

# 航空发动机滑油回油管内的流型识别及含气率预测研究\*

李 澍, 胡剑平, 谭 逸, 朱鹏飞, 吕亚国

(西北工业大学 能源与动力学院, 陕西 西安 710072)

**摘要:** 发动机润滑系统回油管内油气两相介质的流动特性直接影响系统中回油泵及散热器的工作特性。为辨别回油管内油气两相流流型和建立含气率预测关系式, 本文搭建了模拟轴承腔回油管流动的实验系统, 并依据涡轴发动机回油量及油气比完成了700组不同工况的实验测试。实验空气与滑油流量范围分别为10~200 SL/min与6~37 L/min。本文对实验范围内的管内流型进行了判别, 并修正了含气率的预测模型。首先对两种极限工况的压力信号的时序特征、概率密度函数和傅里叶变换进行分析, 判定其流型为分层流和弹状流。将流型结果与Mandhane流型图进行对比, 显示Mandhane流型图并不能准确预测回油管内的油气两相流流型。其次利用含气率经验关系式进行含气率预测, 发现Massena预测模型预测的含气率与实验值更接近, 预测结果更准确。分层流的含气率在50%以下, 而弹状流的含气率在50%以上。最后根据流型对Nicklin经验关系式进行修正, 得到分层流和弹状流对应的分布系数分别为0.848和0.919。

**关键词:** 润滑系统; 回油管; 流型识别; 压力特征; 含气率预测; 分布系数修正

**中图分类号:** V233.4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-4055 (2024) 05-2212036-07

**DOI:** 10.13675/j.cnki.tjjs.2212036

## 1 引言

回油系统作为航空发动机润滑系统的子系统之一, 与供油系统组成一个闭合回路, 保证航空发动机轴承及其附件的润滑。常见的回油故障有以下几点: (1) 回油泵能力不足导致轴承腔内积油。(2) 轴承腔内压力匹配失衡导致滑油泄漏或者无法正常回油。(3) 密封故障造成腔压过高以及回油管内含气率过高造成回油不畅。这些工程问题在分析时并不知道准确的含气率, 导致故障诊断和排除缺少分析依据。此外, 流型也在回油故障分析中占有重要作用。

航空发动机润滑系统中, 滑油经供油系统对轴承进行润滑。在轴承腔中高速旋转轴承的搅拌作用下, 滑油与空气掺混形成油气混合物, 在回油管内形成了油气两相流动。含气率和流型作为油气两相流

最重要的参数和特征, 不同含气率和流型影响润滑系统中回油泵的回油效率以及回油管路散热器的散热特性。因此, 准确地测量含气率并识别相应流型对回油系统的优化有重要作用。

目前学者们对气液两相流的大量研究, 主要集中在两个方面: 流型的识别与含气率特性分析。

关于流型识别方法有三种: 一是通过高速摄像和目测法来观察流动从而直接确定流型, 但是此方法具有主观性, 难以实现对流型的客观识别; 二是建立流型图, 例如Mandhane等<sup>[1]</sup>进行大量实验, 将气相折算速度和液相折算速度作为判断依据, 绘制出相应的水平管气液两相流流型图; 三是测量流动参数, 即采用射线法、探针法等测量流动中的波动信号, 并提取其特征量, 以特征量作为流型识别的依据。白博峰等<sup>[2-3]</sup>采用动态压力测量法, 通过测量压力和压差信号并提取其特征参数, 对流型进行识别。周云

\* 收稿日期: 2022-12-14; 修订日期: 2023-02-24。

基金项目: 国家科技重大专项 (J2019-III-0023-0067)。

作者简介: 李 澍, 硕士生, 研究领域为航空发动机润滑与空气系统流动与换热。

通讯作者: 胡剑平, 博士, 副教授, 研究领域为航空发动机润滑与空气系统流动与换热。E-mail: hujp@nwpu.edu.cn

引用格式: 李 澍, 胡剑平, 谭 逸, 等. 航空发动机滑油回油管内的流型识别及含气率预测研究[J]. 推进技术, 2024, 45(5): 2212036. (LI S, HU J P, TAN Y, et al. Flow pattern recognition and void fraction prediction in lubricating oil recirculating pipe of aeroengine[J]. Journal of Propulsion Technology, 2024, 45(5): 2212036.)

