

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2026.04.10

基于电容层析成像的航空发动机油气两相流测试设计及研究

张龙赐^{1,2,3#*}, 曹西征^{4#}, 雷敦财⁴, 龚轩^{1,2,3}, 何宇⁴

(1. 中国电子科技集团公司 第四十八研究所, 湖南 长沙 410111; 2. 高性能智能传感器及检测系统湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410111; 3. 薄膜传感技术湖南省国防科技重点实验室, 湖南 长沙 410111; 4. 中国航发湖南动力机械研究所 机械系统研究部, 湖南 株洲 412000)

摘要: 针对航空发动机润滑系统回油管路内油气两相参数测量难题, 研发基于电容层析成像的航空发动机油气两相流测试系统。采用电容层析成像技术实现截面相含率测量, 通过整流器实现流型规整, 提高测量精度, 利用文丘里技术进行总流量测量, 最终实现气液两相流量测量。基于现场试验台架搭建油气两相流标定校准装置, 对基于电容层析成像的航空发动机油气两相流测试系统进行性能验证, 结果表明: 6种实验工况下, 液相流量最大测量误差为7.26%FS, 气相流量最大测量误差为6.56%FS。该系统能够有效满足现场测试要求, 为航空发动机润滑系统设计优化提供重要技术支撑。

关键词: 流量测量; 电容层析成像; 航空发动机; 润滑系统; 回油管路; 文丘里效应; 整流器; 校准装置
中图分类号: TB9; TP212; V233.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5795 (2026) 04-0138-10

Design and research of aeroengine oil-gas two-phase flow testing based on electrical capacitance tomography

ZHANG Longci^{1,2,3#*}, CAO Xizheng^{4#}, LEI Duncai⁴, GONG Xuan^{1,2,3}, HE Yu⁴

(1. The 48th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Changsha 410111, China;
2. The High Performance Intelligent Sensor and Testing System in the Key Laboratory of Hunan Province, Changsha 410111, China;
3. The Defense Key Laboratory for Thin-Film Sensing Technology in Hunan Province, Changsha 410111, China;
4. Mechanical Systems Research Department, AECC Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou 412000, China)

Abstract: To address the challenging measurement of oil-gas two-phase parameters in the return oil pipeline of an aeroengine lubrication system, a testing system for oil-gas two-phase flow of aeroengines based on electrical capacitance tomography has been developed. The cross-sectional phase fraction measurement is achieved using electrical capacitance tomography technology, and the flow pattern is regularized through a rectifier to enhance measurement accuracy, at the same time, the Venturi technology is utilized to achieve total flow measurement, ultimately leading to the measurement of gas-liquid two-phase flow. A calibration device for oil-gas two-phase measurement has been set up based on the field test bench for comparative testing of the measurement system. The results indicate that the maximum measurement error for

收稿日期: 2026-05-22; 修回日期: 2026-06-22; 录用日期: 2026-06-29; 发表日期: 2026-08-28

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目(U21B2011)

引用格式: 张龙赐, 曹西征, 雷敦财, 等. 基于电容层析成像的航空发动机油气两相流测试设计及研究[J]. 计测技术, 2026, 46(4): 138-147.

Citation: Zhang Longci, Cao Xizheng, LeiDuncai, et al. Design and research of aeroengine oil-gas two-phase flow testing based on electrical capacitance tomography[J]. Metrology & Measurement Technology, 2026, 46(4): 138-147.



liquid phase flow rate is 7.26 %FS, and the maximum measurement error for gas phase flow rate is 6.56 %FS under six experimental conditions. The research presented in this paper plays a crucial supporting role in the design of lubrication systems in the aeroengine field.

Key words: flow measurement; capacitance tomography; aeroengine; lubrication system; return oil pipeline; Venturi effect; rectifier; calibration device

0 引言

航空发动机润滑系统内, 润滑油完成轴承润滑和冷却后便进入轴承腔, 由于轴承高速旋转, 润滑油被雾化成微小颗粒, 与空气相互作用, 在轴承腔内形成复杂的油气两相流, 在齿轮泵带动下, 润滑油从回油口流出轴承腔进入回油管路回收至润滑油箱, 进入下一个润滑冷却工作循环^[1-5]。回油管路中存在复杂多变的润滑油-空气两相混合流动, 不同含气率影响润滑系统中齿轮泵的回油效率及散热器的散热特性, 准确测量油气两相流量对航空发动机回油系统设计优化具有重要意义。

