

## 摘 要

气液两相流的流型影响着两相流的流动特性和传热特性，同时也影响着流动参数的准确测量以及两相流系统的运行特性。实现对气液两相流流型的客观自动识别，不仅对压力降的正确计算，而且对于控制某些有害流型的出现，从而保证整个流体系统既经济又安全的运行具有十分重要的意义。随着现代测量技术、信号处理技术的发展和计算机的普及，使流型在线识别系统的研究与开发成为可能。

本文讨论了水平管内气液两相流的参数波动特点，选用压差信号作为流型研究的特征信号。针对压差信号的非平稳和非线性特点，将统计理论和小波理论引入流型识别中，提取了流型压差信号的均值、标准差、斜度、峭度以及小波包能量特征参数，形成一个特征向量，作为 BP 神经网络的输入；通过对神经网络的训练，完成特征空间到流型空间的映射，依据训练好的神经网络实现流型的客观自动识别。

在 WindowsXP 平台上使用 Visual Basic6.0 语言编程完成了气液两相流流型在线识别软件的设计。按照信号测量、信号特征提取和流型识别三个实现流型客观自动识别的步骤，开发了一套气液两相流流型在线识别系统。此系统操作界面友好，使用方便。最后，在气液两相流实验系统上采集了 180 组仿真样本进行仿真试验。结果显示：流型正确识别率为 91.7%，此系统应用于实验室的流型识别，不仅具有较高的识别率，而且很好地实现了识别结果的实时显示，达到了流型在线识别的目的。

**关键词** 气液两相流 流型 在线识别

## Abstract

Gas-liquid two-phase flow pattern affects the characteristic of flow and heat transfer of two-phase system, the performance characteristic of two-phase system, and the exact measurement of flow parameter. After the on-line identification of gas-liquid two-phase flow pattern is realized, pressure drop can be calculated right and bad flow pattern can be controlled, then the economy and safe performance of the whole flow system can be ensured. With the use of computer and the development of the modern measuring technology and signal processing techniques, the study and development of on-line identification for flow pattern becomes feasible.

In this paper, the characteristic of parameter which can reflect the fluctuating characteristic of gas-liquid two-phase horizontal flow is discussed, the pressure drop is selected. Aimed at the characteristic of nonlinear and non-stationary of pressure drop, statistic theory and wavelet theory are considered, and average, standard deviation, skewness, kurtosis, and wavelet packet energy are calculated, one feature vector is obtained. In the end, the feature vector values is inputted to BP neural network, and the BP neural network is trained. Meanwhile, the mapping from characteristic space to flow pattern space is erected, the on-line identification of flow pattern can be finished by BP neural network which has been trained.

The software of on-line identification for gas-liquid two-phase flow pattern is designed with Visual Basic 6.0 based on the WindowsXP operating system. According to measurement of signal, extraction of signal characteristic and state identification, which are three progresses of realizing external and automatic identification, an on-line identification system is established. The interface of system is friendly and conveniently. In the end, 180 groups of simulating samples are gathered on air-water two-phase flow test equipment. The results show that the accurate identification rate is 91.7%, the system not only has better identification

rate, but also can automatically send out on-line flow pattern information and reach the target of on-line identification.

**Keywords**      **Gas-liquid two-phase flow**      **Flow pattern**  
                         **On-line identification**

## 论文原创性声明

本人声明，所呈交的学位论文系在导师指导下本人独立完成的研究成果。文中依法引用他人的成果，均已做出明确标注或得到许可。论文内容未包含法律意义上已属于他人的任何形式的研究成果，也不包含本人已用于其他学位申请的论文或成果。

本人如违反上述声明，愿意承担以下责任和后果：

1. 交回学校授予的学位证书；
2. 学校可在相关媒体上对作者本人的行为进行通报；
3. 本人按照学校规定的方式，对因不当取得学位给学校造成的名誉损害，进行公开道歉。
4. 本人负责因论文成果不实产生的法律纠纷。

论文作者签名： 穆旭刚 日期： 2006 年 4 月 2 日

## 论文知识产权权属声明

本人在导师指导下所完成的论文及相关的职务作品，知识产权归属学校。学校享有以任何方式发表、复制、公开阅览、借阅以及申请专利等权利。本人离校后发表或使用学位论文或与该论文直接相关的学术论文或成果时，署名单位仍然为东北电力大学。

论文作者签名： 穆旭刚 日期： 2006 年 4 月 2 日

导师签名： 王 日期： 2006 年 4 月 2 日

# 第1章 绪 论

## 1.1 气液两相流型在线识别的研究背景及意义

气液两相流动现象是在自然界和现代工业生产过程中广泛存在的一个现象，与人类的生活和生产密切相关。目前，在动力、化工、核能、制冷、石油和冶金等行业的许多生产设备中都涉及到气液两相流动工况，例如电站的各种沸腾管、各式气液两相混合器、气液分离器以及化工行业的精馏塔等。气液两相流体在绝热或受热管道中流动时，因压力、流量、热流密度和管道几何形状的不同会形成各种流动结构型式，即流型，它极大地影响着气液两相流的流动特性和传热传质特性，同时也影响着流动参数的准确测量以及两相流系统的运行特性。例如，对于管内气液两相流的压力降计算，正确地进行压力降计算才能使设备具有安全的水循环和足够的流动压头，从而为整个流体系统选用合宜的泵或其他动力设备提供可靠的依据，使整个系统既经济又安全的运转。它的计算是设计各种存在气液两相流动的工程设备的最基本和最重要的课题之一，曼德汉<sup>[1]</sup>曾通过试验比较认为，根据管中流型应用相应计算式得出的计算结果比通用流型的计算式得到的结果要正确；另外，当液体在管内做强制对流沸腾时，其沸腾传热工况与两相混合物的流型关系密切；而且，在不同的流型下，两相流具有不同的流动特征，在理论上针对不同的流型可以分别建立相应的计算模型以提高计算精度；在工程应用中，通过控制流动参数可以避免某些有害流型的出现，以保证设备的安全运行<sup>[2]</sup>。

传统的采用在现场获得的流动参数的基础上，根据流型图或半经验半理论的流型转变准则识别流型的方法；由于气液两相流流动的复杂性及流型的多样性，这一方法由于判别主观性较强等原因不能满足现代工业生产的客观在线要求。还有利用测量方法识别流型，包括直接测量和间接测量，其中有采用目测、高速摄影、接触式探针等直接测量的方法和通过对波动特性分析后的特征来识别流型等间接测量的方法。目测法是流型识别中最可靠的识别方法之一，但是在流速较高的情况下，无法做出实时、自动的测量；高速摄影法相对可以满足

实时要求，但是仍然具有较大的主观性。随着控制科学和计算机科学的发展，智能化的研究已在人类的生产活动与其它活动中得到广泛的应用，越来越多的研究者将这一思想引入流型识别的研究中。近年来，由于现代测量技术、信号处理技术的发展和计算机的普及，流型在线识别系统的研究与开发成为可能。通过实现对气液两相流流型客观自动的识别，不仅对压力降的正确计算，而且对于控制某些有害流型的出现，从而保证整个流体系统既经济又安全的运转具有十分重要的意义。

## 1.2 气液两相流型识别研究的发展及现状

由于气液两相流动存在着气泡的分裂和聚集，气、液相界面的形状和分布在时间和空间上均是随机可变的，与单相流相比较，两相流的流型变化要复杂很多。

### 1.2.1 传统流型识别方法的研究进展及现状

传统的流型识别方法有使用流型图和流型转换准则式识别流型。在气液两相流中，在两相流量、流体的物性值（密度、粘度、表面张力等）、管道的几何形状，管道尺寸以及热流密度确定的条件下，要判断管内气液两相流的流型可应用流型图。流型图主要是根据资料总结而成的。由于研究者主观认识有差异，这样导致流型图坐标参数表达式形式繁多，较为通用的表达式是以液体流量和气体流量为坐标的流型图。近年来，各国学者根据对流动机理的分析和试验提出许多用来确定流型分界的流型图，其中 Baker 流型图和 Mandhane 流型图最具有代表性。Ewing<sup>[3]</sup>利用摄像技术记录水平管中的气液两相流流型变化情况并与 Baker 提出的流型图进行了对比，对原有流型图数据加以扩充，扩大了原有流型图的适用范围。Weisman<sup>[4-5]</sup>利用更广泛的试验数据，提出了两幅适用于水平及垂直上升管的通用流型图。由于从一种流型转变为另一种流型要有一个演变过程，而并非突变，故在流型上不用线条来表示分界，而是用黑色带来表示不同流型的过渡区。

除了使用流型图识别流型外，还可以应用通过对流型转变机理的分析而得

到的判别式来帮助确定具体流型。Kokal<sup>[6]</sup>等对油气两相流在倾斜管内的流型进行了深入的研究,将实验所得的数据与 Taitel 和 Duker 所绘制的流型图进行了比较,并利用实验数据对原有的半经验半理论流型转变准则进行了验证,提出了改进后的准则。Lu Zhongqi<sup>[7]</sup>以简化的两相流体模型为基础并采用一系列经验或理论关系式封闭方程,计算得到界面浓度与含气率、干度的关系,并以此识别流型。Kalkach-Navarro<sup>[8]</sup>等发展了描述气泡串形成与破碎的广义两相流体模型,对含气率和压力波进行了稳定性计算与分析,从而进行两相流流型的判别。周云龙<sup>[9-10]</sup>等对螺旋管和倾斜下降管内气液两相流截面含气率变化规律进行了研究,得出了计算螺旋管内主要流型平均截面含气率的经验关系式及计算倾斜下降管气液分层流截面含气率的理论模型,为螺旋管及倾斜下降管内的气液两相流流型识别提供了理论基础。但是,受主观因素影响仍然很大,而且在利用以上两种方法时用到的流量、干度、截面含气率等流动参数的准确测量很难实现;再者,已有的流型图和半经验半理论的流型转变准则都有一定的适用范围,流型图是在基于稳态流型转变的假设下用实验方法得到的,而生产现场的流动条件千差万别,很难有与流型图完全一致的适用条件。白博峰<sup>[11]</sup>通过比较 McQuillan & Whalley 和 Mishima & Ishii 提出的不同流型转变模型在系统压力为 30MPa 下内径为 20mm 垂直上升管内得到的汽水两相流的流型图后得出结论,不同流型转变模型的差异明显。所以目前的流型图和流型转变准则还只能作为一种定性判别手段,难以满足客观在线识别的要求。

### 1.2.2 流型客观在线识别方法的发展及现状

所谓流型的客观识别方法,也就是通过采用先进的测试与信号处理技术,获取反映气液两相流各种流型本质特征的客观数理描述与流型转变过程中特征参数的变化规律,根据这些数理描述及其特征参数的变化规律进行定量分析,实现流型的客观识别与划分。气液两相流流型的识别工作属于模式识别课题,要进一步做到客观的在线识别一般包括三个环节:流型特征信号的测量、信号的流型特征提取和流型的识别。

近年来,随着工业技术的提高,对流型识别的准确性和适时性要求也不断

提高, 客观、在线的流型识别方法成为人们关注的一个方面。尽管在诸多研究人员的努力下, 传统的气液两相流流型识别方法研究有了很大的进展, 但是仍无法克服其自身固有的缺点, 这使它很难满足现代工业生产对流型客观、在线识别的要求。

除采用流型图和流型转变判据确定流型外, 对流型的辨识还可以通过直接对流体波动状况进行观测的方法, 在文献[12]中对这些方法进行了总结叙述, 其中主要包括目测法、高速摄影法、射线衰减法、接触式探针法等直接观测法。目测法是一种较为简单和直观的方法, 但是由于判断标准人为因素太大, 无法对高速流体的流型做出实时客观判断, 不过在目前的研究中, 对流型的识别最终几乎都要通过与目测结果作比较来验证识别结果的有效性, 它是现在为止较可靠的识别方法; 采用高速摄影法能够满足实时的要求, 但是主观性仍然很强; 射线衰减法的基本原理是利用射线在气相和液相中的衰减系数不同这一特点来实现流动可视化的。这种方法虽然能准确地反应出空泡份额及其脉动, 但是, 从安全性和经济性的角度考虑, 它不是一种很好的两相流测试方法; 采用接触式探头获得的数据, 能够准确反映该测量点流体的特征, 但是长时间使用后, 探头表面会粘附上一些杂质, 从而影响测量的精度。

在寻求流型的客观鉴别方法过程中, 一些研究者尝试性地通过测量和分析诸如密度、压力、空泡份额等两相局部参数, 应用电导探针、X-射线衰减等辨识流型。早期的工作包括 Jones 和 Zuber (1974)<sup>[13]</sup>采用 X-射线衰减技术, 通过分析垂直管内空气、水两相的空泡份额的概率密度函数(Probability Density Function 简称 PDF)曲线的峰态特征判断流型。Tutu<sup>[14]</sup>根据压差波动概率密度分布的峰值个数和位置, 识别出泡状流、弹状流、乳状流和环状流。由于流动参数的波动性是气液两相流的普遍特性, 两相流介质的流动结构形式, 即流型, 可以利用气液两相流动参数的波动特性来识别。在已有的研究文献中, 主要是对压力、压差及含气率等波动参数的测量分析。此外还有对其它波动参数进行测量的相关研究。对于流型识别此类模式识别课题, 一个重要的问题就是如何从样本中提取信息或特征, 在此基础上对未知模式分类做出判决。特征的选取没有对与错的区别, 差异在于对流型识别的识别率高低。Wambsganss<sup>[15]</sup>等人通过实验对水平放置的矩形通道内气、水两相流动进行试验, 提出利用壁面静压

力波动均方根客观识别泡状流或塞状流向弹状流的转变及弹状流向环状流的转变的方法。白博峰<sup>[16]</sup>等利用压差波动信号的功率谱密度(Power Spectrum Density 简称 PSD) 随频率分布特性的均方根进行流型的识别, 实现了泡状流、间歇流和环状流的客观识别。然而, 白博峰<sup>[17]</sup>等在随后的研究中提出虽然压差波动信号的统计特征量、均值和均方根与流型密切相关, 但仅仅依据这一特征量进行流型识别缺乏实用性。Vince 和 Lahey<sup>[18]</sup>提出将空隙率信号的 PSD 和 PDF 作为气液两相流流型的特征量, 并指出空隙率信号的功率谱密度和概率密度的各阶矩反映了各流型的过渡信息, 但是由于概率密度及其均值的二阶矩对液相流速相当敏感, 因此仅采用空隙率的 PSD 和 PDF 特征进行流型识别的效果并不理想。梁法春<sup>[19]</sup>等对测量的压差信号进行分析, 将一维信号转换为二维图像, 分析不同流型信号区和背景区面积比值  $R_{SB}$ , 将其作为一个特征参数, 区分出了段塞流。

