水库),然后接单管(或分叉管),管道末端接振荡阀门后流入大气,而研究热点主要是瞬变检测法。瞬变检测法分为时域和频域方法,早期常用时域法,时域方法一般需要测量管道进出口的流量及水压变化过程。近年来,Brunone(1999)提出了一个基于瞬变流模型的排水管泄漏定位方法,通过研究激励反射波的衰减幅值来获得泄漏参数。Verde等(2007)利用瞬变法对两个泄漏孔进行辨识。Vitkovsky等(2001、2003)系统地研究了瞬变时域反问题分析进行泄漏检测,并首次将遗传算法用于目标函数的寻优中,而且对交叉算子作了改进,并结合模型试验数据对反问题分析模型中可能存在的误差作了分析,采用一种误差补偿策略对模型进行修正(2007)。Ferrante等(2007)也提出了基于瞬变时域检测泄漏的辨识方法。当管道有泄漏孔时,系统测点的瞬变时域反射波形部分反映了泄漏孔信息,原本平滑连续的时域波形由于泄漏而发生部分间断,这个间断点出现的时刻反映其相对位置,波形间断前后相对大小反映泄漏量,所不同的是作者应用小波分析信号的间断点,同时还研究了滤波对泄漏辨识的影响,该试验要求末端阀门产生流量脉冲信号,若瞬变信号产生的速率过慢,那么激励信号将因为水流耗散作用而太过平滑,以致没有产生间断点,这样此方法即会失效。

在目前,大直径管道流量传感器测量的偏差在0.5%~2%,压力传感器的测量偏差在0.1%~0.05%,也就是说,压力的测量精度远远高于流量的测量精度。另外,瞬时流量传感器,如常用的超声波流量计,在检测时间周期较小时测量值受随机噪声信号的影响很大,真实特性时间历程的辨识比较困难。更重要的是流量传感器比压力传感器投资高得多。基于这些原因,泄漏检测方法的一个发展方向是减少对瞬变流量信号的依赖,通过对管道压力信号的辨识来进行泄漏定位。在这一背景下,泄漏检测的频域法成为国际上的研究重点。

国际著名瞬变流专家Chaudhry(1987)的研究表明,管道中稳定的水力波动可以在时域或者频域中分析,当在时域中分析时,从瞬态过渡到稳定波动的收敛过程缓慢;但是,当在频域中分析时,由于是直接确定系统的频域响应,花费的计算时间小得多。如果管道中

