

· 综述 ·

柴油机燃油系统中气液两相流研究现状 及其流型识别研究探讨^{*}

李孝禄¹ 李娟¹ 李迎¹ 王君¹ 许沧粟²

(1 - 中国计量学院机电工程学院 浙江 杭州 310018 2 - 浙江大学能源工程学系)

摘要: 简要分析了气液两相流在柴油机燃油系统中的产生机理及带来的影响。介绍了柴油机燃油系统内气液两相流的研究现状,重点阐述了两相流中声速的计算、喷油规律的探索等,但现有研究较少对其流型进行识别。对现有的气液两相流流型识别方法进行了深入的分析 and 比较,并就柴油机燃油系统中气液两相流流型识别方法提出了建议,指出柴油机燃油系统中气液两相流流型的识别将会是未来研究的趋势之一。

关键词: 柴油机 燃油系统 气液两相流 流型识别

中图分类号: TM933.3 文献标识码: A 文章编号: 1671-0630(2012)06-0080-07

Research Status of Gas-Liquid Two-Phase Flow in Diesel Fuel System and Discussion on Its Flow Regime Identification

Li Xiaolu¹, Li Juan¹, Li Ying¹, Wang Jun¹, Xu Cangsu²

1 - College of Mechanical and Electrical Engineering, China Jiliang University (Hangzhou, Zhejiang, 310018, China) 2 - Department of Energy Engineering, Zhejiang University

Abstract: The generation mechanism and influence of gas-liquid two-phase flow in Diesel fuel system were briefly analyzed. The research status of gas-liquid two-phase flow of Diesel fuel system was introduced, sound velocity calculation and fuel injection discipline were particularly emphasized. But it was found that few studies were focused on its flow regime identification. Comparison and analysis were carried out on existing methods of flow regime identification, and suggestions were given to identify the flow regime of Diesel fuel system. Finally, this paper points out that the flow regime identification of gas-liquid two-phase flow in Diesel fuel system may be one of the research trends.

Keywords: Diesel engine, Fuel system, Gas-liquid two-phase flow; Flow regime identification

引言

目前被产业化应用的各种动力机械中,柴油机是热效率最高、最节能的机型。柴油机的性能在很大程度上取决于缸内的燃烧。改进燃烧过程的各环节,如

燃油喷射系统、进气系统和燃烧室形状等,都可以改善其性能。其中,燃油喷射系统对柴油机性能的影响较为关键。要改善燃油喷射系统的性能就要对燃油在其中的运动过程有深入的了解。

^{*} 基金项目: 浙江省公益性技术应用研究计划(No. 2011C21060) 和浙江省自然科学基金(No. Y1110666)。

作者简介: 李孝禄(1968 -), 男, 副教授, 主要研究方向为内燃机燃烧与排放控制。

本文主要对柴油机燃油系统中气液两相流的产生机理、影响和气液两相流流型识别方法进行了综述,并提出将现有气液两相流流型识别方法应用到柴油机燃油系统中去的设想。

1 气液两相流在柴油机燃油系统中的形成机理及影响

在柴油机燃油系统每次喷射的后期,柴油机喷油泵回油时,压力会急剧下降。当下降到饱和溶解压力以下时,原本溶解在燃油中的自由气体(如空气)就会有一部分释放出来,并迅速向离散的气核扩散,形成微小的空泡。当压力继续下降到燃油的饱和蒸气压以下时(常温下约为0.001MPa,可近似为零),燃油中的部分轻馏成分开始发生相变,生成的蒸汽也迅速在气核附近聚集,形成小空泡。油路中的燃油就以气液两相流的形态存在,而且气泡中不仅含有与液相同质的蒸汽,也含有与液相不同质的自由气体^[1]。燃油相变需要的时间可达到微秒级(“闪蒸”),而自由气体释放需要的时间比较长。因此,空泡中的气体大部分是燃油蒸汽,只有一小部分是自由气体。出油阀落座,油路中的压力随之升高,当高于饱和蒸气压时,空泡中的蒸汽就会迅速变为液体(接近于“闪蒸”的速度),同时自由气体也会溶解于燃油中。但气体溶解的速度远小于气体释放的速度,当蒸汽全部变为液体后,燃油中仍有一部分自由气体空泡,可以承受一定的高压^[2]。油泵出油阀、高压油管和喷油器内都存在着空泡,燃油以气液两相流的形式在燃油系统中运动^[3~4]。如图1、图2和图3所示,图中的白点为气泡。