随着基础科学的应用, 最近几年来, 出现了利用混沌、分形理论、小波理论、信息理论和软测量技术识别气液两相流流型的新方法。在信息论中, 熵描述了系统的不确定性, 规定了自发过程的方向性(熵增加或负熵减少)。石磊<sup>[20]</sup>等在研究中发现, 压差脉动信号的 Shannon 信息熵随流型的不同而具有不同的特性。小波理论主要分析波动过程在不同时间、频率上的能量, 或不同时间或尺度上的信号能量、自相关系数、互相关系数。李菊<sup>[21]</sup>等按 Mallat 小波分析算法对压差信号进行分析, 依据信号在不同频率范围内的能量特点, 对段塞流和波状流的进行识别。陈琪<sup>[22]</sup>等利用尺度密度即小波变换系数的方差除以总采样点数的大小来定义不同频段内的信号能量, 并依据信号能量几个尺度下能量的分布关系作为流型识别的判别依据。与传统频谱分析技术(傅立叶谱、相关、谱密度等)相比, 小波分析方法相对传统的频谱分析技术, 优点在于能够刻画不同时刻的差别, 对信号特征的数理表述有一定的优势。但是即使流型相同, 不同流动工况的参数波动过程之间仍有差别, 采用小波分析的结果会有较大差异, 不利于波动过程客观规律的总结。由于气、液相界面的变形和运动等原因, 两相流动表现了强烈的非线性, 在多数流型下并不满足随机运动模型, 从传统处理方法的数学内涵看, 统计分析前提是假设对象是平稳过程, 因此在两相流领域应用这种方法缺乏坚实的数学基础, 目前直观的统计参数识别流型被许多

学者否定,非线性理论研究波动过程成为一个新的发展趋势,利用确定性混沌理论定量研究流型已受到很多人认同。白博峰<sup>[23]</sup>等认为确定性混沌理论能揭示波动的非线性特征,气液两相流壁面静压力波动信号的混沌特性与流型有关,而且利用压力波动信号的混沌参数对气液两相流流型进行了定量的分析探讨。杨靖<sup>[24]</sup>等对气液两相流压差波动信号的分形插值非线性数据拟合与重构方法进行了探索研究,利用分形插值方法对两相流机理作出了新的分析,并据此给出了一种改进以往两相流压力降数据经验关联式的新方法。Y. Cai<sup>[25]</sup>等提出利用混沌理论计算气液两相流压力波动信号的分形维数、自相关函数、Lyapunov 指数和准相平面轨迹等特征量,并以上述特征量识别流型,指出利用相关维数识别流型是一种有潜力的流型识别方法。

人工神经网络技术的发展使气液两相流型的在线、客观识别走上了一个新的台阶。神经网络由大量处理单元互连而成,具有很强的自适应、学习和容错能力,对信息处理更接近人类的思维活动。许多研究人员开始利用神经网络进行气液两相流流型的在线、客观识别研究。Monji<sup>[26]</sup>等将含气率波动信号的均方根、斜度和峰度分别作为一层和两层前向网络的输入特征参数,仿真结果表明网络的识别率可达 91%,而且误识别的样本多数出现在流型转变区。Mi 和 Ishii<sup>[27]</sup>利用气液两相流动含气率波动信号的均方根和方差作为网络的输入特征参数,分别使用 BP(Back Propagation)神经网络和自组织映射网络进行流型的客观识别,取得了良好的识别效果。然而,Monji 和 Mi 均采用气液两相流动的含气率作为分析信号,而气液两相流的含气率测量非常困难,因此两者提出的方法有一定的局限性。气液两相流压力、含气率等参数的波动过程存在许多不确定的现象,这种不确定性主要表现在随机性和模糊性两个方面。模糊性主要指流型发生过渡过程时所呈现的“亦此亦彼”性。它不是由于人的主观认识达不到客观实际造成的,而是气液两相流的一种客观属性。彭黎辉<sup>[28]</sup>等利用模糊神经元网络识别气液两相流流型,通过计算机仿真,表明此方法对层流、环状流、塞状流及泡状流均有较好的识别能力。夏靖波<sup>[29]</sup>等对有电容传感器阵列采集的反映两相介质分布的信息进行模糊处理,经 Kohonen 网络的自组织学习,提取输入模式样本的分类特征,通过 BP 网络的监督学习,实现两相流流型识别。王妍芃<sup>[30]</sup>等使用自适应梯度下降法和模拟退火法改进传统的 BP 算法,并将改

进后的网络用于气液两相流流型的识别，利用前人的数据验证了这一方法的有效性。人工神经网络在气液两相流流型识别领域的尝试不止这些，随着应用的不断深入，很多问题需要做更进一步的研究。白博峰<sup>[31-35]</sup>提出流型是一个非物理量的概念，其实质是相界面在空间的分布和在时间轴的变化，单独采用一个或一种信号去实现流型的识别缺乏对对象的充足描述，如果将压力、压差和含气率进行组合分析，对实现流型识别会起到良好的推动作用，能够增加准确性和可靠性，将压差波动信号的傅立叶谱(FFT)、压力波动信号的傅立叶谱(FFT)以及压力和压差的均方根、偏态系数、峰态系数、分维数等参数分别作为CPN(Counter Propagation Networks)和BP神经网络的输入特征参数，实现了气液两相流流型的智能识别。在最近的研究中又基于多信号——压力和压差信号波动过程，对流型进行多信息获取以及信号的多特征提取，通过大量实验数据建立了特定流型的识别规则，采用学习矢量量化模式分类器作为未知流型的分类器，根据数据融合的技术思路设计出油气水多相流的流型在线识别系统。

### 1.2.3 现有在线识别方法存在问题

在很多流型在线识别研究的资料中，都将人工神经网络作为讨论的主题。虽然在现有的研究成果中，这一方法在不同程度上显示了它的优越性，但在对流型客观在线识别方法的研究过程中，为了更加准确地实现流型的识别，研究人员对流型波动参数的多个特征进行了提取实验，实现了在线识别，而且在各自的实验中都得到了较好的识别效果。但是，这些试验大多数只实现了典型流型中少数几个流型的识别，要实现两相流多个流型的在线准确识别，还需要研究人员做更多的探索工作。另外，波动参数的选取原则是参数波动能够最大程度地反映流型及其变化。压力波动信号的测量简单易行，但信号中掺杂了由实验段出口反射产生的虚假信号和上游流过各种通道所产生的噪声；由于不同流型的压降特性不同，压差波动特性与流型的关系密切，但不同的实验条件或测点布置有不同的数值特征，这种方法需具体验证；利用含气率识别流型最为直接，因为两相流型从流动的几何角度上讲就是气相、液相的相对分布形式，但是实现准确测量的设备造价太高。由前边的论述已知，作为特征信号，压力、

压差及含气率都有各自的优点。

总结起来，利用人工神经网络实现流型的在线识别存在两个问题：

(1) 描述流型的特征仅来源于单个传感器或单个参数，难以全面描述气液两相流流型的本质特征；

(2) 识别方法完全抛弃了两(多)相流体力学理论，因而制约了利用人工神经网络进行流型客观识别的准确率和在线识别的可靠性。

### 1.3 本课题所要研究的内容

为了实现气液两相流流型实现最优在线、客观识别，关键在于气液两相流动特征信号的采集、流型特征量的提取和在线识别方法的选取。因此，本课题完成了如下工作：

1. 通过对气液两相流压差波动信号不同特征值的比较分析，找出一种能较好地反映流型特征的数据融合方法；
2. 通过对现有在线识别方法的比较分析，选出最优的在线实现手段；
3. 在 Windows 平台下，应用 Visual Basic 6.0 编程，开发出界面友好、应用灵活的流型在线识别应用软件；
4. 通过实验数据对所编制的应用软件进行了实验验证。

## 第2章 流型在线识别方法

在宏观上,常把自然界物质分为三相,即气相、液相和固相。所谓的多相流包括汽(气)液两相流、气固两相流、液固两相流、液液两相流以及相应的三相流和多相流。存在变动分界面的两种独立物质组成的物体的流动称为两相流,多相流中研究较多的是气液两相流。本课题主要对水平管气液两相流的流型进行讨论。

本章将先简要论述水平管气液两相流的流型分类情况,因为对流型的恰当分类是整个系统正常运行的前提。

### 2.1 水平管气液两相流流型的分类

对两相流流型的研究至今已经有几十年的历史了,但流型的分类仍然没有统一,甚至同一名称的流型,在定义上也不完全一致,比如仅仅对于垂直上升管的流型划分就有几十种,对于水平管绝热两相流动的流型划分也有十多种。在早期的流型识别研究中,流型分类相对简单;随着研究手段的完善和工作的不断深入,流型的分类日益精细。但是在长期的科学研究及工程应用中发现,许多流型只是在极其狭窄的工况下存在,并且与其他流型的区别并不显著,过分精细的划分对研究两相流的传热与传质特性研究并没有太大的意义,因此流型的划分又出现了由细到粗的趋势。

究其根源,多相流的流型划分通常有两类方法:一类是按照流体的外观形状来划分;另一类则是根据相的分布特点来划分。前一类划分方法较多,目前较流行的一种方法是按照各相流量由少到多的顺序来划分流型。由于实验手段和人为判断的差异,这类划分方法所划分的流型通常数量不同,名称也不统一。后一种划分方法根据相的分布特点来划分流型。通常说来,基于现象描述的流型划分方法多用第一种,而基于流动机理分析的流型划分方法则多用第二种。

参考水平管气液两相流流型划分方法<sup>[36]</sup>,将实验中观察得到的流型按照流动形态大致分为6种,即细泡状流型、气塞状流型、平滑分层流型、波

状分层流型、气弹状流型及环状流型，上述流型的示意图见图 2-1。流型特征简述如下：

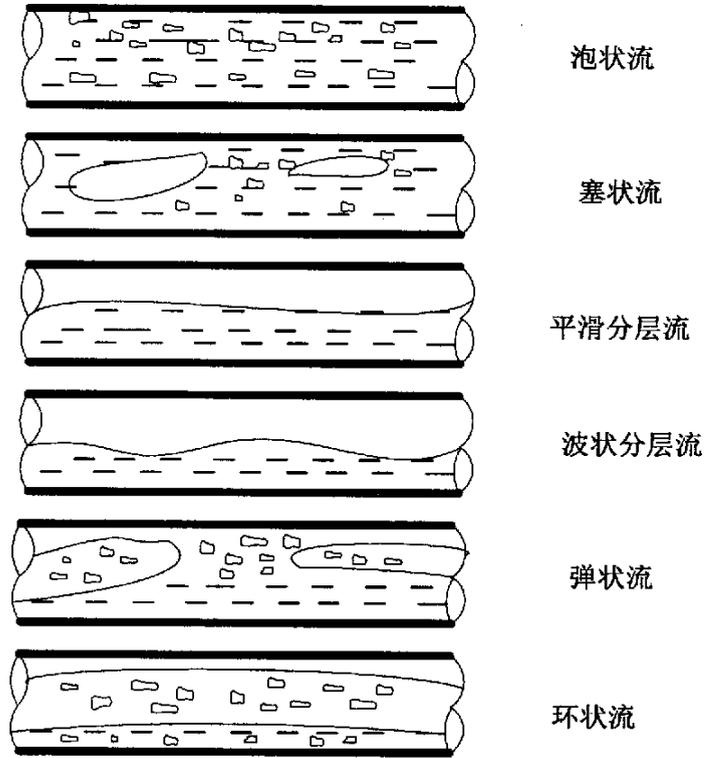


图 2-1 流型示意图

1. 泡状流 气相是以分散在液体中的气泡而流动，在重力作用下，气泡大都集中在管道的上部。典型的泡状流动发生在气体表观速度低而液体流速高的情况下。

2. 塞状流 当气相流量增加时，泡状流中的的小气泡合并成气塞形成塞状流，特点是液相中含有沿管道顶部流动的弹状大气泡。

3. 平滑分层流 当气液两相流量都很小时，气液两相将分开流动，两相之间存在一平滑分界面。

4. 波状分层流 在平滑分层流时，当气相流量增大，两相界面出现波动，形成波状分层流。

5. 弹状流 当气相流量在波状分层流的基础上继续增加时, 波动振幅增长到与管道顶部表面接触时, 将形成弹状流。

6. 环状流 这种流态在较高的气体流速时发生。液相的一部分是以管壁上的液膜的形式流动, 同时气体在管中心流动。通常, 液相的另一部分以液滴状被挟带在气芯中流动。

考虑到实用性以及上述流动结构型式外观形状的相互联系, 将气塞状流与气弹状流合称为间歇流, 平滑分层流与波状分层流合称为层状流。本系统将主要对泡状流、间歇流、层状流、环状流四种流型进行识别。

## 2.2 流型在线识别方法

传统的流型识别方法有流型图和流型转换准则式。应用这两种方法识别流型只能大致预测流型及其转换, 但是不能准确获取流动状态的实时信息。而工程应用中, 往往需要实时了解流型对系统运行状况的影响。根据工作原理, 流型实时识别的方法可以分为两类: 一类是根据两相流流动图像的形式直接确定流型, 如目测法、高速摄影法、过程层析成像法等; 另一类是间接方法, 即通过对反映两相流流动特性的波动信号进行处理分析, 提取出流型特征, 进而识别流型。这种方法建立在随即信号处理技术的基础上, 不仅设备简单、价格低廉, 而且还具有发展成流型识别的客观方法的希望。以下主要对流型识别方面涉及的处理方法进行简单论述。

1. 频域处理方法 Hubbard<sup>[37]</sup>就将水平管道气液两相流压力信号的功率谱分析结果应用于流型判别。通过压力信号的自相关函数求得功率谱密度函数。通过归一化后的比较分析, 得出以下结论: 连续流(层状流和波状流)的功率谱密度集中在零频率附近, 虽频率增加幅度明显下降; 弥散状流(泡状流与雾状流等)的功率谱密度分布较平坦; 间歇流的功率谱密度分布出现一个幅度明显的特征峰。Matuszkiewicz<sup>[38]</sup>等将电导探针测得的局部空隙率信号作为提取功率谱密度的分析信号, 对气泡流到塞状流的转换进行分析后得出结论, 空隙率信号在气泡流时具有较小的方差, 在塞状流时具有较大方

差。

2. 时-频处理方法 小波分析是信号处理领域的一门新科学,近些年来,很多学者将小波分析用于流型识别的研究。劳力云在文献[39]中对内径分别为 40mm 和 50mm 的水平管道空气-水两相流的脉动压差信号进行了 Wigner-Ville (WVD) 谱分析,得出结论,气泡流、塞状流和弹状流的 WVD 分布区别较为明显。

3. 幅域处理方法 信号幅域的处理只对信号幅度进行统计处理。常用参数有方差、均值、概率密度函数等,在文献[40]中也有过论述。孙斌在文献[41]中,通过对压差信号的概率密度特征的分析,得出以下结论,分层流与泡状流的 PDF 的分布范围都较窄,在压差较小的区域有一个峰值,间歇流具有明显的两峰值,而且分布范围很宽,环状流分布在较窄的范围内,有一个非常尖的峰值在较大压差上。而且这种方法以气泡的物理表现为依据,因此对流型的判别较为可靠。

