

小管 R134a 两相流压降噪音与流型关系

侯晗威¹, 夏佳俊¹, 熊伟晨¹, 何振辉²

(1. 中山大学 空间技术中心, 中山大学工学院, 广东 珠海 519082;

2. 中山大学 物理科学与工程技术学院, 广东 广州 510275)

摘要: 两相流型的非可视化图形判断有着其应用需求。目前的方法有电容法和压降法, 均在实验室研究阶段。本文以 R134a 为工质, 研究了 2 mm 管径下泵驱回路两相流压降噪音与流型的关系。用高速摄像机观察和记录石英玻璃管中两相流流型、用单片机采样系统对回路测量段进行压降高密度采样(1 kHz)。对各流型下的压降数据作快速傅里叶变换得到其压降频谱图, 分析了压降噪音来源, 并据此在特定条件下对流型进行初步区分。研究表明, 波状流、间歇流、环状流在压降低频噪音及压降直流分量上表现出不同的特性, 就给出相关的无量纲参数区分流型的可行性进行了讨论, 为非可视化的两相流型在线判断提供了依据。但两相流型区分的普适性判断仍有待深入研究。

关键词: 两相流; 流型; 压降; 噪音; 快速傅立叶变换

中图分类号: TK124 文献标识码: A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2016.12.003

引言

两相流散热系统因其利用了汽液相变潜热因而具有较强的散热能力, 在航天和民用热管理领域得到了广泛的应用。两相流流型极大地影响着流动换热效率和流动阻力^[1~2], 流型特征能反映出两相系统的传热传质特性以及运行的稳定性, 因此气液两相流流型的识别不仅在学术研究上具有重要意义, 同时在工业应用上也能够为维持系统稳定运行和提高换热效率等方面提供重要的技术支持。

随着航天技术的发展, 微重力条件下的科学实验等应用越来越多, 应用所采用的原料、工质也越来越广泛, 甚至将来有可能在空间进行生产。目前, 两相流型的判别主要依赖于高速视频图像的识别、电容法、电阻丝阵列法等^[3~11]。这些方法涉及到大信息量的数据处理或高灵敏度的测量仪器, 对于空间

实验和工程要求而言, 其重量、体积和功耗较大。对于管道两相流而言, 无论是实验还是工程监控, DPS (差压传感器) 都被普遍采用于采集摩擦压降的数据, 并且发现两相流的压降数据存在较大的噪音。若能利用压降数据中的噪音, 提取出有关两相流流型信息, 从而加以判别, 则可简化测量装置、降低了所需测量仪器的重量、体积和功耗。其于 DPS 噪音的小波分析进行两相流流型识别已有所报导^[12~19], 但论文作者仅指出了这个可行性, 没有给出具体的识别法则, 其识别效果较为粗糙。本文尝试探究压降频谱低频特征噪音的来源以及其与流型的关系, 为压降噪音用于流型识别提供了理论依据。

1 实验装置

实验回路原理如图 1 所示。本实验采用的工质为 R134a, 从针阀 1 处充入实验回路和储液器(充装前确认排空不可凝气体); 储液器是一个不锈钢的密封容器, 容积约 1 L, 作用是通过加热或冷却储液器控制回路压力从而控制实验工作点温度(饱和温度)。工质在回路中通过齿轮泵(Micropump GAH-T23; 扬程 0.52 MPa)驱动, 通过调节齿轮泵的输入电压电流控制流量大小, 泵两端接差压传感器(东方万和, 量程 15 kPa, $\pm 0.25\%$ FS)测量回路总压降; 齿轮泵出口接科氏力流量计(Bronkhorst, 量程 0.28~8.33 g/s)来读取并记录流量数据; 流量计下游接的分别是预热器和并联蒸发器, 预热器和蒸发器均为紫铜细通道换热器, 通过陶瓷加热片为其提供加热量, 使用万用表(MASTECH)测量陶瓷加热片的输入电压、电流, 得到加热功率。