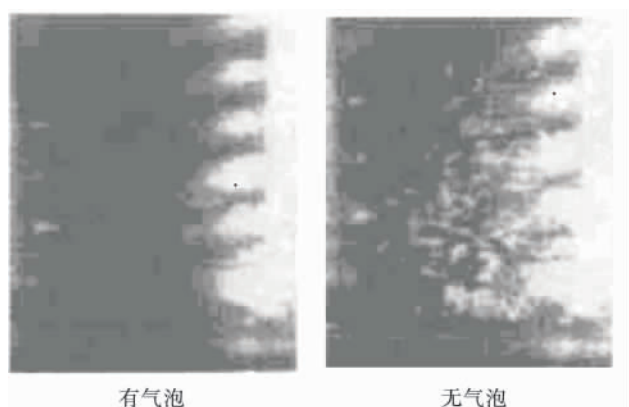


图1 出油阀紧帽腔内产生气泡^[3]

在空泡溃灭的瞬间,空泡周围的液体迅速进入空泡凝失产生的空穴,在此过程中局部压力和温度都急剧升高,据称空泡破裂时的速度高达100米/秒,压力

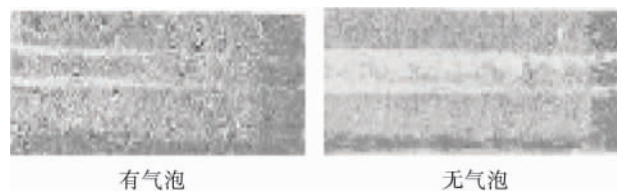


图2 高压油管内产生气泡^[4]

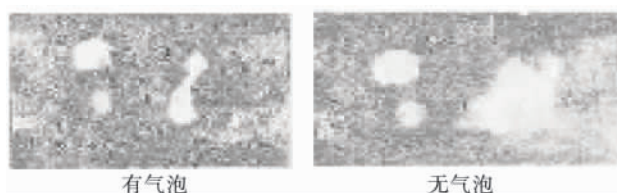


图3 喷油嘴盛油槽内产生气泡^[4]

可以达到104MPa^[5],同时还会有类似“闪电”的现象出现^[6]。“闪电”现象可能是由肉眼几乎看不到的短时间存活气泡造成的^[6],也有可能是由气泡快速崩溃产生光辐射造成的^[7]。国内外很多学者试图通过多泡声致发光^[8]和单泡声致发光^[9~11]来解释这一现象。

对于气泡溃灭过程中产生的“闪电”现象,现有研究还不够深入,目前还没有一致的结论。笔者比较倾向于气泡快速崩溃产生光辐射形成“闪电”现象的解释。Ohan Baghdassarian等人通过对压力范围在1和15 bars之间时,激光致气泡发光特性的研究发现,气泡在快速崩溃时会产生比较微弱的光辐射,光强随压力变化和气泡生长过程而变化,气泡的最大半径取决于气泡从产生到第一个崩溃点的时间, $R_m = 0.55 \sqrt{\frac{p - p_v}{\rho} T_c}$,式中 ρ 是水密度, p 是压力, p_v 是水蒸汽压力^[9]。气泡半径随时间变化如图4所示。

试验发现,光强峰值与气泡的第一次崩溃点有关,光脉冲的宽度是几个纳秒,并随气泡的大小而增加^[9]。压力增加到一定值,气泡在崩溃时会分裂成两个,图5可以观察到两个相隔几十纳秒的光强峰值。

