

文章编号: 1000-8241(2016)03-0250-04

基于 HHT 时-频熵的声发射管道泄漏诊断

周颖涛¹ 周绍琦¹ 晁文胜² 张少波³

1. 中国人民解放军后勤工程学院军事供油工程系; 2. 68099 部队; 3. 78355 部队

摘要: 针对油库管道的泄漏诊断问题, 利用管道泄漏声发射信号非平稳的特点, 提出了基于 HHT 时-频熵的声发射管道泄漏诊断方法。该方法采用 Hilbert-Huang 变换分析管壁声发射信号, 求得信号 HHT 谱, 将 HHT 时-频平面划分为等面积的时-频块, 运用信息熵的计算方法, 求得时-频块内所包含能量的信息熵, 通过对比信息熵的大小判断管道有无泄漏。采用 3 组模拟信号作为仿真对象, 求取 HHT 时-频熵, 其大小与理论分析相符, 验证了该方法的有效性。用模拟管道进行输水实验, 分别对距离泄漏孔 2.0 m 和 14.8 m 的管壁声发射信号进行分析, 判断管道是否泄漏, 实验表明该方法可以准确诊断管道有无泄漏。(图 4, 表 3, 参 12)

关键词: 时频熵; HHT 谱; 管道泄漏; 声发射

中图分类号: TE973.6

文献标识码: A

doi: 10.6047/j.issn.1000-8241.2016.03.004

Acoustic emission pipeline leakage diagnosis based on time-frequency entropy of HHT

ZHOU Yingtao¹, ZHOU Shaoqi¹, CHAO Wensheng², ZHANG Shaobo³

1. Department of Petroleum Supply Engineering, Logistical Engineering University of PLA;

2. The No. 68099th Troop of PLA; 3. The No. 78355th Troop of PLA

Abstract: In order to detect the leakage of pipeline within tankfarm, this paper puts forward an acoustic emission pipeline leakage diagnosis technique based on time-frequency entropy of HHT, considering the instability of acoustic emission signal from the leakage of pipeline. This technique adopts Hilbert-Huang Transform to analyze the acoustic emission signal of pipe wall and then obtain the HHT spectrum of signal. The HHT time-frequency plane is divided into equal area time-frequency blocks, with the calculation method of information entropy, the information entropy of the energy contained in each time-frequency block is obtained. Then, the information entropies are compared to define whether there is leakage in pipeline. Three sets of analog signal are regarded as the simulation object to calculate the time-frequency entropy of HHT. The obtained value agrees with the theoretical analysis, which verifies the effectiveness of this technique. Simulated pipeline is used for water transportation experiment. The AE signals of pipelines with a distance of 2.0 m and 14.8 m from leakage are analyzed to determine leakage. Experimental results show that this technique can accurately detect pipeline leakage. (4 Figures, 3 Table, 12 References)

Key words: time-frequency entropy, HHT spectrum, pipeline leakage, acoustic emission

管道在油气输送过程中时常发生泄漏^[1-2], 若不能及时发现和处理, 将可能造成严重的财产损失和环境污染^[3]。传统的输气管道泄漏诊断方法, 如漏磁检测法^[4]、光纤检测法^[5-6]、流量平衡法^[7]、负压波法^[8]等, 存在不能进行连续检测、价格昂贵、灵敏度低等缺点。针对管道泄漏声发射信号非平稳的特点, 对管壁声发射信号进行 Hilbert-Huang 变换, 引入时-频熵对 HHT

谱进行分析, 进而诊断泄漏与否。该方法既适用于突然泄漏的情况, 也适用于已经泄漏的情况, 对较小流量泄漏同样有效。

1 HHT 时-频熵的定义

Hilbert-Huang 变换 (Hilbert-Huang Transform ,

HHT)自提出以来^[9],被大量应用于语音信号识别和机械故障诊断等领域^[10],其对非平稳信号分析有独特的优势^[11]。HHT的过程是将原始信号进行经验模态分解(Empirical Model Decomposition, EMD),得到一组本征模态函数(Intrinsic Mode Function, IMF)和残余分量,将IMF进行Hilbert变换,得到瞬时频率和瞬时幅值,叠加在时-频平面即构成HHT谱。