的流量小范围扰动,描述管道流动方程的非线性项影响很小,可视为线性的。管道的频率响应描述的是在不同频率上输出与输入之间幅频或相频的关系,其系统的频率响应特性与边界条件、管道系统配置、流体的波速、管道摩阻、泄漏的参数等相关,它可由频率扫描方法(Chaudhry,1987)来获得,另外也可以由足够带宽的伪随机二进序列产生输入信号的方式来获得(Liou,1998),不过前者应用的较多,利用管道有无泄漏时频率响应曲线,分析频率范围内的幅值大小及规律来进行泄漏辨识。该分析方法被较多应用于管道局部阻滞物或泄漏的辨识中。当管道有局部阻滞物时,与正常管道系统的频率响应曲线相比,它会在各奇谐波位置处降低幅值,在偶谐波位置处增大幅值,同时在整个频率范围内呈现一定的波动形态,而泄漏对管道系统的频率响应的影响作用与之类似。在这点上,Ferrante、Brunone(2003)在计算有泄漏情况下管道的传递矩阵时发现,奇谐波频率上振荡压头的衰减形态与正常无泄漏管道的衰减形态不同且呈一定规律性。Taghvaei等(2006)通过频谱变换分析实测的瞬态压力数据来辨识初始激励压力波和反射波之间的时间延迟,而这一延迟正反映了管道的基本特性,如管道节点、末端阀门、泄漏孔信息。Mpesha、Chaudhry等(2001、2002)研究了上游为水库、下游为可以制造正弦周期扰动阀门条件的管道系统泄漏检测频域数学模型,利用传递函数矩阵直接求解管道末端波动压力的频率响应,与管道系统无泄漏时的压力频域响应图相比,有泄漏时响应图中有附加的共振压力峰值,且附近压力峰值要小于无泄漏的共振压力峰值,泄漏点的定位是通过波动压力的频率响应计算得到的。数值模拟表明,此频域模型只需要测量一个位置,如阀门处的流量或压力信号就可以完成泄漏检测任务,并且具有很高的定位准确性,即使泄漏流量为0.5%,也可以用频域法进行泄漏检测和定位。Lee、Vitkovsky等(2002、2003、2005)同样假设阀门正弦扰动,提出了泄漏检测频域分析方法,研究发现管道压力频域幅值随频率呈波动规律,通过对比有无泄漏时频域响应曲线波形的变化情况进行泄漏的定位,同时还研究了更复杂的情况,考虑了非恒定流摩阻系数的影响,基于系统的频域响应,提出了两种管道泄漏辨识的数值方法,通过比较频率范围内的压头峰值的相对大小来辨识泄漏,其有无泄漏的主要差别仍然集中反映在奇谐波频率上,随后他们又研究瞬变激励条件下的频域模型,并与试验结果进行比较。Taghvaei和Mpesha等的方法优点是明显的,但实施困难,因为需要阀门不断启、闭制造等幅正弦周期扰动或方波扰动,对阀门控制要求高、投资大。Ferrante、Brunone(2003)研究了谐波分析方法,它采用类似频域模型,但将阀门扰动修改为快速关闭,产生一个脉冲流量,通过脉冲响应分析将瞬变方程在频域中直接求解,通过传递函数的谐波分析来实现管道有无泄漏的检测。Wang等(2002、2005)根据一个事实:在阀门突然关闭后,微小的泄漏也大大影响水击波动的振幅衰减速度,提出了一个适用一条等直径简单管道的泄漏检测方法,将泄漏等效为一个水力阻力衰减因子,采用傅立叶变换求解水击偏微分方程,通过分析傅立叶变换各分量频率特性确定泄漏大小和位置,该方法只需管道出口阀门突然关闭产生一个流量脉冲扰动,理论上,它可以检测0.1%以上的泄漏量,并进行泄漏定位。不过,该法不能应用于复杂管线,如不同管径。Sang(2005)考虑了层流和紊流非恒定流的水头损失,把脉冲流量用于泄漏检测,并采用拉氏变换得到系统的频域相应模型,采用遗传优化算法来确定泄漏量和定位。Covas等(2005)基于驻波原理将此泄漏引起的频响衰减规律应用到管道泄漏定位中,而该原理被广泛应用于电力系统

的故障诊断中。最近 Sattar、Chaudhry 等(2008)考虑频率相关的摩阻模型,将频率响应分析方法应用于管道局部阻滞物的位置及大小的辨识当中,不同的是作者基于在偶谐波上的频率响应幅值来进行辨识。在瞬变检测法辨识泄漏数学模型的求解上,Nash 等(1999)、伍悦滨等(2005)、Covas 等(2001)研究了基于梯度的算法,杨开林等(1996)研究了基于试算的二分法,Vitkovsky 等(2000)、Lee 等(2005)研究了基因进化算法等。

1.3.3 存在问题分析

上述研究表明基于瞬变流的时域或频域检测法具有很大的研究和实用价值,但是在实际调水工程中应用瞬变检测法检测泄漏还存在一些问题。

其一,利用阀门迅速全关或全开产生流量脉冲或等幅正弦周期扰动、方波扰动在设计、运行中不容许。对现代大型调水工程,由于线路长,管道直径大,为了减少管道投资,一般采用缓慢的阀门启闭速度,以减小管道承受的水击压力,或者防止管道因瞬时压力过低发生液体汽化现象,保证系统运行安全。

其二,管道泄漏和非恒定摩阻两个因素都直接影响着瞬变水击波形的畸变和衰减特性,能否从压力信号突降点或压力幅频特征畸变过程中分清二者的区别又直接关系定位的准确性。在实际工程应用中,计算管道瞬变流的数学模型时一般都忽略了非恒定摩阻的影响,主要因为工程一般关心的是系统甩负荷时造成瞬变水击波的最高或最低值,对其后的衰减过程并不关心。然而在管道泄漏的瞬变检测方法中存在:①阀门扰动后整个时间段上的瞬变流动的模拟都必须较完整地获得;②瞬变波形每个谐波的幅值大小需尽量准确地模拟;③系统较小的 L/a (L 为线路长, a 为水击波速) 值造成非恒定流壁面切应力来不及因水流耗散作用消耗掉。现有研究采用的阀门完全关闭情况用线性化模型描述存在误差,实际上,即使采用现有的非线性模型也很难模拟阀门完全关闭后的水力过渡过程,例如,在阀门不完全关闭情况下,实测水压与计算值非常接近,但在阀门完全关闭后,实测水压波动幅度比计算的小得多(杨开林,2000)。最近 Nixon 等(2006、2007)利用二维水击模型研究了非恒定摩阻在瞬变反问题辨识泄漏中的敏感性问题,数值模拟结果也表明,泄漏和非恒定摩阻这两个因素都影响着瞬变水击波波形的畸变和衰减特性,尤其当泄漏量小于管道流量的 20% 时,必须考虑非恒定摩阻。由此可见,采用非恒定摩阻的瞬变流模型比传统水击模型更能提高瞬变检测法的检测精度。

