

文章编号: 1672-8785(2018)03-0023-06

## 基于 L-M 算法的管内流体流量 及温度单参数识别

张 林<sup>1</sup> 杨 立<sup>1</sup> 范春利<sup>1</sup> 刘亚峰<sup>2\*</sup>

(1. 海军工程大学动力工程学院, 湖北 武汉 430033;

2. 陆军汽车试验场, 江苏 南京 210028)

**摘 要:** 管道内部流量及温度的测量在工业生产和工程应用中具有重要作用。采用高温管道一维稳态导热模型探讨了管道外壁面温度随流体流量及温度的变化规律。基于管道外壁面温度, 采用列文伯格-马夸尔特(Levenberg-Marquardt, L-M)算法对管道内流体流量及温度单参数识别进行了研究, 并分析了外壁面上的测温点个数对识别结果的影响。结果表明, 流体流量或温度与测温点温度之间是一一对应的; 流体流量越小, 流体温度越高, 则流体流量的识别精度越高; 流体流量越大, 流体温度越高, 则流体温度的识别精度越高; 无论存在测温误差与否, 流体流量及温度的单参数识别结果均非常精确。

**关键词:** 反问题; 流体流量; 流体温度; L-M 算法; 传热

**中图分类号:** TK31 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2018.03.005

## Study of Single Parameter Identification of Flow Rate and Temperature in Pipeline Based on L-M Algorithm

ZHANG Lin<sup>1</sup>, YANG Li<sup>1</sup>, FAN Chun-li<sup>1</sup>, LIU Ya-feng<sup>2\*</sup>

(1. College of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. PLA Army Automobile Proving Ground, Nanjing 210028, China)

**Abstract:** The measurement of fluid flow rate and temperature inside pipelines plays an important role in industrial production and engineering applications. A one-dimensional steady-state heat transfer model for high temperature pipelines is used to investigate the variation of temperature of the outer wall of a pipeline with different fluid flow rate and temperature. On the basis of the temperature of the outer wall of a pipeline, a L-M algorithm is used to study the single parameter identification of fluid flow rate and temperature in the pipeline. The influence of temperature measurement point number on the identification result is analyzed. The results show that the fluid flow rate or temperature corresponds to the temperature of the related measurement point. The smaller the fluid flow rate is, the larger the fluid temperature is, and the higher the fluid flow rate identification accuracy is. The larger the fluid flow rate is, the larger the fluid temperature is, and the higher the fluid temperature identification accuracy is. The single parameter identification results of fluid flow rate and

**收稿日期:** 2018-01-22

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51479203)

**作者简介:** 张林(1991-), 男, 山东枣庄人, 博士生, 主要从事红外无损检测和传热反问题等方面的研究。

\***通讯作者:** E-mail: chlfang@163.com

temperature are very accurate regardless of the existence of temperature measurement errors.

**Key words:** inverse problem; fluid flow rate; fluid temperature; L-M algorithm; heat transfer

## 0 引言

圆管是工业上最常用的一种传质管道。管道内流体流量及温度的变化可以反映出设备运行状况,所以对管道内的流量及温度进行测量非常有意义。由此产生了多种管道内部流体流量检测方法,如超声检测和涡街检测等<sup>[1-4]</sup>。大多数流量测量方法都需要在管道内加设检测装置。这会增大流阻,并且需要用较长的直管段对流体进行整流,因此在安装使用时都会存在一定的限制。随着电子元件及半导体技术的发展,热式测量方法体现出了独特的优势。由于接触小、响应快、测量范围大,该方法已经广泛应用在工程实践之中<sup>[5-6]</sup>。但是在工程应用中存在高温管道,而这些管道通常又包有隔热层,一旦安装使用,就无法随意拆解。因此,利用管道壁面温度对内部流量和温度进行识别颇有研究意义。

红外无损检测技术是一种基于检测表面温度,借助红外热像仪对内部边界条件和初始条件、内热源项、热物性参数以及几何边界形状等信息进行识别的方法<sup>[7-10]</sup>。基于红外无损检测的高温管内流量及温度识别属于自然式被动红外检测技术,无需进行外部加热。该技术通过用红外热像仪对外壁面发射出的红外线进行成像而得到热像图,然后从中提取出沿管轴线方向上的壁面温度分布,并基于该数据求得管内流量及温度的识别结果。王焯等人<sup>[11]</sup>基于 Dittus-Boelter 公式建立了高温管道内流体平均温度以及外壁面温度分布变化的一维导热模型,并使用反问题算法——L-M 算法同时识别了管道入口处的流体流量及温度。他们发现相对于温度识别,流量识别结果受测温误差的影响更加明显。