龙等<sup>[4]</sup>通过提取压差信号的概率密度函数特征,发现概率密度函数特征可以作为流型识别的参考依据。孙斌等<sup>[5]</sup>则是通过提取压差信号的功率谱密度函数特征,发现功率谱密度函数特征可以作为流型识别的参考依据。

关于含气率预测模型,国内外学者研究流型之间的转变与含气率特性的关系<sup>[6-9]</sup>。此外,部分学者则利用经验关系式对含气率进行预测。Vijayan 等<sup>[10]</sup>提出了含气率预测表达式的经典分类:滑动比关联式、 $K\alpha_H$ 关联式、漂移通量关联式和一般实验关联式。

目前,油气两相流的研究在石油、化工、水利、航空、航天等领域得到了应用。但是航空发动机润滑系统回油管内油气两相流的研究非常有限。本文开展航空发动机回油管内油气两相流的含气率和流型的研究,为后续回油泵优化设计提供依据。

## 2 实验系统

为研究航空发动机回油系统中回油管路的油气掺混情况,设计并搭建了如图 1 所示的实验系统。该实验系统主要分为油气发生装置、数据采集装置和试验段三部分。油气发生装置包括供油系统、供气系统和油气混合器,试验段分为发展段和测试段。发展段是长 1 m,内径为 21 mm 的水平管,测试段是长为 0.8 m,内径为 21 mm 的水平管。

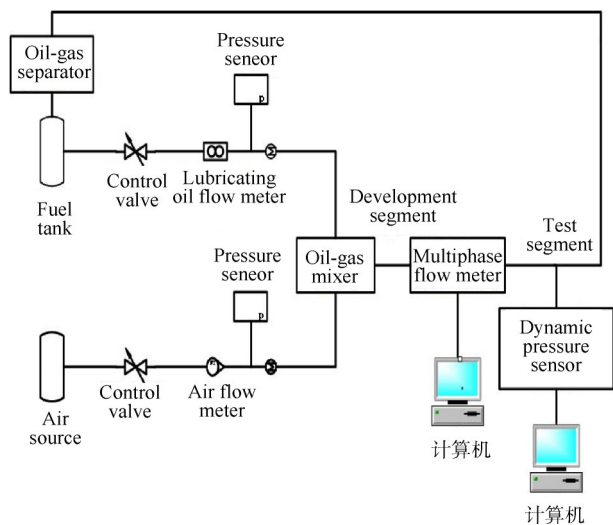


Fig. 1 Experimental system

气源提供压缩空气,空气依次通过调节阀、气体质量流量计、压力传感器,进入到油气混合器。与供油系统提供的滑油在此进行掺混。混合后的油气混合物经过发展段和测试段,在测试段进行数据测量。随后,滑油经过油气分离器后返回油箱,进行循环使

用,空气则排到大气中。

本实验中油气混合器的结构如图 2 所示,混合器包含一个空气进口,空气管伸入混合腔内部,并通过出气孔与腔内连通,64 个直径为 1 mm 的出气孔均匀分布在空气管上;同时设置两个滑油进口保证滑油掺混均匀,滑油与空气在混合腔进行混合,混合之后的油气两相流沿着出口流入发展段。在发展段油气两相流充分发展,保证进入测试段的流态稳定,测试段的流态是否稳定可以通过多相流量计进行监测。当气相和液相流量稳定时,进行实验测量。

