

基于 LCSR 法的电阻温度计动态响应过程

章振文¹, 宋延勇^{1,2}, 梁毅¹, 苏明旭¹

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 上海仪器仪表自控系统检验测试所有限公司, 上海 200233)

摘要: 响应时间是影响电阻温度计动态测量误差的关键因素。回路电流阶跃响应(LCSR)法可实现 在役电阻温度计响应时间的原位测量, 但其中热动态传热过程的变焦耳热和内外部影响因素、转换关系及阶数仍有待进一步研究。基于 COMSOL Multiphysics 软件, 建立多物理场耦合模型, 实现 LCSR 中电流、温度场、外部流场的相互耦合和全过程仿真, 重点讨论电阻丝变焦耳热产生机理。建立 LCSR 法与浸入法的转换关系式, LCSR 动态响应曲线经三阶关系式转换, 与浸入法对比, 响应时间相对误差仅为 1.51%。开展 LCSR 法响应时间影响因素研究, 深入分析外部流体流速、内部填充材料与空气层对响应时间的影响。同步进行 LCSR 法和浸入法验证试验, 对比表明: LCSR 法响应时间仿真与试验结果的相对误差为 2.46%; 在 3 种流速下, LCSR 试验数据经转换后的响应时间与浸入法试验结果的相对误差均小于 5%, 验证了建立的转换关系对试验结果的适用性。

关键词: 电阻温度计; 原位测量; LCSR; 响应时间; 影响因素; 数值仿真

中图分类号: TK 311 **文献标志码:** A

Dynamic response process of resistance temperature detector based on LCSR method

ZHANG Zhenwen¹, SONG Yanyong^{1,2}, LIANG Yi¹, SU Mingxu¹

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Shanghai Inspection and Testing Institute of Instruments and Automation Systems Co., Ltd., Shanghai 200233, China)

Abstract: The response time is a key factor affecting the dynamic measurement error of resistance temperature detector. The loop current step response (LCSR) method can realize the in-situ measurement of the response time of in-service resistance temperature detector. But the variable Joule heat, internal and external influencing factors on thermodynamic heat transfer processes, the conversion

收稿日期: 2024-12-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52376162); 上海理工大学卓越工程师联合培养实践基地项目(1024-301-020)

第一作者: 章振文(1998—), 男, 硕士研究生。研究方向: 温度传感器响应时间测量。E-mail: 13554350942@163.com

通信作者: 苏明旭(1973—), 男, 教授。研究方向: 两相流动及相关热工信号测量。E-mail: sumx@usst.edu.cn

引文格式: 章振文, 宋延勇, 梁毅, 等. 基于 LCSR 法的电阻温度计动态响应过程[J]. 上海理工大学学报, 2026, 48(1): 41-49.

Citation: ZHANG Zhenwen, SONG Yanyong, LIANG Yi, et al. Dynamic response process of resistance temperature detector based on LCSR method[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2026, 48(1): 41-49.

relationship and order are still to be studied. Based on COMSOL Multiphysics software, a multi-physical field coupling model was established to numerically study the coupling process of electric current excitation, temperature field, and external flow field in the LCSR, focusing on the mechanism of variable Joule heat generation of resistance wire involved. Consequently, the conversion relation between LCSR method and plunge test was established. The LCSR dynamic response curve was transformed by the third-order relation equation, and compared with the plunge test, the relative error of response time was only 1.51%. A study on the factors affecting LCSR response time was conducted, and the effects of external fluid flow rate, internal filling material and air layer on the response time were analyzed in depth. LCSR and plunge test validation experiments were simultaneously conducted. The comparison shows that the relative error between the simulation results and the experimental results of the response time of LCSR method is 2.46%. The LCSR experimental data were converted by the relation equation, and the results are compared with the experimental results of plunge test at three flow velocities, and the relative errors are all less than 5%, verifying applicability of the established conversion relationship to the experiments.

Keywords: *resistance temperature detector; in-situ measurement; LCSR; response time; influencing factors; numerical simulation*

电阻温度计(resistance temperature detector, RTD)因其线性度、稳定性良好和抗干扰能力强等优势,广泛应用于工业领域。在压水堆核电站中,管道内冷却剂的温度直接反映了反应堆功率,在发生较大温度瞬变时需将即时温度信号传输至调节和保护系统,这对运行状态下电阻温度计的动态性能和响应时间有严格要求^[1-4]。响应时间定义为输出信号达到稳定值 63.2% 时所需的时间。根据核电行业现行标准,响应时间的测量主要分为浸入法(plunge test)与回路电流阶跃响应(loop current step response, LCSR)法。浸入法在实验室条件下进行离线测量,电阻温度计快速插入高温流体中,外部温度变化引发其温度阶跃产生,获取的响应时间即为电阻温度计响应时间,该方法已得到广泛的使用和认可。但电阻温度计的安装与过程条件均对响应时间的测量存在影响,拆卸后的离线测量无法准确反映其在役响应时间。LCSR 以内部阶跃焦耳热替代外部热环境骤变,可对电阻温度计实现原位、在线测量,避免拆除或运输过程对传感器的损害,从而对在役温度传感器的精度、故障状态、剩余寿命进行客观评估^[5-8]。