收稿日期: 2016-01-19; 修订日期: 2016-10-09

基金项目: 光电材料与技术国家重点实验室(中山大学)资助项目

作者简介: 侯晗威(1991-), 男, 湖南郴州人, 中山大学硕士研究生。

通讯作者: 何振辉(1963-), 男, 广东广州人, 中山大学教授。

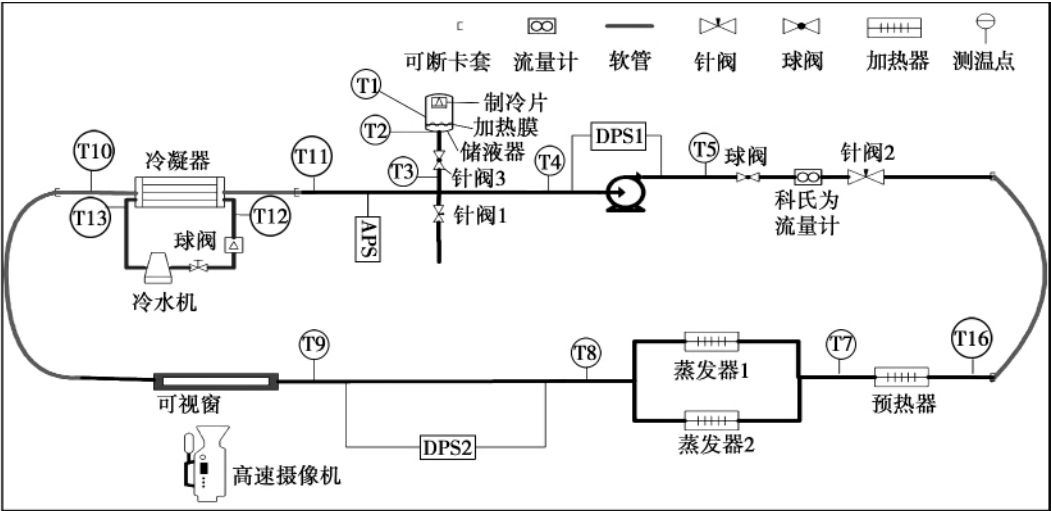


图 1 实验原理图

Fig. 1 Diagram of the experimental setup

预热器作用是将过冷工质加热至接近饱和状态,工质在蒸发器中加热发生相变。蒸发器出口约 40 cm 处为实验的压降测量管段,如表 1 所示,差压传感器通过 2 个三通接入回路测量该段管的压降。压降测量段后约 8 cm 处为实验回路的可视化单元,主体为不锈钢套筒和石英玻璃管,实验过程中,使用 SVSI (高速摄像机) 对该段石英玻璃管内的工质流动状态进行拍摄。工质从视窗出来后在冷凝器内发生冷凝,从两相变为单相,保证了在泵入口工质有一定的过冷度。冷凝器为板式换热器,两相流体与冷水发生热交换。工质从冷凝器出口再到泵入口完成一个循环。实验回路除了观察视窗以外的管道和部件,全部包裹保温棉以达到接近绝热的状态。图中 T1 ~ T13 为热电偶的分布位置。

2 实验结果

2.1 流 型

水平管两相流流型大致可分为泡状流、塞状流、波状流、环状流,每种流型还可进一步细分,但对流型细致的区分没有定量的标准,因此细分流型的命名也并不完全一致。

本实验中出现的主要流型有 SL(塞状流)、SW/SL(类塞状流)、SW(波状流)、A(环状流)、S(分层流)。其中,类塞状流为介于塞状流和波状流之间

的一种流型,在视窗中大部分时间观察到的是波状流,但流动过程中会出现纯液相段,因此可视为两相段较长的塞状流。图 2 列出部分工况的流型图。

表 1 尺寸参数及实验条件

Tab. 1 Parameters and experimental conditions

参数	数值
尺寸	
压降测量段管内径 D_{test}/mm	2
压降测量段管长度 L_{test}/cm	41
差压传感器连接管内径 D_{dps}/mm	1
视窗石英玻璃管内径 D_{glass}/mm	2
视窗观测长度 L_{glass}/cm	10
实验条件	
蒸发器进口过冷度/ $^{\circ}\text{C}$	2
饱和温度/ $^{\circ}\text{C}$	30
环境温度/ $^{\circ}\text{C}$	27
质量通量/ $\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$	72 ~ 481

2.2 压 降

本实验回路中共布置了 2 个差压传感器,其中一个 (DPS1) 测量齿轮泵两端压降,另外一个 (DPS2) 用于压降测量段的压降数据采样。使用 mega16 A/D 对输出电压信号进行采集,采样频率均为 1 000 Hz。记录每个工况的压降数据,对其作快速傅里叶变换分析 (FFT),将压降时域图变为频域图。图 3 为流量 0.5 g/s 蒸发器加热量为 12.2 W