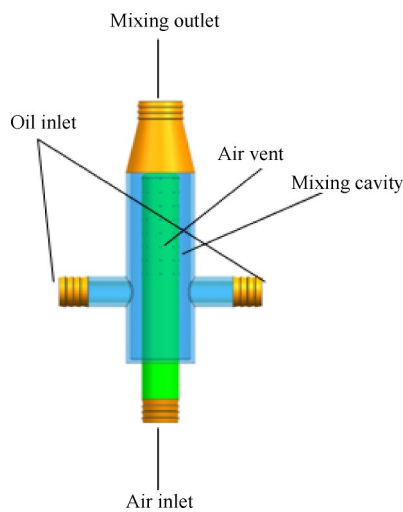


Fig. 2 Oil-gas mixer

航空发动机的滑油循环量大致从 6~130 L/min 不等。常见的涡轴发动机总体循环量约为 17 L/min,大型涡扇发动机滑油循环量约为 45 L/min。为保障回油正常工作,回油级通常为增压级 5~6 倍。对于常见的涡轴和涡扇中大推力发动机,滑油系统循环量在 15~50 L/min,涡桨发动机的循环量要更大。本实验滑油流量在 6~37 L/min,空气流量在 10~200 SL/min。实验中采用动态压力传感器采集管路瞬时压力,并通过多相流量计来测量管路含气率。每个工况的采样时长为 2 min,动态压力传感器设置在测试段,距离多相流量计 0.5 m 处,采样频率为 1000 Hz。

## 3 数据处理及结果分析

### 3.1 压力信号时域特征及流型分析

实验数据在 Mandhane 等<sup>[11]</sup>流型图上分布情况如图 3 所示。

图中坐标的参数定义如下

$$J_g = \frac{V_g}{A} \quad (1)$$

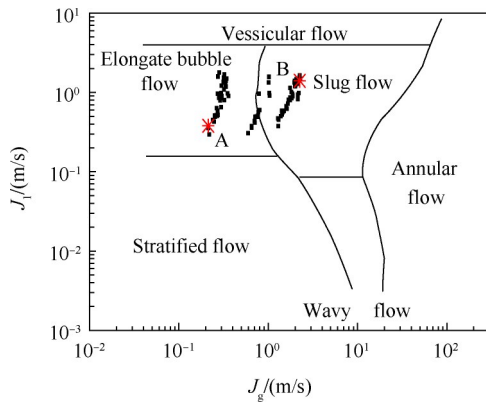


Fig. 3 Distribution of flow patterns in Mandhane flow pattern diagrams

$$J_l = \frac{V_l}{A} \quad (2)$$

式中  $J_g$  为气相折算速度,  $J_l$  为液相折算速度, 单位均为 m/s,  $V_g$  和  $V_l$  分别为气相和液相体积流量, 单位为  $m^3/s$ ,  $A$  为试验段管内径截面积, 单位为  $m^2$ 。

从图 3 可以看出按照 Mandhane 等<sup>[1]</sup>流型图确定实验的流型主要有两种, 分别为塞状流和弹状流。

图 3 中 A, B 工况点为实验工况的边界点, 两工况气相折算速度区别较大。下文选取该两个工况, 并通过压力的动态变化识别工况对应流型。A, B 工况数据如表 1 所示。

Table 1 Experimental data results

Working conditions	Lubricating oil flow/( $sm^3/d$ )	Air flow/( $sm^3/d$ )	Void fraction $\alpha/\%$
A	11.39	7.90	36.49
B	41.87	70.52	63.03

从图 4 中可以看出, 工况 B 的压力时序信号有明显的波峰和波谷, 压力波动范围较大, 且波动的周期性较强。但在波峰附近有明显的小波动, 这是由于流动中存在小气泡。其符合弹状流压力时序信号周期性、压力波动范围大的特征。工况 A 与工况 B 不同, 无明显的波峰和波谷, 周期性不明显, 且压力波动较为密集, 波动范围较小。真实塞状流的压力时序信号有明显的波峰和波谷, 压力波动范围较大。工况 A 的压力时序信号特征不符合塞状流的压力时序信号特征。由此可以看出, 利用 Mandhane 流型图来判断流型的方法并不完全可靠。需要分析压力信号的 PDF 特征, 来进一步确定流型。

