

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104928

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

刘晨昊^{1,2} 谷俊^{1,2} 田光雄³ 梁平昊³ 刘泽伟³ 冀海峰³ 王保良³

(1. 中国航发沈阳发动机研究所 沈阳 110015; 2. 中国航空发动机集团航空发动机动力传输重点实验室 沈阳 110015; 3. 浙江大学控制科学与工程学院工业控制技术国家重点实验室 杭州 310027)

摘要:航空发动机回油管路处于润滑油和空气两相混合流动状态,实现管路中油气两相空隙率的测量对深入了解回油管路工作特性,进行管路流动分析及设计具有重要的意义。本文根据回油管路的运行状态,设计了适用于高温工况的8电极电容层析成像(electrical capacitance tomography, ECT)传感器;利用采集的阵列电容信号,建立了基于主成分回归(principle component regression, PCR)的空隙率测量模型;并针对回油管路温度变化范围大所引起的测量误差,提出了一种基于满管电容标定值的空隙率测量温度补偿方法,并进行了实验研究,结果表明,本文所提出的空隙率测量模型及温度补偿方法是有效的,在20℃~180℃温度变化范围内,空隙率测量的绝对误差均在10%以内。

关键词:油气两相流;空隙率;温度补偿;主成分回归

中图分类号: TP216; TH86 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8040

Study on voidage measurement of gas-oil two-phase and its temperature compensation method in oil return tube of aeroengine

Liu Chenhao^{1,2} Gu Jun^{1,2} Tian Guangxiong³ Liang Pinghao³ Liu Zewei³ Ji Haifeng³ Wang Baoliang³

(1. Shenyang Aeroengine Research Institute, Aero Engine Corporation of China, Shenyang 110015, China;

2. Key Laboratory of Power Transmission Technology on Aero-engine, Aero Engine Corporation of China, Shenyang 110015, China;

3. State Key Laboratory of Industrial Control Technology, College of Control Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The return oil pipeline of aeroengine works in the mixed flow state of lubricating oil and air. The voidage measurement of oil-gas two-phase in the pipeline is of great significance for understanding its characteristics, analysis and design of the pipeline. In this work, according to the practical state of oil return tube, an 8-electrode electrical capacitance tomography (ECT) sensor used for high-temperature operating condition was designed. With the array capacitance data from the designed ECT sensor, a voidage measurement model based on principal component regression (PCR) was established, and a new temperature compensation method was presented by calibrated capacitance value at different temperature in oil-filled full tube. The experiments were carried out, and the results showed that the presented voidage measurement model and its temperature compensation method were effective, and that the maximum absolute error of the voidage measurement was less than 10% with the temperature range of 20 °C ~ 180 °C.

Keywords: gas-oil two-phase flow; voidage; temperature compensation; principal component regression

0 引言

航空发动机是一个结构复杂、精密度高的设备,在其运行过程中,润滑系统为航空发动机的齿轮、轴承等设备提供润滑和冷却并带走磨粒等外来杂质,并且起着防锈、

清洁、密封和缓冲等作用。回油系统将出油孔排出的润滑油返回到润滑油箱,以保证轴承内润滑油的质量和温度的平衡,在维持发动机正常运转上发挥了重要作用^[1]。为了更好地分析回油管路润滑油流动状态,更加合理地设计回油管路,需要对回油管路中的相关流动参数进行测量。然而,回油管路中存在的是复杂多变的润滑油-空

气两相混合流动,其参数检测一直是众多相关领域难点问题之一;且回油管路管径小,温度和介质特性变化大,为其参数检测问题带来了更多的不确定因素,因此亟需进行航空发动机润滑油系统回油管路油气两相流参数测量的研究。

空隙率,又称截面含气率,指在两相流动横截面气相面积占截面总面积的比率,该参数是进行两相流流动分析和其他参数测量的重要流动参数之一^[2-5]。现有的空隙率测量方法主要包括:电学法(电容、电导)、光学法、射线法、高速摄像法、声学法等^[3-6]。但从现有文献来看,用于航空发动机回油管路的空隙率测量手段还鲜有报道,需要根据发动机的实际工况寻求适用于航空发动机回油管路的空隙率测量传感器和方法。电容层析成像(electrical capacitance tomography, ECT)传感器可以根据被测场内介质分布不同而引起的介电常数分布的不同,通过测量场内电容值及灵敏度矩阵反演出场内介质分布情况,为解决两相流空隙率测量问题提供了一种有效的途径^[6-9]。