气液两相流广泛存在于石油化工、航空航天、核反应堆等领域中, 流动特性的在线监测和关键参数的精确测量能够及时反映设备运行状态、系统性能。图像重建可以反映流体流型、相含率等流动参数, 辅助完成两相流量测量, 广大学者在两相流成像方面进行了深入研究, 诞生了X射线层析成像、超声层析成像(Ultrasonic Tomography, UT)、电阻层析成像(Electrical Resistance Tomography, ERT)、电容层析成像(Electrical Capacitance Tomography, ECT)、微波层析成像(Microwave Tomography, MWT)等断层扫描技术。其中, ECT技术因具有非接触式测量、无辐射、快速响应、对多种物质敏感等优点得到广泛应用^[6-8]。ECT技术的原理: 在测量管道外壁布置阵列电极, 任两个电极构成一个电容传感器, 当多种不同介电常数的物质流动时, 通过电极对进行电容测量, 结合图像重建算法实现管道内流动场景的二维呈现。美国Tech4 imaging公司推出电容体积层析成像技术(Electrical Capacitance Volume Tomography, ECVT), 通过沿管道轴向布置多圈电极实现三维成像。与ECT不同, ECVT将轴向电场变化也视为测量单元

而非噪声源。应用ECVT时, 不要求电极对称分布, 电极对的位置能够以任意形状排列, 但多层电极之间的跨层电容信号极其微弱, 对测量系统提出极高要求^[9]。

流量是航空发动机整机试验中的关键参数, 研究人员针对气体、液体流量测试方法开展了大量探索^[10]。气液两相流测量领域, 李澍等人通过压力信号分析实现流型识别, 利用含气率经验关系式进行含气率预测^[11]; 刘晨昊等人设计了一种高温ECT传感器, 并建立了基于主成分回归的回油管路内的油气空隙率模型^[12]; 赵愉等人采用电阻抗断层成像(Electrical Impedance Tomography, EIT)技术, 通过修正灵敏度系数矩阵和测量电压值权重系数处理方法, 提高聚类算法精度^[13]。固液两相流测量领域, 杨昊等人提出了基于ECT的滑油磨粒在线检测方法^[14]; 刘建英等人设计了ECT检测系统, 用于润滑系统管路内滑油与固体颗粒两相流特性分析^[15]。

现有研究表明: 将ECT应用于航空领域多相流测量已成为重要发展趋势, 但目前仍然缺乏涵盖设计分析、仿真验证、现场试验全流程的基于ECT的航空领域油气两相流测量技术研究。针对此问题, 本文开展航空发动机润滑系统回油管路内油气两相参数测量技术系统性研究, 基于ECT原理实现回油管路截面相含率测量, 采用整流器将流型规整为统一的环状流, 提高测量精度, 设计异型文丘里装置用于总流量测量, 最终实现航空发动机润滑系统回油管路内油气两相流量测量。搭建油气两相流标定校准装置开展实验, 验证本文提出的基于ECT的航空发动机油气两相流测试技术的应用效果。

1 系统组成及原理

油气两相流测试系统主要由整流器、ECT单

元、文丘里流量计、主控模块以及温度传感器、压力传感器等组成,如图1所示。

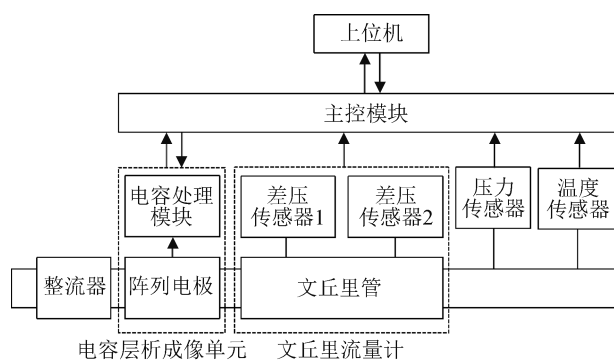


图1 测试系统组成图

Fig.1 Diagram of the composition of the testing system

整流器将流体规整为便于测量的流型,以提高测量精度。文丘里流量计实现对流体总流量测量,其中,差压传感器为流量计的一部分。ECT单元实现流体截面相含率测量。温度及压力传感器实现管道内部温度、压力参数测量,最终实现标准状态下体积流量/质量流量换算。主控模块实现对微小电容处理值、压力值、压差值、温度值等参数的采集及处理,并将相关结果上传给上位机。系统测试主体如图2所示。