LCSR 法测量原理是基于电阻温度计内部的焦耳热效应。在初始平衡状态,电阻温度计内部温度与外界流体温度一致,通过引线施加 40~80 mA 的直流电流至电阻丝,产生的焦耳热使电阻丝温

度上升,并开始与外界流体进行热交换,当两者达到动态平衡时,电阻温度计经历了由内部电流激励引发的温度阶跃响应过程。

LCSR 法在核电领域展现出良好的应用前景,与之相关的核电行业标准于 2015 年正式发布^[9],获得国内外学者的关注。Rupnik 等^[10]基于虚拟仪器技术,设计了电阻温度计 LCSR 法动态特征测量系统,以 PT100 为对象开展性能测试。蔡宛睿等^[11]探究了 LCSR 实验中加热电流、时间、次数对电阻温度计响应时间测量的影响。Klebba 等^[12]从传热学角度分析响应时间影响因素,基于响应时间优化电阻温度计的校准过程。白鸽^[13]通过仿真分析,对感温元件、外壳结构和进气孔相对气流角度进行优化,以改善铠装热电阻动态特性。张磊等^[14]基于 FloEFD 仿真软件,分析骨架材料与骨架结构对镍电阻响应时间的影响,并设计相应骨架结构开展试验验证。

目前,基于 LCSR 法测量的响应时间(简称 LCSR 法响应时间)影响因素的研究仍然存在困难。通过控制变量法研制同型号不同材料参数的电阻温度计,对工艺精度要求极高,很难实现。数值仿真技术减少了试验所需的时间和成本,非常适合响应时间影响因素的研究^[15-17]。既有的 LCSR 过程数值研究通常以恒定热源简化热量产生机理^[18],但在 LCSR 过程中,焦耳热引起温度场变化,会

同步导致电阻丝阻值改变, 该反馈机制使得焦耳热呈现出非线性变热源特性。鉴于 LCSR 过程的复杂性以及快速动态响应特性, 作者基于 COMSOL 平台实现电流、温度场、流场的相互耦合, 数值仿真比较了恒定热源 LCSR、变热源 LCSR 和浸入法动态响应曲线。在变热源模型基础上, 进一步探讨 LCSR 法与浸入法之间的转换关系, 并开展 LCSR 法响应时间影响因素的研究。最后搭建响应时间测试装置, 验证了恒定热源对焦耳热的简化处理会引入一定的动态特征误差, 同时证实了转换关系式在试验数据上的适用性。

1 LCSR 动态响应传热模型

如图 1 所示, 针对电阻温度计的轴对称结构, 采用圆柱坐标系, 选取其一半作为研究对象。热量经历两个传递过程: a. 缠绕在骨架表面的感温元件产生的焦耳热通过填充材料与保护套管进行非稳态导热; b. 焦耳热在保护套管外壁与一定温度和流速的外部流体进行对流换热^[19]。

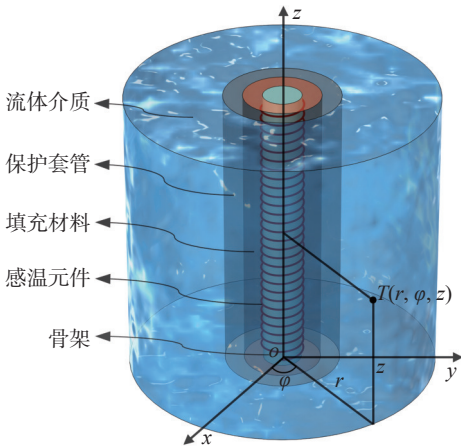


图 1 电阻温度计传热模型

Fig.1 Heat transfer model of RTD

建立含有非齐次边界条件的三维轴对称非线性非稳态导热微分方程如下:

$$\rho(T)c(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \lambda(T)\left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r}\right) + \lambda(T)\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \lambda(T)\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{I^2 R(T)}{V} \quad (1)$$

式中: T 为温度; t 为时间; $\lambda(T)$ 为导热系数; $\rho(T)$ 为密度; $c(T)$ 为比热容; I 为电流; $R(T)$ 为电阻; V 为体积; $I^2 R(T)/V$ 表示单位体积内热源。流体流动以对流换热的形式影响热量的传递, 同时温度场的变化实时影响流体的密度与黏度等物性