本文基于电容层析成像原理,研发了适用于航空发动机回油管路的8电极高温 ECT 系统,并基于主成分回归(principle component regression, PCR)方法建立了空隙率测量模型,同时针对温度变化对测量的影响,以不同温度下的满管标定值为基准,实现了空隙率测量的温度补偿。

1 高温 ECT 系统

1.1 基本原理

本文所采用 ECT 技术的基本原理与医学射线 CT (computerized tomography) 技术相同,均为 Radon 变换及其逆变换,即通过对一个物体投影数据,可以得到反映该物体内部分布信息的图像^[7-8]。

对于二维空间 R^2 中的连续函数 $f(x, y)$, 称其沿直线 l 线积分 $Rf(x, y)$ 为 $f(x, y)$ 沿直线 l 的 Radon 变换。

$$Rf(x, y) = \int_l f(x, y) dl \quad (1)$$

如果将直线 l 表示为: $x \cos \alpha + y \sin \alpha = s$, 其中 $(\cos \alpha, \sin \alpha)$ 为该直线外法线方向, s 为该直线到原点的距离, 则 Radon 变化经典表达式为:

$$Rf(x, y) = Rf(s, \alpha) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(s \cos \alpha - Y' \sin \alpha, s \sin \alpha + Y' \cos \alpha) dY' \quad (2)$$

其 Radon 逆变换可以表述为: 函数 $f(x, y)$ 在定义域内任一点的值可以由经过该点的所有线积分唯一确定, 即:

$$f(x, y) = -\frac{1}{2\pi} \lim_{\tau \rightarrow 0} \int_{\tau}^{+\infty} \frac{1}{s} \int_0^{2\pi} Rf_1(x \cos \alpha + y \sin \alpha - s, \alpha) d\alpha ds$$

$$\alpha) d\alpha ds \quad (3)$$

式中: $Rf_1(s, \alpha)$ 表示 $Rf(s, \alpha)$ 关于 s 的偏导。

通常将 $f(x, y)$ 定义为图像, 而其 Radon 变换 $Rf(s, \alpha)$ 代表该图像沿直线 $l: x \cos \alpha + y \sin \alpha - s = 0$ 的投影。而 Radon 逆变换证明一幅图像可以通过无限多的投影值来重建^[10-11]。

用矩阵形式来表述图像重建过程, 即求取如下方程的解:

$$P = WF \quad (4)$$

其中, P 称为投影值矩阵, 由相应阵列式传感器得到, W 为权重系数矩阵或灵敏场矩阵, F 为重建图像的像素灰度值矩阵。图像重建即利用投影值矩阵 P 和灵敏场矩阵 W 来求取灰度值矩阵 F 。

ECT 技术利用不同的物质具有不同的介电常数这一性质, 通过检测管道或者被测场域中不同物质对应的介电常数, 从而重建出被测场域截面的介电常数分布, 可以认为不同的介电常数反映了不同的相介质, ECT 技术主要适用于非导电介质组成的两相流或者多相流体系^[12-13]。

1.2 高温 ECT 传感器设计

本文所设计的高温 ECT 系统的结构示意图如图 1 所示。

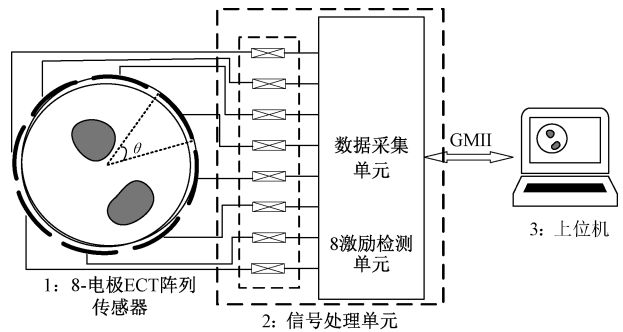


图 1 ECT 系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ECT system

该系统由 8 电极电容阵列式传感器、信号处理单元以及上位机 3 部分组成。8 电极激励检测单元通过对 8 个电极进行交替激励和检测来获取反映油气两相截面分布的电容信号。信号处理单元控制激励检测信号单元的切换并接收检测信号进行数字相敏解调^[14-16]。检测信号通过千兆以太网传输到上位机进行数据处理, 实现空隙率在线测量。