4. 其它识别方法 随着基础理论的发展,模糊理论、混沌分形理论、神经网络等被应用到流型的识别研究中,从而使流型的在线识别成为可能。吴浩江<sup>[42]</sup>用分形的特征参数—关联维数来表征油气水多相流流动的分形性质。分析了多相流流动中的不同点流型的流型信号(压差信号),分析表明,不同流型的信号在重构伪相空间中具有有限的低维维数,流型的产生具有内在的确定性机制,而且不同流型间的关联维数互相间有较明显的区别。顾春来在文献[43]中将由多传感器系统测得的气-液两相流动的差压波动信号,通过计算传感器间的互相关函数,并运用模糊数学理论进行了流型的在线自动识别。

值得注意的是,有些研究者综合应用一些现代信息处理技术,从多相流体体系的常规信号提取流型特征,实现流型判别。吴浩江<sup>[44]</sup>等对管段差压信号利用小波分解-重构方法进行去噪处理后,应用分形理论,提取特定流型对应的特征向量,将模式理论应用到流型识别中,利用径向基函数神经网络实现油气水三相流流型在线识别系统。

本文需要实现流型的在线识别,通过分析,按照客观自动的流型在线识别

的三个环节：特征信号的测量、信号的特征提取和流型的识别，在下面的内容中将详细讨论应该选择什么样的特征信号来进行研究，以及选取特征信号的哪些特征来表现各个流动型式，并提出本文使用的实现在线识别的神经网络的理论算法。

## 2.3 特征信号的选取

### 2.3.1 特征信号的讨论

能够反映气液两相流流型变化的两相流参数很多，其中，两相流的波动特性很好的反应了两相流的流动结构型式。通常研究最多的波动参数有绝对压力、含气率、压差。

绝对压力波动过程记录的是近区域和远区域的气泡成核、生长、运动和合并、流过节流元件等所产生的噪声，同气泡的大小关系密切。

如果从几何角度上考虑的话，两相流动的流型就是气相和液相的相对分布形式。利用含气率识别流型相比较而言是最直接的。但是，含气率的精确测量很难，测量设备价格昂贵，含气率波动反应的是由于气泡的通过而产生的局部含气率的变化，与气泡大小无关。

压差波动在一定程度上过滤掉了测量段之外的压力波。很多研究者通过实验对流型的压差波动特性进行了探讨<sup>[45-46]</sup>，结果都显示压差波动信号与流型有密切关系。很多研究也证明了压力信号的波动与流型的变化是密切相关的，压力信号的波动可以提供流型识别的足够信息<sup>[47-48]</sup>；

### 2.3.2 压差信号的选取

本文选用压差信号作为流型识别的参数主要考虑以下几个方面：

1. 压差信号是两相流实验中最容易获取的信号，并且对流动没有阻力，不会影响流型的稳定和观测；
2. 因为压差信号属于快速反应信号，能够及时反映流型的变化，有利于使用频谱进行研究；

3. 在流型识别中, 压差信号比压力信号更有优势, 因为压力信号不仅与测量点的压力波动有关系, 而且还与测量点以外区域的压力波动有关, 并且由于管道的静态压力一般比较高, 容易导致反映流型信息的压力波动信号被淹没。

## 2.4 信号的特征提取

### 2.4.1 特征提取参数的讨论

对压差波动信号数据进行分析与处理的目的在于提取能够表征各流型的特征量, 即对流型的某些物理性质进行数学描述。一般来说, 只要流型包含足够的信息, 就不存在特征量选择正确与否的问题。但是, 不恰当的特征量选择会使流型的识别规则复杂化, 从而影响流型网络识别的速度与准确性。

由于气液两相流参数直接影响着流动的统计特性, 在传统的信号分析方法中, 流型特征量一般采用统计参数, 所给出的结果可以反映信号幅度变化的分布规律, 常用的参数有概率密度函数 (PDF)、方差、均值等。在文献[49]中提到量纲为一的幅域诊断参数, 他们被用于故障诊断的研究中, 这些参数对信号的幅值和频率变化不敏感, 即和工作条件关系不大, 而对故障足够敏感。这些参数有波形指标、峰值指标、脉冲指标、裕度指标和峭度指标, 其中脉冲指标、裕度指标和峭度指标对早期故障较为敏感, 但稳定性不好, 一般来说, 均方根值的稳定性好, 但对早期故障信号不敏感, 所以, 一般将它们兼顾考虑。

分维数、关联维数、Kolmogorov 熵、Lyapunov 指数等混沌分形参数在表征系统的混沌性质方面起着重要作用, 其物理意义分别为:

1. Hurst 指数( $H$ )  $H$  指数于分维数的关系为  $f_d = 2 - H$ 。描述了序列的长程相关性或曲线的光滑程度。

2. 关联维数( $D_2$ ) 描述了时间序列蕴藏着参与动态过程的全部变量的相互关联的程度。对理想的动力系统,  $D_2 = 1$  时, 系统处于自持周期振荡,  $D_2 = 2$  时系统处于两种不可约频率的准周期振荡, 当  $D_2$  不是整数或大于 2, 系统表现出对初始条件敏感的混沌态。

3. Kolmogorov 熵( $K$ ) 在相空间中刻画混沌运动信息损失的量度,可以区分规则运动、混沌运动和随机运动。熵越大表明信号的混沌程度越大,或说明系统越复杂。

4. Lyapunov 指数 大于0说明系统是混沌的并且信息损失或破坏。

这些参数被引入到流型识别的研究中,而且在很多学者的研究中都表现出了较好的识别效果<sup>[50-55]</sup>。但是部分参数计算的复杂性,不适合用于在线识别。

对于气液两相流的多数流型,其压差波动信号表现出非平稳性,使得建立在平稳随机过程理论之上的傅里叶变换不能完全适用,仅仅从时域方面考虑对流型特征的描述就不完全,在文献[56]中将小波包分析应用到流型的识别中,并达到了很好的识别效果。小波分析是针对非平稳瞬态信号宽谱相应的特点,在低频处有较高的频率分辨率,在高频处有较高的时间分辨率,小波分析的这种多尺度“聚焦”特性,显然较傅里叶变换具有更大的适用性。小波包概念是在小波变化的基础上提出来的,它将频带进行多层次划分,对多分辨分析没有细分的高频部分进一步分解;并能够根据被分析信号的特征,自适应的选择相应频带,使之与信号频谱相匹配。通过分解,可以获得压差波动信号在不同频段内的能量,而各频率成分能量的变化表征了两相流系统流型的转变。

## 2.4.2 特征参数选取

本文针对两相流流动结构形式变化的复杂多样性,只使用单一的参数难以全面反映流型的特征的实际,并结合本文实现实时的要求,采用统计理论与小波理论相结合的方法,计算了压差波动信号的均值、标准差、斜度、峭度和小波包能量特征,具体算法为:

1. 均值  $\bar{x}$  均值反映样本取值的平均情况,计算公式为:

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

式中  $N$ ——样本数据长度;

$x_i$ ——样本元素。

2. 标准差  $ST$  标准差反映样本数据偏离均值变动性的大小, 标准差大说明样本均值的代表性差; 反之, 样本的代表性好, 计算公式为:

$$ST = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (2-2)$$

3. 斜度  $SKE$  斜度反映数据围绕众数不对称的程度。

$$SKE = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^3 / N}{(\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 / N)^{3/2}} \quad (2-3)$$

4. 峭度  $KUR$  峭度对大幅值非常敏感, 当其概率增加时, 峭度值将迅速增大。

$$KUR = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4 / N}{(\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 / N)^2} \quad (2-4)$$

5. 小波包能量 短时傅立叶变换对信号的频带划分是线性等间隔的。多分辨分析可以对信号进行有效的时频分解, 由于尺度是按二进制变化的, 所以在高频段其频率分辨较差, 而在低频段其时间分辨率较差, 即对信号的频带进行指数等间隔划分, 小波包分析能够为信号提供一种更加精细的分析方法, 它将频带进行多层次划分, 对多分辨分析没有细分的高频部分进一步分解, 并能够根据被分析信号的特征, 自适应地选择相应频带, 使之与信号频谱相匹配, 从而提高了时-频分辨率。

在多分辨分析中, 按照不同的尺度因子  $j$  把 Hilbert 空间  $L^2(R)$  分解为所有子空间  $W_j (j \in Z)$  的正交和, 其中,  $W_j$  为小波函数  $\psi(t)$  的闭包即小波子空间, 尺度函数  $\phi(t)$  和小波基函数  $\psi(t)$  满足双尺度方程:

$$\phi(t) = \sum_{k \in Z} h_k \phi(2t - k) \quad (2-5)$$

$$\psi(t) = \sum_{k \in Z} g_k \phi(2t - k) \quad (2-6)$$

其中, 系数满足:

$$g(k) = (-1)^k h(1-k) \quad (2-7)$$

这里记  $u_0(t) = \phi(t)$ ,  $u_1(t) = \psi(t)$ , 并令  $u_n(t)$  满足双尺度方程:

$$u_{2n}(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} h(k) u_n(2t-k) \quad (2-8)$$

$$u_{2n+1}(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} g(k) u_n(2t-k) \quad (2-9)$$

序列  $\{u_n(t)\}$  称为由基函数  $u_0(t) = \phi(t)$  确定的正交小波包。小波包空间由  $\phi(t)$  的伸缩平移系张成, 每个空间都与比它大 1 的两个子空间的直角构成。多分辨率分析分解公式的算子形式为:

$$H[S_k](j) = \sum_k S_k h_{k-2j} \quad (2-10)$$

$$G[S_k](j) = \sum_k S_k g_{k-2j} \quad (2-11)$$

设有信号  $f(t) \in U_j^n$ , 即  $f(t) = \sum_k S_k^j u_n(2^{-j}t-k)$  则有

$$f(t) = 2^{-\frac{1}{2}} \sum_j H[S_k^j](i) u_{2n}(2^{-j-1}t-i) + 2^{-\frac{1}{2}} \sum_j G[S_k^j](i) u_{2n+1}(2^{-j-1}t-i) \quad (2-12)$$

这就是小波包的分解公式。该式说明任一信号在小波包分解中总可分解成两部分: 一部分是信号经  $H$  的作用, 即在  $\{u_{2n}(2^{-j-1}t-i)\}_{j \in \mathbb{Z}}$  上的投影; 另一部分是经  $G$  的作用, 即在  $\{u_{2n+1}(2^{-j-1}t-i)\}_{j \in \mathbb{Z}}$  上的投影。其分解示意图见图 2-2。对于一个给定的正交小波函数, 可以生成一组小波包基, 每一个小波包基提供一种特定的信号编码方法。它完整地保存了信号的全部能量, 并可以对原始信号的全部特征进行完全重构。

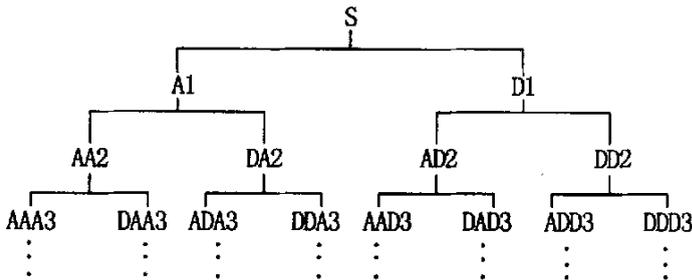


图 2-2 小波包分解示意图

小波变换中，信号的 2 范数的平方等价于原始信号在时域上的能量，所以用小波包能量谱来表示原始信号中的能量分布是可靠的，可以选取各频带内信号的平方和作为能量的标志。

设某频带内信号对应的能量为  $E_j$ ，则有：

$$E_j = \int |S_j(t)|^2 dt = \sum_{k=1}^N |x_{jk}|^2 \quad (2-13)$$

其中  $x_{jk}$  —— 重构信号  $S_j$  的离散点的幅值；

$N$  —— 第  $j$  个子空间的样本长度。

利用小波包可以对信号进行大量不同方式的分解，但对于给定的信号、小波包函数、分解层数和熵标准，它具有最佳的小波包分解方式。本文对信号进行小波包能量分析，并采用以下三个步骤来实现。

(1) 首先对压差波动信号进行三层小波包分解，分别提取第三层从低频到高频 8 个频率成份的信号。

(2) 对小波包分解系数进行重构，提取各频带范围的信号。

(3) 求各频带信号的总能量。

## 2.5 流型在线识别的实现

前面介绍了利用统计理论和小波理论来提取气液两相流流型的压差波动特征，并列出了各自的算法。流型识别的另一关键问题是如何实现自动识别。

### 2.5.1 神经网络的应用

神经网络是在现代神经生理学和心理学的研究基础上，模仿人的大脑神经元结构特性而建立的一种非线性动力学网络系统，它由大量的简单的非线性处理单元高度并联、互联而成；具有对人脑某些基本特性的简单的数学模拟能力，它以神经科学方面的研究为基础，综合了计算机科学、控制论、系统论、信息论、思维科学、微电子学及数学等多学科的研究成果。目

前,神经网络在文字识别、目标识别、图像处理与识别、智能控制、系统辨识等方面显示出极大的应用价值。

神经网络学习问题的研究主要存在三种主要方法,一是基于搜索机制的算法(search based algorithms),最具有代表性的是前向网络 BP 学习算法和模拟退火算法;二是基于规划的学习方法(programming based algorithms),最具有代表性的是支持向量机(support vector machines)方法;三是构造性的学习方法(constructive algorithms),如覆盖算法(covering algorithms)<sup>[57]</sup>。人工神经网络的激活函数主要有三种形式:(1) 阈值函数,(2) 分段线性函数,(3) sigmoid 函数;网络的拓扑结构主要有两种:(1) 前馈型网络,(2) 反馈型网络。通过研究者多年的努力,人工神经网络出现了 BP 神经网络、径向基函数神经网络、支持向量机(Support Vector Machine)、Kohonen 网络以及 Hopfield 网络等诸多的网络模型<sup>[58]</sup>。

BP 算法理论依据坚实(梯度下降法),推导过程严谨,所得公式对称完美,物理概念清晰,通用性好。上述这些优点使它至今仍是前向网络学习的主要算法之一。Hopfield 的研究开拓了神经网络用于联想记忆和优化计算的新途径,并为神经网络计算机的研究奠定了基础,Kohonen 神经网络的最大特点是无需监督的自组织学习,在克服病态样本和计算量方面均优于传统的 BP 神经网络。支持向量机是 AT&Bell 实验室 V.Vapnik 针对分类和回归问题,为适用于小样学习而提出的通用学习算法。这种学习算法被建议用以代替多种传统的神经网络方法,已经成为机器学习研究的热点,并在很多领域得到了成功应用。

## 2.5.2 利用 BP 网络实现流型的识别

BP 网络是目前应用最广、基本思想最直接、最容易被理解的多层前馈神经网络,也叫做误差逆向传播学习算法(Error Back-Propagation)。BP 网络的结构一般包括输入层、隐含层和输出层。网络的拓扑结构见图 2-3。网络的各层之间由输入层向输出层依次相互连接起来并对连接进行加权,从而形成网络的拓扑结构。BP 网络按有导师的学习规则进行监督训练学习,当