气泡在产生、发展和崩溃的过程中会伴随着复杂的物理、化学现象,表现出强烈的噪声、振动和对流道材料的侵蚀等,这些现象被称为气蚀。当气泡大量产生、气蚀持续发展时,高压油管壁就可能变成蜂窝状或海绵状^[12]。

气穴现象会影响燃油系统内压力波的传播速度(音速),会使针阀产生剧烈的振动,进而引起喷油始点和循环供油量的变化,使喷油规律、喷油压力波产生畸变。这会影响燃油系统的工作稳定性,导致柴油机

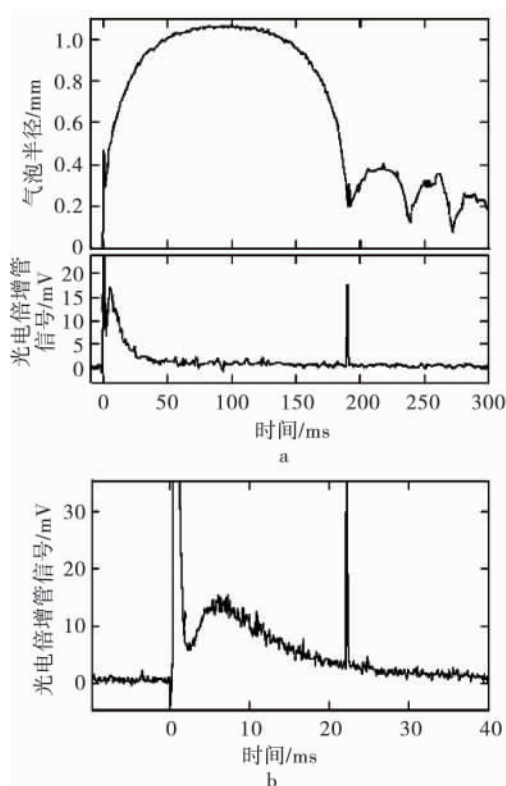


图4 a. 压力为1bar时的气泡半径和光电倍增管输出信号
b. 压力为10.3bars时的光电倍增管输出信号^[9]

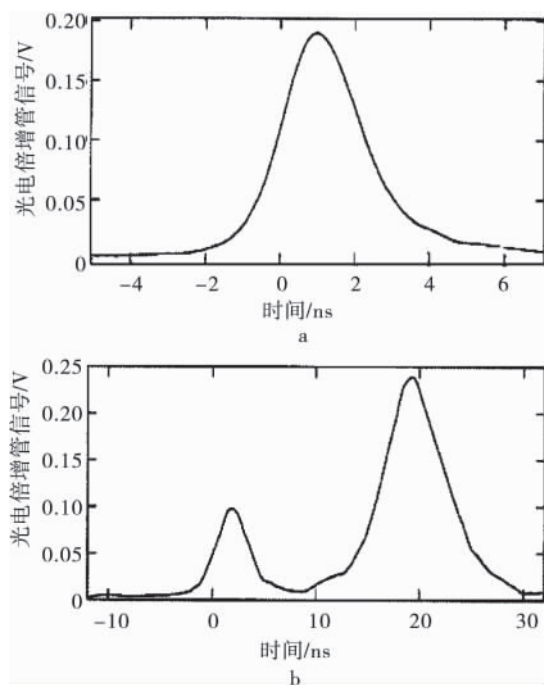


图5 a. 压力为1bar时单脉冲; b. 压力为9bars时双脉冲^[9]

工作不稳定,甚至有可能在高速小负荷时,产生喘振现象。空穴现象不仅能损坏针阀、出油阀、高压油管等零件,而且还影响分析计算的正确性,给柴油机与燃油系统的合理匹配带来很大困难^[4]。