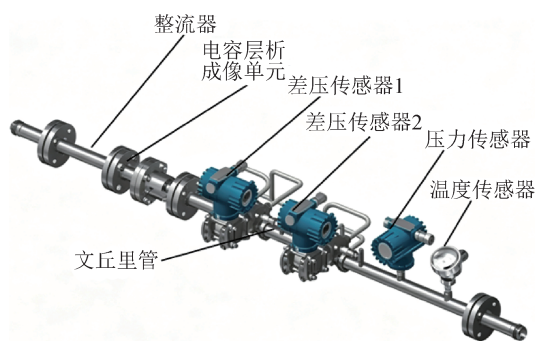


图2 系统测试主体图

Fig.2 Diagram of system testing subject

2 关键部件设计及分析

2.1 整流器设计及分析

整流器核心部件为整流叶片和分配环,如图3所示。整流叶片由两块垂直相交的椭圆片组成,椭圆片圆弧段与圆管内壁贴合,其目的是将待测

流体规整为环状流;分配环的作用是将流体进一步加速,维持环状流形态进入ECT单元。

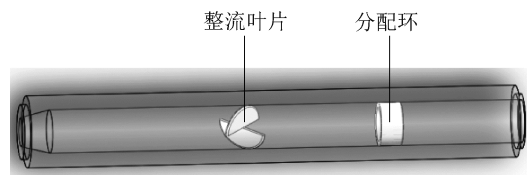


图3 整流器组成示意图

Fig.3 Schematic diagram of rectifier composition

在仿真软件中建立整流器有限元模型,采用mixture模型进行两相流分析,设置主相为油,密度为 780 kg/m^3 ,粘度为 $0.0024 \text{ Pa}\cdot\text{s}$;次相为空气,密度为 1.22 kg/m^3 ,粘度为 $1.79 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。边界条件设置为速度入口,压力出口,并采用标准粗糙度、无滑移壁面模型。根据油气流量和管道内径设置油气初始速度,气相体积分数取0.2。计算得到两相雷诺数均大于2000,属于湍流。流体流经整流器后,迹线发生旋转,选用标准Realizable $k-\varepsilon$ 模型(k 为湍流动能, ε 为湍流耗散率)。图4为整流器截面气液两相分布云图,经过整流叶片前,油相和气相均匀分布。经过整流叶片后,油相在靠近管壁的位置较为稠密,气相在靠近管心的位置较为稠密。产生此现象的原因:流体以一定速度流过整流叶片时,由于液相密度大,其受到的离心力大于气相受到的离心力,液相被甩

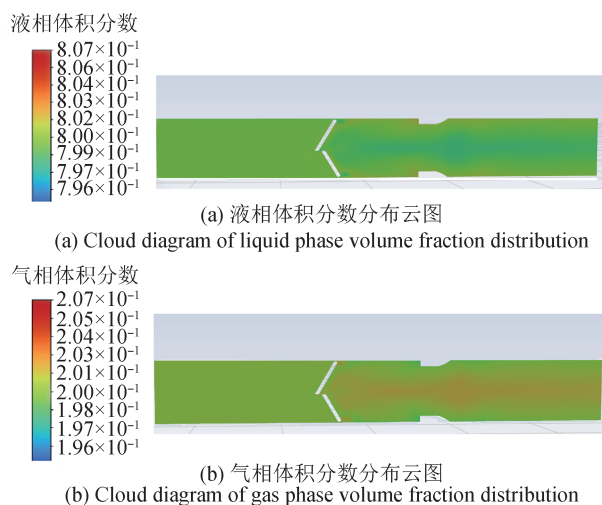


图4 整流器截面气液两相分布云图

Fig.4 Cloud image of gas-liquid two-phase distribution in the cross-section of the rectifier

向管壁，而气相集中在管心处。

2.2 异型文丘里装置设计及分析

如图5所示，建立文丘里管三维模型，其包括：入口段、收缩段、喉部、扩散段、出口段、定义入口端面、取压面1、取压面2、取压面3。

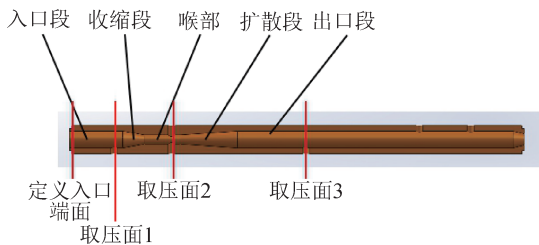


图5 文丘里管标识图
Fig.5 Venturi tube marking diagram

为了提高差压传感器分辨力，设置取压面1和取压面3的差压值尽可能大，同时，为保证系统运行效率，设置管内入口与出口之间的引入压力损失尽可能小^[16]。设计收缩段的角度为21°，入口段、出口段的长度至少等于圆管直径。设计了三种模型，喉径比 β 分别取0.4、0.5、0.6，扩张角 ϕ 分别取10°、12°、15°，采用有限元分析软件对全液相的文丘里管进行速度场、压力场分析，建立不同喉径比和扩张角的模型矩阵，以选择最优 β 和 ϕ 参数。分析文丘里管内的流速及压力分布可知： β 为0.4、 ϕ 为10°时，入口处流速比较均匀，进入喉部位置达到最大。入口流量为30 L/min时，文丘里管轴向压力分布如图6所示。由图6可知：入口处压力最大，由于沿程压力损失积累，静压值逐渐减小，在喉部达到最小，进入扩散段后压力又逐渐恢复。