一对学习模式提供给网络后,神经元的激活值从输入层经中间层向输出层传播,在输出层的各种神经元均获得网络的输入响应。并按照减小期望输出与实际输出值之间误差的方向,从输出层经过中间层逐层修正各层的连接权

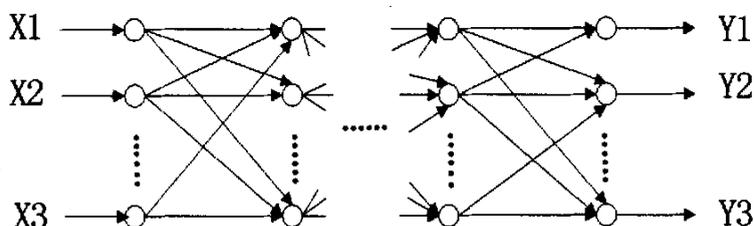


图 2-3 BP 网络的拓扑结构

值,最后回到输入层随着逆向传播修正的不断进行,网络对输入模式响应的正确率也不断上升。最后达到允许的误差范围内,网络达到平衡状态后自动收敛。本文选用三层 BP 网络,学习速率选择 0.4,输出层和隐层激励函数分别选择 logsig 函数和 tansig 函数,输入层激励函数选择线性函数。

1. 网络前向计算 以第  $q$  个样本为例,  $Q$  为总样本数。

输入层神经元  $i$  的输出等于其输入:

$$o_{qi} = x_{qi} \quad (2-14)$$

隐层神经元  $j$  的输入:

$$net_{qj} = \sum_{i=1}^I w_{ji} o_{qi} + b_j \quad (2-15)$$

隐层神经元  $j$  的输出:

$$o_{qj} = f(net_{qj}) \quad (2-16)$$

输出层神经元  $k$  的输入:

$$net_{qk} = \sum_{j=1}^J w_{kj} o_{qj} + b_k \quad (2-17)$$

输出层神经元  $k$  的输出:

$$y_{qk} = g(\text{net}_{qk}) \quad (2-18)$$

初始的权值和阈值可以是随机数, 通过网络的前向计算, 得到网络某一样本的网络输出值, 通过目标值与网络输出值的比较, 可以得到某一样本的误差。

单样本误差计算:

$$E_q = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K (t_{qk} - y_{qk})^2 \quad (2-19)$$

总误差计算:

$$E_m = \frac{1}{Q} \sum_{q=1}^Q E_q \quad (2-20)$$

式中  $I$  —— 输入层神经元数;

$K$  —— 输出层神经元数;

$J$  —— 隐层神经元数, 计算式为:

$$J = \sqrt{I + K} + A \quad (2-21)$$

式中  $A$  为 1 到 10 之间的任意数;

- $w_{ji}$  —— 输入/隐层间的权值矩阵;
- $w_{kj}$  —— 隐层/输出层间的权值矩阵;
- $b_j$  —— 隐层神经元阈值;
- $b_k$  —— 输出层神经元阈值;
- $f$  —— 隐层神经元传递函数;
- $g$  —— 输出层神经元传递函数;
- $t_{qk}$  —— 样本  $q$  对应的目标输出;
- $E_q$  —— 单样本误差;
- $E_m$  —— 总样本误差。

初始时, 网络输出与目标输出之间存在较大误差, 因此需要对阈值和权值进行修正。对阈值和权值的修正可以采用单样本, 也可以使用批处理, 通过反向传播计算实现参数的修正。

2. 网络误差的反向传播计算 批处理 BP 算法是沿着总误差下降的方向修正参数。

输入层与隐层之间权值修正量:

$$\Delta w_{ji} = \eta \sum_{q=1}^Q \delta_{qj} o_{qj} \quad (2-22)$$

隐层阈值修正量:

$$\Delta b_j = \eta \sum_{q=1}^Q \delta_{qj} \quad (2-23)$$

输出层与隐层之间权值修正量:

$$\Delta w_{kj} = \eta \sum_{q=1}^Q \delta_{qk} o_{qj} \quad (2-24)$$

输出层阈值修正量:

$$\Delta b_k = \eta \sum_{q=1}^Q \delta_{qk} \quad (2-25)$$

式中  $\eta$ ——网络学习率;

$\delta_{qk}$ ——网络输出层神经元的学习误差, 计算式为:

$$\delta_{qk} = (t_{qk} - y_{qk}) g'(net_{qk}) \quad (2-26)$$

$\delta_{qj}$ ——网络隐层神经元的学习误差, 计算式为:

$$\delta_{qj} = f'(net_{qj}) \sum_{k=1}^K w_{kj} \delta_{qk} \quad (2-27)$$

批处理算法是一次循环完成时, 当所有样本都经过网络的前向计算后对网络阈值和权值进行修正的。循环是否进行, 是通过比较总误差与期望误差后作出决定的。

## 2.6 小结

按照本文所提出的实现流型在线识别的三个步骤，本文分步讨论了反映流动参数波动特征的测量信号、表现流型特征参数，以及实现在线识别的网络的选取；经过讨论比较，得出以下结论：

1. 绝对压力、含气率、压差等两相流的波动特性参数很好的反应了两相流的流动结构型式。由于含气率很难达到精确测量，测量设备价格昂贵，而且压差波动在一定程度上过滤掉了测量段之外的压力波。所以选取压差信号作为被测量信号。

2. 由于气液两相流的非线性和非平稳性特点，单一的特征提取很难全面反映流型的信息，本文将统计理论与小波理论相结合，在幅域（选取均值、标准差、斜度和峭度参数）、时域、频域（选取小波包能量特征参数）三方面对流型进行识别，识别结果优于单个参数。

3. 在线识别采用应用较为广泛的 BP 神经网络，很好的实现了特征空间到流型空间的映射。

## 第3章 气液两相流流型在线识别系统

### 3.1 在线识别系统结构

白博峰在文献[59]中提到流型的客观自动识别一般包括信号的测量、信号特征的描述或提取，以及流型的判断。并且按照这三个环节，测量了压力信号和压差信号，分别提取了压力信号的傅里叶功率谱、均方根、分维数和压差信号的均值、傅里叶功率谱及0~10 Hz的总功率谱，通过建立特定流型的识别规则，采用学习矢量量化模式分类器作为未知流型的分类器，根据数据融合的技术思路获得了油气水多相流的流型在线识别技术。最后通过系统集成的手段，利用微处理装置研制出了流型识别系统；吴浩江<sup>[44]</sup>的油气水多相流流型智能识别系统也是按照检测系统流动状态的特征信号、从检测得到的特征信号中提取特征向量和依据特征向量来识别流型三个步骤建立的，文献将流体的压差信号作为特征信号，通过小波滤噪，提取了滤噪后信号的分维特征，最后利用径向基函数神经网络实现流型智能识别。本文建立的在线识别系统要做到客观自动识别流型，并且适时输出识别结果，系统结构见图3-1。

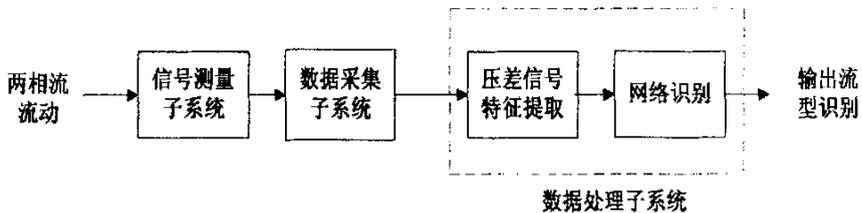


图3-1 气液两相流型在线识别系统结构图

本系统由三部分组成，主要包括信号测量子系统、数据采集子系统以及数据处理子系统。数据采集部分是系统的硬件部分，由信号测量子系统和数据采集子系统组成，其中信号测量子系统由电容式差压变送器组成；数据采集子系统由IMP35951C数据采集板和P4微机组成，用来实现对信号测量子系统的输出做实时的采集、预处理以及存储等工作；数据处理部分也即数据处理子系统，

这部分为软件部分，实现对采集到数据的自动处理功能以及识别结果的实时输出功能。

## 3.2 硬件介绍

### 3.2.1 信号测量子系统

1. 差压传感器的选择 实验室选择差压传感器遵循以下几个要求：

(1) 具有良好的动态响应特性 能够快速不失真地获得动态信号的变化；

(2) 要有足够的精度 实验中的管道差压一般较小，在 kPa 级时，如果测量精度要达到 1%，传感器的精度要达到 10Pa；而采用两个压力表测量差压是达不到这个精度的。本实验选用 ROSEMOUNT3051S 型变送器。该型变送器精度可以达到 0.025%。

2. 压差信号的获取 压差信号与实验段两取压环之间的距离有关。两取压环的间距太大，将会使测量的气泡之间或气弹与液弹之间相互作用；间距太小，不能包含一个完整的气弹，无法真实反映实际的波动信号。参考松井刚一<sup>[60]</sup>等人的实验，本文取 10 倍的管内径。差压传感器测量得到的数据通过信号线传给数据采集转换器，从而进入数据采集子系统。

3. 其它参数的测量 为了方便于后续工作的进行，本文在这里加入了气相和水相各自的温度、压力、流量参数的测量。

### 3.2.2 数据采集子系统

数据采集子系统由 P4 微机、IMP3595A 数据采集卡、IMP35951C 数据采集转换器以及数据线、电源几部分组成。

IMP (ISOLATED MEASUREMENT PODS) 是英国输力强公司近年研制成功的一种新型分散式数据采集设备。它主要应用于工业环境和其他恶劣条件下多通道慢变化模拟信号 (温度、压力、流量、应变等) 的实时连续监

测和模拟量的输出（电流、电压），以及各种开关量信号（状态、频率、事件、周期等）的输入和输出，它可与各种微型计算机组成分布式数据检测与控制系统，从而实现对生产过程的数据采集和控制。

3595 系列 IMP 是为一般工业现场应用而设计的数据转换器，根据其产品形式可分为普通型 IMP、单板式 IMP 和开发型 IMP 三种类型；根据其基本测量功能又可分为四种类型：（1）模拟量信号输入板；（2）模拟量信号输出板；（3）数字量信号输入/输出板；（4）振动信号输入板。本文选用型号为 35951C 的 3595 普通型数据采集器。通道特性：20 通道 3 端干簧开关模拟量输入；基本功能及重要指标：电流输入为 0-20mADC，电压输入为 0-12VDC，分辨率为  $1\mu\text{V}$ 。

IMP 数据采集器是一种智能化输入/输出前端，每块 IMP 中不仅包含有微处理器和若干逻辑阵列门，而且还有 EPROM 和 RAM，因此，它具备数据处理能力和编程条件。系统中的每块 IMP，除了完成数据采集和通信工作外，还可以通过其内部固化软件对测量数据作一些预处理，它可以将本来由主机进行的部分数据处理工作交给采集器完成。其智能化功能主要包括：

1. 自动量程变换；
2. 数字滤波；
3. 使用热电偶进行温度测量时，对信号可自动进行冷端温度补偿、非线性处理及热电偶开路检查；
4. 有关工程单位换算；
5. 对放大器进行零漂校正；
6. 由软件命令指定每一通道的输入/输出功能、量程范围及工作方式。

### 3.3 软件介绍

在线识别系统软件的设计是整个系统的主要部分。考虑操作界面友好、使用简单、系统功能可扩展性和兼容性，软件部分采用面向对象编程的 Visual Basic 6.0 语言来实现所要求的数据采集、数据处理以及数据显示等功能。

Microsoft Visual Basic（简称 VB）是可视化的、面向对象的、采用事件驱

动方式的结构化高级程序设计语言,是一套完全独立的开发系统,是在 Windows 操作平台下设计应用程序的最快速、最简捷的工具之一。它具有简单易学、操作方便、功能强大等特点,已经成为普通用户首选的程序设计语言。Visual Basic 6.0 不仅继承了以前版本的优点,而且在数据技术、控件等方面增加了许多新特点<sup>[61]</sup>。

配置说明: Microsoft Windows XP, 内存 256MB, Pentium(R)4 CPU  
Office2003, Visual Basic 6.0, MATLAB 7

### 3.3.1 软件结构

本系统由在线识别系统操作平台、数据采集以及数据处理程序和数据库三部分组成,软件结构见图 3-2。数据处理部分数据的存储和获得需要用到数据库中各相关表中的数据,所以整个程序围绕数据库运行。

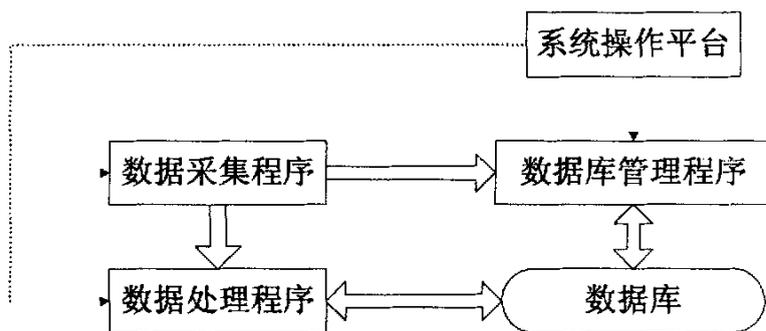


图 3-2 软件结构图

系统操作平台提供了一个操作人员与计算机之间友好的图形交互界面。操作人员通过界面所提供的信息,按照系统运行要求可以进行相应操作。

数据采集程序实现微机与采集板的连接、采集板各通道的设置、采集命令的发送以及采集数据的接收存储。

数据处理程序首先对采集得到的压差电信号进行单位转换计算,转换后值按照已选特征参数的计算式进行计算,而后将计算得到的数据与数据库

中已有的网络参数值一起送到网络训练的计算程序中进行误差计算,同时更新网络各参数值,最后的在线识别功能实现同样是电信号经历单位转换计算、特征参数计算后与更新后的网络参数值一起送入网络,通过网络得到正确的识别结果。

数据库管理程序主要用于存储采集得到的电信号、网络参数值、历史记录、以及其他一些相关信息,并在计算或有显示需要的时候,从数据库中读出网络参数值、历史纪录等信息。

### 3.3.2 软件功能实现

本文在 WindowsXP 环境下,使用 Visual Basic 6.0 语言编程完成系统软件的开发。界面结构见图 3-3 所示。由启动界面、主界面和各子界面组成,主要的子界面有数据采集界面、网络训练界面、流型识别界面、以及历史数据查询界面和系统图界面组成。