2 柴油机燃油系统内气液两相流研究现状

喷油过程中产生气液两相流在很大程度上制约着柴油机的燃烧过程和性能指标。在理论方面研究喷油过程中气液两相流产生的规律,可以深入阐明其复杂的流体动力现象;在实际应用方面,可以改进现有柴油机性能,研制出高性能柴油机。国内对柴油机燃油系统内气液两相流的研究有一个逐步深入的过程。

2.1 理论研究

2.1.1 利用实测压力对柴油机燃油系统中气液两相流音速值进行估算

高宗英在奥地利格拉兹技术大学进修期间,提出了一种根据实测油管压力计算运转中柴油机喷油过程的新方法。该方法考虑了喷油器各集中容积对压力波反射的影响。计算结果表明,在高速大负荷工况下,无论有无空泡,计算结果都能与测量结果很好的吻合;在低转速与部分负荷工况下,情况比较复杂,还需要更加深入的研究变音速计算^[4]。之后,高宗英等人又引入当量燃油密度的概念,提出了用变音速的方法来处理燃油系统内的气穴现象,进一步充实了计算模型,提高了计算精度^[13]。

2.1.2 利用气泡模型对柴油机燃油系统喷油规律进行模拟计算

一直以来,柴油机燃油系统中气液两相流的计算都存在一个很大的难点,就是空泡的处理。宋军等人分三个阶段对喷油过程进行了深入的研究,对空泡的物理状况进行了比较详细的了解和描述,进而根据实测油管压力和实取二次波声速提出了一种简单、实用的喷油规律计算方法。该方法基本可以实现对柴油机的实时分析^[14]。何勇灵等人根据流体动力学原理,给出了燃油系统中基于气泡溶解和析出物理过程的气泡模型和有效体积弹性模量模型,建立了伴随气泡产生的波动方程,并以此模型为基础进行了计算^[15]。

这些模型虽然克服了以往模型中假设气泡均匀分布的缺点,可以更真实的反映实际过程,更准确预测压力脉动变化,但初始气泡体积、气体析出时间常数和溶解时间常数会影响燃油的弹性模量、密度和气泡析出和溶解的速度,进而影响到模型运行的精度。因此,这些参数的确定还需要做更深入的研究。

2.2 试验研究

在试验研究方面,大多数研究者都借助于高速摄影技术和频谱分析技术对柴油机燃油系统的气液两相

流进行研究。

2.2.1 基于高速摄影法对柴油机喷油系统空泡现象进行研究

早在 1990 年高宗英等人就开始利用高速摄影技术观察柴油机喷油泵出油阀紧帽腔和高压油管内的介质的流动状态了,通过对气泡产生、生长和溃灭过程的分析及对气泡在出油阀紧帽腔和高压油管中分布情况深入研究,了解了气泡形成的内在机理,可以作为研究柴油机高压油管气液两相流必要的试验资料^[16]。1999 年杜慧勇等人在国内首次揭示了柴油机供油系统中存在不同的汽泡类型(长时间存在和短时间存在)找出了汽泡的运动规律和影响因素,并揭示了汽泡对压力波曲线和油管内音速的影响^[17]。

利用高速摄影技术虽然可以把气泡记录下来,但有时与实际情况存在一定的差距。这就需要借助更精确的方法来进行研究。

2.2.2 频谱分析法研究柴油机喷油系统的空泡

柴油机高压油路中气泡的存在可能会导致穴蚀和二次喷射,二者对柴油机性能都有一定的影响,是要尽量防止和避免的。李理光等人首次提出了利用油管内压力波次波的频谱可以简捷、准确、有效的检测出穴蚀和二次喷射^[5]。何勇灵等人通过分析汽泡溃灭引起压力波振荡的频谱结构,揭示了功率谱与汽泡、压力波的关系。为运行中的柴油机提供了一种方法来判断其喷油系统是否存在气泡和大概的气泡量,进而为出油阀弹簧和针阀弹簧及阀体结构的选择提供重要依据^[3]。