时的压降时域图;图4为流量0.5 g/s不同加热量工况下的压降频域图。

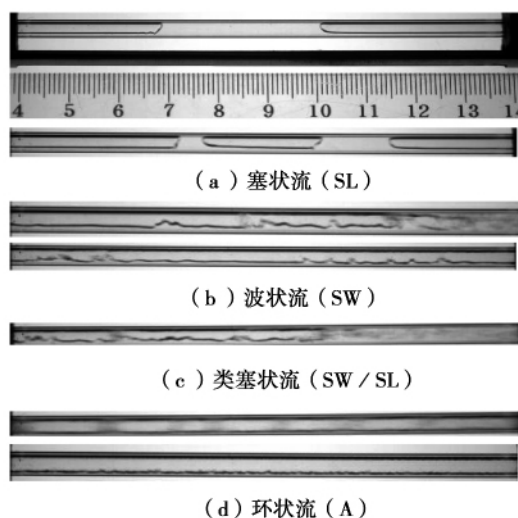


图2 高速摄像机拍摄的流型

Fig. 2 Flow pattern captured by the high-speed camera

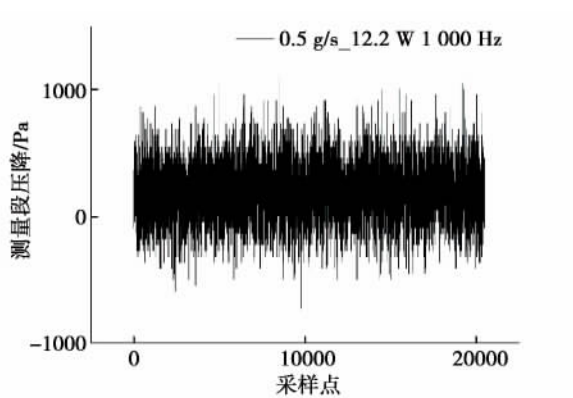


图3 流量0.5 g/s 蒸发器加热量12.2 W 压降时域图

Fig. 3 Pressure drop signal as a function of time with mass flow rate of 0.5 g/s and heat load of 12.2 W

2.3 讨 论

本实验管道为水平管,管道内汽-液两相流的重力压降贡献可忽略,只有摩擦压降和加速压降的贡献。摩擦压降比较稳定,相对于极低频范围内(含直流分量)的压降贡献,加速压降与工质密度和流速的平方成正比,因此,当差压传感器两采样端的

工质密度或流速(密度与流速平方之积)不同时,差压传感器就会探测到非零的加速压降差信号(它叠加在摩擦压降信号之上),这个信号随时变化产生了压降噪音。更深入地,差压传感器采样点的流速对于层流或两相流的塞状流约为工质的宏观流速,因此会表现出相对低频的噪音;但对湍流或两相流中的波状流或环状流,它取决于采样点的工质局域流速,因此会表现出相对高频的噪音。

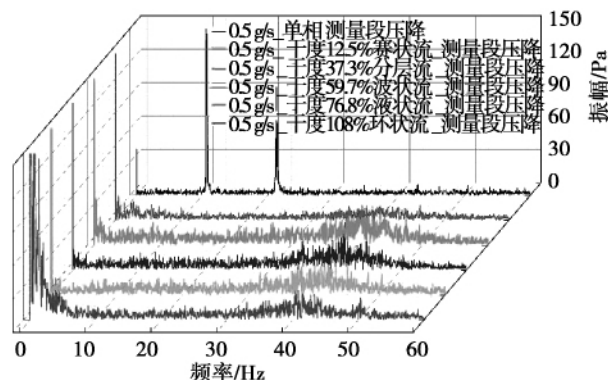


图4 流量0.5 g/s 不同加热量工况压降频域图

Fig. 4 Frequency domain plot of the pressure drop with different heat loads under mass flow rate of 0.5 g/s

对于塞状流,主要通过识别压降频谱中的加速压降部分频率、幅值特征,来确定其流型特征。在压降频域图中,加速压降主要体现在低频段,低频特征噪音的频率反映出流速及气相段和液相段长度,气液相段交替出现频率越高,则低频特征噪音频率越高。伯努利方程加速压降的计算为:

$$|dP| = \left| -\frac{1}{2}\rho_l V_l^2 + \frac{1}{2}\rho_v V_v^2 \right|$$

从该计算式中看到,噪音幅值主要反映出工质的干度和流速,幅值越大,则工质流速越大或气液相段密度相差越大。下面进行塞状流加速压降的粗略计算。

加速压降粗略计算的条件是:(1)塞状流流动较为稳定,气液相流速视为一致;(2)气泡段将其视为全气相,相比实际情况计算得到的加速压降值偏大;(3)由于管径较小,将考虑到毛细力的影响;(4)在计算毛细力的影响时,气液界面弯曲半径取管半径。

毛细力导致的压降(流向为从右向左):

$$\begin{cases} dP = P_{s2} - P_{s1} \\ P_1 = P_g - \frac{\sigma}{r_2} \\ P_1 = P_{s2} \\ P_{s1} = P_g - \frac{\sigma}{r_1} \\ dP = \frac{\sigma}{r_1} - \frac{\sigma}{r_2} \end{cases}$$

式中: r_1 、 r_2 —气液界面曲率半径,m; r_1 、 r_2 均取管半径。 P_{s1} 、 P_{s2} —差压传感器两端毛细管内压力,Pa; P_g 、 P_l —管内气相和液相压力,Pa; σ —工质表面张力,N/m。