其三,现有的瞬变频域检测不是纯粹在频域范畴内分析求解,它们也需要部分时域信息,由于在管道中很难产生高频激励,且频响图依赖于外部激励的形式,这对于复杂系统有时是一件困难的事情。

其四,当阀门完全关闭时间 T 很短时,如 $T \leq L/a$,则阀门流量的变化可以用脉冲函数表示,因为阀门流量的变化过程曲线形状对管道中水力瞬变没有影响;但是,当阀门关闭较缓慢时,阀门流量的变化过程曲线形状对管道中水力瞬变有很大影响,不能用脉冲函数描述阀门流量的变化。较长的阀门关闭时间,不能简单用一个流量脉冲函数表示,在此情况下,流量变化过程对水力瞬变有较大影响,必须考虑。

其五,求解模型时,LM 算法是标准的优化求解方法,但是其收敛依赖于初始值,容易陷入局部最优,在瞬变分析中该法的计算量大;试算法概念简单,但费时,盲目性较大。

其六,现有频域法多从数学模型、数值模拟上进行检测,缺乏试验验证,包括实验室模型验证。在一般情况下,为了使水力检测数据不失真,泄漏检测仪器的检测周期需很小。实践表明,由于实际工程中管道系统本身是动态运行,在瞬变过程中存在一些随机不确定性干扰因素,如噪声、测量误差等,且检测周期越小,噪声信号的干扰越大。如何从噪声干扰信号中辨识出量测流量、水压的真实水力瞬变特性也是需解决的一个问题。

1.4 本书的研究内容、目标及主要工作

1.4.1 主要研究内容、目标

调水工程管道系统的典型布置一般是:

(1) 泵站—管道—调节池(或者出水池,调压井),然后在调节池后接明渠或者管道,如引黄入晋输水工程、南水北调中线北京段有压管涵输水工程。

(2) 调节池—管涵—调节池(或者保水堰),然后在调节池后接明渠或者管涵,如南水北调中线天津段有压管涵输水系统。

二者的泄漏检测模型可归纳为:水库(调节池)—管道—阀门,如前所述,这也是目前国际上研究的概化物理模型。对所研究的不同边界条件下的管道系统,泄漏检测设备最少的传感器布置是:在阀门处设置流量、压力传感器,在调节池处设置压力传感器。作为更可靠的方法,也可在管线上多设一些压力传感器。泄漏检测的方法是,由阀门部分关闭/开启或特殊激励方式制造流量扰动信号,同时由流量、压力传感器记录阀门和调节池处流量、压力及水位的水力瞬变时间历程,然后以阀门处流量和调节池水位作为已知边界条件,分析系统泄漏前和泄漏后其他传感器处水压的时频域特性,通过对理论时频特性和实测时频特性的比较,以确定泄漏大小和位置。本书的研究目标是发展实用的泄漏检测瞬变时域、频域理论和实施方法。

1.4.2 主要研究工作

本书系统地研究了基于水力瞬变全频域分析的调水工程管道系统泄漏检测方法,研究工作涉及瞬变流、泄漏检测理论、模型试验和滤波技术等,着力解决目前在实际调水工程中应用瞬变检测法检测泄漏所存在的一些问题,各章节的主要内容如下:

第1章绪论部分主要介绍开展调水工程输水系统管道泄漏检测研究的意义,综述目前泄漏检测方法的研究进展,指出国际研究热点以及在调水领域存在的主要问题,同时叙述本书的研究内容、目标等。

第2章研究泄漏检测瞬变流非恒定摩阻模型。分析各类模型优缺点,通过文献算例验证表明与瞬时加速度有关的IAB模型能够模拟出整个时间段上压力波的幅值衰减和畸变,并给出该模型的离散网格和特征线插值解法。分析不同泄漏参数对瞬变水击波的影响,同时以瞬变流IAB模型为基础,建立泄漏的瞬变反问题分析时域模型,用遗传优化算法结合该模型求解目标函数,给出数值计算程序流程图,并将之应用于算例进行泄漏参数的辨识,寻优的效果比较明显,为后续开展管道泄漏检测的全频域法奠定基础。