



中国工程热物理学会

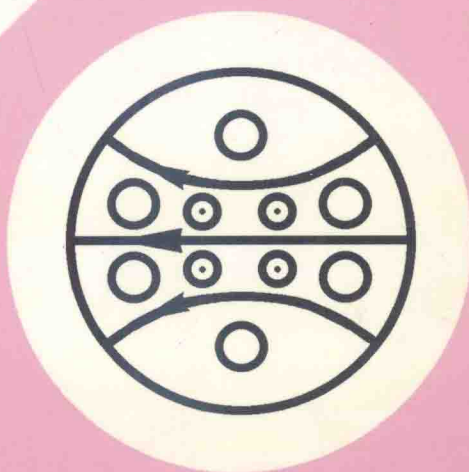
第十一届年会论文集

多相流

二〇〇五

北京

中国工程热物理学会编



多相流学术会议论文目录

一. 气液两相流与沸腾传热传质

- 056002 动态聚类方法识别两相流流型研究.....华 爽 董 峰(1)
- 056003 利用支持向量机识别两相流流型.....齐国华 董 峰 赵福来(7)
- 056005 双组分制冷工质 R11-R141b 核态沸腾的可视化研究.....
.....刁彦华 赵耀华 王秋良(13)
- 056007 蒸发两层流系统的对流不稳定性分析.....刘 荣 刘秋生(18)
- 056013 正交内混式高压喷嘴油气两相混合流量特性研究.....
.....李 朋 马其良 吕新颜(25)
- 056019 蒸汽压力对 Marangoni 凝结换热特性的影响.....
.....杨豫森 甄克建 严俊杰 刘继平(29)
- 056025 非圆截面小通道内水-空气垂直上升流动.....
.....杨朝初 毕勤成 杨 冬 陈昕宽(34)
- 056026 汽水分离器中液滴的行为分析.....王晓墨 黄素逸 李 嘉(41)
- 056027 内混式油喷嘴两相流量特性实验研究...马其良 毕政益 戴征浩 唐 兵(45)
- 056031 超音速蒸汽浸没射流与凝结换热的实验研究.....
.....邵树峰 严俊杰 曹 岩 刘继平(50)
- 056032 水平矩形小通道内气-液两相流型及摩擦压降的研究.....
.....李 卓 俞 坚 夏国栋 马重芳(54)
- 056038 湿法脱硫岛内气液两相流流动规律的研究.....
.....侯 宇 周屈兰 惠世恩 徐通模(60)
- 056040 缝隙位置对空心静叶去水性能影响的研究.....
.....王新军 卢 澄 李振光 高铁瑜 刘建成 张俊博(65)
- 056041 缝隙吹扫对二次水滴直径影响的试验研究.....
.....王新军 卢 澄 李振光 高铁瑜 刘建成 张俊博(70)
- 056042 带有表面微结构的芯片上 FC-72 的强化沸腾换热.....魏进家 本田博司(75)
- 056043 小长径比垂直管气液两相流动特性分析.....王海琴 何利民 李志彪(82)
- 056046 PEM 燃料电池中的两相传质及其影响.....
.....孙 红 郭烈锦 刘洪潭 张广升(89)
- 056050 高效微射流阵列冷却热沉阻力特性的实验研究.....
.....马晓雁 夏国栋 刘 青 刘启明 马重芳(94)
- 056055 上升管中强烈段塞流消除方法试验研究.....罗小明 何利民 赵越超(98)
- 056057 微重力气液两相环状流界面波特性分析.....赵建福 陈文学(104)
- 056058 汽泡在电场作用下的变形.....董 伟 郁鸿凌 李瑞阳(109)
- 056064 空隙率波的波速与气相漂移特性研究...刘 磊 廖宏伟 史宇慧 周芳德(114)
- 056072 水平管内气液两相流单气泡形态特征的实验研究.....
.....顾汉洋 郭烈锦 王智伟 陈 斌 张西民(120)

056076 静止水滴生成气体水合物的动力学研究·····	徐新亚 刘道平 潘云仙 周文铸 杨群芳 胡汉华(128)
056077 喷雾制取天然气水合物特性的实验研究·····	潘云仙 刘道平 周文铸 胡汉华 徐新亚 杨群芳(134)
056086 新型分配器中环状流相分配研究·····	梁法春 王 栋 林宗虎(139)
056092 凝析气相变微观孔隙模型实验研究·····	王志伟 李相方(145)
056093 深水钻井气侵流动特征及控制规律研究·····	许寒冰 李相方(153)
056094 油气两相流流动模拟及实验研究·····	路广遥 王 经 刘夷平 张 华 贾志海(161)

二. 气固两相流

056004 导流管喷动床环隙区颗粒流动分析·····	赵香龙 姚 强 李水清(167)
056008 喷动床内纳米颗粒气固两相流动的数值模拟·····	郑建祥 何玉荣 刘文铁 陆慧林(173)
056010 循环流化床内双组分气固两相湍流流动的 DPM 模拟·····	何玉荣 刘文铁 金记英 鹿高明 陆慧林(178)
056011 DSMC-LES 方法研究超细颗粒气固两相流动特性·····	刘欢鹏 赵云华 李 响 刘亚宁 陆慧林(183)
056012 高浓度颗粒气固两相流动的二阶矩模型的数值模拟·····	陆慧林 何玉荣 刘欢鹏 刘文铁 李 响(188)
056017 CO ₂ 冷却燃机空气中喷射系统的技术研究·····	江薛麟 陶正良 何明勋 王法良 王 海(193)
056028 CFBC 旋风分离器气粒两相流数值模拟与优化·····	蒲 舸 张 力 辛明道(198)
056033 气固两相圆湍流流动的大涡模拟·····	容 易 张会强 王希麟(204)
056034 气固两相圆湍射流喷口附近固相对气相湍流度影响研究·····	徐 钊 燕小芬 王希麟(209)
056035 竖直槽道中稠密气粒两相流动的瞬态结构·····	刘春嵘 郭印诚 王希麟(217)
056036 气粒并流上行流动中颗粒团特性的实验研究·····	吴 昊 刘春嵘 郭印诚(223)
056053 扩张管道入口处气固两相流特性的实验研究·····	赵文峰 阮晓东 刘素芬 任志宇(229)
056056 圆管突扩气固两相流动湍流变动研究·····	包英捷 祁海鹰 由长福 徐旭常(234)
056059 方柱绕流中颗粒扩散的 PIV 实验研究·····	罗 坤 樊建人 周 哲 岑可法(242)
056060 转捩射流中涡结构与颗粒扩散的直接模拟·····	罗 坤 樊建人 吴锦坤 岑可法(249)
056061 气固两相三维圆柱绕流的直接数值模拟·····	李文春 金焱辉 任安禄 樊建人 岑可法(259)
056062 提升管喷嘴进料段内气固两相流动的数值模拟·····	蔡飞鹏 范怡平 周力行 时铭显(265)