为了满足高温环境的运行条件, 绝缘管路部分最终选用聚四氟乙烯 (poly tetra fluoroethylene, PTFE) 材质管道, 能够满足实际应用的温度要求。

本文所设计的电极阵列传感器示意图如图 2 所示。其尺寸参数如表 1 所示。

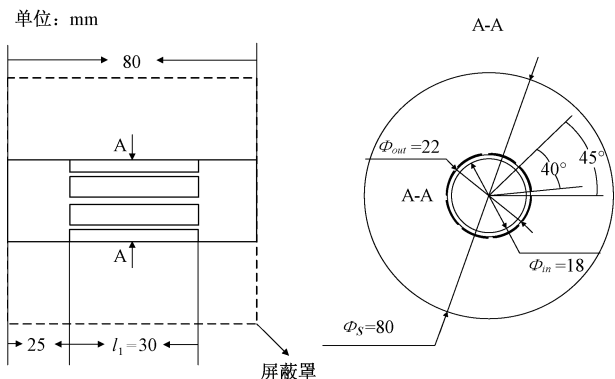


图 2 ECT 电极阵列传感器

Fig. 2 Electrode array for ECT system

表 1 ECT 电极阵列传感器尺寸参数

Table 1 Size parameters of electrode array for ECT system

材料	电极张角 $\theta_1 / (^\circ)$	绝缘部分张角 $\theta_2 / (^\circ)$	电极长度 l_2 / mm	屏蔽罩直径 Φ_s / mm
不锈钢	40	5	30	80

由于回油管路管径小,设计的传感器电极阵列综合考虑测量有效信号的强度及其传感器测量区域,采用了 8 电极阵列,每个电极长度为 30 mm,电极张角为 40° 。仿真和实验研究也表明所设计的 ECT 高温传感器可以满足测量的要求。

2 空隙率测量建模及其温度补偿

在 ECT 传感器设计的基础上,本文根据获取的阵列电容信号,利用主成分回归(PCR)技术,提出一种基于满管电容标定值的空隙率测量及温度补偿方法,实现了回油管路润滑油-空气两相流空隙率的测量和温度补偿。相对于传统的空隙率测量模型^[17-18],本文所提出的方法直接利用采集的电容信号建立空隙率测量模型,避免了复杂费时的图像重建过程,满足了测量的实时性要求,同时引入不同温度下的满管电容标定值作为基准,进行电容数据的归一化处理,实现空隙率测量误差的温度补偿。图 3 为空隙率测量建模及其温度补偿方法的技术路线框图。

从图 3 可以看出,本文所提出的空隙率测量方法主要解决两个关键问题:空隙率测量模型的建立和温度补偿。

本文利用 ECT 系统获得的反映被测介质的 20 个独立电容值作为空隙率测量模型的输入信号,基于主成分回归(PCR)方法建立空隙率测量模型,该方法可以有效地解决多元回归中多重共线性问题。其主要思想为对自

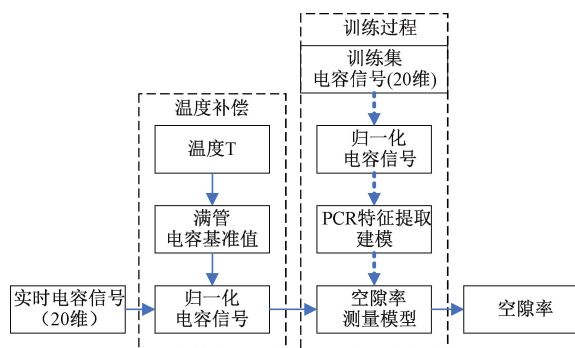


图 3 空隙率测量建模及其温度补偿技术路线框图

Fig. 3 Block diagram of voidage measurement modeling and temperature compensation technology