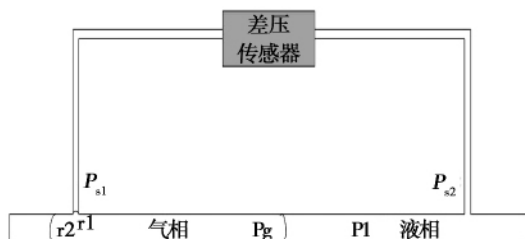


图 5 毛细力对压降的影响计算原理图

Fig. 5 Calculation schematic of the effect of the capillary force on the pressure drop

加速压降计算结果如表 2 所示。

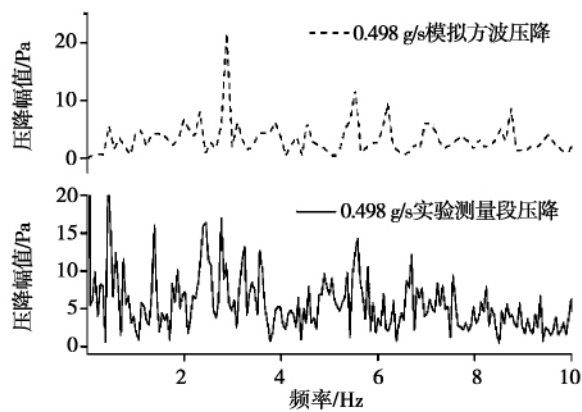
表 2 塞状流加速压降计算结果

Tab. 2 Calculation results of the accelerated pressure drop for the slug flow

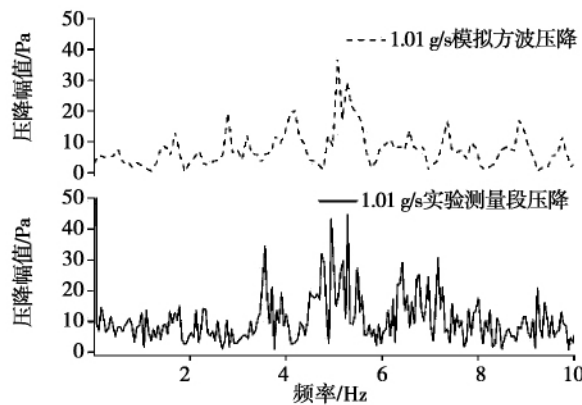
参 数	工况 1	工况 2	工况 3
流量 $m/g \cdot s^{-1}$	0.498	1.01	1.49
干度	0.125	0.042 5	0.049 4
流速 $V_l, V_g / m \cdot s^{-1}$	0.336	0.479	0.800
$-\frac{1}{2}\rho_l V_l^2 + \frac{1}{2}\rho_g V_g^2 + dP / Pa$	-57.496	-124.90	-360.57

注:表 2 中, ρ_l —工质液相密度, ρ_g —工质气相密度, dP —毛细力导致的压力降。

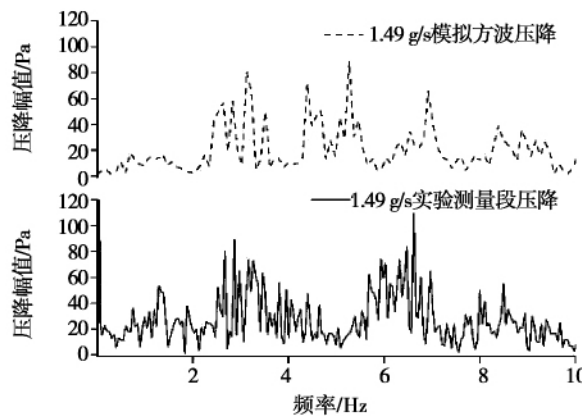
为探究塞状流压降低频噪音的来源,根据高速摄像机拍摄的塞状流流动过程作只与加速压降相关的模拟方波信号图,方波幅值取表 2 中的加速压降计算值,并对其作快速傅里叶变换,对比实验压降采样数据的频谱图,结果如图 6 所示。



(a) 流量为 0.498 g/s 塞状流



(b) 流量为 1.01 g/s 塞状流



(c) 流量为 1.49 g/s 塞状流

图 6 模拟信号频谱对比实验压降频谱

Fig. 6 Comparison of frequency spectrum of analog signal with the experimental pressure drop

结果显示模拟方波信号的频谱特征噪音基本集中在低频段,并且频率与对应工况的实验压降采样频谱的噪音频率较接近。表 3 选取各频谱中的两个最大峰值作为特征噪音,对比模拟信号与实验压降特征噪音的频率和幅值。

据以上分析可作出初步判断:实验压降频谱中的低频噪音来源于差压传感器两探测点工质的流速差异和密度差异,其中流速差异影响较小,因此其密度差带来的压降有效地反映在压降频谱中的低频