为了更加全面地探讨流体流量及温度的识别规律,本文基于 Gnielinski 公式构建高温管

道一维导热模型,并使用 L-M 算法进行流量及温度的单参数识别,进而研究测温误差和测温点对识别精度的影响。

## 1 数学物理模型

图 1 为管道截面的示意图。高温流体的热量通过管内强迫对流换热、圆管壁导热以及外壁面自然对流换热和辐射换热传递给环境。

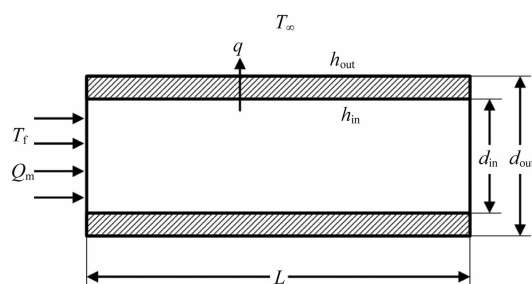


图 1 管道模型的示意图

在常规的流体管内湍流强迫对流换热关联式中,目前最为精确的是 Gnielinski 公式<sup>[12]</sup>:

$$Nu_f = \frac{h_{in} d_{in}}{k_f} = \frac{(f/8)(Re_f - 1000) Pr_f}{1 + 12.7(f/8)^{1/2} (Pr_f^{2/3} - 1)} c_t \quad (1)$$

对于液体,

$$c_t = \left( \frac{Pr_f}{Pr_{wi}} \right)^{0.01}, \quad \frac{Pr_f}{Pr_{wi}} = 0.05 - 20 \quad (2)$$

对于气体,

$$c_t = \left( \frac{T_f}{T_{wi}} \right)^{0.45}, \quad \frac{T_f}{T_{wi}} = 0.5 - 1.5 \quad (3)$$

式中,下标 f 和 wi 分别表示流体和内壁面;  $f$  为管内湍流流动的 Darcy 阻力系数,按  $f = (1.82 \lg Re_f - 1.64)^{-2}$  进行计算。

外壁的总换热系数为

$$h_{out} = h_{outc} + h_{outr} \quad (4)$$

式中,  $h_{outc}$  为自然对流换热系数;  $h_{outr}$  为辐射换热系数。

为了计算外壁面与环境之间自然对流换热的换热量,采用以下形式的大空间自然对流换

热实验关联式:

$$Nu_m = \frac{h_{out} d_{out}}{k_\infty} = C \left( \frac{g a_c \Delta t_c^3}{v^2} Pr_m \right)_m^n \quad (5)$$

单元长度管道的外壁辐射换热量为

$$\begin{aligned} q_r &= h_{out} (T_{wo} - T_\infty) \\ &= \epsilon_r c_b \left[ \left( \frac{T_{wo}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_\infty}{100} \right)^4 \right] \end{aligned} \quad (6)$$

式中,  $\epsilon_r$  为管道外壁的发射率;  $c_b$  为黑体辐射系数。

当热力系统达到稳态时, 单位长度管道的换热量为

$$\begin{aligned} q &= \frac{T_f - T_\infty}{\frac{1}{\pi h_{in} d_{in}} + \frac{1}{2\pi k_w} \ln \frac{d_{out}}{d_{in}} + \frac{1}{\pi h_{out} d_{out}}} \\ &= \frac{T_{wo} - T_\infty}{1/(\pi h_{out} d_{out})} \end{aligned} \quad (7)$$

式中, 下标 wo 表示外壁面;  $k_w$  为管壁导热系数。

单位长度管道内的流体温度变化为

$$\Delta T = \frac{q}{Q_m c_p / 3600} \quad (8)$$

若给定一维导热模型的几何尺寸(内径  $d_{in}$ 、外径  $d_{out}$ 、管长  $L$ )、物性参数(管壁导热系数  $k_w$ 、管道外壁发射率  $\epsilon_r$ )、边界条件(管内流量  $Q_m$ 、入口温度  $T_f$ 、环境温度  $T_\infty$ )以及一个很小的正数设定值  $\epsilon$ , 则正问题求解步骤如下:

(1) 给出第  $i$  个网格单元外壁面温度的初始值  $T_{wo}$ 。

(2) 根据式(4)~式(6)算得第  $i$  个单元管道的外壁面换热系数  $h_{out}^i$ 。

(3) 根据式(1)~式(3)算得第  $i$  个单元管道的内壁换热系数  $h_{in}^i$ 。

(4) 根据式(7)算得第  $i$  个网格单元的外壁面温度  $T_{wo, new}^i$ 。

(5) 对给定的初始值  $T_{wo}^i$  和计算得到的修正值  $T_{wo, new}^i$  进行比较。若二者之差的绝对值小于设定值  $\epsilon$ , 则认为  $T_{wo}^i$  已经收敛, 否则将  $T_{wo, new}^i$  代回步骤(2)重新进行计算, 然后再进行比较, 直至两次计算得到的  $T_{wo}^i$  差值小于设定

值  $\epsilon$  为止。

(6) 根据式(8)计算第  $i+1$  个网格单元的流体温度  $T_f^{i+1}$ 。

(7) 将流体温度  $T_f^{i+1}$  代入步骤(1), 计算相应网格单元的外壁面温度  $T_{wo}^{i+1}$ , 直至算完所有网格的管内流体温度  $T_f$  和外壁面温度  $T_{wo}$  为止。

## 2 反问题求解方法

管道内流量及温度的单参数识别就是根据外壁温度分布, 采用反问题算法来确定管内流体的流量或温度。将管内流量  $Q_m$  设为识别参数  $P_1$ , 将入口温度  $T_f$  设为识别参数  $P_2$ , 于是  $P_1$  和  $P_2$  就构成了反问题识别参数  $\mathbf{P}$ 。通过不断迭代使式(9)达到最小值时, 得到流量及温度的单参数识别结果:

$$S(\mathbf{P}) = [\mathbf{Y} - \mathbf{T}_{wo}(\mathbf{P})]^T [\mathbf{Y} - \mathbf{T}_{wo}(\mathbf{P})] \quad (9)$$

式中,  $\mathbf{T}_{wo}(\mathbf{P})$  为迭代计算中根据识别参数  $\mathbf{P}$  求解传热正问题时所得到的管道外壁温度分布;  $\mathbf{Y}$  为通过红外检测得到的某一流体流量及温度下管道外壁的温度分布。

### 2.1 L-M 算法

为使式(9)取最小值, 通过求导可得:

$$\nabla S(\mathbf{P}) = 2 \left[ -\frac{\partial \mathbf{T}_{wo}^T(\mathbf{P})}{\partial \mathbf{P}} \right] [\mathbf{Y} - \mathbf{T}_{wo}(\mathbf{P})] = 0 \quad (10)$$

对式(10)中的  $\mathbf{T}_{wo}(\mathbf{P})$  进行泰勒级数展开并去掉高阶项, 然后加入衰减参数  $\mu_{LM}^n$  来调节迭代速度, 得到 L-M 算法的迭代式<sup>[13-15]</sup>:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}^{n+1} &= \mathbf{P}^n + [(\mathbf{J}^n)^T \mathbf{J}^n + \mu_{LM}^n \boldsymbol{\Omega}^n]^{-1} (\mathbf{J}^n)^T \\ &\quad \cdot [\mathbf{Y} - \mathbf{T}_{wo}(\mathbf{P}^n)] \end{aligned} \quad (11)$$

式中,

$$\mathbf{J}^n = \left[ \frac{\partial \mathbf{T}_{wo}^T(\mathbf{P}^n)}{\partial \mathbf{P}^n} \right]^T \quad (12)$$

$$\boldsymbol{\Omega}^n = \text{diag}[(\mathbf{J}^n)^T \mathbf{J}^n] \quad (13)$$

式中,  $n$  为迭代次数。

当迭代开始时,  $\mu_{LM}^n$  采用一个较大的数值, 并以较快的迭代速度进行识别求解, 然后减小  $\mu_{LM}^n$  值, 得到最终解。

### 2.2 收敛条件

反问题识别的收敛条件为

$$S(\mathbf{P}) < \epsilon_{LM} \quad (14)$$

式中,  $\epsilon_{LM}$  为一个很小的正数。当考虑在温度测量结果中存在测温误差时,  $\epsilon_{LM} = m\sigma^2$ 。其中,  $\sigma$  为实际测量的标准偏差,  $m$  为测温点的个数<sup>[16-17]</sup>。