虽然针对柴油机燃油系统内气液两相流的研究很

多,但基本都集中在对气泡形成机理、声速计算和喷油规律等方面,很少着眼于流型识别。流型不但影响气液两相流的流动特性、传热和传质性能,而且影响两相流系统运行效率和其可靠性。流型的识别一般包括流型信号的测量、信号特征的描述或提取,以及流型的判断等环节。因此,内燃机界需要把流型识别方法引入到柴油机燃油系统气液两相流的研究中来。

气液两相流动存在于很多行业和领域,如石油、化工、核反应堆等,其流型在很大程度上影响着这些行业的经济效益和安全性,而且工业生产过程优化及工艺改造也要求对流型进行准确的识别。因此,气液两相流流型识别发展很快,已得到了广泛的应用。现对其进行综述和分析,以便借鉴到柴油机气液两相流流型识别的研究中来。

3 气液两相流流型识别研究现状

自 1954 年 Baker 绘制出第一张流型图以来^[18],流型图成了 20 世纪工程中判断流型的主要方法。但流型图只能定性判别,而且普适性不好,其使用范围非常有限。

尽管各国学者在流型转变准则关系式方面做了不少研究工作^[19~21],但由于缺乏对流型转变机理的深入研究,所建立的模型均存在一定误差,而且不同学者得到的转变关系式并不完全一致。这阻碍了流型转变准则在流型识别中的广泛应用。

直接测量法和间接测量法在气液两相流流型识别中运用的比较多,其原理和不足之处如表 1 和表 2 所示。

表 1 直接测量法

方法	原理	不足
目测法	通过透明管段或透明窗口,直接用眼睛判断两相流的流型。	目测法只适用于透明管道中流体流速较低的场合,且观察所得到的结论主观性较强。
高速摄影法	利用高速照相机或摄像机,通过透明管段或透明窗口拍摄流体的流动状态。直接判断或者对图像进行处理再进行流型识别。	两相流相界面复杂,容易产生多重反射和折射,影响成像清晰度。直接判断流型具有较大的主观性。流体压力高时,透明管段要采用蓝宝石、石英玻璃或硼化玻璃等耐高压材料,造价较高。
射线吸收法	射线通过介质时会发生吸收衰减,通过比较接收到的射线量和发射的射线量来判断流型。	很难得到稳定可靠的射线源,材料对射线的吸收比较多,由于射线的辐射性,对射线的防护和放射性物质的保管比较困难。
电导探头测试	管道中流体形态或成份发生变化时,空间介质的介电常数发生变化,传感器不同极板间的电导率随之改变。	目前电导探针传感器还没有比较完整的设计准则,测量的不确定性较大。采集到的电导波动信号会受到各种干扰,将严重影响非线性分析的精度。

表 2 间接测量法

方法		原 理	不 足
过程层析成像	电容层析成像 ^[22]	管道或容器中两种具有不同介电常数的物质组分或分布发生变化时,混合物等价介电常数也会变化,从而使电容值发生变化。	软场特性无法克服、图像重建算法复杂、重建图像质量差和重建图像速度慢等都不适合工业应用。
	电阻层析成像 ^[23]	管道或容器中两种具有不同介电常数的物质组分或分布发生变化时,混合物等价介电常数也会变化,从而使电阻值发生变化。	存在许多困难需要克服,如软场特性、分辨率低、传感器优化设计等。ERT 传感器观测角度少、数据采集速度慢、精度低。
	超声层析成像 ^[24]	假设超声波在物体内部以直线传播,利用发射器与接收器之间的时间延迟或振幅衰减来重建物体内部的声速或吸收特性参数。	超声波在不均匀介质中传播时会产生散射,密度会发生变化,导致测量误差大,而且重建算法的实时性比较差。
截面含气率(空泡份额) ^[25]		不同流型的空隙率波、概率密度函数(PDF)曲线和频谱曲线具有不同的特征,截面含气率越高,空隙率波的频率越趋于单一。	空隙率不易测量
压力波动		两相流流型不同导致两种介质的分布有很大区别。	测得的压力值受外界各种因素影响很大,甚至会使压力信号淹没。
压差波动		压差波动信号在各频率成份信号能量中,包含了丰富的流型信息,某几种频率成份能量的改变即代表了流型的转变。	压差波动信号对传感器的参数和安装位置要求比较严格。