段。对于所有工况的压降频谱,携带流型信息的低频段特征噪音将为气液两相流型的在线判别提供有效的数据支持。

表 3 模拟信号与实验压降频谱特征噪音对比

Tab.3 Comparison of the noise frequency spectrum of analog signal with the experimental pressure drop

		0.498 g/s,0.125 干度		1.01 g/s,0.042 5 干度		1.49 g/s,0.049 4 干度	
		模拟信号	实验压降	模拟信号	实验压降	模拟信号	实验压降
特征噪音 1	频率/Hz	2.88	2.76	4.18	3.56	3.12	2.87
	幅值/Pa	21.7	17.0	20.6	34.4	80.8	89.1
特征噪音 2	频率/Hz	5.54	5.58	5.07	5.28	5.27	6.62
	幅值/Pa	11.8	14.2	37.2	44.7	88.7	109.6

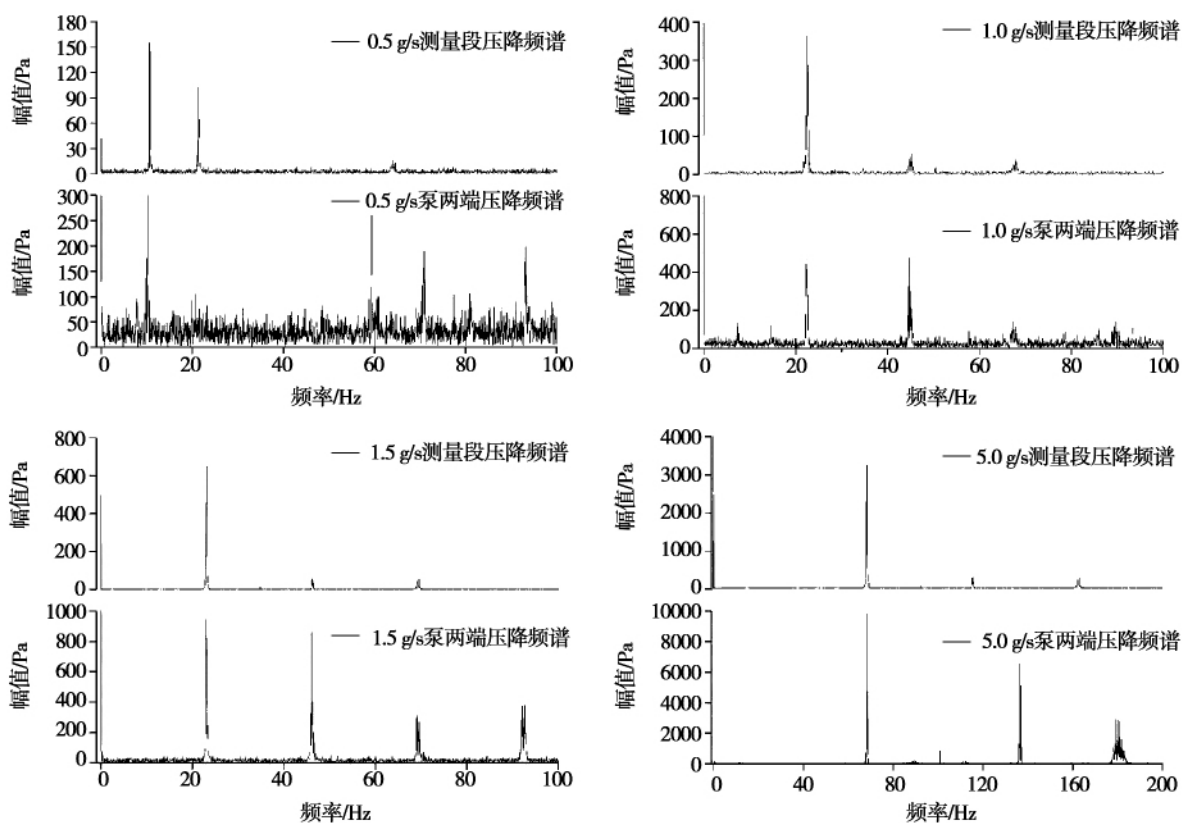


图 7 不同流量单相泵两端压降频谱与测量段两端压降频谱对比

Fig.7 Comparison of frequency spectrum of DPS test with DPS pump under different mass flow rates(single phase)

在对比同一流量(质量流量分别为 0.25、0.5、1.0 和 1.5,以 0.5 g/s 流量的数据为例)的测量段单相压降频谱与两相压降频谱时发现,单相压降频谱中的单一频率较高幅值的特征噪音在两相压降频谱中没有出现,而两相压降频谱相比单相压降频谱