- 056084 水平槽道内两相湍流变动的 PIV 实验研究.....
吴 意 栗 晶 柳朝晖 王汉封 张立麒 郑楚光(271)
- 056085 有限差分格子 Boltzmann 方法模拟稀疏气固两相流.....
陈 胜 柳朝晖 贺 铸 郑楚光(277)
- 056095 半圆管分离器内气固两相流动数值模拟.....谭晓军 陈丽华(282)

三. 多相流数理模型和数值方法

- 056001 氢氧发动机低温两相流现象与数值模拟.....唐雅娟 程谋森(288)
- 056006 平行流场 PEMFC 输出性能影响因素的数值分析.....
任庚坡 于立军 姜秀民 袁俊琪(298)
- 056009 VOF 方法研究气液流化床内单个气泡的运动特性.....
沈志恒 何玉荣 刘文铁 陆慧林(305)
- 056014 淬火过程液固耦合传热与流动数值模拟.....明平剑 姜任秋(310)
- 056016 复合管道气液固三相流浆体水击压强和水击波速计算.....
周云龙 王锦峰 洪文鹏 孙 斌(315)
- 056023 描述离散系统动力学演变过程的几种主流 Monte Carlo 方法的比较和分析...
赵海波 郑楚光(322)
- 056024 喷雾中液滴碰撞的数值模拟及实验对比.....单彦广 杨 荣 李 凌(330)
- 056039 湿法脱硫旋流喷嘴体积流量变化规律及数值模拟.....
李兆东 王世和 王小明(335)
- 056044 溶气燃油喷雾数值模拟研究.....肖 进 黄 震 乔信起(342)
- 056045 反应堆堆芯熔化机理研究.....尚 智 陈 硕 赵 钧(347)
- 056047 多颗粒系统的无网格法直接数值模拟及颗粒碰撞频率研究.....
仇 轶 由长福 祁海鹰 徐旭常(353)
- 056048 轴对称非等温相变问题的双倒易边界元分析.....刘 捷 卢文强(359)
- 056049 生物质热解过程的数值模拟.....胥 凯 卢文强(364)
- 056054 高粘度流体中上升气泡的数值模拟.....陈 斌(369)
- 056066 高温小球在冷液中运动的蒸发阻力模型.....胡志华 杨燕华(376)
- 056069 低含液率油气混输管路瞬态模拟研究.....李玉星 王武昌(383)
- 056070 集输管路上升管系统严重段塞流模拟研究.....王 鑫 郭烈锦(391)
- 056073 一维双流体分层/段塞流模型的特征根分析.....顾汉洋 郭烈锦(399)
- 056074 剪切流动条件下液滴变形的数值模拟.....林长志 郭烈锦(407)
- 056075 风沙运动的 DEM 数值模拟.....亢力强 郭烈锦(413)
- 056078 锅炉受热面单相区段动态特性仿真.....江先恩 郭烈锦(420)
- 056079 受热管蒸发区段动态特性仿真.....江先恩 郭烈锦(425)
- 056080 均匀湍流中细微颗粒的布朗碰撞率.....李瑞霞 柳朝晖 贺 铸 郑楚光(434)
- 056081 可吸入微细颗粒物生长过程的探讨.....
黎春梅 柳朝晖 耿 珺 张丰豪 郑楚光(440)
- 056082 各向同性湍流中颗粒引起湍流变动的直接模拟研究.....
贺 铸 柳朝晖 李瑞霞 郑楚光(446)

056083	三维槽道两相流颗粒运动的大涡模拟	栗晶 柳朝晖 贺铸 翁磊 郑楚光(452)
056087	冷中子源冷包截面含汽率数理模型探讨	李良星 李会雄 胡金峰 毕勤成 陈听宽(459)
056088	超细磁性颗粒聚并系数的数值研究	李永旺 赵长遂 吴新 鲁瑞峰 韩松(468)
056089	颗粒沉降运动的虚拟区域法直接数值模拟	陈丽华 邵雪明 樊建人(474)
056096	扩散式气固分离器内两相流动数值模拟	谭晓军 陈丽华 李宏剑(482)
056097	人体呼吸道中微细颗粒运动的数值模拟	林江 樊建人(488)

四. 多相流测量技术及其它

056015	ERT 技术在两相流测量中应用的研究	许燕斌 董峰(494)
056018	声致发光气泡表面温度的测量	苏新军 郭宪民 陈华 邸倩倩(506)
056020	油气水埋地混输管道轴向温降计算方法研究	刘晓燕 赵波 韩国有 张艳(511)
056022	介电泳细胞分离过程微流动中力的分析	陈振乾 施明恒(520)
056029	油水两相渗流模拟界面扩导计算格式对比	徐明海(525)
056030	特高含水采油期油气水混输管道压降计算方法研究	刘晓燕 张艳 刘立君 郭敬红(529)
056037	CFD 和电容层析成像对旋风筒的浓缩特性的对比研究	董向元 陈琪 刘石(537)
056051	歧管式微通道流动特性的研究	刘启明 夏国栋 刘青 马晓雁 马重芳(541)
056052	两相流数字粒子图像测速方法的研究	阮晓东 赵文峰 刘素芬(546)
056063	消光起伏自相关光谱法颗粒测量技术	沈建琪 蔡小舒 于彬(551)
056065	水平管内油气水三相分层流的压降计算	曹学文 王立洋 周鹏 林宗虎(560)
056067	进口浓度对水力旋流器颗粒分级的影响	耿丽萍 杨荣 周静伟 章立新 林宗虎(566)
056068	水喷雾静电感应探针在线测量实验研究	王夕华 薛明华 欧阳新 蔡小舒 苏明旭(571)
056071	管内油水两相流相分布特性实验研究	赵冬建 郭烈锦 张西民 胡晓伟 董训伟(575)
056090	两相自然循环非线性特征及其演化的实验研究 第一部分: 概述、非线性 机制与静态分岔	匡波 胡志华 陈宏 刘晓晶 姚伟 徐济鋈(581)
056091	两相自然循环非线性特征及其演化的实验研究 第二部分: 动态特性、稳 定性机制及演化	匡波 胡志华 陈宏 刘晓晶 姚伟 徐济鋈(589)
056098	垂直低温两相流管底液氮气泡上升速度的实验研究	张华 王经(597)