分析可知：差压值及压力损失随喉径比减小

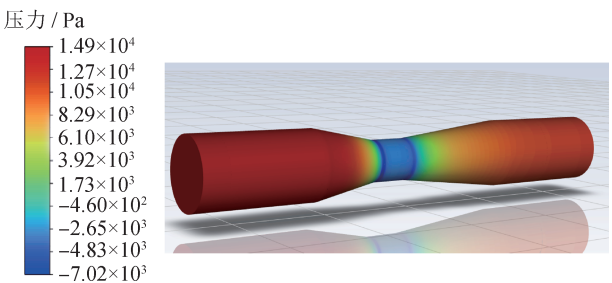


图6 文丘里管轴向压力分布图
Fig.6 Axial pressure distribution diagram of Venturi tube

而增大，喉径比相同时，压力损失随扩散角增大而增大，增大趋势不明显。 β 为0.4、 ϕ 为10°时，最大差压值为21.92 kPa，本文选取此条件下的参数进行文丘里管设计，如表1所示。

表1 文丘里管设计参数表

Tab.1 Design parameter table of Venturi			
入口管径/mm	β	$\phi/(^{\circ})$	喉部长度/mm
30	0.4	10	48

由体积流量公式可知，油气混合时的总体积流量 q_v 为

$$q_v = f(\Delta p_1, \Delta p_2, \rho_{\text{mix}}) \tag{1}$$

式中： Δp_1 为入口端面Ⅱ与取压面Ⅲ的差压值， Δp_2 为取压面Ⅲ与取压面Ⅳ的差压值， ρ_{mix} 为混合流体的密度。

2.3 ECT单元设计

2.3.1 电容传感器设计

图7为电容传感器三维模型，在管道外壁均匀布置8个电极片，每两个电极片构成一个电容传感器，共计28个电容传感器。电极片安装屏蔽环，在对电极片进行径向定位的同时，可防止环境中电磁噪声对电容测量造成干扰，屏蔽环上端预留了电极片引线出孔。定位环用于对电容传感器进行轴向定位。连接法兰用于将整个电容传感器接入测量管道系统中。图8为电极片设计参数，其中， r 为极片半径， h 为极片厚度， α 为极片张角， L 为极片长度。电极片设计参数如表2所示。

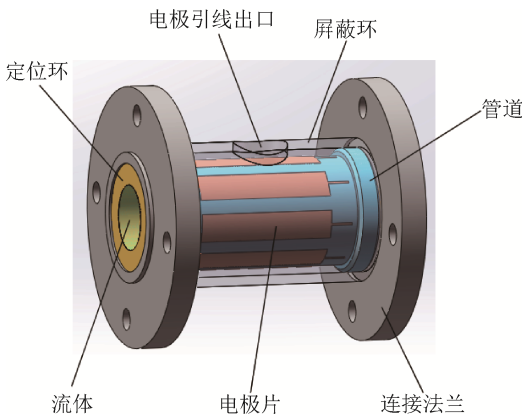


图7 电容传感器模型图
Fig.7 Schematic diagram of capacitive sensors

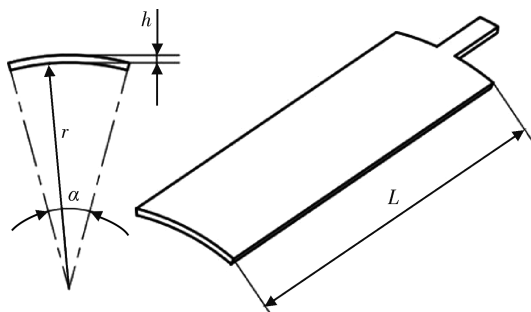


图8 电极片设计参数
Fig.8 Design parameters of electrode

表2 电极片设计参数表
Tab.2 Design parameter table of electrode pad

r/mm	$\alpha/(\text{^\circ})$	h/mm	L/mm
40	30	0.5	40

2.3.2 电磁仿真分析

采用COMSOL有限元软件对电容传感器进行仿真，建立电容传感器有限元模型，如图9所示，采用自由四面体网格单元对模型进行离散。电极材料为Cu，管道材料为PVC，相对介电常数为3.5。流体介质为动力油，相对介电常数为2.3。给电极*i*施加5 V的电压激励，电极*j*接地，其余电极悬空，得到*i-j*极板间的空间电势分布图(共计可以得到28个极板对间的电势分布图)。通过麦克斯韦电容计算函数，求解得到每对极板间的电容值。

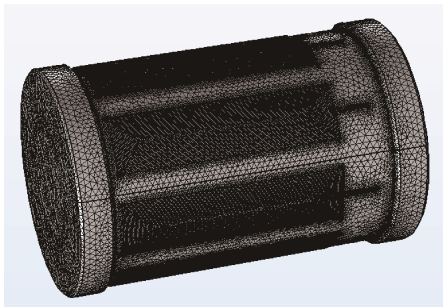


图9 电容传感器有限元模型
Fig.9 Finite element model of capacitive sensors

极板1-2间的电势分布情况如图10所示，极板1施加5 V直流电压激励，极板2接地。越靠近极板1的位置电势越高；越靠近2个极板的位置电场线越密集，说明极板1-2对附近区域的流体介质分布更加敏感。计算得到极板1-2的电容值为942.63 fF，同理，求解得到28对电极的电容值，如表3所示。