变量进行降维处理,消除自变量中存在的冗余信息^[19-20]。

PCR 建模过程中,首先将原自变量 C_m (本文中为 20 个测量电容) 转换为少数的几个相互正交的隐变量(即主成分)且最大限度地保留原变量的特征信息。隐变量为原变量的线性组合,如式(5)所示,其中隐变量 C_s 也称为得分向量,而转换矩阵 W_L 称为载荷矩阵,然后对空隙率值与主成分进行回归分析,

$$Y = C_s \cdot \beta + e = C_m \cdot W_L \cdot \beta + e \quad (5)$$

式中: β 为回归系数,是训练过程需要确定的参数; e 为残差。

由于回油管路中,润滑油-空气的温度变化范围宽,而温度会引起润滑油介电常数发生变化,导致即使相同介质分布情况下,所采集的电容值发生变化,由此产生测量误差,为了补偿由于温度变化而带来的空隙率测量误差,本文的研究中,引入不同温度下的满管(即管道中充满润滑油时)电容标定值作为基准,利用归一化电容数据作为空隙率测量模型的输入,实现了空隙率测量的温度补偿。具体来说,在空隙率测量建模过程中,通过加热装置使管道中的润滑油处于不同温度 $T^\circ\text{C}$ 下,测量润滑油充满管道时的电容数据 C_{Full}^T ,并将该电容数据作为此温度下的基准值,代入式(6)中计算归一化电容值 C_{nor} ,该值作为测量模型的输入。

$$C_{nor} = \frac{C - C_{Empty}}{C_{Full}^T - C_{Empty}} \quad (6)$$

式中: C_{Full}^T 、 C_{Empty} 分别为温度为 T 时,传感器满管和空管(管道内充满空气)时的电容值, C 为电容实测值。

可得最终空隙率测量模型,如式(7)所示。

$$\alpha = C_{nor} \cdot W_\alpha \quad (7)$$

式中: α 为油气两相流空隙率, C_{nor} 为 20 个归一化电容值, W_α 为训练得到的权重系数,即式(5)中转换矩阵 W_L 与回归系数 β 的乘积。

3 实验装置

为了验证本文提出的空腔率测量模型和温度补偿方法,进行了相应的实验研究。目前在两相流测量领域缺乏有效的动态方法来获取真实的空腔率测量值,本文通过静态模拟油气两相的流动结构,实现所提出的空腔率测量及温度补偿方法的验证。

本文所设计的高温 ECT 系统实物图如图 4 所示。实验用 ECT 传感器内径为 18 mm,实验介质为长城 4106 航空合成润滑油和空气。设定温度为:20 ℃、40 ℃、60 ℃、80 ℃、100 ℃、120 ℃、140 ℃、160 ℃、180 ℃。

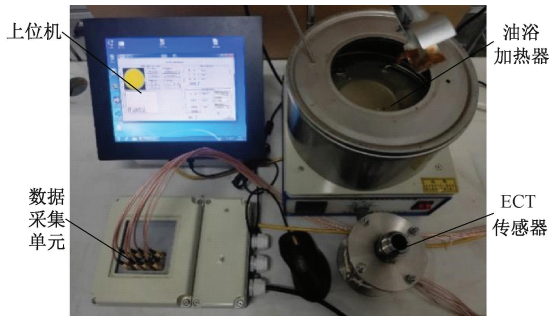


图 4 高温 ECT 实验装置

Fig. 4 High temperature ECT system

实验过程中,利用油浴加热器将 ECT 传感器及其润滑油加热到不同的设定温度,将不同管径的空心聚四氟乙烯 (PTFE) 管插入管道中,模拟水平管内典型流型:泡状流、层状流和环状流,如图 5 所示。

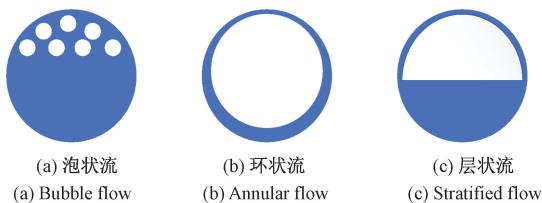


图 5 模拟流型示意图

Fig. 5 Schematic diagram of simulated flow pattern

4 实验结果与讨论

空腔率测量模型是基于 20 ℃ 下的电容测量值建立的。将 20 ℃ 的电容数据分为两大组:训练集和测试集。其中,训练集数据包括 500 组数据,用于空腔率测量模型的建立。测试集数据包括 100 组数据,用于测量结果的验证。空腔率的参考值 α_{ref} 来源如下:

$$\alpha_{ref} = \frac{S_{ptfe}}{S_{ect}} \quad (8)$$

式中: S_{ptfe} 为模拟气相的 PTFE 管截面面积,而 S_{ect} 为管道

截面面积,空腔率参考值为两者之比。

图 6 为 20 ℃ 空腔率测量结果。

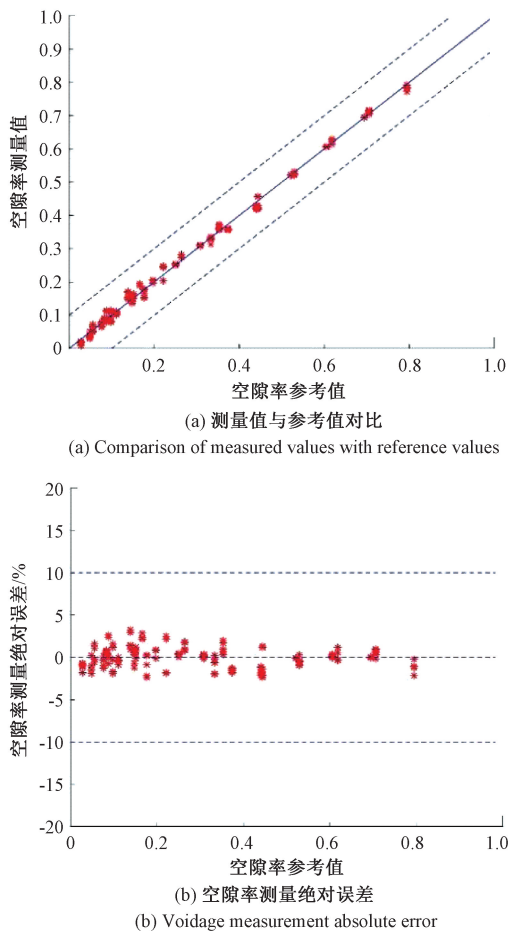


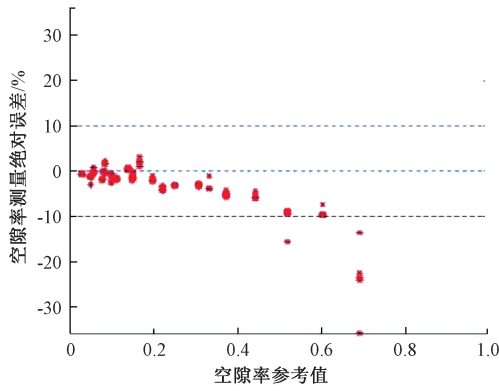
图 6 20 ℃ 空腔率测量结果

Fig. 6 Voidage measurement results at 20 ℃

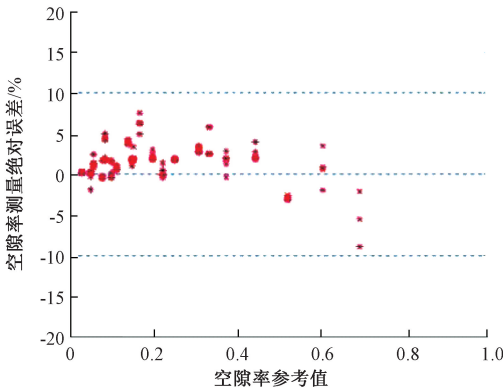
从图 6 中可以看出,在 20 ℃ 时,所建立的空腔率测量模型的最大绝对测量误差不超过 3.28%,取得了较好的测量效果。

为了进一步验证所提出的温度补偿方法,分别测量得到 40 ℃、60 ℃、80 ℃、100 ℃、120 ℃、140 ℃、160 ℃、180 ℃ 下的满管电容标定值,代入式(6)中,获取归一化电容值,并根据 20 ℃ 下建立的空腔率测量模型,计算空腔率,并与未经过温度补偿而获得的空腔率结果进行了对比,如图 7~10 所示,分别列出 60 ℃、100 ℃、140 ℃ 和 180 ℃ 下的对比结果,其他温度下有类似结果。表 2 列出了不同温度下最大绝对测量误差的对比结果。