动态聚类方法识别两相流流型研究*

华 爽, 董 峰

天津大学电气与自动化工程学院, 天津 300072

电话: 022-27890276, E-mail: fdong@tju.edu.cn

摘要: 两相流流型的准确识别是实现两相流流动参数准确测量的基础。针对水平管道中气/液两相流的流动状态, 应用电阻层析成像技术(ERT)实现不同流型条件下的数据采集; 采用统计数学方法提取不同流型测量数据的特征值, 并采用离散系数反映气相分布情况。根据各截面离散系数的差异, 使用动态聚类的方法, 对几种典型流型进行了识别。经实验验证这种方法可以实现水平管道中气/液两相流流型的准确识别。

关键词: 两相流, 电阻层析成像, 流型识别, 离散系数, 动态聚类

1 引言

两相流各种参数的准确测量往往依赖于对流型的识别。相比垂直流动的两相流, 水平管道中的两相流由于受到重力对流体的影响, 导致两相分布的不对称, 较重的液相有聚集在管道底部的倾向。这使得水平管道中的流型比垂直管道中的要多。水平两相流有广泛的工业应用, 如用于空气凝结器、油气管道和预热器等设备中^[1]。

对于流型的识别很大程度上依靠观测者或者测量者的主观判断。而识别流型最常用的方法是从透明管道中直接观测。这种方法由于无法观测出流型的内在结构, 特别是在管道中心流速很高的时候, 不能对流型做出一个清晰的描绘^[2]。这样, 其他一系列新的技术也出现了, 如基于压力波动的方法、基于分相含率的方法和射线吸收法等^[3]。作为一种可视化测量方法的电阻层析成像技术(Electrical Resistance Tomography, 简称 ERT)也应用于对多相流参数的测量中^{[4][5]}。在实验数据的处理方法上, 常把其作为随机时间序列进行处理和统计, 可以使用功率谱密度函数(PSDF)、自相关函数(ACF)、概率密度函数(PDF)^[6], 或者使用分形与混沌的方法和 Kolmogorov 熵的方法进行时间序列分析^[7]。同时, 神经网络等模式识别方法也广泛地用于对流型的识别中^[8]。

本文基于电阻层析成像技术, 使用天津大学的研制的 ERT 系统样机^[9], 对水平管道中的几种典型流型进行了实验测试, 对测量数据进行特征提取, 并对其应用动态聚类方法实现流型识别。

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50276043)及天津市自然科学基金资助项目(05YFJMJC11600)

2 ERT 工作原理

ERT 的物理基础是不同的媒质具有不同的电导率,通过判断出敏感场中的电导率分布,就可以得到媒质分布。在进行敏感场的建立时,ERT 系统敏感场可以看成是似稳场,并且敏感场内没有激励频率范围的源和汇。在一对电极激励时,采用电流激励电压测量的方式,敏感场的电位分布与电导率分布及激励电流的关系满足如下 Laplace 方程:

$$\begin{cases} \nabla \cdot (\sigma \cdot \nabla \phi) = 0 & \text{在敏感场内} \\ \int_{E^+} \sigma \cdot \frac{\partial \phi}{\partial n} d\vec{s} = +I & \text{在电流注入电极} \\ \int_{E^-} \sigma \cdot \frac{\partial \phi}{\partial n} d\vec{s} = -I & \text{在电流引出电极} \end{cases} \quad (1)$$

ERT 系统工作时,首先将激励电流通过电极阵列上某对电极施加到被测域,建立敏感场,由其它电极对按照一定模式分别测量边界电压;然后切换激励电流到下一电极对,再在不包含激励电极的电极对上测量电压,直至所有的电极对都被激励。当场内电导率 σ 的分布变化时,敏感场分布会相应变化,边界电极上的电压也会变化。原理如图 1。

在流型判别中,使用 ERT 技术实现可视化是一种比较准确的方法,它解决了在非透明管道中肉眼无法识别的问题,和从外部观测所带来的误差问题。通过对图像在时间方向上的积累、判断,可实现流型识别。

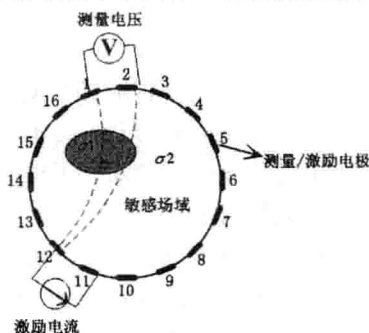


图 1 ERT 工作原理示意图

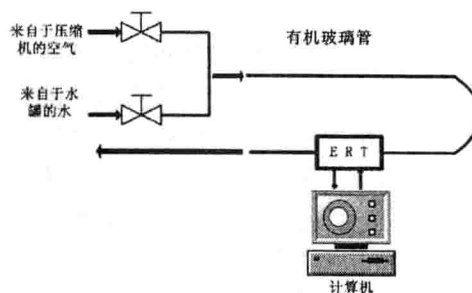


图 2 水平两相流管道的实验装置图

3 实验条件描述

实验装置如图 2 所示。本实验中,ERT 系统的工作频率选用 23.34KHz,数据采集速度为 10 幅/秒。实验装置中的管道是用透明的有机玻璃材料制成,以便于直接观察两相流管道中的流型。管道内径为 50mm,总长为 40m。通过控制注入空气和水的压力和流量,在管道中可以形成诸如泡状流、塞状流、弹状流等流型。

4 实验分析

在气液两相流水平管流型识别的研究中,进行基于边界测量电压特征分析的水平管流型识别时,根据测量值的不同,可以直接粗略判断出管道内气液两相流流型情况。这种归纳方法是建立在对 ERT 系统全部 208 个截面测试数据进行分析的基础上的。