### 2.3 数值计算过程

管道内流体流量及温度反问题识别的数值计算过程如下:

(1) 对管道内的流体流量或温度作初始假设  $\mathbf{P}^0$ , 然后开始进行迭代计算;

(2) 代入正问题模型, 求得  $T_{wo}(\mathbf{P}^i)$ ;

(3) 检查是否满足式(14), 若满足则停止, 否则继续;

(4) 根据式(11)~式(13)求得  $\mathbf{P}^{i+1}$ , 并返回到步骤(2)。

### 3 算例与讨论

为了更加全面地探讨管道内流体流量及温度的识别规律, 本文采用数值实验开展相关工作。

在算例的几何模型中, 检测段管道的内径为 0.108 m, 壁厚为 0.003 m, 管长为 1.0 m。材料选择如下: 管内流质为空气, 其性质数据取自商业软件 COMSOL 材料库; 管壁为碳钢, 其导热系数为 17.6 W/(m·K), 外壁面的发射率为 0.95; 管外为空气自然对流, 环境温度为 298.15 K。

#### 3.1 外壁面温度随不同流体流量及温度的变化规律

在不同的流体温度下, 外壁面温度随流体流量的变化如图 2 所示。在不同的流体流量下, 外壁面温度随流体温度的变化如图 3 所示。

从图 2 中可以看出, 在相同的流体温度下, 当流体流量较低时, 外壁面温度随流体流量的变化速率较大; 随着流体流量的增加, 外壁面温度随流体流量的变化速率变缓, 而且两者之间越来越呈现出线性关系。流体温度越高, 外壁面温度随流体流量的变化速率越大。

从图 3 中可以看出, 在相同的流体流量下, 外壁面温度与流体温度之间基本成线性关

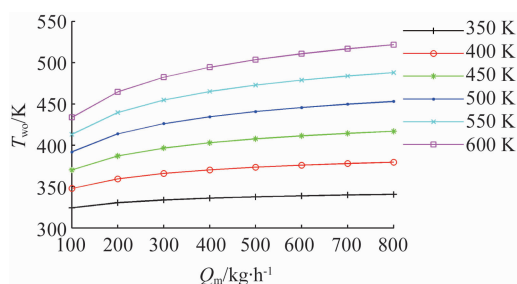


图 2 不同流体温度下外壁面温度随流体流量的变化

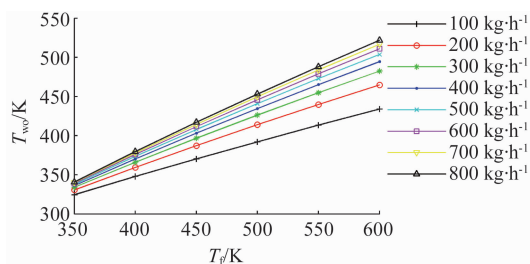


图 3 不同流体流量下外壁面温度随流体温度的变化

系。流体流量越大, 外壁面温度受流体温度的影响越大。

综上可得, 一个流体流量或温度对应于一个外壁面温度, 两者之间并不相互重叠, 即外壁面上某点的温度与流体流量或温度之间存在单值性条件。因此, 基于一个外壁面测温点信息即可开展流体流量及温度的单参数识别工作。

#### 3.2 单参数识别

将管内流体流量及温度识别结果的相对误差定义为反问题识别结果  $(Q_{m,inv}, T_{f,inv})$ , 与真实结果  $(Q_{m,tru}, T_{f,tru})$  之差的绝对值与真实结果的比值, 即

$$E(Q_m)_{avg} = \frac{|Q_{m,inv} - Q_{m,tru}|}{Q_{m,tru}} \quad (15)$$

$$E(T_f)_{avg} = \frac{|T_{f,inv} - T_{f,tru}|}{T_{f,tru}} \quad (16)$$

在已知流体温度时, 对管道内的流体流量进行反问题识别。测温点的个数越多, 信息越丰富, 但有用信息未必就越多。由上述分析可得, 在没有测温误差时, 单参数识别只需要外壁面上某一点的温度。当测温点数为 1、测温误差  $\sigma=0$  K 时, 在不同工况下的识别误差见



表 1 (流量  $Q_m$  的单位取  $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ , 温度  $T_f$  的单位取 K, 识别误差  $E(Q_m)_{\text{avg}}$  的单位取 %).