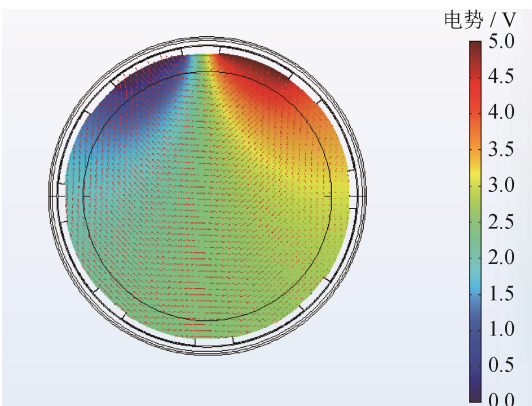


图10 极板1-2间的电势分布情况
Fig.10 Potential distribution between plates 1 and 2

表3 不同极板间的电容分布
Tab.3 Capacitance distribution between different plates

电极对	空腔电容/fF	满腔电容/fF	差值/fF
1-2	942.63	1 545.10	602.47
1-3	588.92	1 070.60	481.68
1-4	518.60	964.10	445.50
1-5	501.83	938.16	436.33
1-6	518.56	964.04	445.48
1-7	588.83	1 070.30	481.47
1-8	942.93	1 545.60	602.67
2-3	942.41	1 544.80	602.39
2-4	588.28	1 069.30	481.02
2-5	518.48	963.89	445.41
2-6	501.43	937.32	435.89
2-7	518.51	963.91	445.40
2-8	588.47	1 069.70	481.23
3-4	942.71	1 545.20	602.49
3-5	588.86	1 070.40	481.54
3-6	518.60	964.10	445.50
3-7	501.87	938.19	436.32
3-8	518.71	964.33	445.62
4-5	942.53	1 545.00	602.47
4-6	588.39	1 069.50	481.11
4-7	518.57	964.02	445.45
4-8	501.59	937.64	436.05
5-6	942.60	1 545.00	602.40
5-7	588.81	1 070.30	481.49
5-8	518.63	964.18	445.55
6-7	942.36	1 544.70	602.34
6-8	588.42	1 069.60	481.18
7-8	942.67	1 545.20	602.53

式中： g_A 为截面液相含率计算函数， c_1 为第1个电极对的电容值， c_{28} 为第28个电极对的电容值。

此时， ρ_{mix} 可表示为

$$\rho_{\text{mix}} = X\rho_1 + (1 - X)\rho_g \quad (3)$$

式中： ρ_1 与 ρ_g 分别为滑油和空气的密度。

最终，液相体积流量 q_{lv} 可表示为

$$q_{lv} = m(\Delta p_1, \Delta p_2, c_1, \dots, c_{28}, p) \quad (4)$$

式中： m 为液相体积流量计算函数， p 为管道内压力值。

气相体积流量 q_{gv} 可表示为

$$q_{gv} = n(\Delta p_1, \Delta p_2, c_1, \dots, c_{28}, p, t) \quad (5)$$

式中： n 为气相体积流量计算函数， t 为管道内的温度值。

2.3.4 图像成像算法

图像重建算法包括传统算法、压缩感知与稀疏优化算法以及深度学习方法^[17]。传统算法主要包括线性反投影法(Linear Back Projection, LBP)、Landweber、Tikhonov 正则化。本文采用LBP算法，其求解速度较快，可用于实时测量。

首先，通过仿真预先计算出成像区域内像素 k 对每个电极对的敏感程度，计算得到第 i - j 电极对的电容敏感场矩阵 S_{ij} ，公式为

$$S_{ij} \approx \frac{\iint \nabla \varphi_i \cdot \nabla \varphi_j dS}{V^2} \quad (6)$$

式中： V 为激励电压； $\nabla \varphi_i$ 为第 i 电极施加激励电压 V 时，其余电极接地时的空间电势梯度场； $\nabla \varphi_j$ 为第 j 电极施加激励电压 V 时，其余电极接地时的空间电势梯度场； S 为电容敏感场矩阵。

对电容实测值进行归一化处理，公式为

$$\lambda_{ij} = \frac{C_m(ij) - C_l(ij)}{C_h(ij) - C_l(ij)} \quad (7)$$

式中： λ_{ij} 为第 i - j 个电极对测量值归一化值， $C_m(ij)$ 为实际两相流流动时测得的电容值， $C_h(ij)$ 为管道内充满高介电常数物质时测得的电容值， $C_l(ij)$ 为管道内充满低介电常数物质时测得的电容值。