图3左侧是一幅典型的液相满管时的电压曲线,在水平管道中没有气体存在时,曲线呈现对称性很强的16个U形,数据结构对称、特征明显。右侧是在典型弹状流型下,气弹经过时采集到的电压数据,视觉上会使人觉得数据杂乱无章,没有规律,但是我们仍能从里面得到大部分场内信息:由于气相经过时,气相电导率较连续相—水要低很多,使截面裸露在空气中的电极附近差压值变化异常。这是因为在实际实验中裸露在空气中的电极会带上一层薄薄的液膜,等效为在此电极附近有一个电导率非常小的区域,这样我们就可以大致估计出气相的大小与位置。

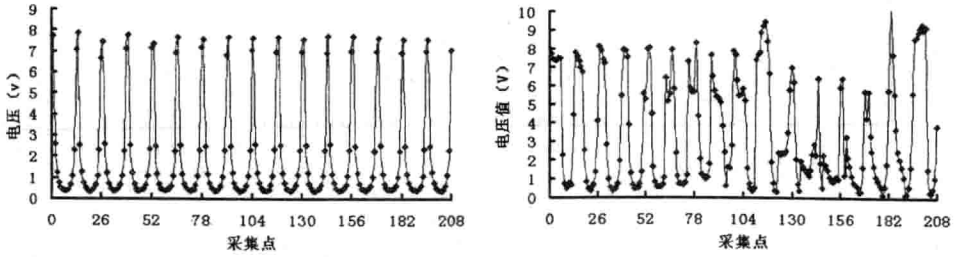


图3 满管水流时与弹状流经过时测量值

这种方法虽然可以把敏感场内某个时刻下每个角度的电导率变化情况真实反映出来,却由于所用的信息量过多,描述此时刻下场内分布很不方便,并且不能作为直接的判别手段对流型进行识别。因此首先要对这些信息进行降维处理,如特征值提取。

对于采集的表示电压差值的208个数据,我们可以选择使用均值这个指标作为特征值来反映敏感场内电导率的平均变化程度。而简单把各个差压数据求均值,并不能使各幅数据有很好的可比性,因此要首先对数据进行标准化处理。

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i,j} \frac{V_{ij}}{V_{ij0}} \quad (2)$$

其中, V_{ij} 表示两相流流动时不同的 i ($i=1,2,\dots,16$) 个激励方向下的第 j ($j=1,2,\dots,13$) 个边界电压测量差压值; V_{ij0} 表示液相(水)为满管情况下相映的 i 个激励方向下第 j 个边界电压测量值,作为计算的参考值; μ 表示测量电压值相对于满管对应电压值的归一化后的均值,与两相流的气相含率 α_g 有关。 μ 的大小直接反映了截面平均电导率相对于液相满管流动时的变化,并且对气相位置变化而带来的边界电压值敏感性不高。这样就使各幅数据间有了可比性,并且减少了由于 ERT 系统电路和其它方面产生的误差。

由于气相分布的情况直接决定了流型,只使用 μ 并不能完全反映出水平管中测量值的离散情况,这时可以使用方差作为特征值去表现气相的离散情况。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i,j} \left(\frac{V_{ij}}{V_{ij0}} - \mu \right)^2}{N}} \quad (3)$$

在这里 $\mu = \bar{x}$, 是反映总体样本的平均值。可以看出,导致方差不同的因素有:变量本身的离散程度、变量本身的平均水平、采用的度量单位个数。当度量单位个数确定时,不同样本的 μ 不同会导致 σ 不具有可比性。

离散系数也称为变异系数,它是一组数据的标准差与均值之比,是测度数据离散程

度的相对指标。以 $C.V.$ 表示离散系数，其计算公式为：

$$C.V. = \frac{\sigma}{\mu} \quad (4)$$

$C.V.$ 可以消除均值水平以及度量单位的不同对数据离散程度的影响，使各组资料可以在一个标准之下进行比较。这样，每一个 $C.V.$ 值都是表示一个截面信息的特征值。

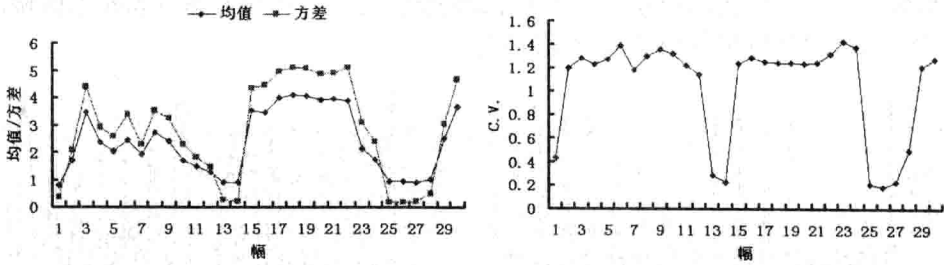


图4 均值、方差与 $C.V.$ 曲线

由图4可以发现，在已知流型为弹状流条件下，左侧的均值和方差两条曲线趋势几乎一致，这是因为在水平管道中，气体总有处于管道的顶部的趋势。右侧是针对同样原始资料而得到的 $C.V.$ 曲线。这条曲线清楚的分成为数值较大与较小的两部分。

在 $C.V.$ 曲线图中，数值越大说明气相分布的离散程度越高。由敏感场内的边界条件可知，场内气相含率 α_g 增加时，电导率 σ 减小，而场内电势分布在其法线方向上变化程度加大，即差压数据变化加剧，表现为方差 σ 明显增加， μ 变化相对较小，使得 $C.V.$ 值增大。由于流型识别中对于气相含率不同但形状相似的截面，可认为是同一种流型的截面，使用 $C.V.$ 作为判断指标可以比 μ 和 σ 更好的反映出这个特点，因此 $C.V.$ 是较好的一个截面信息特征指标。

$C.V.$ 可以表示出离散相的相对大小，各种典型流型又都可按照 $C.V.$ 相对大小出现的频率进行判断，比如泡状流型下 $C.V.$ 会一直维持在一个较低的范围；弹状流和塞状流都会有规律的起伏变化；层状流会维持在一个较高的范围。这些流型在其较高范围中 $C.V.$ 值个数与在较低范围内的明显不同，而且两类数据中心的距离也不同。这样可以使用聚类的方法对这两类数据进行划分，进而找出其对应流型的规律。