从表 1 中可以看出, 流体流量识别结果非常精确。当流体温度为 350 K 时, 流体流量识别结果存在相对较大的误差。尤其是当流体温度为 350 K、流体流量为 800 kg/h 时, 识别误差相对最大, 即流体流量越大、流体温度越小, 则流体流量识别误差越大。

表 1 不同工况下的流体流量识别误差  $E(Q_m)_{\text{avg}}$  ( $\sigma=0$  K)

$T_f$	$Q_m$				
	100	200	400	600	800
350	2.63e-06	0.0003	0.0196	0.2060	1.2845
400	1.81e-08	5.11e-06	0.0009	0.0120	0.0492
500	1.35e-10	4.19e-09	1.83e-05	0.0004	0.0049
600	1.11e-11	1.65e-09	1.55e-06	4.42e-05	0.0005

当存在测温误差时, 一般考虑测温误差呈正态分布, 因此需要考虑测温点个数对测温误差的影响。当测温点数取 1 时, 收敛条件  $\epsilon = m\sigma^2$  失去意义; 测温点数越多, 测温误差越能体现出其正态分布规律。在有测温误差时, 测温点数取 40。假定测温误差分别为  $\sigma=0.5$  K 和  $\sigma=1$  K, 则识别结果见表 2 和表 3。

表 2 不同工况下的流体流量识别误差  $E(Q_m)_{\text{avg}}$  ( $\sigma=0.5$  K)

$T_f$	$Q_m$				
	100	200	400	600	800
350	0.0069	0.0077	0.0093	0.0107	0.0121
400	0.0036	0.0041	0.0049	0.0057	0.0065
500	0.0019	0.0022	0.0027	0.0031	0.0035
600	0.0013	0.0015	0.0019	0.0022	0.0025

表 3 不同工况下的流体流量识别误差  $E(Q_m)_{\text{avg}}$  ( $\sigma=1$  K)

$T_f$	$Q_m$				
	100	200	400	600	800
350	0.0112	0.0141	0.0176	0.0205	0.0232
400	0.0061	0.0077	0.0096	0.0112	0.0126
500	0.0035	0.0044	0.0054	0.0062	0.0070
600	0.0025	0.0032	0.0039	0.0045	0.0050

从表 2 和表 3 中可以看出, 随着流体温度的升高, 由测温误差引起的流体流量识别误差逐渐减小; 流体流量越小, 流体流量识别误差越小。另外, 在有测温误差时, 直接使用反问题算法得到的识别结果非常好, 并没有放大测温误差; 通过单参数识别得到的流量识别结果比采用双参数识别时精确得多, 这就是单参数识别的优势所在。

在已知流体流量时, 对管道内的流体温度进行反问题识别。当测温点数为 1、测温误差  $\sigma=0$  K 时, 不同工况下的识别误差见表 4。

表 4 不同工况下的流体温度识别误差  $E(T_f)_{\text{avg}}$  ( $\sigma=0$  K)

$Q_m$	$T_f$			
	350	400	500	600
100	4.75e-08	1.62e-08	6.64e-09	4.71e-09
200	5.07e-09	2.06e-09	8.52e-10	7.38e-10
400	4.03e-10	1.90e-10	1.07e-10	8.44e-11
600	9.05e-11	4.79e-11	3.00e-11	2.42e-11
800	3.31e-11	1.90e-11	1.28e-11	1.04e-11

从表 4 中可以看出, 流体温度识别结果非常精确。同时可知, 管内流体流量识别误差略大于流体温度识别误差; 流体流量越大, 流体温度的识别精度越高; 流体温度越大, 流体温度的识别结果越好。

考虑到实际测量, 将测温点数取 40, 最终得到了表 5 和表 6 所示的识别结果。

表 5 不同工况下的流体温度识别误差  $E(T_f)_{\text{avg}}$  ( $\sigma=0.5$  K)

$Q_m$	$T_f$			
	350	400	500	600
100	0.0003	0.0002	0.0002	0.0001
200	0.0002	0.0002	0.0002	0.0001
400	0.0002	0.0002	0.0001	0.0001
600	0.0002	0.0002	0.0001	0.0001
800	0.0002	0.0002	0.0001	0.0001

从表 5 和表 6 中可以看出, 当存在测温误差时, 流体温度的识别精度有所下降, 但是识别结果还是非常令人满意的, 并没有放大测温

误差；流体温度的识别误差随着流体流量的增大而减小，并随着流体温度的增大而减小。

表6 不同工况下的流体温度识别误差  $E(T_f)_{avg}$  ( $\sigma=1$  K)