### 3.2 压力信号的 PDF 和 FFT

选取图 3 中处于塞状流和弹状流各自中间位置的 6 种工况, 探究其压力信号的概率密度函数曲线与

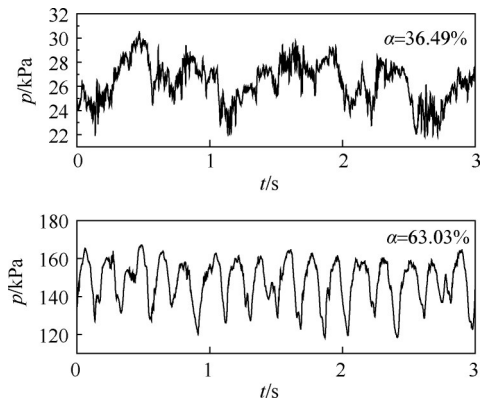


Fig. 4 Pressure timing signal

流型及含气率的关系。

从图 5 中可以看出 6 个工况压力信号的概率密度函数曲线有相同的趋势, 均只有一个峰值, 呈现出明显的尖峰分布, 且压力波动范围小, 为 10~20 kPa, 符合分层流压力波动范围小的压力信号特征。图 6 压力信号的概率密度函数曲线与图 5 有明显的区别, 图 6 的压力信号范围比图 5 大, 为 60~80 kPa。在含气率低于 70% 时, 曲线呈现较宽的双峰分布, 在含气率高于 70% 时, 曲线的双峰分布不明显。两图的共同点是随着含气率的变大, 压力不断变小。说明影响压力波动情况主要是气相来决定的。结合图 4 中压力时序信号的波动情况, 气泡的出现, 会导致压力降低, 因此可以利用压力降低的程度及压力波动情况, 来推测气泡的大小和出现的频率。为确定处于图 3 中塞状流的流型, 对其压力信号进行傅里叶变换。

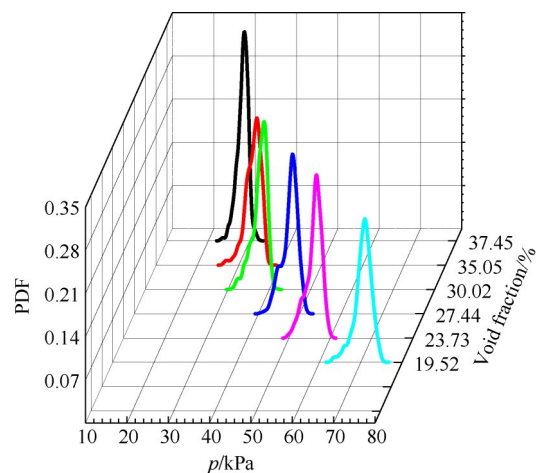


Fig. 5 Pressure PDF of elongate bubble flow in the Fig. 3

图 7(a) 和图 7(b) 的压力信号经 FFT 变换后, 得到幅值的波动情况基本相同, 0~5 Hz 内都出现了两个峰值, 峰值对应的幅值均小于 1, 且大小相等。10 Hz 以后, 幅值基本趋向于 0, 呈现出密集的小波



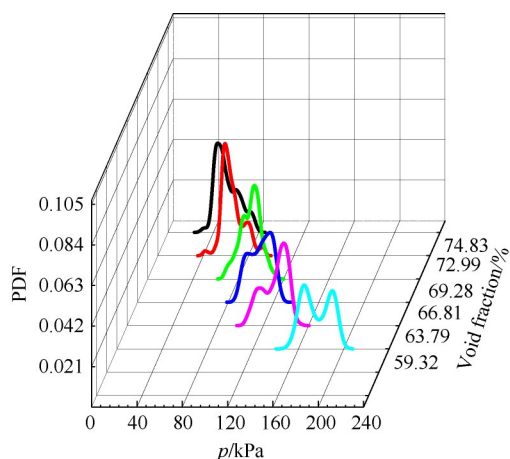
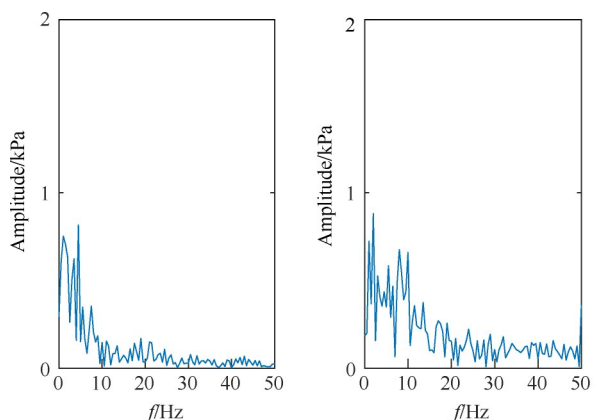