从图 7~10,以及表 2 中可以看出,未加温度补偿的情况下,空腔率测量值会随着温度的变化,产生较大的误差。利用本文所提出的温度补偿方法可以大大的降低温度对测量的影响,在 20 ℃~180 ℃ 温度范围内,最大绝对测量误差不超过 10%。



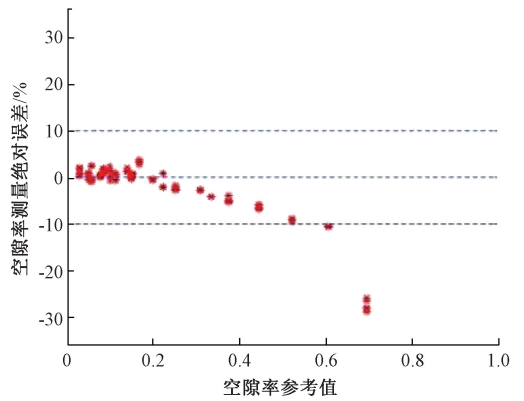
(a) 无温度补偿测量绝对误差
(a) Without temperature compensation



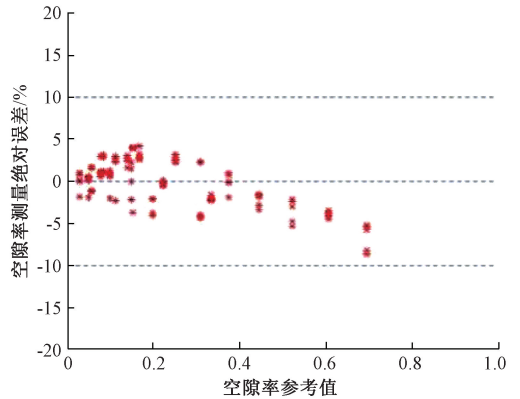
(b) 温度补偿后测量绝对误差
(b) With temperature compensation

图 7 60 °C 温度补偿前后空隙率测量绝对误差分布

Fig. 7 Absolute error distribution of voidage measurement before and after temperature compensation at 60 °C



(a) 无温度补偿测量绝对误差
(a) Without temperature compensation



(b) 温度补偿后测量绝对误差
(b) With temperature compensation

图 8 100 °C 温度补偿前后空隙率测量绝对误差分布

Fig. 8 Absolute error distribution of voidage measurement before and after temperature compensation at 100 °C

表 2 温度补偿前后不同温度空隙率测量最大绝对误差

Table 2 Maximum absolute error of voidage measurement before and after temperature compensation

温度/°C	无温度补偿	温度补偿
	最大绝对误差/%	最大绝对误差/%
20	3.29	3.29
40	24.92	9.51
60	35.75	8.85
80	14.27	8.85
100	28.74	8.65
120	20.27	8.14
140	22.36	9.78
160	23.16	8.42
180	15.32	9.80

5 结 论

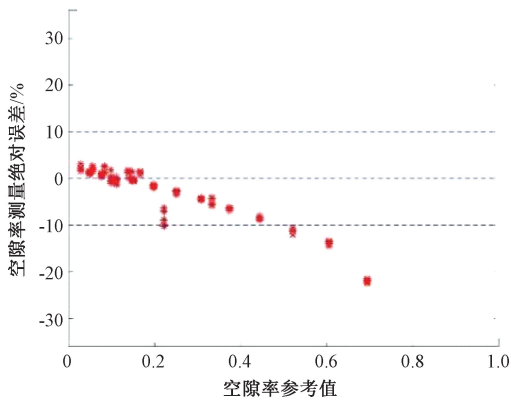
航空发动机润滑系统回油管路对发动机的运行起到了至关重要的作用,获取回油管路中润滑油-空气两相流

动分布及其空隙率信息对回油管路工况监测、流动分析和管路设计等具有重要意义。本文根据航空发动机回油管路运行环境,研发了适用于回油管路的高温电容层析成像(ECT)传感器,提出了一种基于不同温度下满管标定值的新型空隙率测量模型,实现了不同温度下的温度补偿。实验研究表明所设计的高温 ECT 传感器可以满足回油管路的工况要求,所提出的新型空隙率测量模型在 20 °C ~ 180 °C 温度范围内的空隙率测量误差均小于 10%,大大减少了温度对测量结果的影响。