HHT谱反映了信号的能量随频率和时间变化的情况,不同状态下管道声发射信号在时-频面上的分布也不同,具体表现在时-频平面上不同区域所包含的能量大小的差别,每个区域能量分布的均匀性可以反映管道工况的不同,为定量描述这种差异,可将信息熵^[12]和HHT谱相结合,将HHT谱的时-频平面等面积划分为若干个时-频块,每个块所具有的能量为 E_i ($i=1, 2, \dots, N$), HHT谱中整个时-频平面的能量大小为 A ,对每个时-频块中的能量进行归一化操作,可以得到 $q_i=E_i/A$,参考信息熵的计算方法, HHT谱的时-频熵 $s(q)$ 的计算公式为:

$$s(q) = -\sum_{i=1}^N q_i \ln q_i \quad (1)$$

式中: q_i 为每个时-频块能量归一化的值。

根据最大离散熵原理, q_i 值的大小差异越大,计算出的信号时-频熵值 $s(q)$ 越小, q_i 值的分布越均匀,时-频熵值越大。

当管道无泄漏时,管壁声发射信号主要由背景噪音组成,而当管道发生泄漏时,其声发射信号包含泄漏信息,信号能量随时间和频率的分布将发生变化。如果用Hilbert-Huang变换对管壁声发射信号进行分析,则正常状态下的HHT谱和泄漏状态下的HHT谱是不同的,这种差异反映了信号的内在特征。因此,可以对管道声发射信号的HHT谱进行时-频熵分析,提取信号的特征。

将时-频熵应用于声发射管道泄漏检测的过程(图1)为:①采集管壁的声发射信号;②对信号进行Hilbert-Huang变换,求得时-频平面的能量谱;③将能量谱划分为等面积的时-频块,进行归一化,去除能量

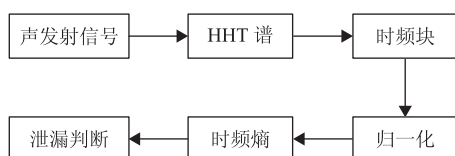


图1 基于HHT时-频熵的声发射管道泄漏检测流程图

为零的块,按照式(1)求取时-频熵值;④对比不同状态下的时-频熵值,判断泄漏状态。

2 仿真模拟

考察3个模拟仿真信号 $x(t)$ 、 $y(t)$ 和 $z(t)$,分别由式(2)~(4)给出:

$$x(t) = 5 \cos(100 \pi t) + 10 \cos(200 \pi t) + 15 \cos(400 \pi t) + 20 \cos(400 \pi t) \quad (2)$$

$$y(t) = 5[1 + \cos(40 \pi t)] \cos(100 \pi t) + 10[1 + \cos(40 \pi t)] \cos(200 \pi t) + 15[1 + \cos(400 \pi t)] \cos(200 \pi t) + 20[1 + \cos(40 \pi t)] \cos(800 \pi t) \quad (3)$$