Fig. 6 Pressure PDF of slug flow in the Fig. 3



(a) Pressure FFT of elongate bubble flow in the Fig.3 (b) Pressure FFT of stratified flow from other experiment



(c) Stratified flow pattern graph

Fig. 7 FFT contrast

动。由此可以判定,两种压力信号处于同一种流型。图 7(c)是利用高速摄像机拍摄的分层流,图 7(b)的压力信号在图 7(c)分层流的流动中测得。因此,可以明确图 3 中的塞状流是分层流。通过流型图确定流型的方法不够准确,不能作为流型识别的依据,可以作为一个参考。根据压力信号及其特征来进行流型识别更准确更可靠。

### 4 含气率预测模型

油气两相流的流动情况复杂,主要原因在于两

相之间存在运动的界面,相间会有相对速度,从而导致参数测量难度较大。含气率作为多相流的主要测量参数之一,对弄清多相流的流动具有重要作用。关于含气率的研究,有许多学者提出了各种含气率理论预测模型,模型根据气相和液相的密度、折算速度和质量含气率来进行含气率预测。

#### 4.1 预测模型分析

学者对含气率预测模型进行了大量研究,有不同的分类方式,本文采用 Vijayan 等<sup>[10]</sup>对含气率模型的划分方法。主要分为四类:滑动比关联式、 $K\alpha_H$  关联式、漂移通量关联式和一般实验关联式。在四类预测模型中,各选取一个最为常用的模型来进行预测。选取模型如表 2 所示。

Table 2 Void fraction prediction model

Author	Void fraction correlation
Spedding and Chen <sup>[11]</sup>	$\alpha = [1 + 2.22(\frac{1-x}{x})^{0.65}(\frac{\rho_l}{\rho_g})^{0.65}]^{-1}$
Massena <sup>[12]</sup>	$\alpha = [0.833 + 0.165x] \alpha_H$
Nicklin <sup>[13]</sup>	$\alpha = \frac{J_g}{C_0 J_m + 0.35 \sqrt{gD}}$
Huq and Loth <sup>[14]</sup>	$\alpha = 1 - 2(1-x)^2(1-2x + [1 + 4x(1-x)(\frac{\rho_l}{\rho_g} - 1)]^{0.5})^{-1}$

表 2 式中  $x$  为质量含气率(即干度), $\rho_g, \rho_l$  为气相和液相的密度。 $J_g$  为气相折算速度, $J_m$  为气相折算速度和液相折算速度的和。 $D$  为管道内径, $g$  为重力加速度, $g=9.8 \text{ m/s}^2$ 。

模型预测所需数据主要有气相折算速度、液相折算速度、干度以及各相的密度等。

#### 4.2 实验数据和预测模型

图 8 为多相流量计测得数据,本次实验共 700 组工况,滑油流量为  $8 \sim 56 \text{ sm}^3/\text{d}$ ,空气流量为  $8 \sim 180 \text{ sm}^3/\text{d}$ 。含气率为  $11.76\% \sim 77.35\%$ 。

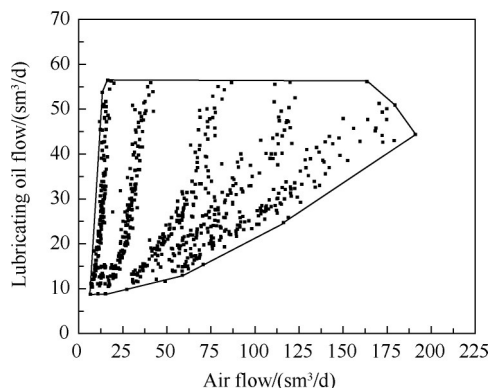


Fig. 8 Data results of multiphase flow meter measurement

图9为实验测得含气率和预测模型预测含气率的对比。从图9中可以看出,Massena预测模型较为接近,Spedding and Chen模型和Nicklin模型的预测结果偏低,与之相反,Huq and Loth模型的预测结果偏大。预测模型的预测能力可以利用绝对误差和均方误差来进行评估。绝对误差可以看出误差的波动情况及误差的最值。均方误差可以评价数据的变化程度,均方误差越小,说明预测模型描述实验数据具有更好的精确度。