5 应用动态聚类法识别流型

把特征值 $C.V.$ 进行两类划分，可以选择动态聚类的方法实现。动态聚类是一种有效且实用的聚类方法。其计算方法^[10]如下：

首先，每类的重心为聚核，称 A_i 为第 i 类的聚核，有

$$A_i = \bar{x}_i = \frac{1}{n_i} \sum_{x_i \in P_i} x_i \quad (5)$$

式中， n_i ——类 P_i 中的点的数目。

第一步：随机选取 K 个点作为 K 个聚核，记为

$$L^0 = \{A_1^0, A_2^0, \dots, A_K^0\} \quad (6)$$

根据 L^0 ，可以把样本集 Ω 中的点分为 K 类，记为

$$P^0 = \{P_1^0, P_2^0, \dots, P_K^0\} \quad (7)$$

$$\text{其中 } P_i^0 = \{x \in \Omega | d(x, A_i^0) \leq d(x, A_j^0), j = 1, 2, \dots, K, j \neq i\} \quad (8)$$

第二步：由 P^0 出发，计算新的聚核 L^1 。

$$L^1 = \{A_1^0, A_2^0, \dots, A_K^0\} \quad (9)$$

$$\text{其中 } A_i^1 = \frac{1}{n} \sum_{x \in P_i^0} x_i \quad (10)$$

由 L^1 出发，做新的分类

$$P^1 = \{P_1^1, P_2^1, \dots, P_K^1\} \quad (11)$$

$$\text{其中 } P_i^1 = \{x \in \Omega | d(x, A_i^1) \leq d(x, A_j^1), j = 1, 2, \dots, K, j \neq i\} \quad (12)$$

针对 $C.V.$ 值进行动态聚类时，要对选择的全部样本做两类处理，直到第 $k+1$ 次处理后的重心与第 k 次处理的重心完全一致，这时得到的两个重心分别为 A_H 与 A_L 。 A_H 表征了气相含率较高时对整体样本影响， A_L 则表征了气相含率较低时的情况，而 $A_H - A_L$ 表示两类重心的距离。这样，属于以 A_H 为重心的样本数越多，则越能表明此段时间内流体接近分离流型；反之，以 A_L 为重心的样本数越多，就说明流体接近于连续流型；处于中间的情况则认为是一种间断流型。当 $A_H - A_L$ 较小时，且属于以 A_L 为重心的样本数较多的情况，即 $C.V.$ 值很难划分，在本实验中可认为是满管流。

经过动态聚类之后，就可以得到以 A_H 为聚核的样本数 C_H ，和以 A_L 为聚核的样本数 C_L ，进而得到一个表示流型指标，隶属度 M 。其中，

$$M = \frac{C_H}{C_H + C_L} \times 100\% \quad (13)$$

经过实验， M 的大小作为流型主要判别指标。而两类聚核 A_H 与 A_L 的距离 $A_H - A_L$ 则可以表现在这段时间内，气相含率的变化差异情况，可以作为一种辅助的判别标准。

6 识别结果

把实验中采集到的数据，采用动态聚类的方法加以区分。以每 50 幅测量数据为一个样本，计算 M 值和两类重心距离 $A_H - A_L$ ，再以流型先验信息划分为 4 种流型。

这样，可以进一步得到一个流型判别的标准：

当 $M \geq 70\%$ ，是弹状流；当 $70\% > M \geq 60\%$ ，是塞状流与弹状流的过渡，划分为塞状流；当 $60\% > M \geq 40\%$ ，是塞状流；当 $M \leq 40\%$ ，是泡状流；当 $M \leq 20\%$ ，且 $A_H - A_L < 0.005$ ，可认为是液相满管流。

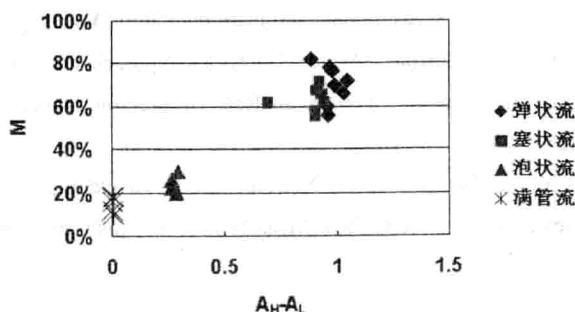


图 5 实验结果

对以上水平管道中弹状流、塞状流、泡状流和满管流不同样本加以识别,表示结果如图 5 所示。

根据以上的识别结果,采用动态聚类方法的识别正确率达到 81%,并且判别错误是在塞状流与弹状流的过渡情况下出现的,根据流型转变的机理,随着气相流量增大,塞状流会向弹状流转变,两者之间的界限很难界定。也可从图 5 知,满管流和泡状流的情况很容易区分,而塞状流与弹状流却则较难划分,这也说明了划分间断流型的困难性。

7 结论

本文介绍了 ERT 的基本原理,描述了使用天津大学 ERT 样机,在两相流装置上进行在线数据采集的实验条件。分析了原始数据的含义,并对比了均值、方差和离散系数 ($C.V.$) 值在表现流型截面情况的异同。使用动态聚类的方法,提取出隶属度函数 (M),结合两类聚类中心的距离 ($A_H - A_L$),有效地对动态实验数据样本进行了识别,识别率达到 81%,初步验证了此方法的可行性。