$$z(t) = x(t) + 50 \cos(50 \pi t) \quad (4)$$

式中: $x(t)$ 为谐波信号的合成; $y(t)$ 为调幅信号的合成; $z(t)$ 为在 $x(t)$ 上添加了一个高能量低频正弦信号(图2)。

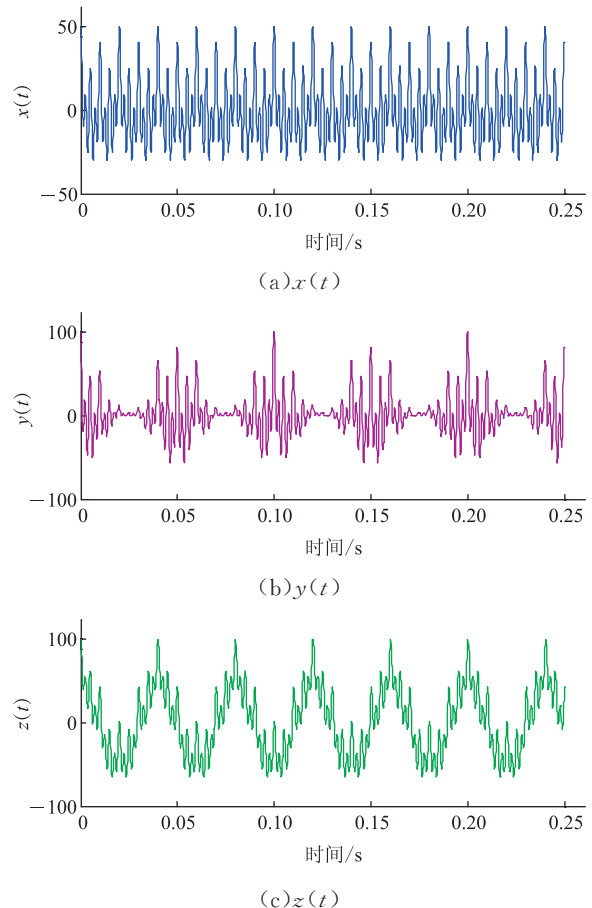


图2 模拟信号的时域波形

分别对 $x(t)$ 、 $y(t)$ 和 $z(t)$ 进行Hilbert-Huang变换,得到信号的HHT谱(图3)。可见,仿真信号 $x(t)$ 和 $y(t)$ 的幅值在频域上变化不大,在时域上相差较大,

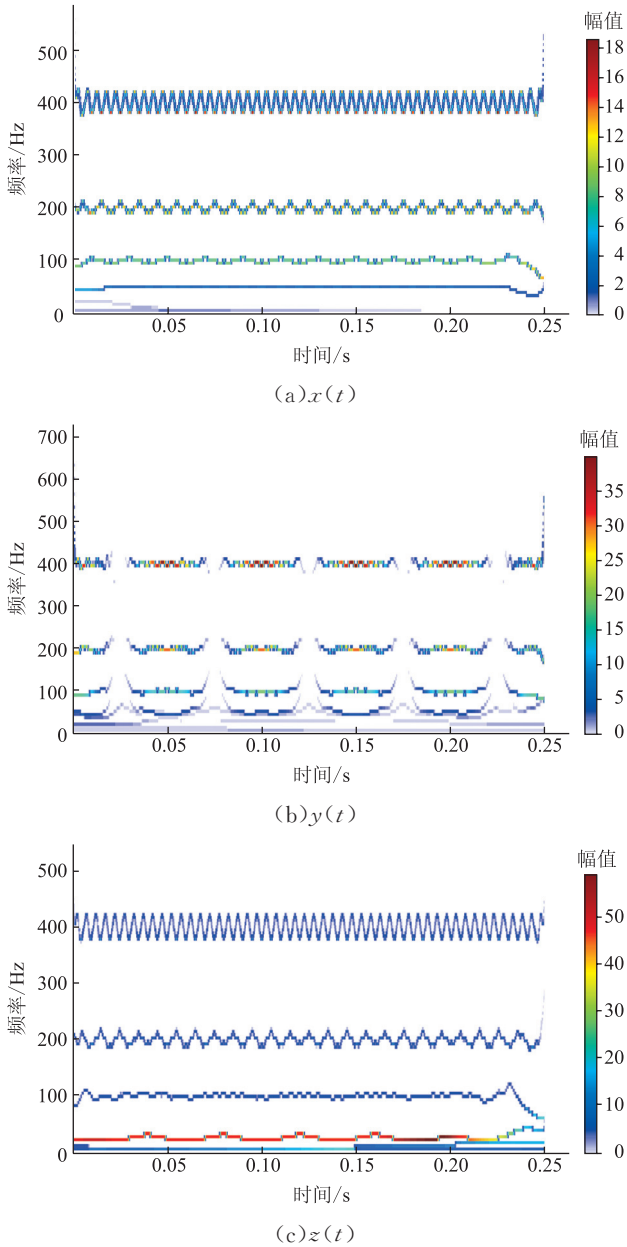


图3 模拟信号的HHT谱

$x(t)$ 和 $z(t)$ 的时频分布差异主要表现在幅值随频率的变化上,因此,信号 $x(t)$ 与 $y(t)$ 、 $x(t)$ 与 $z(t)$ 的能量在频率和时间的分布上有明显不同。为定量体现这种差异,分别将 $x(t)$ 、 $y(t)$ 和 $z(t)$ 的HHT谱图划分为 n 个等面积的时-频块,用信息熵的计算方法计算出时-频熵值(表1)。虽然对于同一信号,不同数量的时-频块划分所得到的时-频熵值不同,但是用同一种方法划分的时-频块数相等时,信号 $x(t)$ 的时-频熵值均大于 $y(t)$ 和 $z(t)$ 的时-频熵值,其原因在于信号 $x(t)$ 的能量随时间的分布较 $y(t)$ 均匀,信号 $x(t)$ 的能量随频率分布较 $z(t)$ 均匀,因此信号 $x(t)$ 的时-频熵值最大。