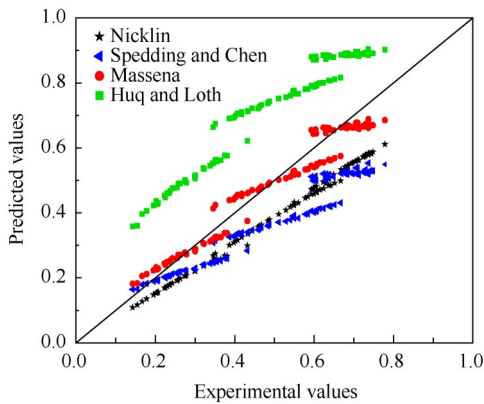


Fig. 9 Predict results of void fraction

图10为100组实验数据的含气率预测值与实验值绝对误差的波动曲线。从图10中可以看出,Massena模型绝对误差大部分在5%以内,小部分在5%~10%,且Massena模型绝对误差波动比其他预测模型小。Nicklin模型绝对误差在10%~20%,Spedding and Chen模型绝对误差大部分在20%以下,小部分在20%以上,Huq and Loth模型绝对误差大部分在20%左右。

四个预测模型的均方误差如下:Spedding and Chen模型均方误差为0.018 530,Massena模型均方误差为0.001 753,Nicklin模型均方误差为0.013 449,

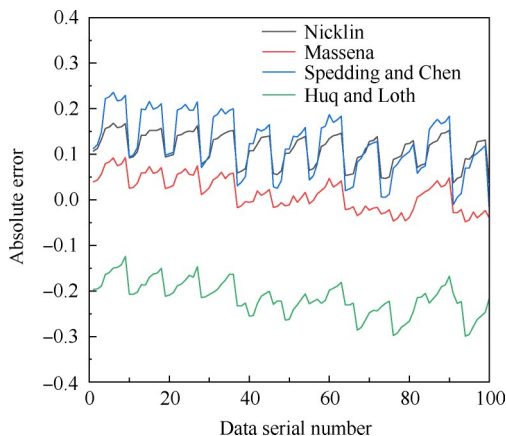


Fig. 10 Absolute error of predictive models of void fraction

Huq and Loth模型均方误差为0.049 774。Massena模型均方误差最小,说明其预测结果更精确。Huq and Loth模型的均方误差最大,预测结果最不理想。

四种类型的四个模型中, $K\alpha_H$ 关联式中的Massena模型预测结果较为准确,与实验值最接近,可以更好地预测含气率。

### 4.3 修正模型选择

滑动比关联式的一般形式为干度分数和干度之间比值、气液密度之比以及气液动力粘度之比的函数。Spedding and Chen预测模型是通过理论推导分层流和环状流两相界面的力平衡方程得到的关系式。与本文所得到分层流和弹状流不符,因此选择其修正会对弹状流时的含气率预测造成一定误差。

$K\alpha_H$ 关联式是无滑动或均匀含气率 $\alpha_H$ 的常数或某个函数倍数。 $\alpha_H$ 的一般表达式为

$$\alpha_H = [1 + (\frac{1-x}{x})(\frac{\rho_g}{\rho_l})]^{-1} \quad (3)$$

$\alpha_H$ 模型的滑移率为1,表示气液速度相等,为均匀混合流动。Massena预测模型原理是根据均匀混合流动来预测含气率,在不分流型的情况下预测较为准确,无法分不同的流型来进行预测。

漂移通量关系式由分布参数 $C_0$ 表示流动中的非均匀性,漂移速度来表示液相和气相的速度差。Nicklin预测模型中分布参数 $C_0$ 和流型有关,不同的流型其 $C_0$ 的值不同。因此,可以按照流型来对预测模型进行修正。此外,漂移通量预测模型较为先进,应用广泛。

一般实验关联式主要是经验性的,Huq and Loth预测模型通过理论推导建立截面含气率和截面气体质量流量分数之间的关系,通过数据库对关系式进行验证,并未考虑流型的影响。