由以上分析可知,利用压差波动信号来识别气液两相流流型具有无可替代的优势,已成为流型识别的一种主要途径,在实验室和工业领域均获得了非常广泛的运用。而且越来越多的方法被运用到压差识别流型中来,其优缺点如表 3 所示。

表 3 压差信号识别流型

数据处理方法	优 点	缺 点
统计分析 ^[26]	统计分析技术可以方便地提取出压差信号的时域统计参数。	统计分析技术不能同时对频域特征进行描述。使识别准确率降低。
混沌分析 ^[27]	混沌分析技术不需要设置很多可调参数或求解复杂方程就可以通过对一个状态变量的动态时间序列重构状态相空间来获得系统的宏观特征。	在关联维数的计算中,对嵌入维数和延迟时间的正确选择是重构相空间的关键,而关联维数和延迟时间的选择需要大量的实验来确定。
傅里叶分析 ^[28]	傅里叶变换是全局变换,可以很好地表征信号的频率特性,而且应用比较简单、方便。	傅里叶变换无法给频率进行时间定位,无法描述信号的时频局域性质,不能很好的表征信号的非平稳性。
小波分析、小波包分解 ^[29-30]	小波分析具有独特的时频分析能力和多分辨分析能力,能同时对信号进行时域和频域的分析,并能以任意的分辨率对信号进行任意细致地观察。	小波变换需要选取小波基和分解层数,而小波基和分解层数是经验值,需要通过大量的实验比较来获得。

续表

数据处理方法	优 点	缺 点
希尔伯特黄变换(经验模态分解) ^[29~30,31]	希尔伯特黄变换(经验模态分解)吸取了小波变换多分辨的优势,同时克服了小波变换中需要选取小波基的困难,在对非线性、非平稳信号进行线性和平稳化处理的过程中保留数据本身的特性,并具有良好的局部适应性。	希尔伯特黄变换(经验模态分解)在处理复杂信号时不够纯粹和彻底,会导致结果不够精确。而且还可能存在边端效应、越界问题和停止准则等问题。
支持向量机 ^[30]	支持向量机(SVM)较好地解决了小样本、非线性和高维模式识别等实际问题,并且具有结构相对简单、收敛速度快等优点。	SVM采用逼近算法去解决凸二次优化的训练问题,会使结果不准确。核函数和模型参数的选择在很大程度上决定着SVM的性能,而目前还不能很准确的找到最优参数。
神经网络 ^[28,32]	神经网络有很强的非线性拟合能力,可以映射任意复杂的非线性关系,有很强的鲁棒性和记忆能力,而且学习规则简单,便于计算机实现。	神经网络的性能在很大程度上取决于其拓扑结构的选择,设计者需要有很丰富的经验才能做出最好的选择。
数据融合 ^[31]	数据融合技术可以从多方面对信号的特征进行把握,可以比较全面的体现信号特征。	数据融合会造成信息冗余,增加分类器的负担,影响识别准确性,应用中需要找到合适的方法来剔除不相关信息。

综合以上研究成果可以看出,目前的气液两相流流型识别研究呈现出方法多样化的趋势,希尔伯特黄变换(HHT)和神经网络凭借其突出优势获得了非常广泛的应用。可以把这种方法引入到柴油机燃油系统中气液两相流流型识别的研究中。