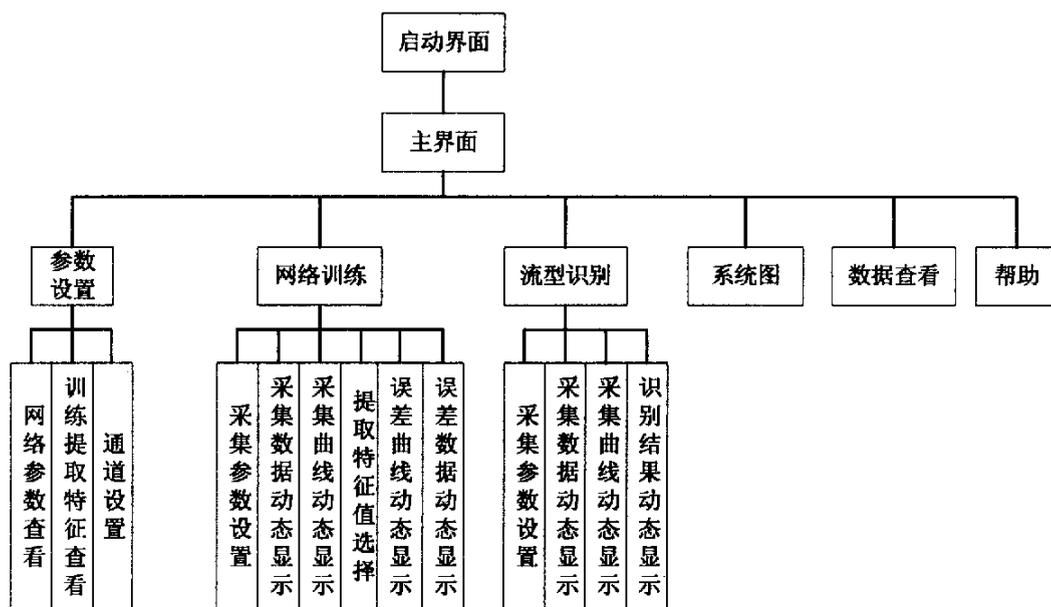


图 3-3 界面结构图

本应用软件主要实现以下主要功能:

1. 实现气液两相流压差信号的实时采集以及预处理工作,之后将压差数据送入微机;
2. 具有参数设置界面、数据动态显示界面、网络训练界面、流型识别界面、系统图界面以及历史数据查看界面和帮助界面;
3. 能够实现采集数据及训练误差的数据动态显示和数据曲线动态显示,以及数据的存储;
4. 实现识别结果的实时动态显示,以及历史数据的存储、查询、打印等功能,可供数据的离线处理。

### 3.3.3 主要模块的设计及相关功能说明

1. 系统操作平台 系统平台的好坏直接影响到用户对系统的印象。一个美观、实用的图形交互界面是设计者的目标。Visual Basic(简称VB)是在Windows操作平台下设计应用程序的最快速、最简捷的工具之一,它提供给用户一个非常友好的图形界面设计功能。气液两相流流型在线识别系统应用软件采用MDI(Multiple Document Interface)即多文档界面与SDI(Single Document Interface)即单文档界面相结合的设计方法,在界面的相互转换之间按照需要采用了多种对话框形式,对软件的正常运行提供了很大的帮助。

(1) 主界面 软件的启动界面主要实现应用软件与采集板的连接,当采集卡以及IMP初始化成功后系统进入主界面。主界面是一个MDI,见图3-4。

主界面是最基本的操作界面,从界面的主菜单中就可以了解到应用软件主要功能,其中包括参数设置功能、网络训练功能、流型识别功能、系统图查看、数据库中数据查看以及帮助功能。进入主界面后,需要先进行参数设置。如果不需要进行网络训练可直接使用已有的网络参数值进行未知流型的识别,否则进入网络训练界面开始网络参数值的更新。点击主菜单网络训练的下拉菜单有两级,每一级都有两项,第二级说明了训练样本的两种获取方式,用户可以直接进入采集界面进行样本采集,也可以点击历史数据进入历史数据操作界面获得训练样本。

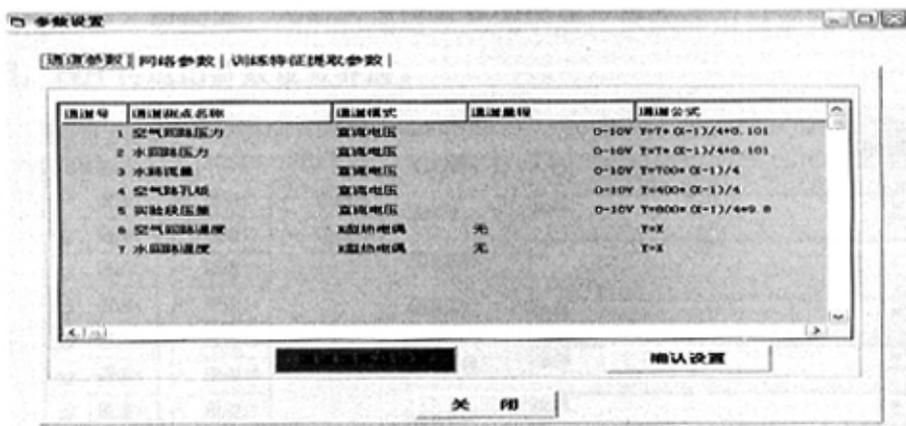


图 3-4 主界面

## (2) 参数设置界面

采集板连接成功后，需要对各通道的测点名称、通道模式、通道量程、通道换算公式等参数进行设置。所有这些参数是采集程序运行的前提。

参数设置界面由一个选项卡控件组成，选项卡包括通道设置、网络参数设置、训练特征提取参数三个选项，界面设计见图 3-5，实现通道、采集、训练等部分参数的查看和设置。其中图 a) 为通道参数显示界面，特征参数查看界面见图 b)、图 c)。网络参数查看界面显示网络的默认参数设置，在点击修改按钮前，各参数是不可写入模式；特征提取参数查看显示已经选择好的将要提取的特征参数，这里只实现显示，在网络训练界面中专门有这部分参数的选择。



a) 通道设置界面



b) 网络参数设置界面

c) 训练特征参数查看界面

图 3-5 参数设置界面

(3) 通道设置界面 参数设置及显示界面打开之初，表格中显示上一次设置的通道值，如果用户决定继续使用原通道设置，只需点击确认设置按钮，通道设置完毕；否则点击通道选择及设置按钮，程序进入通道设置界面，见图 3-6。

在通道设置界面的左侧选择相应的通道号，通道号选择结束点击确定选择，在右侧点击下拉选择框选择通道的设置值，此系列下拉框是可编辑的，如果需要的设置不存在，则可以直接输入。每设置好一个通道，点击设置按钮，各设

置参数值将存入数据库，当所有通道设置完毕后，依次点击设置完毕按钮，关闭按钮，程序将退出参数设置界面。

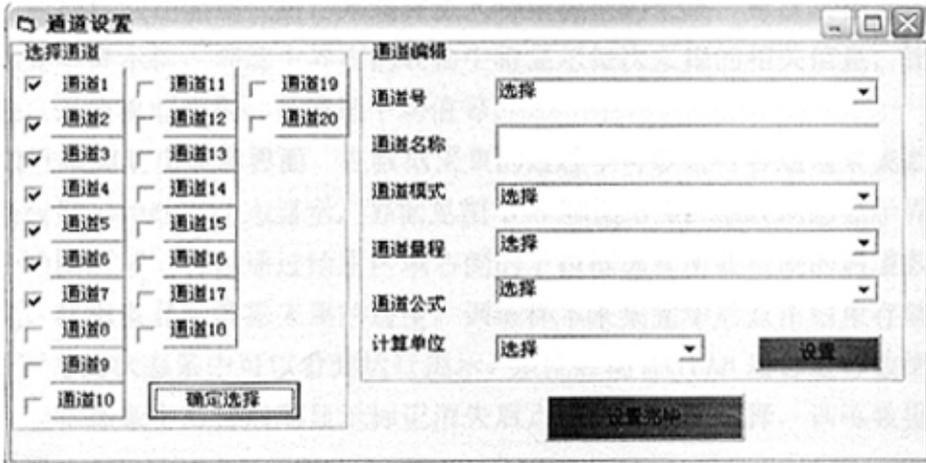


图 3-6 通道选择及设置界面

(4) 样本采集界面 点击主菜单网络训练的下拉菜单中末级的重新采集项，系统进入样本采集子界面如图 3-7。

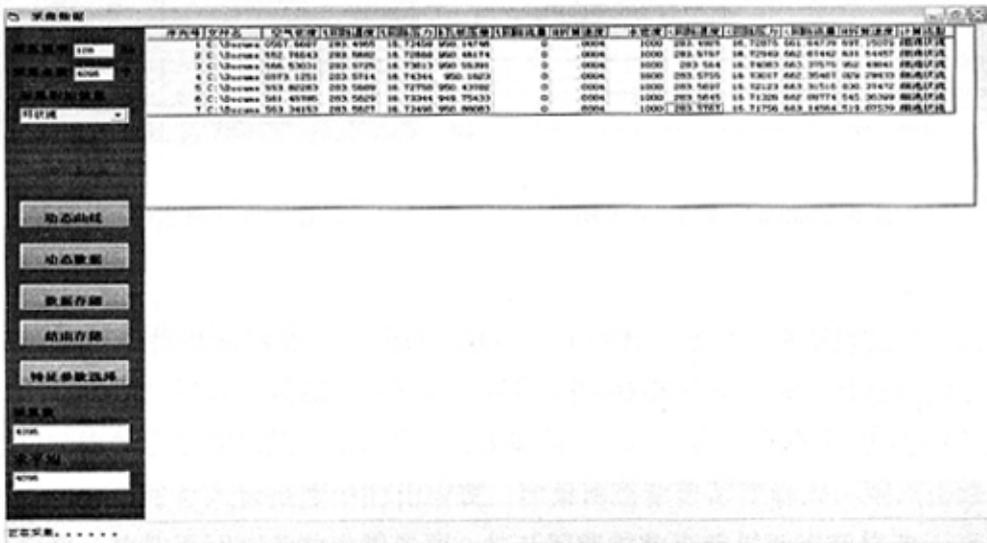


图 3-7 样本采集子界面

在采集开始前先设置采集频率和采集点数。在采集板工作的过程中，可以按照实验台的调节结果选择要采集的流型类别，点击存储按钮，弹出路径选择对话框，选择数据存储路径后，系统将进入特定流型的采集，每次采集完毕后弹出采集完毕提示框，训练主界面的表格中将显示每次采集的相关信息，比如存储路径，采集流型类别、各通道平均值等。

(5) 数据采集动态显示界面 在数据采集的过程中可以进行各通道采集数据的动态曲线显示和数据动态显示，界面见图 3-8 和图 3-9。曲线动态显示界面中有三个绘图区域，可以通过绘图区域右侧的下拉框选择所要绘制的通道数据动态曲线，状态条显示数据采集的进度，训练样本采集完毕后点击结束存储按钮，在最下方的状态条中可以看到运行提示，系统启动 MATLAB 后台进行数据特征计算，当状态条中后台启动显示标记消失后点击特征参数选择，训练数据选择界面出现。

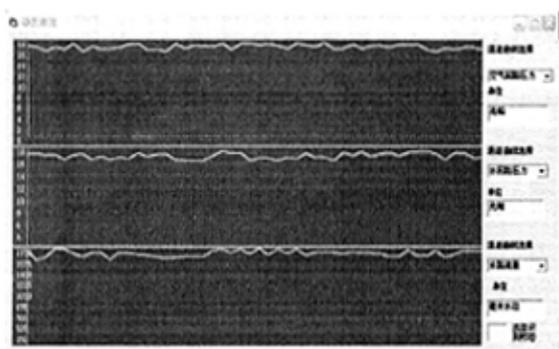


图 3-8 动态曲线显示界面

通道	通道侧点名称	采集值	转换公式	转换值
1	空气回路压力	10.60672	$Y=T*(X-1)/4$	16.91276
2	水回路压力	10.10571	$Y=T*(X-1)/4$	16.03599
3	水路流量	10.47269	$Y=700*(X-1)$	1657.721
4	空气路孔板	10.46740	$Y=400*(X-1)$	946.739
5	实验段压差	2014.16016	$Y=800*(X-1)$	3945794
6	空气回路温度	10.13387	$Y=X$	10.13387
7	水回路温度	10.37023	$Y=X$	10.37023

图 3-9 数据动态显示界面

(6) 训练数据选择界面 在线识别系统的实现有三部分：流型特征信号的采集、信号特征的提取以及流型的识别。选择训练数据界面实现信号特征的选择功能和网络各层参数值的显示，界面设计见图 3-10，点击列表框下的确定按钮，所选择的参数将存入数据库中的相应表；如果网络参数需要修改，则点击修改参数按钮，软件返回到参数设置界面，打开网络参数查看界面进行修改。

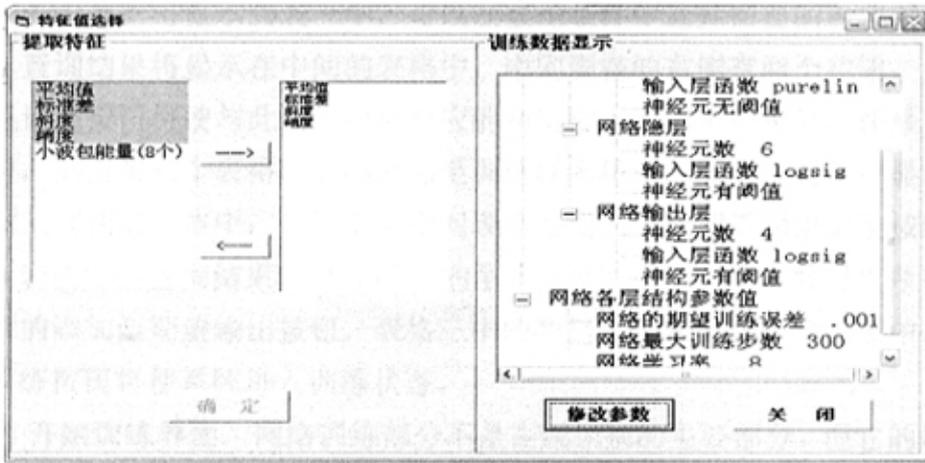


图 3-10 选择训练数据界面

(7)历史数据 这部分将历史数据作为训练样本的又一个来源功能的操作界面。图 3-11 是具体界面设计，说明了功能是如何实现的。

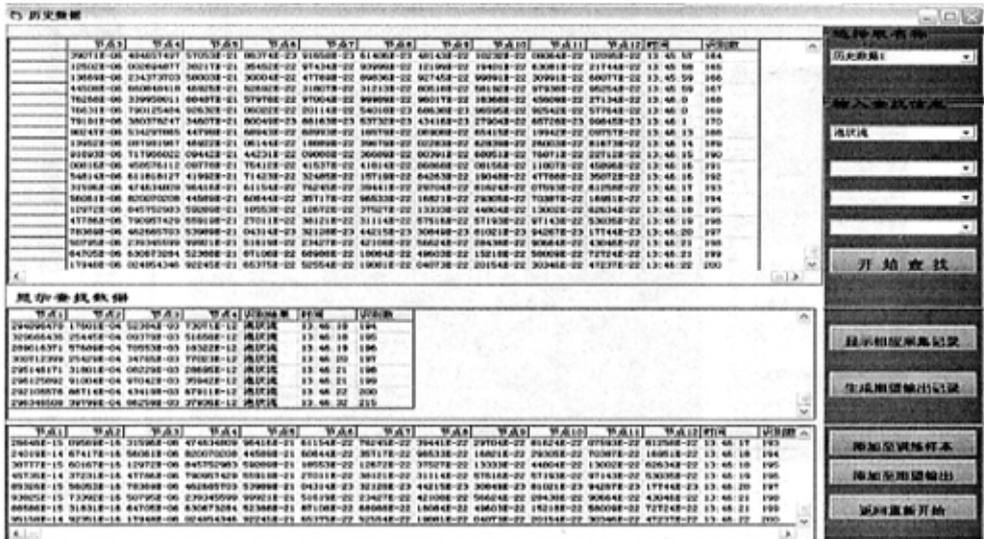


图 3-11 历史数据界面

整个界面由三个表格组成，最上面的表格是用来显示右侧下拉框中选择的表中数据的。如果需要选择历史记录加入到训练样本，则选择历史数据 1 这一

表名，表中数据将显示到表一中，可以在查询条件中选择需要的内容；点击查询后，查询结果将显示在中间的表格中；中间表格的右侧有两个按钮，显示相应采集记录按钮将使与此表中数据对应的网络输入的历史记录显示在最下面的表格中，单击第三个表格右边的添加至训练样本按钮，此时表格三中显示的数据将加入到训练样本中；如果单击中间表格右侧的生成期望输出记录按钮，则原中间表格中的查询结果将以 0 或 1 的形式显示在表格三中，此时再单击表格三右侧的添加至期望输出按钮，表格三中的数据将加入到期望输出表中。点击开始训练按钮将使系统进入训练状态。