综合以上分析,选取Nicklin预测模型根据分层流和弹状流对 $C_0$ 进行修正。

### 4.4 Nicklin预测模型修正

漂移通量模型是由分布参数 $C_0$ 和漂移速度及折算速度等构成。经学者对分布参数 $C_0$ 的研究发现, $C_0$ 的值与流量分布和浓度分布有关,还与管道的截面形状有关。在环状流时,即壁面体积浓度小于中心处体积浓度, $C_0$ 的值为1~1.5。当壁面体积浓度大于中心处体积浓度时, $C_0$ 的值小于1<sup>[15]</sup>。

Nicklin<sup>[13]</sup>预测模型中分布参数为定值1.2, $C_0$ 的值源于湍流中最大流速与平均流速的比值,并没有考虑浓度分布的影响。因此,对Nicklin模型中的分布系数 $C_0$ 进行修正。找到分层流和弹状流所对应的分布系数 $C_0$ 。

$$C_0 = \frac{J_g - 0.35\sqrt{gD}}{J_m} \quad (4)$$

修正采用的方法为:利用上述公式,计算出 $C_0$ 值,取其均值,得到新的 $C_0$ ,用未参与求均值的数据再进行验证。

通过计算可知,得到的 $C_0$ 全部都小于1。分层流的 $C_0$ 比弹状流的 $C_0$ 小,分层流的 $C_0$ 在0.753~0.901,弹状流的 $C_0$ 在0.887~0.941。对分层流和弹状流的 $C_0$ 取均值,分别为0.848和0.919。用修正后的Nicklin预测模型分别预测分层流和弹状流的含气率。

从图11中可以看出,分层流的含气率预测值和实验值均在50%以下,其预测的绝对误差在2%以内,均方误差为 $3.02 \times 10^{-4}$ 。弹状流的含气率在50%以上,其预测的误差也在2%以内,均方误差为 $7.7 \times 10^{-5}$ 。修正后的Nicklin模型预测的结果绝对误差更小,均方误差更小。说明修正后的Nicklin预测模型对于含气率的预测更加准确。因此,采用修正后的Nicklin预测模型可以较好地预测在分层流和弹状流的含气率。

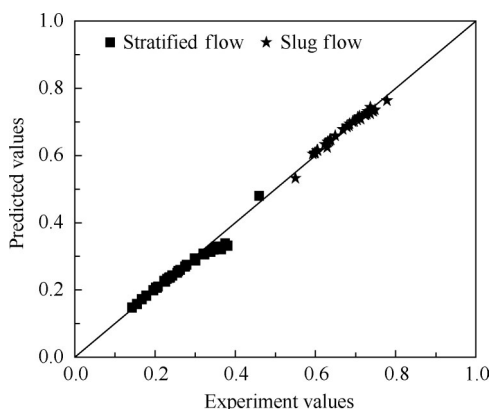


Fig. 11 Comparison of different flow pattern after corrections

## 5 结论

本文通过研究,得到如下结论:

(1)根据Mandhane流型图来确定流型的方法不能准确识别发动机润滑系统回油管的流型,需要结合压力信号的时序特征、概率密度函数和傅里叶变换等来进行流型识别。

(2)本实验得到流型主要有两种:分层流和弹状流。分层流的含气率在50%以下,而弹状流的含气率在50%以上。含气率与流型有着十分密切的联系。

(3)本文对四种含气率预测模型进行验证,发现 $K\alpha_H$ 关联式中的Massena预测模型预测的含气率与实验值更接近,预测结果更准确。其他三种预测模型的预测结果误差较大。

(4)本文对漂移通量结构中的Nicklin预测模型的分布系数 $C_0$ 进行修正,修正后的Nicklin预测模型可以较准确地预测分层流和弹状流两种流型的含气率。预测分层流时,分布系数 $C_0=0.848$ ;预测弹状流时,分布系数 $C_0=0.919$ 。