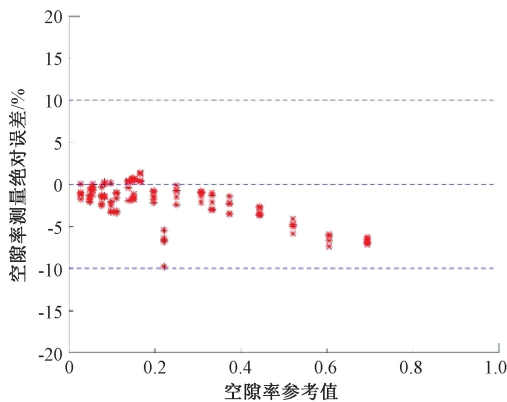
参考文献

[1] 林基恕. 航空燃气涡轮发动机机械系统设计[M]. 北京:航空工业出版社, 2005.
LIN J SH. Mechanical System Design of Aviation Gas Turbine Engine [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2005.

[2] YAN Y, WANG L, WANG T, et al. Application of soft computing techniques to multiphase flow measurement: A review [J]. Flow Measurement and Instrumentation,



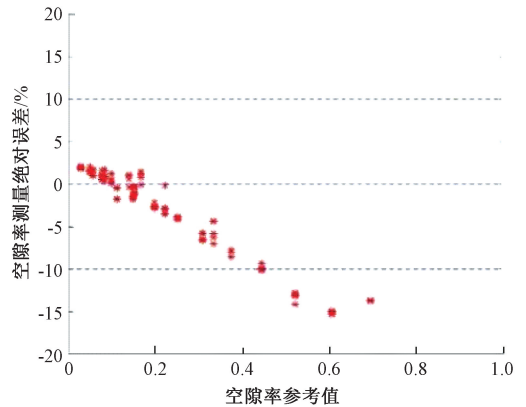
(a) 无温度补偿测量绝对误差
(a) Without temperature compensation



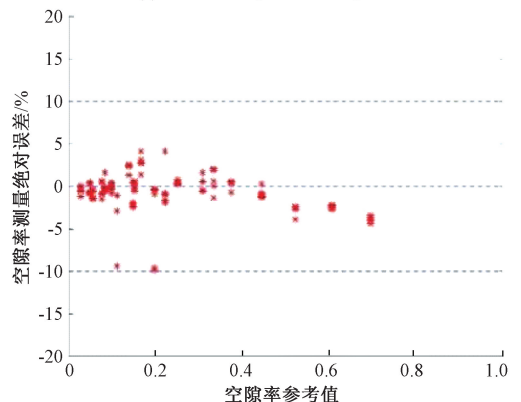
(b) 温度补偿后测量绝对误差
(b) With temperature compensation

图9 140 °C 温度补偿前后空腔率测量绝对误差分布

Fig. 9 Absolute error distribution of voidage measurement before and after temperature compensation at 140 °C



(a) 无温度补偿测量绝对误差
(a) Without temperature compensation



(b) 温度补偿后测量绝对误差
(b) With temperature compensation

图10 180 °C 温度补偿前后空腔率测量绝对误差分布

Fig. 10 Absolute error distribution of voidage measurement before and after temperature compensation at 180 °C

2018, 60: 30-43.

- [3] 李海青, 黄志尧. 软测量技术原理及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.
LI Q H, HUANG ZH Y. Principle and Application of Soft Sensor Technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2000.
- [4] ZHOU Y, HUANG Z Y, WANG B L, et al. A new method for void fraction measurement of gas-liquid two-phase in millimeter-scale pipe[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2015, 72: 298-305.
- [5] XU Z, WU F, YANG X, LI Y. Measurement of gas-oil two-phase flow patterns by using CNN algorithm based on dual ECT sensors with Venturi Tube[J]. Sensors, 2020, 20(4): 1200.
- [6] 谭超, 董峰. 多相流过程参数检测技术综述[J]. 自动化学报, 2013, 39(11): 1923-1932.
TANG CH, DONG F. Parameters measurement for multiphase flow process [J]. Journal of Automatica Sinica, 2013, 39(11): 1923-1932.