4 流型识别研究探讨

油液在柴油机燃油系统中以气液两相流的形式存在和运动,而且相界面非常复杂。本质上就是气泡在油液中的分布情况是不同的,油液的流型是多种多样的。燃油系统中气泡在产生、发展和崩溃的过程中会伴随着强烈的噪声和振动,不仅会侵蚀管壁,还会影响其中的音速,使喷油规律、喷油压力波产生畸变,进而影响喷油系统的工作稳定性。特别是柴油机燃油系统中使用生物柴油、柴油醇、含水柴油、二甲醚等代用燃料或混合燃料等,相同条件下,一般比柴油更容易产生气液两相流。因此,对燃油系统中气液两相流的流型进行识别就显得很有必要了。而以往对柴油机燃油系统中气液两相流的研究大多集中在对音速、喷油规律的理论研究和气泡产生、溃灭过程的试验研究方面。由于测量技术和计算机技术的限制,对流型识别的研究几乎没有。为填补这一空白,把其他领域的流型识别方法引入到柴油机研究中来很有必要。

在气液两相流流型识别的各种方法中,压差识别法具有无可替代的优势,可以满足快速、准确和易于实

现等要求。燃油系统中气液两相流的压差波动信号与柴油机工作过程相对应,可以进行实时采集,压差识别法在柴油机研究中具有现实意义。

希尔伯特黄变换(HHT)不需要信号的先验知识,而且能很好的显示非线性、非稳态信号的时频信息;Elman神经网络是一种典型的动态神经元网络,它具有动态特性好、逼近速度快、预测准确可靠等特点。对采集到的高压油管中气液两相流的压差数据进行HHT处理,然后对得到的解析信号求取能量特征并进行归一化处理,把得到的结果作为特征参数对神经网络进行训练。训练完成后就可以根据试验得到的压差数据进行流型识别。