表1 不同模拟信号的时-频熵值

信号	时频熵值		
	时频块数 924	时频块数 3 507	时频块数 9 452
$x(t)$	5.940 6	6.814	7.368 7
$y(t)$	5.506 7	6.285 7	6.942 7
$z(t)$	5.556 1	6.504 2	7.210 9

3 试验分析

某野战输油管道外径102 mm,壁厚2.5 mm,管内水压0.18 MPa。采用德国Vallen公司生产的AMSY-5(M16-2)型16通道声发射仪采集信号,采样频率设为2 MHz,泄漏孔直径5 mm。分别对距离泄漏孔2.0 m和14.80 m的声发射信号(图4)进行HHT时-频熵计算,各选取11组数据,每组数据长度为10 000,在不同时-频块数下,得到有泄漏和无泄漏的时-频熵计算结果(表2、表3)。

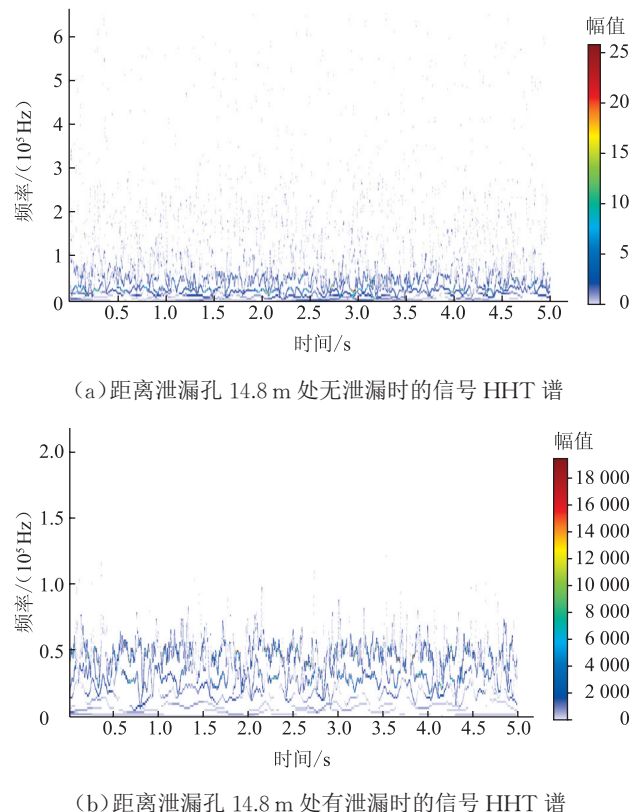


图4 不同状态下的HHT谱

根据距离泄漏孔14.80 m声发射信号的HHT谱(图4),管道无泄漏时信号能量在时-频平面分布较均匀,管道泄漏时相对集中。为定量体现这种差异,引入时-频熵,由表2和表3可以看出,在同一位置,即使

表2 距离泄漏孔 2.0 m 的信号时-频熵值

序号	时频熵			
	时频块数为 4 676		时频块数为 40 000	
	无泄漏	有泄漏	无泄漏	有泄漏
1	6.227 5	5.910 5	8.091 9	7.753 5
2	6.206 0	5.944 0	8.069 5	7.783 7
3	6.284 0	5.938 6	8.122 8	7.778 9
4	6.262 6	5.915 4	8.123 4	7.788 7
5	6.292 9	5.937 8	8.155 9	7.788 9
6	6.268 4	5.903 1	8.125 1	7.771 3
7	6.266 7	5.920 1	8.115 7	7.761 3
8	6.239 9	5.919 4	8.118 7	7.800 1
9	6.203 6	5.922 7	8.047 2	7.765 2
10	6.248 9	5.897 0	8.102 8	7.781 2
11	6.250 6	5.919 6	8.126 3	7.820 4