多了一段频率大约为 30 ~ 50 Hz 的特征噪音,幅值相对单相特征噪音较小,成“类正态分布”的波包形式,如图 4 所示。为探究两相压降频谱中波包形式的特征噪音的来源,图 7 对比了各流量下单相过程泵两端压降频谱与测量段两端压降频谱。从频谱的

对比中可以发现,测量段两端压降存在与泵两端压降几乎同频率的倍频特征噪音,但幅值均有一定的衰减。因此,泵两端的压降特征噪音能一定程度地在测量段两端压降中反映出来,单相过程对于该信号的传递保存得相对完好,而两相过程泵两端的压降信号由于汽液界面的反射、散射等作用发生了信号丢失或扭曲的现象,30 ~ 50 Hz 特征噪音仅在流体为两相时出现,不排除上述现象是导致出现该特征噪音的原因。为证实以上推论,设计以水和氮气混合流体为工质,驱动力为气压(非泵驱)的对比实验,部分工况压降频谱如图 8 所示。

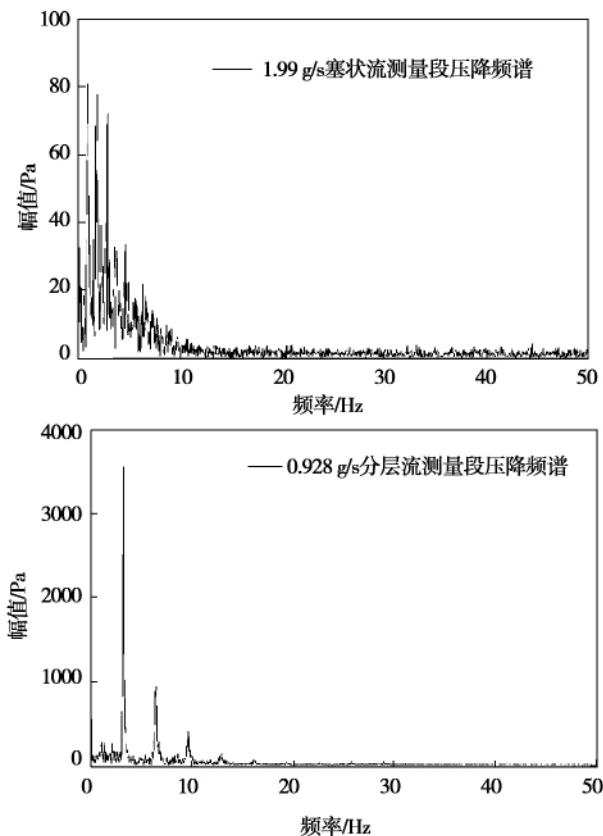


图 8 工质为水、氮气混合流体不同工况压降频域图

Fig. 8 Frequency spectrum of DPS test with different working conditions for water and nitrogen mixture

在该对比实验的压降频谱中只存在低频特征噪音,30 ~ 50 Hz 几乎不存在特征噪音。因此该特征噪音只出现在泵驱蒸发两相回路的实验中,利用该频率段的压降噪音特征来进行气液两相流流型的识别,存在理论上的可能(本文中提到的单相过程和

两相过程均针对于蒸发器至冷凝器之间的管道段,泵进出口均为单相)。

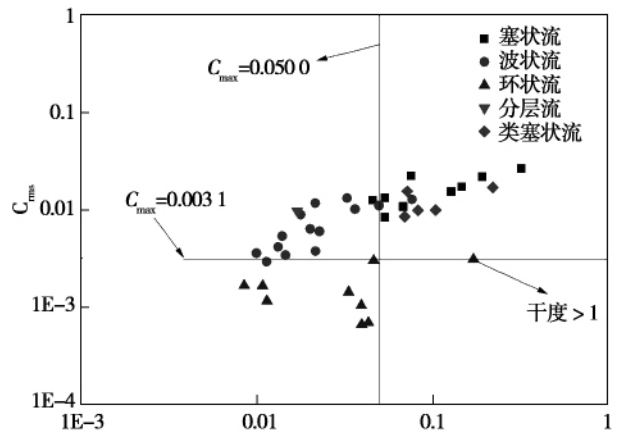


图 9 流型区分图

Fig. 9 Classification of flow pattern based on dimensionless number

为讨论测量段压降频谱特征噪音对于流型识别的可行性,特别是对以上探讨的低频段和 30 ~ 50 Hz 频率段压降特征噪音信息的提取,对测量段压降频谱 30 ~ 50 Hz 频率段幅值作均方根处理得到压降均方根值 Amp_{rms} (Pa),压降频谱低频(0 ~ 10 Hz)幅值最大值为 Amp_{max} (Pa),压降直流分量为 Amp_{dc} (Pa),定义无量纲常数:

$$C_{rms} = \frac{Amp_{rms}}{Amp_{dc}}, C_{max} = \frac{Amp_{max}}{Amp_{dc}}$$

作流型区分图,如图 7 所示。由图中可知,从 C_{max} 尺度上能大致将塞状流和类塞状流与其它流型进行区分;而环状流在 C_{rms} 尺度上有更好的区分度。由于微重力下的两相流型更简单,因而可望能应用于微重力下的两相流型在线辨别。