将归一化后的电容向量 λ (该向量长度为28)与灵敏度矩阵转置矩阵 S^T 相乘，计算出每个像素的灰度值 g 。

$$g = S^T \lambda \quad (8)$$

单个像素 k 的灰度值 g_k 计算公式为

$$g_k = \frac{\sum_{x=1}^{28} S_x \lambda_x}{\sum_{x=1}^{28} S_x} \quad (9)$$

式中： S_x 和 λ_x 分别为矩阵 S 和向量 λ 中的元素值。将计算出的一维像素值向量转换成对应的二维矩阵，生成截面图像。

图13为实际层析成像图，显示为环状流流型，图13的中心蓝色区域代表空气，周围红色区域代表滑油。

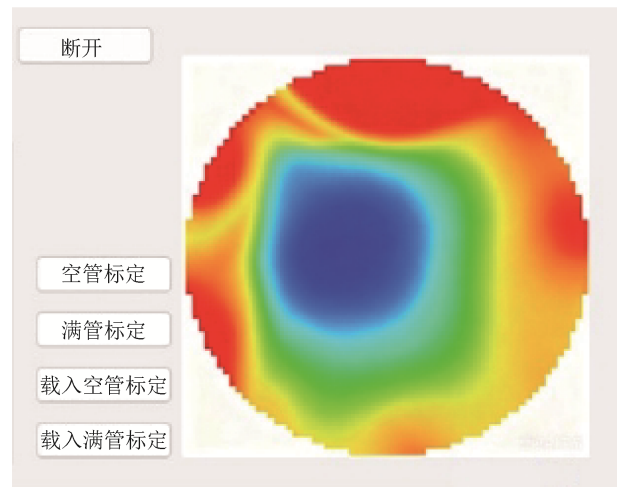


图13 实际层析成像图

Fig.13 Actual tomographic image

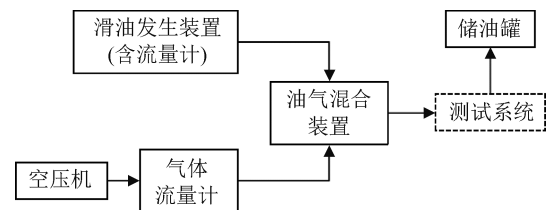


图14 现场搭建校准设备框图

Fig.14 Block diagram of on-site setup of calibration equipment



图15 现场校准图

Fig.15 On-site calibration diagram

3 实验结果分析

基于现场试验台架搭建油气两相流校准系统,对基于ECT的航空发动机油气两相流测试系统进行校准。液相由滑油发生装置产生,并由装置上自带的流量计进行计量;气相由空压机产生,经过计量后进入油气混合装置,液相与气相均匀混合后通入测试系统。现场搭建校准设备框图如图

14所示,现场校准图如图15所示。实时采集测试系统测量值,并与流量计设置值进行对比分析。

设置标准流量计液相和气相流量分别为(0.00 L/min, 24.88 g/s)、(15.17 L/min, 12.15 g/s)、(14.98 L/min, 24.98 g/s)、(30.24 L/min, 0.00 g/s)、(30.00 L/min, 12.59 g/s)、(30.05 L/min, 25.09 g/s),6种工况下的两相流量测试结果曲线如图16所示,流量误差分析数据如表4所示。由表4可知:液相