表3 距离泄漏孔 14.80 m 的信号时-频熵值

序号	时频熵			
	时频块数为 4 676		时频块数为 40 000	
	无泄漏	有泄漏	无泄漏	有泄漏
1	6.854 9	5.814 6	8.632 3	7.652 3
2	6.853 4	5.820 9	8.644 9	7.657 5
3	6.883 2	5.823 6	8.636 6	7.657 8
4	6.920 7	5.837 4	8.703 1	7.692 8
5	6.956 5	5.812 1	8.745 0	7.633 1
6	6.943 5	5.806 1	8.720 0	7.649 7
7	6.926 3	5.809 9	8.696 1	7.636 0
8	6.907 7	5.814 7	8.681 2	7.649 3
9	6.878 8	5.804 9	8.669 5	7.656 4
10	6.926 2	5.835 6	8.706 8	7.695 7
11	6.921 5	5.794 7	8.679 0	7.654 0

时-频块数不同,管道无泄漏状态下信号的时-频熵值较大,管道泄漏时时-频熵值较小。当管道无泄漏时,管壁声发射信号主要由能量较低的背景噪音组成,信号在时-频平面分布较均匀,时-频熵值较大;当管道发生泄漏时,在噪音信号上增加了能量较大的泄漏信号,管道泄漏声发射信号有非平稳随机性的特点,在时域和频域上均增加了能量分布的不均匀性。由此可知,HHT 时频熵能够准确地判断是否泄漏。

4 结论

(1) 提出了基于 HHT 时频熵的声发射管道泄漏诊断方法,该方法将管壁声发射信号进行 HHT 变换,求取信号的时-频熵,通过对比时-频熵的大小诊断管道有无泄漏。

(2) 对 3 组仿真信号的时-频熵计算结果进行对比表明,该方法对于不同信号,可以准确提取信号内在的波动信息,有利于管壁声发射信号的分析。

(3) 运用该方法,对距离泄漏孔 2 m 和 14.80 m 处

的有泄漏和无泄漏的声发射信号进行分析的结果表明,该方法可以准确地诊断管道有无泄漏。

参考文献:

- [1] 王立坤,王洪超,熊敏,等.长距离输油管道泄漏监测技术分析
及研究建议[J].油气储运,2014,33(11):1198-1201.
WANG L K, WANG H C, XIONG M, et al. Long distance
oil pipeline leak monitoring technology analysis and research
proposal[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014,
33(11): 1198-1201.
- [2] 黄郑华.燃气输配管道泄漏事故类型及其控制措施[J].油气储
运,2012,31(11):804-818.
HUANG Z H. Gas transmission pipeline leakage accident
type and its control measures[J]. Oil & Gas Storage and
Transportation, 2012, 31(11): 804-818.
- [3] 黄维和,郑洪龙,王婷.我国油气管道建设运行管理技术及发展
展望[J].油气储运,2014,33(12):1259-1262.
HUANG W H, ZHENG H L, WANG T. The construction
of oil and gas pipelines running management technology and
development prospect[J]. Oil & Gas Storage and Transportation,
2014, 33(12): 1259-1262.
- [4] 王长龙,傅君眉,徐章遂,等.天然气管道漏磁检测中的信号处
理[J].天然气工业,2005,25(6):100-103.
WANG C L, FU J M, XU Z S, et al. Gas pipeline magnetic flux
leakage detection of signal processing[J]. Natural Gas Industry,
2005, 25(6): 100-103.
- [5] MACLEAN A, MORAN C, JOHNSTONE W, et al. Detection
of hydrocarbon fuel spills using a distributed fibre optic
sensor[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2003, 109(1):
60-67.
- [6] 袁朝庆,刘燕,才英俊.利用光纤温度传感系统检测天然气管道
泄漏[J].天然气工业,2006,26(8):117-119.
YUAN C Q, LIU Y, CAI Y J. Using the optical fiber
temperature sensor system detecting pipeline leakage[J]. Natural
Gas Industry, 2006, 26(8): 117-119.
- [7] LIOU J C. Leak detection by mass balance effective for Norman
wells line[J]. Oil and Gas Journal, 1996, 94(17): 4-7.
- [8] 陈志刚,张来斌,梁伟,等.复杂工况下热油管道泄漏识别与定
位方法研究[J].西南石油大学学报(自然科学版),2008,30(6):
157-160.