但是,这个方法只是在现有的实验装置和系统的条件下进行验证的,流型参数的改变对隶属度阈值如何界定,还需要今后进行更多实验进行加以分析。

参考文献

- [1] Hetsroni G, Handbook of Multiphase System, Hemisphere Publishing Corporation, 1982, pp.2-25
- [2] P. Angeli, G. F. Hewitt, Flow structure in horizontal oil-water flow, Internatinal Journal of Multiphase Flow, Vol.26 pp.1117-1140, 2000
- [3] Y. Mi, M. Ishii and L. H. Tsoukalas, Flow regime identification methodology with neural networks and two-phase flow models, Nuclear Engineering and Design, Vol.204 pp.87-100, 2001
- [4] F. Dong, X.P. Liu, X. Deng, L.J. Xu and L.A. Xu, Identification of two-phase flow regimes in horizontal, inclined and vertical pipes, Measurement Science and Technology, Vol.12, pp.1069-1075, 2001
- [5] Y.X. Ma, Z.C. Zheng, L.A. Xu, X.P. Liu and Y.X. Wu, Application of electrical resistance tomography system to monitor gas/liquid two-phase flow in a horizontal pipe, Flow Measurement and Instrumentation, Vol.12, pp.259-265, 2001
- [6] D. C. Lowe, K. S. Rezkallah, Flow regime identification in microgravity two-phase flows using void fraction signals, International Journal of Multiphase Flow, Vol.25, pp.433-457, 1999
- [7] N. D. Jin, X. B. Nie, Y. Y. Ren and X. B. Liu, Characterization of oil/water two-phase flow patterns based on nonlinear time series analysis, Flow Measurement and Instrumentation, Vol.14, pp.169-175, 2003
- [8] T. Xie, S. M. Ghiaasiaan and S. Karrila, Artificial network approach for flow regime classification in gas-liquid-fiber flows based on frequency domain analysis of pressure signals, Chemical Engineering Science, Vol.59, pp. 2241-2251, 2004
- [9] F. Dong, Z. X. Jiang, X. T. Qiao and L. A. Xu, Application of electrical resistance tomography to two-phase pipe flow parameters measurement, Flow Measurement and Instrumentation, Vol.14, pp.183-192, 2003
- [10] 任若愚,王惠文,多元统计资料分析—理论、方法、实例,北京,国防工业出版社,1997年6月, pp.78

利用支持向量机识别两相流流型*

齐国华¹, 董峰¹, 赵福来²

¹天津大学电气与自动化工程学院, 天津 300072

²河北理工大学计算机与自动控制学院, 河北省, 唐山 063009

电话: 022-27890276, E-mail: fdong@tju.edu.cn

摘要: 流型是两相流系统中具有重要工程意义的基本参数之一, 一直是两相流研究中的一个重要方向。本文以水平管道中的气/液两相流为研究对象, 应用电阻层析成像(ERT)系统获取不同流型条件下的测量数据, 并采用统计学习理论中支持向量机(SVM)方法对数据进行分析、识别流型。实验数据的分析结果表明, 该方法具有较好的识别率。

关键词: 支持向量机; 电阻层析成像; 两相流; 流型识别

1 引言

随着科学技术的迅速发展, 两相流的研究在国民经济和人类生活中的地位日益重要。两相流流动参数的准确测量, 一直是科学研究领域急需解决的研究课题^[1]。在两相流的研究中, 流型不同, 不但影响两相流的流动特性和传热传质性能, 而且影响对两相流参数的准确测量。因此, 流型的识别和预测对于工程设备的设计和运行十分重要。在两相流流型识别问题的研究中, 许多研究工作者做了大量的工作。例如, 利用压差信号的功率谱密度函数(PSD)和概率密度函数(PDF)判断流型^[2, 3], 还可利用分形特性、小波分析和混沌理论等来描述两相流系统的流型^[4, 5]。

在二十世纪八十年代中期, 过程层析成像技术的形成和发展为两相流测量技术提供了新的研究手段和方法。电学层析成像技术利用物场的电学特性的变化来获取物场信息, 并以其非侵入、可视化等特点应用于各类两相流体的在线检测, 实现流型识别^[6-9]。本文以水平管道中的气/液两相流为研究对象, 应用电阻层析成像技术(Electrical Resistance Tomography, ERT)获取不同流型条件下的数据, 并结合统计学习理论中的支持向量机(Support Vector Machine, SVM)方法分析测量数据, 判断流型。

2 ERT 系统及其数据特征

2.1 ERT 系统结构及工作原理

ERT 技术的物理基础是根据不同媒质具有不同的电导率, 当场内电导率分布变化

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50276043)及天津市自然科学基金资助项目(05YFJMJC11600)

时, 电流场的分布也会随之变化, 导致场内电势分布变化, 从而场域边界上的测量电压也发生变化, 因此边界电压数据的变化可以反映出物场内电导率的变化, 判断出敏感场的电导率分布便可以知道物场的媒质分布。

电阻层析成像系统由以下三个主要部分构成 (如图 1 所示): ① 获取被测物场信息的空间敏感阵列。它在交变电流激励下, 形成一个可从不同角度观测的空间敏感场, 物场内部电导率分布和变化对敏感场产生调制作用, 使敏感阵列输出相应的信号。② 数据采集与处理单元。它的任务是快速实时的采集空间敏感阵列输出的反映被测物场二维/三维分布状态的大量瞬时信号, 并完成相应的解调、滤波处理, 以获得直接反映物场电阻率变化的信息。③ 图像重建与物场参数提取单元。它的任务是运用图像重建算法, 获得被测物场的二维/三维图像以及变化的时间历程, 使人们直接看到被测物场内部某个截面上不同电导率的分布, 同时又可运用相应的信息处理方法, 提取出被测物场的特征信息, 如流型、相速度、相含率等等。

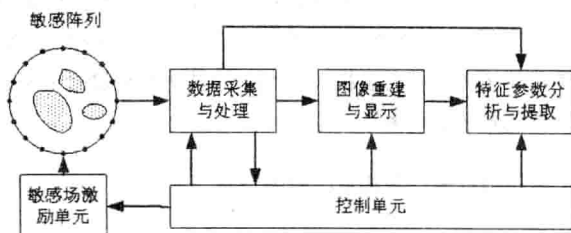


图 1 电阻层析成像系统原理图

2.2 ERT 系统的测量数据

研究中所用的电阻层析成像系统采用相邻电流激励, 电压检测的方式。传感器为 16 电极, 每采集一幅图像有 208 个数据。实验中对四种流型连续测量, 所得到其中一幅图像的数据如图 2、3、4 和 5 所示:

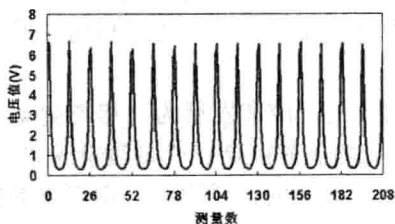


图 2 满管测量数据

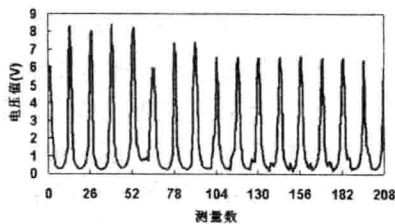


图 3 泡状流测量数据

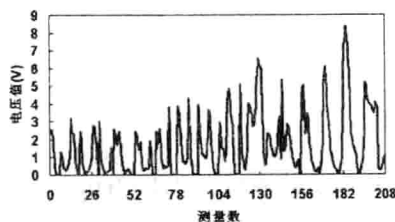


图 4 塞状流测量数据

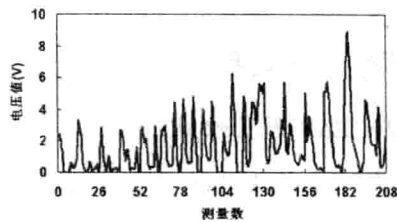


图 5 弹状流测量数据

2.3 测量数据特征提取

实验所得的测量数据需要进行相应的特征提取以便用于后面的流型识别。特征提取的基本任务是如何从许多特征中找出那些最有效的特征,即研究如何把高维特征空间压缩到低维特征空间以便更好地用于后面的计算^[10]。

这里首先引入边界电压的相对值:

$$x_i = V_i - V_{i0} \quad (1)$$

其中, $V_i (i = 1, 2, \dots, 208)$ 表示实验测得的边界电压值, V_{i0} 表示当水为满管情况下相应的边界电压值。然后根据统计上的定义并结合 SVM 的样本特点来分别计算每幅图像数据边界电压的相对值 x_i 的样本均值 ($\bar{x}$)、样本标准差 (S) 和样本偏斜度 (SK), 其计算公式如下所示^[11] (其中 n 为样本个数):

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

$$SK = \frac{n}{(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{S} \right)^3 \quad (4)$$

统计上 $\bar{x}$ 可以表征数据的集中趋势和平均水平; S 是测度数据离散程度的最主要方法; 而 SK 的含义为对数据分布对称性的测度。针对测量数据, 敏感场内气相含率不同, 则所测得的边界电压值不同, 则 $\bar{x}$ 的相应变化反映出敏感场内截面平均气相含率的变化; 敏感场内气相的位置和大小同时变化时, 对应其 S 就会引起变化, 反映截面气相的整体离散程度; 而 SK 是从测度数据分布的形状上来区别各截面信息的不同。敏感场内气相的位置和大小同时变化时, 数据的分布形状也就不同, 则 SK 就会有不同的数值, 所以 SK 能够从另一个角度很好地反映出截面的信息。

利用上面的特征提取方法对每幅数据可以分别得到三个特征值 $\bar{x}$ 、 S 、 SK , 以每二十幅数据表征一组流型, 然后将对应的特征值分别求均值, 以降低数据的随机效应, 最终得到代表不同流型的特征向量。

3 支持向量机理论

支持向量机 (SVM) 方法作为统计学习理论中的一种方法^[12], 目前仍处于不断发展阶段。SVM 方法是从线性可分情况下的最优分类面 (Optimal Hyperplane) 提出的。所谓最优分类面就是在高维空间里要求分类面不但能将两类无错误地分开, 而且要使两类的分类空隙最大。

设线形可分样本集为 $(x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, n, x \in R^d, y \in \{+1, -1\}$ 是类别标号。支持向

量机的目标就是根据结构风险最小的原理, 构造一个目标函数, 寻找一个满足分类要求的分割超平面 $\omega \cdot x + b = 0$, 其中 ω 为超平面的法向量, b 为超平面的偏移量, 并使训练集中的点距离该分割平面尽可能地远, 即寻找一个分割平面, 使其两侧的空白区域 ($2/\|\omega\|$) 最大。即表示为:

$$\min \phi(\omega) = \frac{1}{2} \|\omega\|^2 = \frac{1}{2} (\omega \cdot \omega) \quad (5)$$

满足约束条件:

$$y_i (\omega \cdot x_i + b) \geq 1 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

为此, 定义如下的 Lagrange 函数:

$$L(\omega, b, \alpha) = \frac{1}{2} (\omega \cdot \omega) - \sum_{i=1}^n \alpha_i \{y_i [(\omega \cdot x_i) + b] - 1\} \quad (7)$$

其中, $\alpha_i > 0$ 为 Lagrange 系数, 对 ω 和 b 求 Lagrange 函数的极小值。将式 (7) 分别对 ω 和 b 求偏微分并令它们等于 0, 就可以把原问题转化为如下的对偶问题:

$$\max Q(\alpha) = \sum_{i=1}^n \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n \alpha_i \alpha_j y_i y_j (x_i \cdot x_j) \quad (8)$$

若 α_i^* 为最优解, 则

$$\omega^* = \sum_{i=1}^n \alpha_i^* y_i x_i \quad (9)$$

则得到的最优分类函数为:

$$f(x) = \text{sgn}\{(\omega^* \cdot x) + b^*\} = \text{sgn}\left\{\sum_{i=1}^n \alpha_i^* y_i (x_i \cdot x) + b^*\right\} \quad (10)$$

$\text{sgn}()$ 为符号函数。

而对非线性的情况, 可以把样本 x 通过非线性映射 $\phi(x)$ 映射到高维特征空间 H , 这样, 在高维空间中实际上只需进行内积运算, 而这种内积运算可以用原空间的函数来实现的。因此, 以 $\phi(x)$ 代替原空间中的 x , 以适当的核函数 $K(x_i, x)$ 代替高维空间的内积 $\phi(x) \cdot \phi(x_i)$ 就可以实现某一非线性变换后的线性分类。相应的分类函数也变为:

$$f(x) = \text{sgn}\left\{\sum_{i=1}^n \alpha_i^* y_i K(x_i, x) + b^*\right\} \quad (11)$$

针对实验中的流型类别为四类, 可以采用 Platt 等人提出的直接非循环图 SVM (Directed Acyclic Graph SVM, DAGSVM) 算法^[13], 这种算法在训练阶段采用一对一的模式, 共有 $K(K-1)/2$ 个二分类 SVM, DAG 共有 $K(K-1)/2$ 个节点, 图中的每一个节点对应一个二分类 SVM, 从根节点输入训练数据, 估计每一节点的二分类决策函数, 根据决策函数的结果决定训练数据的流向。这种算法的优点在于它的测试速度比其它方案要快。