3 结 论

本文给出了工质 R134a 在泵驱两相回路 2 mm 管径流动沸腾的流型特点以及压降与流型之间的关系,初步分析了压降频谱特征噪音的来源,对压降用于流型识别的可能性作了初步评估分析。结果总结如下:

(1) 压降频谱低频段(0 ~ 10 Hz)特征噪音主要来自加速压降部分,该结论在塞状流流型上有了较

好的验证;

(2) 塞状流流型与其他流型在 $C_{\max}$ 尺度上有较好的区分度; 环状流流型与其他流型在 C_{rms} 尺度上有较好的区分度, 证明压降频谱特征用于两相流流型的识别是可能的, 本文仅提供了一个方向, 要做到流型的在线识别, 尚须大量的实验来提供判别条件。

参考文献:

- [1] OULD DIDI M, KATTAN N, THOME J. Prediction of two-phase pressure gradients of refrigerants in horizontal tubes [J]. Int. J. Refrigeration, 2002, 25 (7): 935 - 947.
- [2] GRECO A, VANOLI G. Experimental two-phase pressure gradients during evaporation of pure and mixed refrigerants in a smooth horizontal tube [J]. Heat. Mass. Trans., 2006, 42 (8): 709 - 725.
- [3] 施丽莲, 蔡晋辉, 周泽魁. 基于图像处理的气液两相流型识别 [J]. 浙江大学学报, 2005, 39 (8): 1128 - 1131.
SHI Li-lian, CAI Jin-hui, ZHOU Ze-kui. Gas-liquid two-phase flow pattern identification based on image processing [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2005, 39 (8): 1128 - 1131.
- [4] GARCIA A, SOLANO J P, VICENTE P G, et al. Flow pattern assessment in tubes with wire coil inserts in laminar and transition regimes [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2007, 28 (3): 516 - 525.
- [5] ZHANG Li-feng, WANG Hua-xiang. 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.
- [6] SCHLEICHER E, AYDIN T B, VIEIRA R E, et al. Refined reconstruction of liquid-gas interface structures for stratified two-phase flow using wire-mesh sensor [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2015, 1: 1 - 10.
- [7] NEMA G, GARIMELLA S, FRONK B M. Flow regime transitions during condensation in microchannels [J]. International journal of refrigeration, 2014, 40: 227 - 240.
- [8] KEEPAIBOON C, WONGWISES S. Two-phase flow patterns and heat transfer characteristics of R134a refrigerant during flow boiling in a single rectangular micro-channel [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2015, 66: 36 - 45.
- [9] FIGUEIREDO M. M. F., GONCALVES J. L., NAKASHIMA A. M. V., et al. The use of an ultrasonic technique and neural networks for identification of the flow pattern and measurement of the gas volume fraction in multiphase flows [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2015, 70: 29 - 50.
- [10] 赵德喜, 曹学文, 张宇航, 等. 基于超声波技术的水平管气液两相流型识别方法 [J]. 油气储运, 2014, 33 (2): 165 - 171.
ZHAO De-xi, CAO Xue-wei, ZHANG Yu-hang, et al. Identification method of gas-liquid two-phase flow pattern of horizontal pipe based on ultrasonic technology [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33 (2): 165 - 171.
- [11] 邵晓寅, 黄志尧, 冀海峰, 等. 基于电容层析成像和模糊模式识别的油气两相流型辨识新方法的研究 [J]. 高校化学工程学报, 2003, 17 (6): 616 - 621.
SHAO Xiao-yin, HUANG Zhi-yao, JI Hai-feng, et al. Study on flow pattern identification of gas-oil two-phase flow based on electrical capacitance tomography and fuzzy pattern recognition [J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2003, 17 (6): 616 - 621.
- [12] 陈万鹏. 两相流流型识别方法研究 [D]. 天津: 天津大学, 2006.
CHEN Wang-peng. Study on the identification method for the two-phase flow pattern [D]. Tianjin: Tianjin University, 2006.
- [13] 周云龙, 王强, 孙斌, 等. 基于希尔伯特-黄变换与 Elman 神经网络的气液两相流型识别方法 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27 (11): 50 - 56.
ZHOU Yun-long, WANG Qiang, SUN Bin, et al. Applied study of hilbert-huang transform and elman neural network on flow regime identification for gas-liquid two-phase flow [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27 (11): 50 - 56.
- [14] 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型识别方法 [J]. 热能动力工程, 2005, 20 (1): 48 - 51.
SUN Bin, ZHOU Yun-long, ZHANG Ling, et al. A Method for identifying gas-liquid two-phase flow patterns on the basis of a wavelet packet decomposition and Kohonen neural network [J]. Journal Of Engineering For Thermal Energy And Power, 2005, 20 (1): 48 - 51.
- [15] 黄竹青. 基于小波分析的垂直上升管气液两相流型的识别 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (1): 26 - 29.
HUANG Zhu-qin. Wavelet analysis of distinguish flow pattern in vertical upward gas-liquid two-phase flow [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (1): 26 - 29.
- [16] 王强, 周云龙, 程思勇, 等. 基于小波 Elman 神经网络的气液两相流型识别方法 [J]. 热能动力工程, 2007, 22 (2): 168 - 172.
WANG Qiang, ZHOU Yun-long, CHENG Si-yong, et al. A method for discriminating gas-liquid two phase flow patterns based on wavelets and Elman neural networks [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2007, 22 (2): 168 - 172.
- [17] 白博峰, 郭烈锦, 陈学俊. 气液两相流型在线智能识别 [J]. 中国电机工程学报, 2001, 21 (7): 46 - 50.
BAI Bo-feng, GUO Lie-jing, CHEN Xue-jun. The technology and theory of online recognition of gas-liquid two-phase flow regime [J]. Proceeding of the CSEE, 2001, 21 (7): 46 - 50.
- [18] 白博峰, 郭烈锦, 赵亮. 汽(气)液两相流型在线识别的研究进展 [J]. 力学进展, 2001, 31 (3): 437 - 446.
BAI Bo-feng, GUO Lie-jing, ZHAO Liang. Development of on-line identification of steam (gas) -liquid two-phase [J]. Advances in Mechanics, 2001, 31 (3): 437 - 446.
- [19] 周云龙, 顾杨杨. 基于独立分量分析和 RBF 神经网络的气液两相流型识别 [J]. 化工学报, 2012, 63 (3): 796 - 799.
ZHOU Yun-long, GU Yang-yang. Flow regime identification of gas/liquid two-phase flow based ICA and RBF neural networks [J]. CIESC Journal, 2012, 63 (3): 796 - 799.