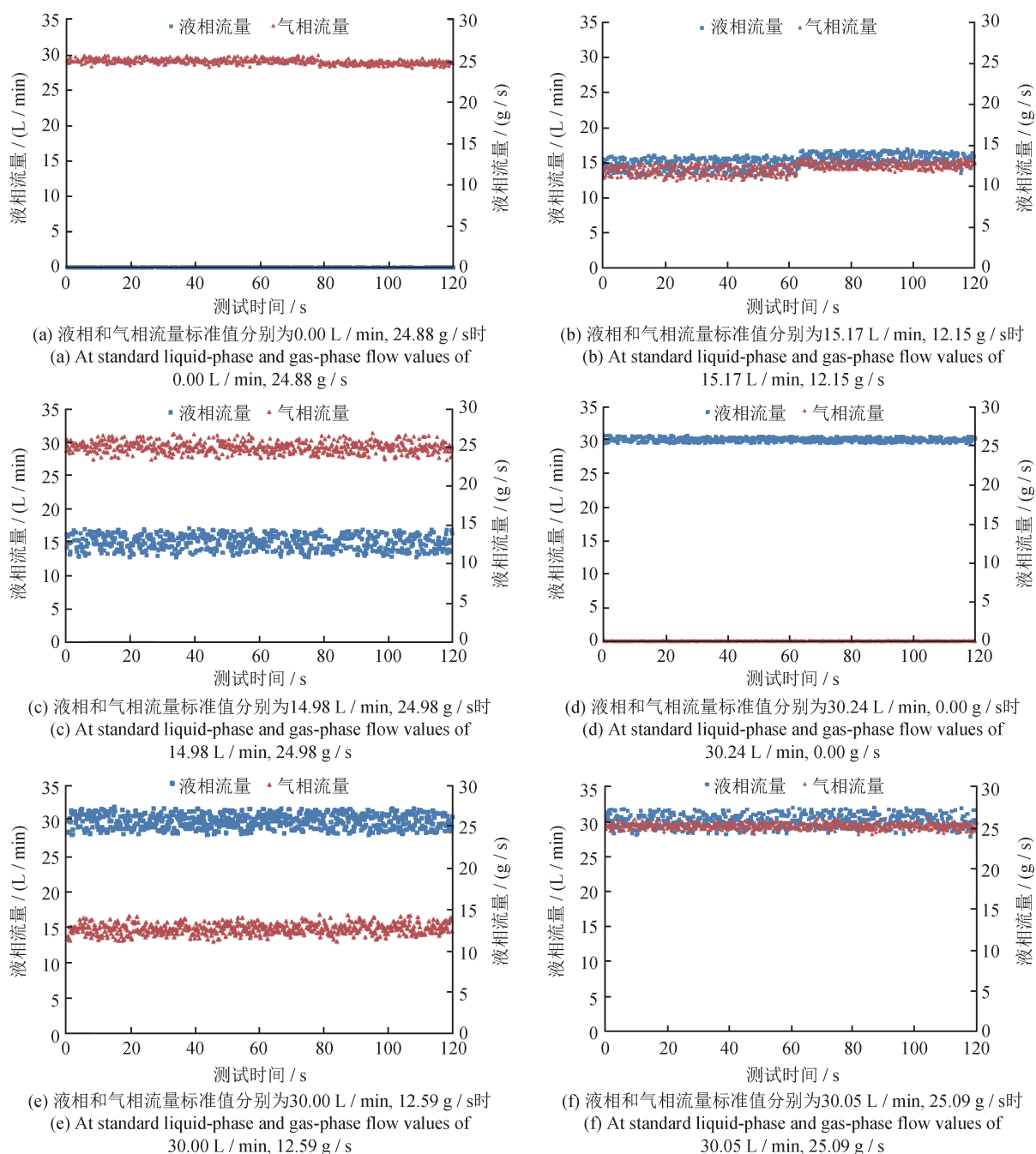


图 16 两相流量测试结果曲线

Fig.16 Test result curves of two-phase flow

表4 流量误差分析表
Tab.4 Table of flow error analysis

标准流量计		误差/%FS	
液相流量/(L/min)	气相流量/(g/s)	液相流量	气相流量
0.00	24.88	0.29	3.00
15.17	12.15	6.83	6.04
14.98	24.98	6.93	6.56
30.24	0.00	4.13	0.24
30.00	12.59	6.56	6.04
30.05	25.09	7.26	4.00

误差最大为7.26 %FS，出现在液相流量为30.05 L/min且气相流量为25.09 g/s时；气相误差最大为6.56 %FS，出现在液相流量为14.98 L/min且气相流量为24.98 g/s时。

4 结论

为了准确获得回油管路内油气两相实时流量数据，本文提出基于ECT的航空发动机油气两相流测试方法，并搭建了相应系统开展实验。主要结论：①采用整流器完成流型规整，避免了传统方法需先进行流型识别，再采用不同流体动力学模型完成流体测量的复杂操作，提高了测量效率；②设计采用异型文丘里装置完成总流量测量，在实现油气两相充分混合的前提下，既不引入较大压力损失，又提高了差压值，有效提升了测量精度；③完成了ECT单元阵列极板、电磁仿真、电路匹配的全流程设计，所搭建的系统满足现场测试要求，为航空发动机润滑系统设计优化提供了重要支撑。

参考文献

[1] 任国哲, 燕阳, 郑莞霏, 等. 航空发动机轴承腔油气两相流动特性及改进研究[J]. 推进技术, 2023, 44(11): 160-169.
Ren Guozhe, Yan Yang, Zheng Guanfei, et al. Oil-gas two-phase flow characteristics and improvement of bearing chamber for an aeroengine[J]. Journal of Propulsion Technology, 2023, 44(11): 160-169.
[2] 王菲, 贺猛, 朱志冰, 等. 航空发动机回油管中气泡流动特性分析[J]. 郑州航空工业管理学院学报, 2025,