(下转第 258 页)

- pipeline and countermeasures[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014: 20-21.
- [5] 尤秋菊, 朱伟. 地下燃气管网事故的致因理论分析[J]. 煤气与热力, 2010, 30(4): 30-33.
YOU Q J, ZHU W. Theoretical analysis of underground gas pipe network accident[J]. Gas and Heat, 2010, 30(4): 30-33.
- [6] 吴策宇, 耿晓梅, 赵焕省. 欧洲天然气管道发展特点及事故原因[J]. 油气储运, 2014, 33(2): 148-152.
WU C Y, GENG X M, ZHAO H S. European gas pipeline development characteristics and the cause of the accident[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33(2): 148-152.
- [7] 张海霞, 施刚斌, 李建华. 浅谈燃气管网巡线管理[J]. 科技创新导报, 2011, 32(5): 114.
ZHANG H X, SHI G B, LI J H. Discussion on gas pipeline patrol management[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2011, 32(5): 114.
- [8] 刘昌华. 保护层分析(LOPA)中的独立保护层探讨[J]. 安全、健康和环境, 2011, 11(11): 42-45.
LIU C H. Independent protection layer of protection analysis (LOPA) study[J]. Safety, Health and Environment, 2011, 11(11): 42-45.
- [9] 白永忠, 万古军, 张广文. 保护层分析中独立保护层的识别研究[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(7): 74-78.
BAI Y Z, WAN G J, ZHANG G W. The recognition of independent protective layer in the layer analysis[J]. China Safety Science Journal, 2011, 21(7): 74-78.
- [10] 朱汉生. 燃气管道第三方施工安全管理体系的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013: 39-43.
ZHU H S. Research on the safety management system of the third party construction of the gas pipeline[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013: 39-43.
(收稿日期: 2015-01-09; 修回日期: 2015-09-22; 编辑: 刘朝阳)

基金项目: 质检公益性行业科研专项资助“城镇燃气聚乙烯管道安全状况模糊评价方法研究”, 201310159; 中国石油天然气股份公司科技专项“管道风险评价深化与管道判废处置技术研究”, 2014B-3415。

作者简介: 于红红, 女, 在读硕士生, 1991年生, 2013年毕业于中国石油大学(华东)安全工程专业, 现主要从事油气装备失效分析与完整性管理方向的研究工作。地址: 北京市昌平区府学路18号, 102249。电话: 18810905753, Email: xiangxuelanyh@163.com

(上接第 253 页)

- CHEN Z G, ZHANG L B, LIANG W, et al. Hot oil pipeline leakage under complicated condition recognition and positioning method research[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Natural Science Edition), 2008, 30(6): 157-160.
- [9] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1998, 454: 903-905.
- [10] 于德介, 杨宇. 机械故障诊断的 Hilbert-Huang 变换方法[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 67-69.
YU D J, YANG Y. Mechanical fault diagnosis of the Hilbert-Huang transform method[M]. Beijing: Science Press, 2006: 67-69.
- [11] HUANG N E, WU M L, QU W, et al. Applications of Hilbert-Huang transform to non-stationary financial time series analysis[J]. Applied Stochastic Models in Business and Industry, 2003, 19(3): 245-248.
- [12] 傅祖芸. 信息论[M]. 第3版. 北京: 电子工业出版社, 2013: 78-82.
FU Z Y. Information theory[M]. 3rd ed. Beijing: Electronic Industry Press, 2013: 78-82.
(收稿日期: 2014-12-21; 修回日期: 2015-05-14; 编辑: 潘红丽)
- 作者简介:** 周颖涛, 男, 在读硕士生, 1988年生, 2011年毕业于中国人民解放军后勤工程学院油料储运自动化专业, 现主要从事油气储运及自动化方向的研究。地址: 重庆市沙坪坝区大学城, 401311。电话: 023-86736516, Email: airazor@qq.com