(8) 开始训练界面 网络训练部分不是在线识别的主要部分，但它的地位是不容忽视的。在线识别软件实现流型的正确分类是通过神经网络实现的，网络训练是 BP 神经网络思想的精髓所在。这部分功能包括前面介绍到的训练样本的采和训练数据选择两部分外，还有开始训练部分。图 3-12 为网络训练部分的运行界面。其中包括了网络训练界面和在主界面打开的训练误差子界面。



图 3-12 网络训练主界面

网络训练界面是网络训练误差动态曲线显示界面。点击开始后绘图区域将

显示误差的动态曲线图，坐标图的纵坐标是误差值，横坐标是训练步数，训练步数值为训练步长的横坐标值的倍数。右上文本框中显示网络的训练误差值、期望误差以及训练步数。在右下有一个提示文本框，如果需要终止网络训练，只要按照需要点击更新或放弃按钮。更新是指更新网络各层参数值，而放弃是停止训练且不对网络参数值进行更新，没有特殊要求，一般点击更新。退出训练时有确认询问框，同时网络训练误差数据动态显示在训练主界面的表格中。

(9) 流型识别 在线识别软件的目标是要实现流型的实时识别。在识别的过程中，用户不仅可以直观的看到未知信号的温度、压力等的动态曲线图和数据动态显示，同时可以实时的看到网络的识别结果。流型识别界面见图 3-13。在识别进行之初，需要先设置采集频率和采集点数，采集点数的设置要考虑到采集一个完整信号需要的时间。

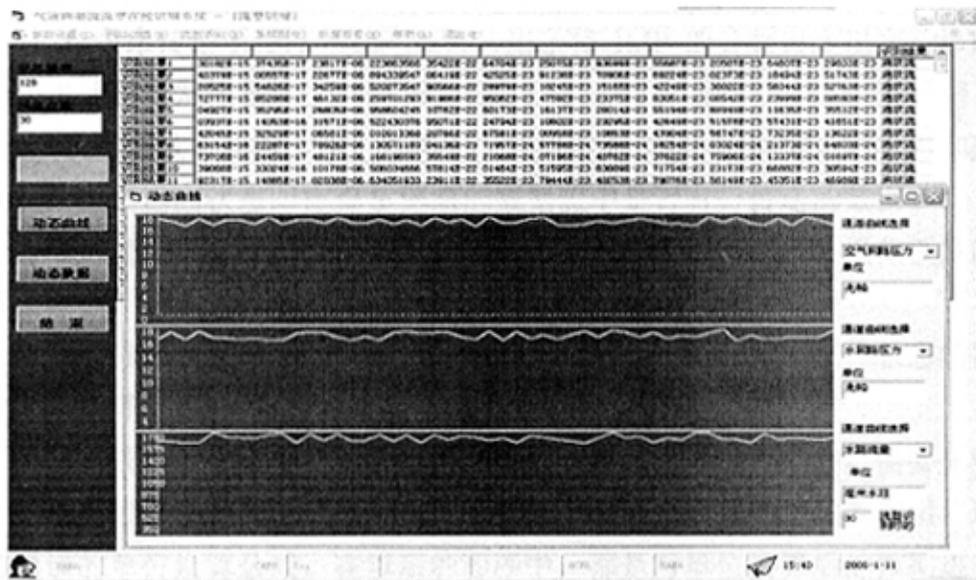


图 3-13 流型识别界面

(10) 数据查看界面 主菜单的数据查看项有一个下拉菜单，点击相应的表名称可以将相应表的数据显示在报表中，这样实现对数据的查看和打印功能。

(11) 其它界面 系统图界面只是一个显示界面，用户通过这一界面可以熟

悉了解本系统运行的一个环境。帮助界面的设计给用户操作本系统提供了方便。

## 2. 数据采集及数据处理程序设计

(1) 软件接口程序 在线识别系统在启动之初先调用初始化程序，它是一个后台处理模块，主要通过调用数据转换器的驱动程序实现软件与硬件的连接状态的测试以及数据的传输。

施伦伯杰公司设计了一套 IMP 字符命令，并向用户提供一套驱动程序，方便 BASIC、QUICK BASIC、QUICK C 等高级语言调用，从而使得 IMP 系统组态灵活。图 3-14 是 IMP 数据采集系统应用程序的流程框图。

在每种语言的驱动程序中实际包括了五个基本的程序，各基本程序功能为：

a) 初始化子程序 (IMP\_INIT) 用于设定接口板的内存地址；初始化并清除接口板输入缓冲器的内容；将 S-网络断电后再上电，使所有的 IMP 复位；查询系统中各块 IMP 的地址；设定接口板和 IMP 的工作日历。

b) 命令串传送子程序 (IMP\_TX) 用于将 IMP 的各种命令以字符串的形式，由主计算机发往各有关 IMP 板。

c) 状态测试子程序 (IMP\_TEST) 用以检查 IMP 的数据返回状态和数据流种类，数据返回状态即检查 S-网络的数据流中是否有待传送的数据。

d) 数值接收子程序 (IMP\_NUMERIC) 用于接收系统中 IMP 采集板发回的数值型数据。

e) 字符串回收子程序 (IMP\_STRING) 用于将表示 IMP 工作状态的字符串输入主计算机。

由采集板进入主计算机的数据为电信号，要对信号进行处理，需要先将电信号的值通过单位换算公式换算成压差单位。在通道设置的时候要求用户选择出各通道的单位换算公式。在以后的程序中，都是对单位换算后的数据进行处理。在数据采集过程中，各通道的数据是分别存储的，每采集完一次，都要对除实验段的压差数据外的其他通道数据进行平均值的计算和显示。同时对压差数据进行特征提取计算，计算后数据存入数据库中训练样本表中；并利用每次采集时存储的流型的相应信息生成期望输出表，这两个表中的数据与网络各层参数值一起被送入网络进行训练。在流型识别部分使用相同的步骤，先将采集到的信号进行单位换算、特征提取等一系列计算后送入网络，调用训练好

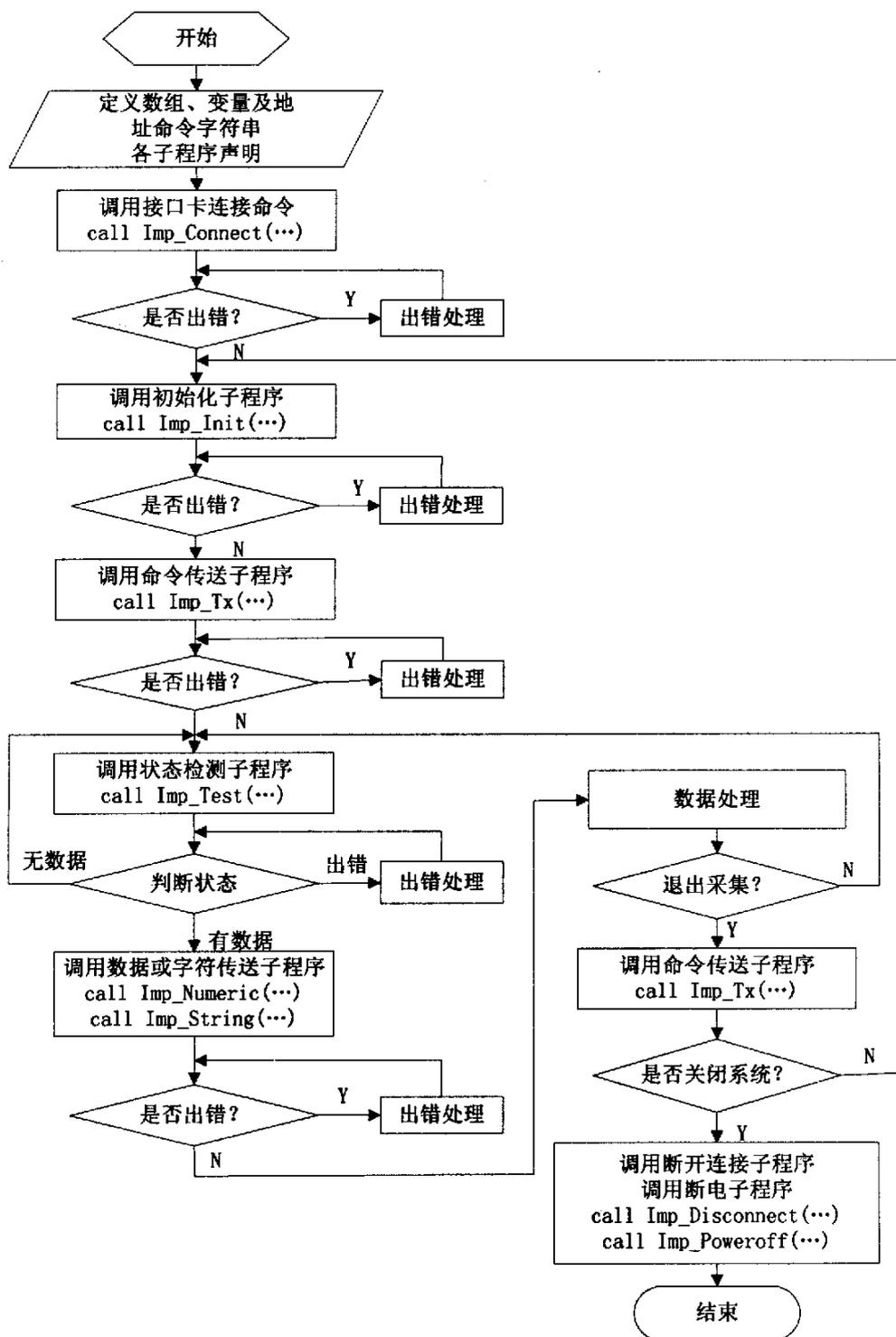


图 3-14 数采系统程序框图

的网络各层参数值实现流型的正确识别。

(2) 数据处理部分设计 数据处理部分是整个系统的核心。在线识别软件的数据处理部分主要包括对采集获得的数据所进行的单位转换计算、特征提取计算以及网络训练和识别时设计的参数值更新计算。小波包能量特征计算框图见图 3-15。

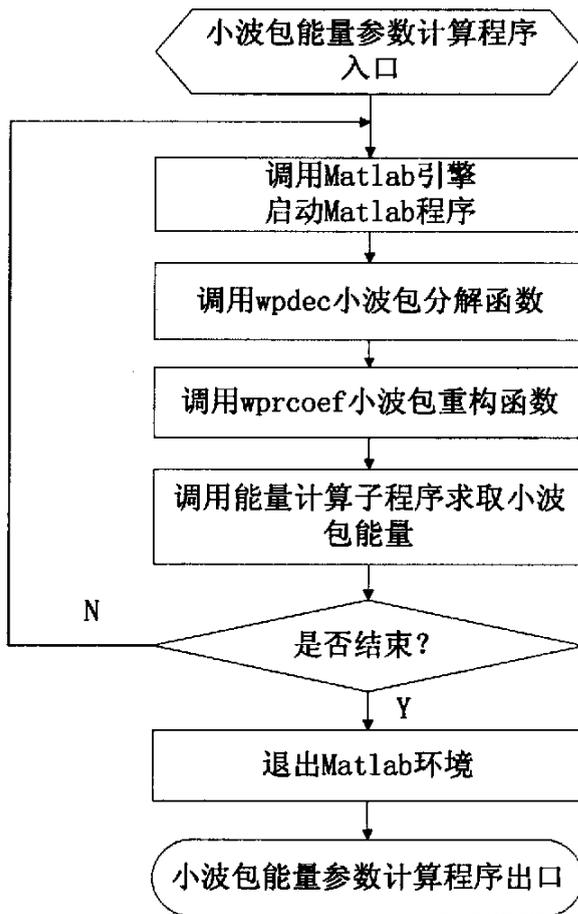


图 3-15 小波包能量特征程序框图

本系统在开始时先进行通道的设置工作，向采集器发出采集信息，以便让采集板完成采集的初始化和通道参数设置，做好采集的准备工作；接着向数采发出采集命令，并判断通道是否有数据，将采集到的数据按通道存储在定义的

相应数组变量中，调用单位换算子程序，对各通道采集数据进行转换计算后。这部分数据用来绘制采集的动态曲线图；如果系统进入数据存储模式后，系统将在一定的时间内把转换后的各通道数据存储到对应的数据文件中。到这里，数据采集以及前期工作准备结束。通过调用特征参数计算子程序，网络训练子程序，最后通过训练好的网络进行识别计算判断流型种类，同时完成数据的存储和显示。按照系统建立的步骤，采集得到的数据需要进行特征值计算，这里需要调用各特征值计算子程序。其中考虑到 MATLAB7 语言移植性、开放性好的特点，利用它的小波工具箱中涉及的用于小波包能量特征计算现有函数<sup>[62]</sup>，运用将 MATLAB 与 VB 各自特点相结合的思路，采用 MATLAB 接口技术，通过 ActiveX 自动化接口将 MATLAB 作为 VB 语言的一个 ActiveX 部件进行调用<sup>[63-65]</sup>，操作流程框图见图 3-16。

**3. 数据库管理** 在线识别系统的数据库是在 VB 环境下，利用外界程序中的可视化数据管理器(Visual Data Manager)直接建立的，所建数据库为 Microsoft Access 的 Version 7.0MDB，数据库中的表大都通过编程建立，这样可以在不需要的时候随时删除表，节省系统运行空间。数据库存储的数据或者信息主要方便程序运行时的调用。数据库中包括有网络各层参数值存储表、训练样本存储表、期望输出存储表、历史数据以及存储其它信息的表格。

(1) **网络各层参数值存储表** 用来存储网络训练后的各层阈值以及层间的权值。初始的时候这些值按照随机数给出，在网络开始训练的时候被读出，每训练一次会被更新一次；开始网络识别时更新后的数据被读出。