(单丽华 编辑)

小管 R134a 两相流压降噪音与流型关系 = Correlation between the Two-phase Flow Pattern of R134a and the Noise of the Flow Pressure Drop in a Small Tube [刊, 汉] HOU Han-wei, XIA Jia-jun, XIONG Wei-chen (Center for Space Technologies, School of Engineering, Sun Yat-Sen University, Zhuhai, Guangdong, China, Post Code: 519082), HUANG Li-ping (School of Physics and Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou, Guangdong, China, Post Code: 510275), HE Zhen-hui (State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies, Guangzhou, Guangdong, China, Post Code: 510275) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2016, 31(12). - 12 ~ 18

The nonvisual identification of two phase flow patterns is needed in application. At present, electrical capacitance tomography and pressure drop measurement are commonly used techniques in laboratories. In this paper, we presented the relationship of the noise of the two-phase flow pressure drop and the flow pattern of R134a in a tube of 2mm diameter. A high-speed camera was used to observe and record the flow patterns through a quartz-tube window; and a single-chip sampling system was used to record the pressure drop of the test tube with a sampling frequency of 1 kHz. In order to obtain the noise frequency characteristics of the pressure drop, the Fast Fourier Transforms (FFT) was employed to convert the pressure drop data from time-domain to frequency spectra. Then we analyzed the source of pressure drop noise and distinguished a kind of flow pattern from another based on the noise characteristics. It is shown that wave flow, slug flow, and annular flow have different features in the DC component and low frequency noise of the pressure drop. The feasibility of using the dimensionless parameters to identify the flow patterns was discussed and a theory basis for the on-line identification of nonvisual two-phase flow pattern was provided, with the fact that further investigation is warranted to verify its universality. **Key words:** two-phase flow, flow pattern, pressure drop, noise, Fast Fourier Transform

双轴燃气轮机高精度建模方法研究 = Study on High Precision Simulation Model of Biaxial Gas Turbine [刊, 汉] ZHENG Wei-dong, WANG Pei-hong (Key Laboratory of Energy Thermal Conversion and Control of Ministry of Education (Southeast University), Nanjing, Jiangsu, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2016, 31(12). - 19 ~ 24

A high precision simulation model of biaxial gas turbine is developed based on the traditional ones in order to overcome some previous drawbacks. In this modeling process the variations of specific heat capacity of air and fuel gas are taken into consideration. The fact that the components of fuel gas change with different load and the temperature of the turbine blades affects the cooling air significantly is considered. A simplified model of calculating the total work of cooling air is presented to satisfy the need of simulation. The steady simulation results show that the improved simulation model agrees well with the experimental data and is more accurate than previous simulation mod-