$Q_m$	$T_f$			
	350	400	500	600
100	0.0012	0.0011	0.0008	0.0007
200	0.0008	0.0007	0.0005	0.0004
400	0.0005	0.0005	0.0004	0.0003
600	0.0004	0.0004	0.0003	0.0002
800	0.0004	0.0003	0.0003	0.0002

#### 4 结束语

本文采用一维简化模型对高温管道传热问题进行了求解计算，并基于外壁面温度分布对管道内部流量及温度的单参数识别方法进行了研究，最后得到了以下主要结论：

(1) 流体流量或温度与外壁面测温点温度之间遵循一一对应的变化规律。在不考虑测温误差的情况下，基于一个测温点就可以进行单参数识别。

(2) 在不考虑测温误差时，管内流体流量及温度的单参数识别误差都非常小，而且流体流量识别误差略大于流体温度识别误差。流体流量越小，流体温度越高，则流体流量的识别精度越高；流体流量越大，流体温度越高，则流体温度的识别精度越高。

(3) 当存在外壁温度测量误差时，流体流量单参数识别结果受测温误差的影响非常小，并且比双参数识别结果精确得多；流体温度单参数识别结果比流体流量单参数识别结果更加精确。

#### 参考文献

[1] 刘炳宏. 多相流测量中涡轮流量计的影响因子分析 [J]. 内蒙古石油化工, 2015, 19(16): 71-72.  
 [2] 汪伟, 徐科军, 方敏, 等. 一种气体超声波流量计信号处理方法研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(9): 1365-1373.  
 [3] Franca D R, Jen C K, Ono Y. Contrapropagating Ultrasonic Flowmeter Using Clad Buffer Rods for

High Temperature Measurements [J]. *Journal of Dynamic Systems Measurement & Control*, 2011, 133(1): 011007.

- [4] 陈子静, 朱小良. 一种基于广义回归神经网络的超声波流量传感器系数求解方法 [J]. 传感技术学报, 2015, 28(1): 56-61.  
 [5] 梁国伟, 文英杰, 黄震威, 等. 热式气体流量计原理及影响因素分析研究 [J]. 中国计量学院学报, 2008, 19(3): 201-205.  
 [6] 高振斌, 潘星, 田丰, 等. 基于热敏电阻的热式液体流量传感器 [J]. 仪表技术与传感器, 2014, 9: 12-15.  
 [7] 孙国栋, 吴云峰, 叶玉堂, 等. 涡轮叶片红外热波无损检测技术研究 [J]. 红外, 2009, 30(6): 39-43.  
 [8] 孙洁, 孟庆娇, 黄晓婷. 基于红外热像技术铸坯表面质量检测的研究 [J]. 红外技术, 2015, 37(8): 707-710.  
 [9] Huo Y, Zhang C L. Quantitative Infrared Prediction Method for Defect Depth in Carbon Fiber Reinforced Plastics Composite [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(14): 321-328.  
 [10] 孙怡, 王焯, 彭少博, 等. 用红外热像仪与红外测温仪诊断电气设备故障的对比研究 [J]. 红外, 2015, 36(8): 28-33.  
 [11] 王焯, 杨立. 高温管道内流体流量及温度识别研究 [J]. 计量学报, 2017, 38(4): 477-480.  
 [12] 门启明. 非能动余热排出热交换器传热机制与计算方法研究 [D]. 上海: 华东理工大学, 2015.  
 [13] 吕事桂, 杨立, 范春利, 等. 采用混沌-LM混合解法的材料缺陷单面红外检测定量辨识 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(2): 317-323.  
 [14] 范春利, 孙丰瑞, 杨立, 等. 电气设备零件内部三维缺陷的定量红外识别算法研究 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(2): 159-164.  
 [15] Özisik M N, Orlande H R B. Inverse Heat Transfer [M]. Boca Raton: CRC Press, 2000.  
 [16] Huang C H, Liu C Y. A Three-dimensional Inverse Geometry Problem in Estimating Simultaneously Two Interfacial Configurations in a Composite Domain [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2010, 53(1-3): 48-57.  
 [17] 范春利, 孙丰瑞, 杨立, 等. 基于红外测温的内部缺陷尺寸、方位的计算方法研究 [J]. 热科学与技术, 2005, 4(1): 82-86.