(2) **训练样本** 用来存储通过特征提取计算后得到的数据，这些数据在训练开始时被依次读出进入训练计算。

(3) **期望输出** 存储训练样本的期望输出结果，数据在每次训练样本采集结束后，通过提取有关的采集信息，判断并生成对应的数值后被写入；在训练开始时被读出。

(4) **历史数据** 在对未知流型识别时被写入。每次实验开始后历史数据以前的数据将被删除后重新写入。

(5) **其它信息存储各表** 这些表里包括存储通道信息表、通道参数均值存储表、以及所有的通道默认设置存储表。

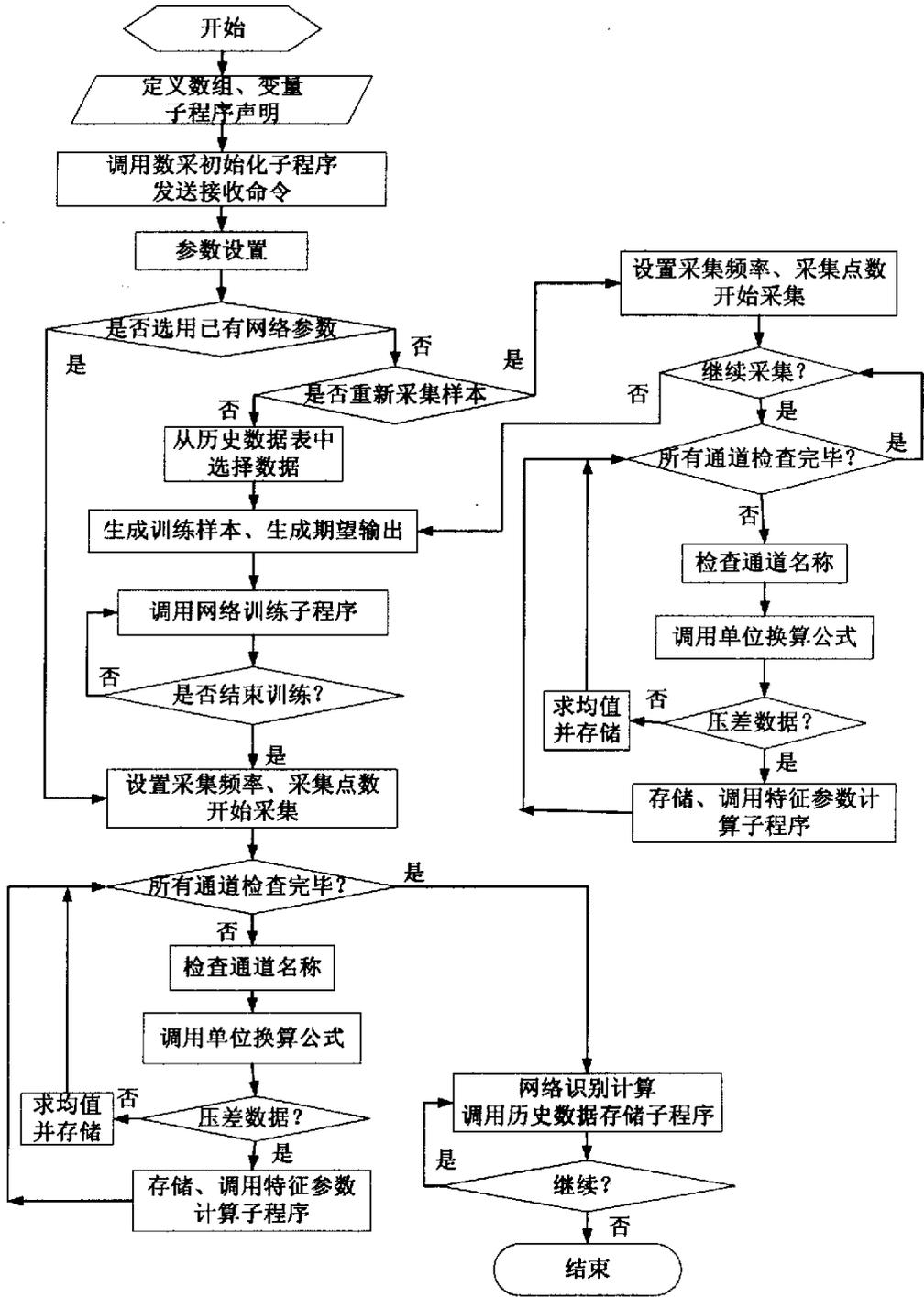


图 3-16 操作流程框图

除通道默认信息存储表外，其余表格都是通过编程建立，只有程序运行到时，表才被生成；在程序开始进入时，可以选择是否保留原有数据。

### 3.4 小结

通过 Visual Basic 语言编程,在 WindowsXP 系统下进行了系统的软件设计,综合起来,本系统具有以下特点:

1. 用户操作界面友好,使用方便。
2. 实时显示功能强,能够对流动状态进行实时观测,并对未知流型的识别结果实现了实时显示,使用户能够按照实际情况及时做出响应。

## 第4章 在线识别系统的实验验证

任何一个软件在投入使用之前必须要进行运行可靠性的测试，经过多个用户的反复测试、修改、再测试、再修改才能最后进入市场。识别系统软件编译完成后，通过 60 组样本数据对网络进行训练，获得网络各层参数值，最后形成识别系统。通过在实验室的气液两相流实验系统上进行流型在线识别系统的测试，结果表明，此系统满足实验要求，达到实时自动识别的目的。

### 4.1 实验系统

为了验证本识别系统的在线识别效果，在线识别系统设计完毕后，我们在空气-水两相流实验系统上进行了仿真实验，实验系统的结构布置如图 4-1 所示。实验系统中的空气压缩机型号为 W-0.9/C，额定工作压力为 0.7MPa，排气量为 0.9m<sup>2</sup>/min；离心式水泵型号为 2BA-9。

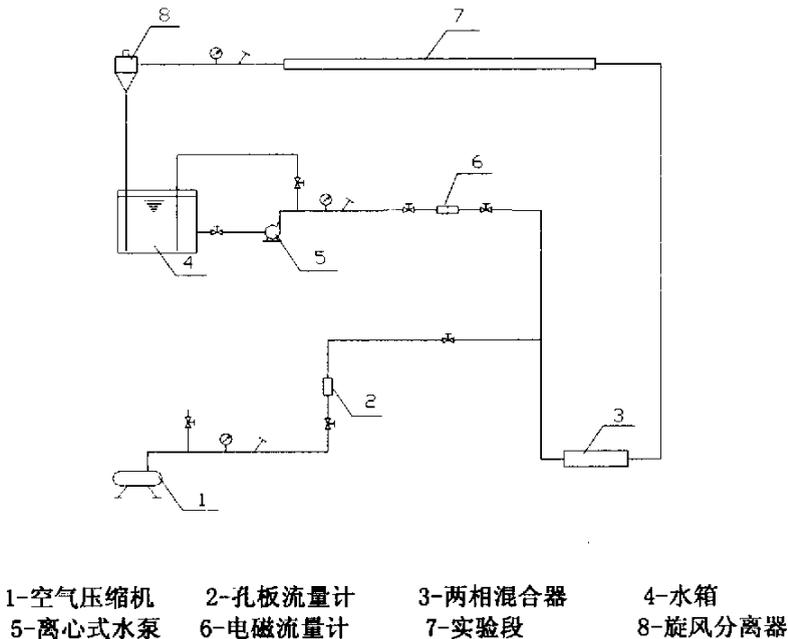


图 4-1 空气-水两相流实验系统

实验工质采用空气和水，其流程如下：实验时，空气经空气压缩机升压后，由孔板流量计计量后进入两相混合器；同时，离心式水泵给水箱中的水进行加压，水流入实验系统，通过电磁流量计计量后也流入两相混合器。在混合器内充分混合而后进入实验段进行实验各参数的测量，从实验段出来气水混和物通过旋风分离器分离，分离出的空气排入大气，剩下的水重新流回水箱，以备循环使用。

实验段选用内径为 26mm 的有机透明玻璃管，测量压差段长度为 2,000mm。本文实验段的取压间距取 10 倍管直径。由压差变送器采集的数据通过数据采集器输入微机。实验段结构布置图见图 4-2 所示。

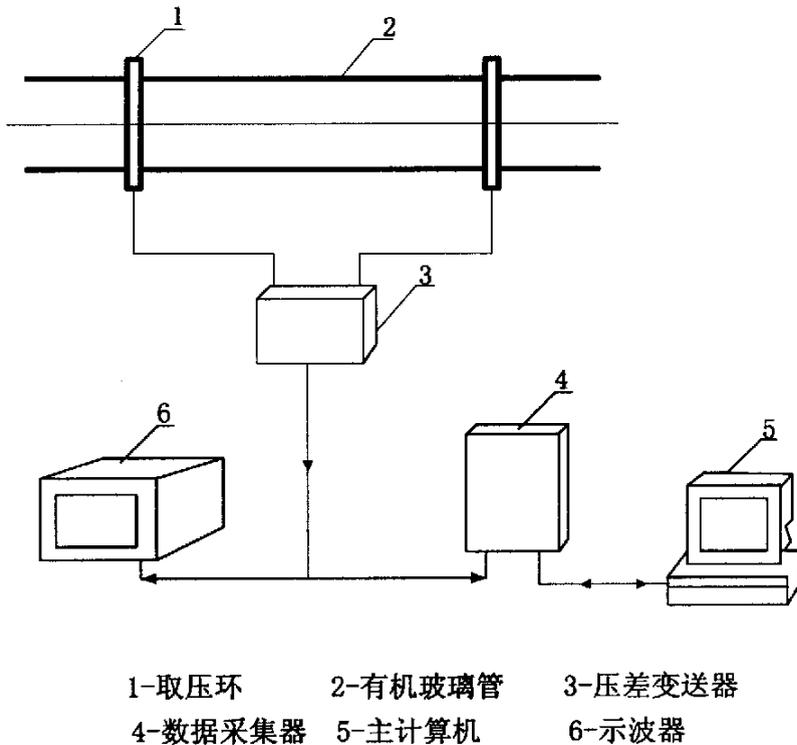


图 4-2 实验段结构布置图

## 4.2 实验参数测量

1. 参数测量 实验主要对以下参数进行了测量：空气流量、水流量、空气

压力、水压力、空气温度、水温度以及实验段压差。

(1) **流量测量** 空气的流量采用孔板流量计来测量,水的流量使用电磁流量计 (Model: NT546E) 来测量;

(2) **压力测量** 空气压力、水压力均采用 ROSEMOUNT3051S 型电容式压力变送器测量;

(3) **温度测量** 空气和水的温度采用 ROSEMOUNT3144P 温度变送器测量;

(4) **实验段的压差测量** 压差信号通过 ROSEMOUNT3951S 型电容式压差变送器测量。

测量得到的数据通过 IMP35951C 数据采集板进入主机。

## 2. 参数范围

压力: 0.1-0.5MPa;

工质温度: 3-42°C;

空气流量: 0-25m<sup>3</sup>/s,

水流量: 0-4.5m<sup>3</sup>/s。

## 4.3 实验步骤

1. 设定若干水流量和若干空气流量;
2. 启动空气压缩机, 调节使空气流量稳定在某一设定值;
3. 启动离心式水泵, 使水流量稳定在某一设定值;
4. 采集所需要的流动参数值;
5. 保持水流量不变, 增加空气流量至下一个设定值, 重复步骤 4;
6. 增加水流量重复 4、5, 直至按照要求采集完所有工况。

这里需要说明的是, 系统开始采集后, 首先要进行训练样本的采集, 每采集一个工况的数据, 都按照以上步骤进行, 进行到第 4 步时, 点击数据存储按钮, 数据将按照选择路径进行存储; 样本采集结束后, 采集板也不再读入数据, 直至到最后的仿真识别时, 同样是按照以上的几步进行。每调节好一个工况, 点击流型识别按钮, 识别软件开始工作; 需要变换流型时, 先暂停识别, 按照第 5 或第 6 步调节系统, 而后点击识别按钮, 系统重新工作。

### 4.4 实验验证结果

为了验证系统的识别效果，在上述实验系统上做了验证。实验设置采集频率为 128Hz、采集点数为 1024，采集 180 组数据（分层流和泡状流各 30 组、环状流 40 组、间歇流 80 组）进行实验验证。图 4-3 为识别结果显示。

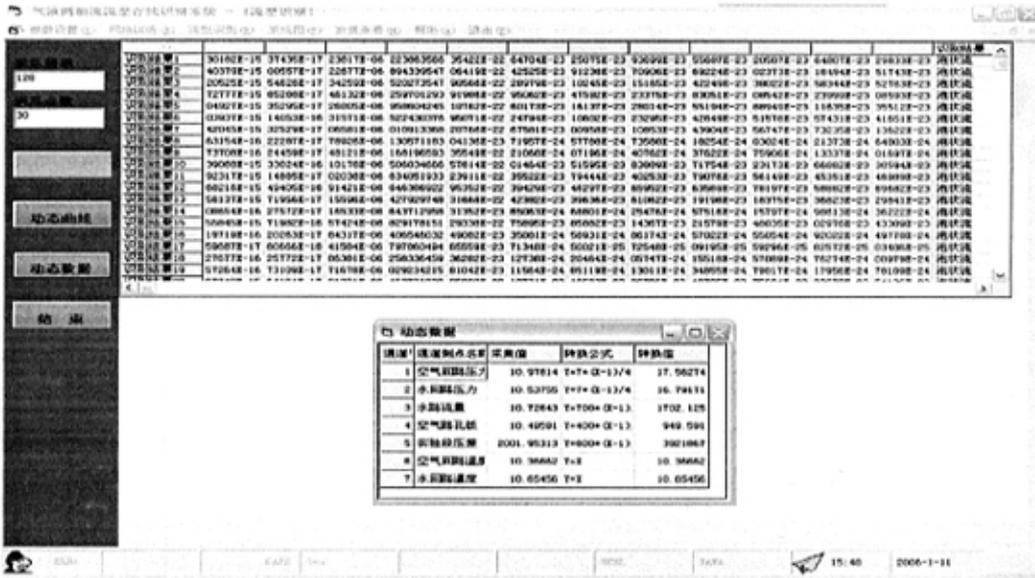


图 4-3 流型识别界面

系统识别结果与可视化方法（目测法和压差波动法）获得的结果进行了比较，结果显示：网络正确识别样本数为 165 例，整体识别率为 91.7%，其中典型流型的识别结果见表 4-1 所示：

表 4-1 典型流型识别结果

	泡状流	间歇流	层状流	环状流
识别总数	30	80	30	40
正确识别数	30	68	30	37
正确识别率	100%	85%	100%	92.5%

对于实验中出现的误识别主要考虑以下几个方面：首先，由于对流动机理

缺乏完整的认识，要使训练样本具有类比性、完备性、平衡性和复杂性有一定的难度，所以难以获得一组好的学习样本；另外，从以前的研究中也发现，间歇流的压差信号频率范围较大，很容易与其它流型重叠；再者，使用语言编程时，由于一些主客观因素总会增加计算的误差。这些都使网络识别不可避免地要产生一定的误识别。