43(5): 17-23.
Wang Fei, He Meng, Zhu Zhibing, et al. Analysis of bubble flow characteristics in the scavenge pipe of an aero-engine [J]. Journal of Zhengzhou University of Aeronautics, 2025, 43(5): 17-23.
[3] 李柯宁, 贾兴运, 熊德明, 等. 航空发动机润滑密封系统油气分离器分离性能研究[J]. 流体机械, 2025, 53(10): 73-80.
Li Kening, Jia Xinyun, Xiong Deming, et al. Separation performance study of oil-gas separator in aero-engine lubrication and sealing system[J]. Fluid Machinery, 2025, 53(10): 73-80.
[4] 李国权. 航空发动机滑油系统的现状及未来发展[J]. 航空发动机, 2011, 37(6): 49-62.
Li Guoquan. Current status and future development of aeroengine lubricating oil system[J]. Aeroengine, 2011, 37(6): 49-62.
[5] 孙恒超. 轴承腔油气两相介质流动和热效应理论分析与试验研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2015.
Sun Hengchao. Theoretical analysis and experimental study on oil-gas two-phase medium flow and thermal effect in bearing cavity[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2015.
[6] 王化祥. 电学层析成像[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
Wang Huaxiang. Electrical tomography[M]. Beijing: Science Press Press, 2013.
[7] 姚佳烽, 车权齐, 李志伟, 等. 电容层析成像技术研究进展[J]. 机械制造及自动化, 2022, 51(5): 1-7.
Yao Jiafeng, Che Quanqi, Li Zhiwei, et al. Research progress of electrical capacitance tomography [J]. Machine Building and Automation, 2022, 51(5): 1-7.
[8] Wang Haigang, Yang Wuqiang. application of electrical capacitance tomography in circulating fluidised beds — a review [J]. Applied Thermal Engineering: Design, Processes, Equipment, Economics, 2020, 176(1). DOI: 10.1016/j.applthermaleng. 2020. 115311.
[9] Joshua S, Benjamin S, Christopher Z, et al. Volume fraction determination of an oil continuous three phase system using electrical capacitance volume tomography [EB/OL]. [2026-05-22]. <https://www.tech4imaging.com>.
[10] 张天宏, 张宸煦. 航空发动机整机试验关键参数测试技术综述[J]. 计测技术, 2025, 45(1): 3-20.
Zhang Tianhong, Zhang Chenxu. Review of engine-level

- testing techniques for the key parameters of gas turbine engine [J]. Metrology & Measurement Technology, 2025, 45(1): 3–20.
- [11] 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): 125–131.
- Li Shu, Hu Jianping, Tan Yi, et al. Flow pattern recognition and void fraction prediction in lubricating oil recirculating pipe of aeroengine [J]. Journal of Propulsion Technology, 2024, 45(5): 125–131.
- [12] 刘晨昊, 谷俊, 田光雄, 等. 航空发动机回油管路油气两相空隙率测量及温度补偿方法的研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(4): 214–220.
- Liu Chenhao, Gu Jun, Tian Guangxiong, et al. Study on voidage measurement of gas-oil two-phase and its temperature compensation method in oil return tube of aeroengine [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2022, 36(4): 214–220.
- [13] 赵愉, 岳士弘, 张洋洋, 等. 航空发动机中气液两相流的可视化检测[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(11): 2345–2351.
- Zhao Yu, Yue Shihong, Zhang Yangyang, et al. Visible measurement of gas-liquid two-phase flow in aircraft engine [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 43(11): 2345–2351.
- [14] 杨昊. 基于 ECT 的航空发动机滑油磨粒在线监测方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.
- Yang Hao. Research on on-line monitoring method of lubricating oil particles of aero-engine based on ECT [D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.
- [15] 刘建英, 于海亭, 薛倩, 等. 基于 ECT 的航空发动机滑油检测系统设计[J]. 仪表技术与传感器, 2015(9): 50–52.
- Liu Jianying, Yu Haiting, Xue Qian, et al. Aeroengine lubricating oil detection system design based on ECT [J]. Instrument Technique and Sensor, 2015(9): 50–52.
- [16] 张龙赐, 谢锋, 曹勇全, 等. 用于乙二醇水溶液的文丘里流量测量研究[J]. 载人航天, 2021, 27(3): 373–378.
- Zhang Longci, Xie Feng, Cao Yongquan, et al. Study on Venturi flow measurement for ethylene glycol aqueous solution [J]. Manned Spaceflight, 2021, 27(3): 373–378.
- [17] Zhao Qing, Liu Shi, Chen Weining. A novel computational imaging algorithm for electrical capacitance tomography [J]. Applied Sciences, 2024, 14(2): 2076–3417.

(本文编辑: 刘圣晨 李成成)



第一/通信作者: 张龙赐(1988—), 男, 正高级工程师, 硕士, 主要研究方向为传感器设计及制备, 仪器及测控技术。曾负责仪器专项、终端产业化等项目, 相关成果获集团公司技术发明奖三等奖, 湖南省科技进步奖二等奖。



共同第一作者: 曹西征(1989—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为航空发动机滑油系统设计及试验, 极端环境测试技术。