4 实验测试与分析

实验中的采用水平管道的弹状流、塞状流、泡状流和满管四种典型数据各 20 组，分别用数字 1、2、3、4 代表。则设样本集为 $(x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, 20, x \in R^3, y \in \{1, 2, 3, 4\}$ 是类别标号。所有实验数据均采用径向基核函数 (Radial Basis Function, RBF)，并采用序贯最小优化 (Sequential Minimal Optimization, SMO) 训练算法^[14]进行样本训练。实验方法采用交叉验证法，即将所有的样本平均分为四个子集，其中三个子集构成训练样本，剩余的一个子集用于测试；重复划分四次，使所有的样本子集都参加过测试。第一次划分后，实验的结果如表 1 所示。

表 1 实验结果

样本序号	先验流型	特征向量 ($\bar{x}$ S SK)	识别结果
1	弹状流	(0.232805 2.010665 0.841105)	弹状流
2	弹状流	(0.160027 1.809265 1.034640)	弹状流
3	弹状流	(0.130013 2.106183 0.550513)	塞状流
4	弹状流	(0.133773 1.641976 1.290895)	弹状流
5	弹状流	(0.043324 1.892606 1.234969)	弹状流
6	塞状流	(0.024366 1.856067 0.792840)	塞状流
7	塞状流	(0.169431 1.953474 0.445365)	塞状流
8	塞状流	(0.085458 1.717306 0.549618)	塞状流
9	塞状流	(0.121372 1.864002 0.261924)	塞状流
10	塞状流	(0.097147 1.582168 1.018947)	弹状流
11	泡状流	(0.226664 0.944091 5.366941)	泡状流
12	泡状流	(0.227966 0.931481 5.743374)	泡状流
13	泡状流	(0.230613 0.937636 5.741013)	泡状流
14	泡状流	(0.232775 0.936497 5.703072)	泡状流
15	泡状流	(0.098600 0.941903 2.758853)	满管
16	满管	(0.208667 0.913425 5.946681)	满管
17	满管	(0.208741 0.913416 5.946296)	满管
18	满管	(0.208789 0.913209 5.946187)	满管
19	满管	(0.208757 0.913185 5.947340)	满管
20	满管	(0.069325 0.649534 -0.593216)	泡状流

四次实验所得到结果中有 5 组弹状流、3 组塞状流、3 组泡状流和 5 组满管被错判，平均识别率为 80%。其中第二次实验的误差最大，共有 3 组弹状流、2 组泡状流和 4 组满管被错判。原因是在实验过程中，刚开始采集数据时，ERT 系统的运行还不稳定，因此采集到的数据本身就存在一定的误差，而第二次实验所用到的测试样本恰好是系统运行开始时所得到的数据。所以造成了上述结果。同时造成实验误差的原因还有弹状流与塞状流的相似性。因为不管是经典的流型划分理论还是现代的一些流型识别手段，都不能定量的给出弹状流和塞状流的区别，只能根据流型中气栓长度给出简单的划分，并没

有明显的划分标准，况且它们之间的形成和转换是随时进行的，因此出现判断的误差。

5 结论

本文是在基于 ERT 系统的基础上，分析了 ERT 系统的数据特征并结合支持向量机的样本特点对测量数据进行了特征提取，从统计上的角度分别提取出了样本均值、样本标准差和样本偏斜度三个特征值，提出了一种新的流型识别方法。并对动态的流型数据进行了辨识，实验结果表明，这种新的流型识别方法基本可以满足辨识的要求，具有较好的识别率。

但是，同时由于支持向量机本身的特点，它要求不同类别样本的特征向量（包括各个特征值）必须有很好的区分度，这就要求我们在特征提取的时候要尽量挖掘数据间的异同，找到更适合样本本身的特征值，最好能从不同的角度和方向提取出代表不同意义的特征值，这将对本文所提出的方法更为有利。

参考文献

- [1] 鲁钟琪 编著，两相流与沸腾传热，北京，清华大学出版社，2002
- [2] 周云龙，孙斌，李岩，张玲，洪文鹏，倾斜下降管内气-液两相流流型 PSD 特征，热科学与技术，2004，3（2），pp.129~132
- [3] 贾志海，牛刚，王经，基于动态聚类算法的两相流流型识别方法研究，热能动力工程，2004，19（2），pp.182~185
- [4] 陈伯川，甄玲等，基于混沌参数的距离判别在气固两相流流型辨识中的应用，仪器仪表学报，2002，23（5），pp.446~449
- [5] 顾春来，董守平，气液两相管流流型信号的小波去噪处理，北京科技大学学报，2002，24（1），pp.76~78
- [6] F Dong, X T Qiao, Z X Jiang, and L A Xu, Application of electrical resistance tomography to two-phase pipe flow parameters measurement, 3rd World Congress on Industrial Process Tomography, Banff, Canada, 2003, pp. 299-304.
- [7] 王雷，冀海峰，黄志尧，王保良，李海青，气液两相流流型识别新方法研究，化工自动化及仪表，2004，31(2)，pp.45~47
- [8] M.A.Bennett, R.M.West, S.P.Luke, R.A.Williams, The investigation of bubble column and foam processes using electrical capacitance tomography, Minerals Engineering, 2002, 15, pp.225~234
- [9] 董峰，姜之旭，乔旭彤，徐苓安，基于 ERT 技术的垂直管道两相流流型识别，仪器仪表学报，2004，Vol.25，No.4，pp.457~461
- [10] 孙即祥著，模式识别中的特征提取与计算机视觉不变量，北京，国防工业出版社，2001
- [11] 贾俊平 编著，描述统计，中国人民大学出版社，2000
- [12] 边肇祺，张学工 等编著，模式识别（第二版），清华大学出版社，2002
- [13] J Platt, N Cristianini, J Taylor, Large margin DAG's for multiclass classification [A], Advances in Neural Information Processing Systems [c], Cambridge, USA: MIT Press, 2000, pp.547~553
- [14] 邓乃扬，田英杰 编著，数据挖掘中的新方法-支持向量机，北京，科学出版社，2004，