## 结 论

气液两相流的流型影响着两相流的流动特性和传热特性，同时也影响着流动参数的准确测量以及两相流系统的运行特性。所以，对气液两相流流型的研究将为相关工业生产设备实现安全、经济的设计与运行提供有力的技术支持。随着工业技术的提高，对流型识别的准确性和适时性要求在不断提高，客观、在线的流型识别方法成为人们关注的一个方面。虽然目前流型识别方法有很多种，但是仅仅只利用单一的识别方法识别流型往往较难达到客观自动识别。因此，开展气液两相流型在线识别系统的研究具有重大的理论意义和实用价值。

本文通过按照信号采集、特征提取和流型识别三个步骤完成了气液两相流流型在线识别系统的开发。本系统的软件部分通过 Visual Basic 6.0 语言编程实现，并于基本设计工作结束后在气液两相流实验系统上进行了实验验证。从中得出以下结论：

1. 本文选用压差信号作为流型的特征信号，在较大程度上反映了流型的特征，对数据的后续处理工作提供了一个良好的数据基础。

2. 利用 MATLAB 强大的计算功能实现小波包能量特征参数的计算，使计算的准确性提高，缩短了特征的计算时间。

3. 采用 BP 神经网络实现流型识别，与传统的识别方法相比，判别的客观性增强。

4. 使用 Visual Basic 语言编程实现气液两相流流型在线识别系统软件，用户操作界面友好，实时显示的功能强，动态显示功能使运行人员能够更形象、更直观地了解到两相流的流动状况。

5. 此系统应用于实验室的流型识别，不仅具有较高的识别率，而且较好地实现了识别结果的实时显示，达到了流型在线识别的目的。

本课题还需要在以下几个方面进行进一步的完善工作：

1. 很多研究者将证据理论引入到了流型识别的研究，以后的工作中可以考虑将这一理论应用到在线识别软件开发中。

2. 本系统在提取消波包能量特征参数时使用将 MATLAB 语言与 Visual

Basic 语言相结合的方法完成计算；虽然在计算的准确性和错误处理的完备性上有很大优势，但是计算时不能脱离 MATLAB 环境。如果能够找出一种较好的处理方法，使系统运行避免过于复杂。

3. 本文在使用 BP 网络识别流型，没有针对它收敛速度慢的固有缺点作相应改进，希望在后续工作中予以考虑。

4. 对于一个应用软件，本系统还需要在界面美化方面以及方便使用上作一些完善工作。

## 致 谢

本文是在导师周云龙教授的指导下完成的，在论文完成之际，我想真诚的对关心、帮助和支持过我的老师和同学说一声谢谢。

感谢我的导师周云龙教授，谢谢老师在我课题方面给予的悉心指导以及对我的严格要求，尤其是在百忙之中仍然不忘关心我的学习和生活。周老师严格的时间观念、忘我的敬业精神和严谨的科学态度将会是我今生受用不尽的财富。在此，我对导师周云龙教授致以崇高的敬意和衷心的感谢！

感谢师兄孙斌博士，谢谢他在我做课题期间给予的指导，师兄的及时点拨不仅使我积累了知识，而且每次都使我陷入困境的课题正常进行。

感谢杨静、刘巍、赵雪峰等课题组的同学，谢谢各位同窗给予的帮助，那些充实和美好的日子会永远留在我的记忆中。

谨以此文献给我的父母！没有他们的支持和鼓励，我不会有机会得到所有这一切！

## 参考文献

- [1] J. M. Mandhane, J. Petroleum Technology. 1977. 1348~1358
- [2] 林宗虎. 气液两相流和沸腾传热. 西安: 西安交通大学出版社, 2003. 1~457
- [3] M. E. Ewing, J. J. Weinandy. Observations of Two-Phase Flow Patterns in a Horizontal Circular Channel. Heat Transfer Engineering, 1999, Vol.20(1): 76~85
- [4] J. Weisman. Effects of Fluid Properties and Pipes Diameter on Two-phase Flow Patterns in Horizontal Lines. Int J Multiphase Flow, 1979, 5: 437~462
- [5] J. Weisman, S. Y. Kan. Flow Pattern Transitions in Vertical and upwardly inclined Lines. Int J Multiphase Flow, 1981, 7: 271~291
- [6] S. L. Kokal, J. F. Stanislaw. An Experimental Study of Two-Phase Flows in Slightly Pipes-I. Flow Patterns. Chemical Engineering Science, 1989, Vol.44(3): 324~337
- [7] Lu Zhongqi, Zhang Xi. Identification of Flow Patterns of Two-Phase Flow by Mathematical Modeling. Nuclear Engineering and Design, 1994, 149: 111~116
- [8] S. Kalkach-Navarro, R. T. Lahey. Analysis of the Bubbly/Slug Flow Regime Transition. Nuclear Engineering and Design, 1994, 151: 15~39
- [9] 周云龙, 石惠娴, 李泓源, 等. 螺旋管内气-液两相流截面含气率试验研究和理论模型. 工程热物理学报, 1999, Vol.20(1): 86~89
- [10] 周云龙, 孙斌, 梁强, 等. 倾斜下降管气液两相分层流截面含气率的计算与液层高度的预测. 工程热物理学报, 2002, Vol.23(2): 238~240
- [11] 白博峰, 郭烈锦, 赵亮. 汽(气)液两相流流型在线识别的研究进展. 力学进展, 2001, Vol.31(3): 437~446
- [12] 盖德·希特斯洛尼. 多相流动和传热手册. 北京: 机械工业出版社, 1993. 151~210

- [13] O. C. Jones, N. Zuber. The Interrelation between Void Fraction Fluctuations and Flow Patterns in Two-Phase Flow. *Int J Multiphase Flow*, 1975, Vol.2(2): 273~306
- [14] N. K. Tutu. Pressure Fluctuations and Flow Pattern Recognition in Vertical Gas-Liquid Two-Phase Flow. *Int J Multiphase Flow*, 1982, Vol.8(4): 443~447
- [15] M. W. Wambsganss, J. A. Jandrzejczyk. Determination and Characteristics of The Transition to Two-Phase Chug Flow in Small Horizontal Charnels. *ASME J. of Fluid Engineering*, 1994, 116: 140~146
- [16] 白博峰, 郭烈锦, 赵亮. 垂直上升管汽液两相流型的压差波动特征识别. *化工学报*, 1999, Vol.50(6): 799~805
- [17] 白博峰, 郭烈锦, 陈学俊. 空气-水两相流压差波动研究. *中国电机工程学报*, 2002, Vol.22(3): 22~26
- [18] M. A. Vince, R. T. Lahey. On the Development of an Objective Flow Regime Indicator. *Int J Multiphase Flow*, 1982, Vol.8(2): 93~124
- [19] 梁法春, 王栋, 林宗虎. 一种基于差压波动图的段塞流识别方法. *热能动力工程*, 2004, Vol.19(6): 586~657
- [20] 石磊, 张作义, 杨瑞昌. 垂直管空气-水两相流流型的 Shannon 信息熵特性研究. *核动力工程*, 2000, Vol.21(5): 411~415
- [21] 李菊, 董守平. 小波分析在多相流流型识别中的应用. *石油大学学报(自然科学版)*, 2000, Vol.24(2): 93~97
- [22] 陈琪, 黄志尧. 小波变换辨识流型的一种新方法研究. *仪器仪表学报*, 1999, Vol.20(2): 117~120
- [23] 白博峰, 郭烈锦, 陈学俊. 空气水两相流压力波动现象非线性分析. *工程热物理学报*, 2001, Vol.22(3): 359~362
- [24] 杨靖, 郭烈锦. 气液两相流压差信号数据的分形插值拟合. *西安交通大学学报*, 2002, Vol.36(9): 921~924
- [25] Y. Cai, M. W. Wambsganss. Application of Chaos Theory in Identification of Two-Phase Flow Patterns and Transitions in a Small Horizontal Rectangular

- Channels. ASME J. Fluid Engineering, 1996, 118: 383~390
- [26] H. Monji, G. Matsui. Flow Pattern Identification of Gas-Liquid Two-Phase Flow Using a Neural Network. In: Proc. The Third International Conference on Multiphase Flow. ICMF'98. France: Lyon, 1998. 485~497
- [27] Y. Mi, M. Ishii. Vertical Two-Phase Flow Identification Using Advanced Instrumentation and Neural Networks. Nuclear Engineering and Design, 1998, 184: 90~103
- [28] 彭黎辉, 张宝芬, 姚丹亚. 基于模糊神经元的两相流流型辨识方法. 模式识别与人工智能, 1997, Vol.10(4): 30~35
- [29] 夏靖波, 杨晓铁. 模糊神经网络两相流流型辨识算法的研究. 控制与决策, 1999, 14(增刊): 531~535
- [30] 王妍芃, 林宗虎. 改进 BP 神经网络在流型判别中的应用. 热能动力工程, 2001, Vol.16(1): 63~65
- [31] 白博峰, 郭烈锦, 赵亮. 汽(气)液两相流流型在线识别的研究进展. 力学进展, 2001, Vol.31(3): 444~445
- [32] 白博峰, 郭烈锦, 陈学俊. 基于反传神经网络和压差波动识别气液两相流流型. 化工学报, 2000, Vol.51(6): 848~851
- [33] 白博峰, 郭烈锦. 气液两相流流型在线智能识别. 中国电机工程学报, 2001, Vol.21(7): 46~50
- [34] 白博峰, 郭烈锦, 陈学俊. 气液两相流流型 BP 网络识别. 计量学报, 2001, Vol.22(2): 122~127
- [35] 白博峰, 郭烈锦, 王忠勇, 等. 油气水多相流压力和压差信号特征分析与流型在线识别. 工程热物理学报, 2002, Vol.23(3): 357~360
- [36] 林宗虎. 气液两相流和沸腾传热. 西安: 西安交通大学出版社, 2003. 19~28
- [37] M. G. Hubbard, A. E. Dukler. The Characterization of Flow Regimes for Horizontal Two-Phase Flow. In: Proc. Heat Transfer & Fluid Mechanics Inst, 1966. 100~121
- [38] A. Matuszkiewicz. The Bubbly Slug Flow Pattern Transitions and The

- Instabilities of Void Fraction Wave. *Int J Multiphase Flow*, 1987 (13): 199~217
- [39] 劳力云. 基于动态差压信号分析的两相流参数辨识方法研究: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 1998. 15~101
- [40] 陆军. 改进 BP 网络的气液两相流流型智能识别方法: [硕士学位论文]. 吉林: 东北电力学院, 2004. 14~40
- [41] 孙斌. 水平管气液两相流型压差波动的统计特性: [硕士学位论文]. 吉林: 东北电力学院, 2002. 34~41
- [42] 吴浩江, 吴浩扬, 周芳德. 分形理论在油气水多相流流型识别中的应用. *西安交通大学学报*, 1999, Vol.33(9): 50~57
- [43] 顾春来, 董守平. 基于相关法的气-液两相流流型的模糊判别方法. *石油大学学报 (自然科学版)*, 2001, Vol.25(5): 66~69
- [44] 吴浩江, 周芳德. 油气水多相流流型智能识别系统的设计与实现. *西安交通大学学报*, 2000, Vol.34(3): 32~35
- [45] 孙斌, 周云龙, 关跃波, 等. 水平管气液两相流流型的压差波动特征. *东北电力学院学报*, 2002, Vol.22(4): 12~16
- [46] 周云龙. 应用压差波动测量气液两相流的流型[C]. 见: 第四届全国多相流非牛顿流物理化学非流学术会议论文集. 西安: 中国力学学会. 1993. 130~135
- [47] Wu Haojiang, Zhou Fangde. Intelligent Identification System of Flow Regime of Oil-Gas-Water Multiphase Flow. *Int J Multiphase Flow*, 2001, Vol.27(2): 459~475
- [48] N. D. Jin. Characterization of Oil/Water Two-Phase Flow Patterns Based on Nonlinear Time Series Analysis, *Flow Measurement and Instrumentation*, 2003: 169~175
- [49] 韩捷, 张瑞林. 旋转机械故障机理诊断技术. 北京: 机械工业出版社, 1997. 36~37.
- [50] A. H. Tewfrik. Correlation Structure of The Discrete Wavelet Coefficients of Fractional Brownian Motion. *IEEE Trans On Information Theory*, 1992,

- Vol.38(2): 904~909
- [51] G. Wornell. Estimation of Fractal Signals from Noisy Measurement Using Wavelets IEEE Trans on Signal Processing, 1992, Vol.40(3): 611~623
- [52] K. Kozma, H. Kok, M. Sakurna, et al. Characterization of Two-Phase Flows Using Fractal Analysis of Local Temperature Fluctuations. Int J Multiphase Flow, 1996, Vol.22(5): 953~968
- [53] G. Saether, K. Bendiksen, J. Muller, et al. The Fractal Statistics of Liquid Slug Lengths. Int J Multiphase Flow, 1990, Vol.16(6): 1117~1126
- [54] R. Mosdorf, M. Poiewski, R. Ulbrich. Fractal Analysis in Two-Phase Flow. In: The 2nd International Conference on Heat Transfer and Transport Phenomena in Multiphase Systems. Poland: Kielce, 1999. 18~22.
- [55] 黄海, 黄轶伦, 张卫东. 气固流化床压力脉动信号的相关结构模型与分析. 化工学报, 1999, Vol.50(6): 812~817
- [56] 孙斌, 周云龙, 张玲, 等. 基于小波包分解和 Kohonen 神经网络的气液两相流流型识别方法. 热能动力工程, 2005, Vol.20(1): 48~51
- [57] 周志华, 曹存根. 神经网络及其应用北京: 清华大学出版社, 2004. 1~2
- [58] 王洪元, 史国栋. 人工神经网络技术及其应用. 北京: 中国石化出版社, 2002. 6~10
- [59] 白博峰, 王忠勇, 郭烈锦, 等. 多相流流型识别技术与系统开发. 西安交通大学学报, 2003, Vol.37(3): 306~309.
- [60] 松井剛一. 水平管気液内二相流の压差変動の統計的性質と流動様式 [A]. 日本机械学会論文集, 52-478, B: 854~858
- [61] 郑阿奇, 曹弋. Visual Basic实用教程(第2版). 北京: 电子工业出版社, 2004. 1~313
- [62] 飞思科技产品研发中心. 小波分析理论与 MATLAB7 实现. 北京: 电子工业出版社, 2005. 307~361
- [63] 周竹生, 陈灵君, 张塞民. VB 实现对 MATLAB 程序的调用. 电脑开发与应用. 2004, Vol.17(5): 21~23
- [64] 张学典, 赵学玲, 许家群, 等. Matlab 与 VB、VC 高级语言的接口技术. 沈

阳工业大学学报. 2001, Vol.21(6): 493~496

- [65] 王颖, 胡宗军, 邹介棠, 等. ActiveX:从 Visual Basic 6.0 调用 MATLAB 的实现方法. 机电工程. 1999, (5): 172~17