致谢:感谢国家科技重大专项的资助。

## 参考文献

- [1] MANDHANE J M, GREGORY G A, AZIZ K. A flow pattern map for gas-liquid flow in horizontal pipes [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1974, 1(4): 537-553.
- [2] 白博峰,张少军,赵亮,等.多相流流型在线识别理论研究[J].*中国科学: E辑*, 2009, 39(4): 655-655.
- [3] 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[J].*化工学报*, 1999, 50(6): 799-805.
- [4] 周云龙,孙斌,李雅侠.气液两相流流型压差波动的PDF特征[J].*仪器仪表学报*, 2003, 24(S4): 432-433.
- [5] 孙斌,周云龙,陆军.水平管气液两相流流型压差波动的PSD特征[J].*仪器仪表学报*, 2003, 24(S4): 387-388.
- [6] BARNEA D, LUNINSKI Y, TAITEL Y. Flow pattern in horizontal and vertical two phase flow in small diameter pipes [J]. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1983, 61(5): 617-620.
- [7] 刘洁净.水平管内油气两相流流型及流型转换的实验和理论研究[D].上海:上海交通大学,2010.
- [8] BHAGWAT S M, GHAJAR A J. Similarities and differences in the flow patterns and void fraction in vertical upward and downward two phase flow [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2012, 39: 213-227.
- [9] ZHAO Y, BI Q C, HU R C. Recognition and measurement in the flow pattern and void fraction of gas-liquid two phase flow in vertical upward pipes using the gamma densitometer [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 60(1-2): 398-410.
- [10] VIJAYAN P K, PATIL A P, PILKHWAL D S, et al. An assessment of pressure drop and void fraction correlations with data from two-phase natural circulation loops [J]. *Heat and Mass Transfer*, 2000, 36(6): 541-548.
- [11] SPEDDING P L, CHEN J J J. Holdup in two phase flow [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1984, 10(3): 307-339.

- [12] MASSENA W A. Steam-water pressure drop and critical discharge flow a digital computer program[R]. NSA-15-008949, 1960.
- [13] NICKLIN D J. Two-phase flow in vertical tubes [J]. Transactions of the Institution of Chemical Engineers, 1962, 40(1): 61-68.
- [14] HUQ R, LOTH J L. Analytical two phase flow void prediction method [J]. Journal of Thermophysics & Heat Transfer, 1992, 6(1): 139-144.
- [15] ZUBER N. Average volumetric concentration in two-phase flow systems[J]. Journal of Heat Transfer-Transactions of the ASME, 1965, 87(4): 453-468.

(编辑:梅 瑛)

## Flow pattern recognition and void fraction prediction in lubricating oil recirculating pipe of aeroengine

LI Shu, HU Jianping, TAN Yi, ZHU Pengfei, LYU Yaguo

(College of Energy and Power, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** The flow characteristics of oil-gas in oil recirculating pipe of engine lubrication system directly affect the working characteristics of oil return pump and radiator. In order to identify the two-phase flow pattern of oil and gas in the return pipeline and establish the relationship between gas content prediction, an experimental system is built to simulate the oil recirculating pipe flow in bearing chamber. According to the oil return amount and oil-gas ratio of the turboshaft engine, 700 sets of different experiments are completed. The experimental air flow and lubricating oil flow ranges were 10~200 SL/min and 6~37 L/min, respectively. The flow patterns inside the recirculating pipe within the experimental range are discriminated. And the prediction model of void fraction is established. Firstly, the time series characteristics, probability density function and Fourier transform of the pressure signals under two extreme conditions are analyzed. And the flow patterns are determined to be stratified flow and slug flow. Comparing the flow pattern results with the Mandhane flow pattern diagram, it shows that the Mandhane flow pattern diagram cannot accurately predict the oil-gas two-phase flow pattern in the recirculating pipe. Secondly, the empirical relationship of void fraction is used to predict the void fraction. It is found that the void fraction predicted by the Massena prediction model is closer to the experimental value and the prediction result is more accurate. The void fraction of stratified flow is less than 50%, the void fraction of slug flow is more than 50%. Finally, the Nicklin empirical correlation is modified according to the flow pattern. And the distribution coefficients of stratified flow and slug flow are 0.848 and 0.919, respectively.

**Key words:** Lubrication system; Recirculating pipe; Flow pattern recognition; Pressure characteristics; Void fraction prediction; Distribution coefficient correction

Received:2022-12-14; Revised:2023-02-24.

DOI:10.13675/j.cnki.tjjs.2212036

Foundation item: National Science and Technology Major Project of China (J2019-III-0023-0067).

Corresponding author: HU Jianping, E-mail: hujp@nwpu.edu.cn