- [7] 王化祥. 电学层析成像技术[J]. 自动化仪表, 2017, 38(5): 1-6.
WANG H X. Electrical tomography technology [J]. Process Automation Instrumentation, 2017, 37(5): 1-6.
- [8] YE Z, WEI H Y, SOLEIMANI M. Resolution analysis using fully 3D electrical capacitive tomography [J]. Measurement, 2015, 61: 270-279.
- [9] YAO J F, TAKEI M. Application of process tomography to multiphase flow measurement in industrial and biomedical fields: A review [J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(24): 8196-8205.
- [10] WEI K, QIU C H, PRIMROSE K. Super-sensing technology: Industrial applications and future challenges of electrical tomography [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A-Mathematical Physical and Engineering Sciences, 2016, 374(2070): 20150328.
- [11] 张立峰, 戴力. 基于极限学习机求解正问题的ECT图像重建[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(10): 64-71.

- ZHANG L F, DAI L. Image reconstruction of electrical capacitance tomography based on forward problem solution using extreme learning machine [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(10): 64-71.
- [12] 孟振振, 气水两相流流量测量新方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- MENG ZH ZH. Study on new flowrate measurement method for air-water two-phase flow [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
- [13] SALEHI S M, KARIMI H, DASTRANJ A A. A capacitance sensor for gas/oil two-phase flow measurement: Exciting frequency analysis and static experiment[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 17(3), 679-686.
- [14] MOSOROV V, ZYCH M, HANUS R, et al. Improvement of flow velocity measurement algorithms based on correlation function and twin plane electrical capacitance tomography[J]. Sensors, 2020, 20: 306.
- [15] CUI Z Q, WANG H X, CHEN Z Q, et al. A high-performance digital system for electrical capacitance tomography[J]. Measurement Science and Technology, 2011, 22(5): 055503.
- [16] SALEHI S M, KARIMI H, MOOSAVI R, et al. Different configurations of capacitance sensor for gas/oil two phase flow measurement: An experimental and numerical study [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2017, 82: 349-358.
- [17] LI M, HENRY M, ZHOU F B, et al. Two-phase flow experiments with Coriolis mass flow metering using complex signal processing [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2019, 69: 101613.
- [18] WANG X, CHEN Y, WANG B, et al. Sectional void fraction measurement of gas-water two-phase flow by using a capacitive array sensor [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2020, 74:101788.
- [19] XU Z Q, WU F, ZHU L Y, et al. LSTM model based on multi-feature extractor to detect flow pattern change characteristics and parameter measurement [J]. IEEE

Sensors Journal, 21, 3: 3713-3721.

- [20] JOLLIFFE I T, CADIMA J. Principal component analysis: A review and recent developments [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A-Mathematical Physical and Engineering Sciences, 2015, 374: 20150202.

作者简介



刘晨昊, 2007 年于西北工业大学获得学士学位, 2011 年于西北工业大学获得硕士学位。现为中国航发动力所高级工程师, 主要研究方向为航空发动机滑油系统设计。
E-mail: 148103602@qq.com

Liu Chenhao received her B. Sc. degree from NPU University in 2007, M. Sc. degree from NPU University in 2011. Now she is a senior engineer in AECC Shenyang Engine Research Institute. Her main research interest includes aeroengine oil system design.



谷俊(通信作者), 2003 年于南京航空航天大学获得学士学位, 2016 年于克兰菲尔德大学获得硕士学位。现为中国航发动力所研究员, 主要研究方向为航空发动机滑油系统设计。

E-mail: serapis_g@163.com

Gu Jun (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2003, M. Sc. degree from Cranfield University in 2016. Now he is a professor in AECC Shenyang Engine Research Institute. His main research interest includes aeroengine oil system design.



冀海峰, 2002 年于浙江大学获得博士学位。现为浙江大学副教授, 主要研究方向: 检测技术与自动化装置、智能感知技术。

E-mail: hfji@zju.edu.cn

Ji Haifeng received his Ph. D. from Zhejiang University in 2002. Now he is an associate professor in Zhejiang University. His main research interests include measurement technology, automatic device and smart sensing technique.