随着对柴油机工作效率和性能等研究的不断深入,以及代用燃料和柴油掺混燃料的使用,快速、准确识别流型将是柴油机研究的趋势之一,必然会吸引越来越多研究者的关注。

参考文献

1 Голубков П. Е. 在燃油两相状态下柴油机燃油系统的流动过程[J]. 车用发动机, 1987(4): 34~38

2 高宗英. 柴油机喷油系统的计算研究[J]. 江苏工学院学报, 1983(4): 22~36

3 何勇灵, 刘建新, 赵致和, 等. 一种研究柴油机喷油系统中汽泡的新方法[J]. 内燃机学报, 2000, 18(3): 254~257

- 4 赵致和,刘建新,邓本都,等. 柴油机喷油系统中的空泡及其对发动机性能的影响[J]. 内燃机学报,1992,10(4): 364~370
- 5 李理光,许斯都. 燃油高压喷射中二次喷射及穴蚀的新判据—油管压力波次波的频谱分析[J]. 内燃机学报,1994,12(3): 283~285
- 6 李民. 柴油机供油系统中泵端压力对汽泡消失的影响[J]. 洛阳工学院学报,2000,21(2): 49~53
- 7 吴先梅. 瞬态单一声空化气泡的动力学过程及空化发光[D]. 北京: 中国科学院声学研究所,2003
- 8 Yuri T. Didenko, William B. McNamara III, Kenneth S. Suslick. Effect of noble gases on sonoluminescence temperatures during multibubble cavitation[J]. Physical Review Letters,2000,84(4): 777~780
- 9 Ohan Baghdassarian, Bernd Tabbert, Gary A. Williams. Luminescence characteristics of laser-induced bubbles in water[J]. Physical Review Letters,1999,83(12): 2437~2440
- 10 Mario O. Barbagliaa, Fabia'n J. Bonetto. Dependence on liquid temperature and purity of light emission characteristics in single cavitation bubble luminescence[J]. Journal of Applied Physics,2004,95(4): 1756~1759
- 11 Thomas Kurz, Tobias Wilken, Dennis Kröninger, et al. Transient dynamics of laser-induced bubbles in an ultrasonic field[J]. AIP Conference Proceedings,2008,1022(1): 221~224
- 12 Xavier Escaler, Eduard Egusquiza, Mohamed Farhat, et al. Detection of cavitation in hydraulic turbines[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2006,20(4): 983~1007
- 13 高宗英,张建芳,朱建新. 柴油机喷油系统变声速变密度模拟计算的研究[J]. 内燃机学报,1986,4(2): 150~163
- 14 宋军,申理. 喷油过程计算中空泡模型的新探索[J]. 内燃机学报,1991,9(1): 49~54
- 15 何勇灵,李汝宁. 气泡模型在喷油系统模型仿真中的应用[J]. 航空动力学报,2011,27(3): 142~145
- 16 高宗英,刘胜吉,袁银男,等. 柴油机喷油系统空泡现象的试验研究[J]. 内燃机学报,1990,8(2): 143~148
- 17 杜慧勇,傅茂林,刘建新,等. 柴油机供油系统气泡类型的研究[J]. 内燃机学报,1999,17(4): 339~342
- 18 Baker O. Simultaneous flow of oil and gas[J]. Oil and Gas Journal,1954,53(3): 185~190
- 19 Rin Yun, Yongchan Kim. Flow regimes for horizontal two-phase flow of CO₂ in a heated narrow rectangular channel[J]. International Journal of Multiphase Flow,2004,30: 1259~1270
- 20 Nilava Sen. Modeling in prediction of microgravity two-phase slug-annular flow pattern transition[J]. Acta Astronautica,2011,69: 365~372
- 21 A. A. Donaldson, D. M. Kirpalani, A. Macchi. Curvature induced flow pattern transitions in serpentine mini-channels[J]. International Journal of Multiphase Flow,2011,37: 429~439
- 22 Lifeng Zhang, Huaxiang Wang. Identification of oil-gas two-phase flow pattern based on SVM and electrical capacitance tomography technique[J]. Flow Measurement and Instrumentation,2010,21: 20~24
- 23 Zhenzhen Meng, Zhiyao Huang, Baoliang Wang, et al. Flow-rate measurement of air-water two-phase flow using an electrical resistance tomography sensor and a Venturi meter[C]. IMTC,2009: 118~121
- 24 Xu Lin-an, B. G. Green, M. S. Beck. A pulsed ultrasound cross-correlation system for velocity measurement in two component fluids[J]. Journal of Tianjin University,1986(1): 33~49
- 25 Van Thai Nguyen, Dong Jin Euh, Chul-Hwa Song. An application of the wavelet analysis technique for the objective discrimination of two-phase flow patterns[J]. International Journal of Multiphase Flow,2010,36(9): 755~768
- 26 Xiao Rongge, Kou Jie, Wei Bingqian, et al. Analysis of the PSD and PDF characteristics on typical flow regime of gas-liquid two-phase flow in horizontal pipes[C]. MACE,2011: 5592~5597
- 27 肖楠,金宁德. 基于混沌吸引子形态特性的两相流流型分类方法研究[J]. 物理学报,2007,56(9): 5149~5157
- 28 陈国定,张凤娟,吴昊天. 基于DNA遗传技术的气液两相流型辨识研究[J]. 润滑与密封,2006,177(5): 50~52
- 29 孙斌,王二朋,郑永军,等. 气液两相流波动信号的时频谱分析研究[J]. 物理学报,2011,60(1): 1~8
- 30 Sun Bin, Wang Hong. Identification method of gas-liquid two-phase flow regime based on distance evaluation[C]. ICNC 2010,1266~1270
- 31 Erpeng Wang, Bin Sun, Fei Qian. Design of fuzzy identification system for patterns of gas-liquid two-phase flow on LabVIEW[C]. IEEE Conferences,2009: 1~4
- 32 E. S. Rosa, R. M. Salgado, T. Ohishi, et al. Performance comparison of artificial neural networks and expert systems applied to flow pattern identification in vertical ascendant gas-liquid flows[J]. International Journal of Multiphase Flow,2010,36(9): 739~754

(收稿日期:2012-01-20)