参数, 实现共轭传热与流场的双向耦合。

初始条件为

$$T(r, \varphi, z, 0) = T_0 \quad (2)$$

式中, T_0 为电阻温度计与外界流体一致的初始温度。

由于对称性, 圆柱中心线处热流密度为 0, 第二类边界条件为

$$-\lambda(T)\left(\frac{\partial T}{\partial n}\right)_c = 0 \quad (3)$$

式中, n 为法线方向。

保护套管外壁面的第三类边界条件为

$$-\lambda(T)\left(\frac{\partial T}{\partial n}\right)_w = h(T_w - T_f) \quad (4)$$

式中: h 为对流换热系数; T_w 为保护套管外壁面温度; T_f 为与外壁面接触的流体温度。

保护套管外壁面的热交换速率主要受对流换热系数的影响, 采用流体横掠单管强制对流换热模型进行描述。随着雷诺数 Re 的增大, 流动由层流逐渐转变为湍流, 伴随着绕流脱体和旋涡脱落等流动特征的出现, Churchill 和 Bernstein 给出努塞尔数 Nu 的关联式^[20]:

$$Nu = 0.3 + \frac{0.62Re^{\frac{1}{2}}Pr^{\frac{1}{3}}}{\left[1 + \left(\frac{0.4}{Pr}\right)^{\frac{2}{3}}\right]^{\frac{1}{4}}} \times \left[1 + \left(\frac{Re}{282000}\right)^{\frac{5}{8}}\right]^{\frac{4}{5}} \quad (5)$$

式中: Nu 为壁面上流体的无量纲温度梯度; Re 为流体惯性力与黏性力之比; Pr 为普朗特数, 表示动量扩散能力与热量扩散能力之比。定性温度为 $(T_w + T_f)/2$, 特征长度为保护套管外径 d 。

传热模型中内热源的逐渐增大由感温原件热电阻效应引起, 对于常见的铂电阻丝感温元件, 温度范围在 $0 \sim 850 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 其电阻与温度具有以下关系^[21]:

$$R_T = R_0(1 + AT + BT^2) \quad (6)$$

式中: R_T 为测量温度时的铂电阻阻值; R_0 为温度 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的铂电阻阻值, 取值 $100 \text{ } \Omega$; A 为 $3.9083 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$; B 为 $-5.775 \times 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-2}$ 。铂电阻阻值随内部温度的上升而增加, 产生的焦耳热以内热源项的形式影响热传导过程。

2 有限元模型建立

2.1 快响应铂电阻温度计建模

选择核电在役的 1E 级快响应铂电阻温度计作

为研究对象,金属铂丝均匀地缠绕在陶瓷骨架表面,封装于不锈钢管内,并注入氧化镁粉填充压实,最终通过模具拉伸形成一体化结构^[22]。如图2所示,左侧为浙江伦特生产的1E级快响应铂电阻温度计,右侧为其内部结构细节。

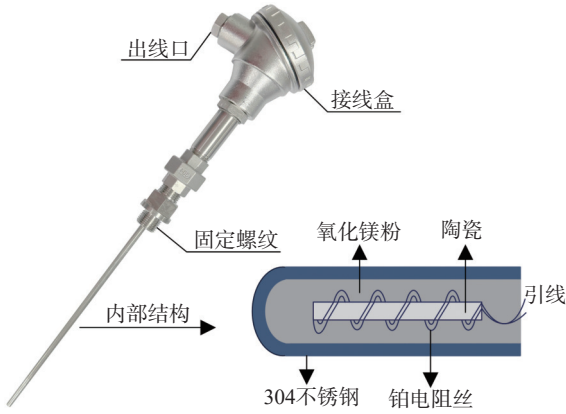


图2 铂电阻温度计结构示意图

Fig.2 Schematic structure of platinum resistance temperature detector

为建模的方便,对模型进行了关键特征保留和简化:铂电阻丝以螺旋形规则缠绕在骨架上,与填充材料充分接触,提高其对温度变化的灵敏度;忽略铂电阻温度计内部的引线,排除因引线电阻而引入的误差;假设铂电阻温度计内部各部分材质均匀、形状规则、材料内部无空气缝隙,忽略各部分结构间的接触热阻。仿真模型如图3所示。

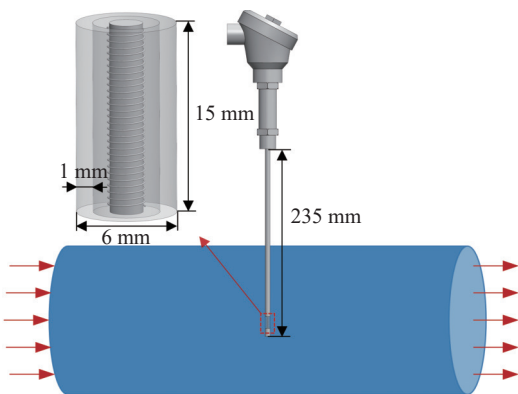


图3 仿真模型示意图(铂丝直径0.1 mm)

Fig.3 Schematic diagram of the simulation model (platinum wire diameter 0.1 mm)

根据NB/T 20148标准,流道的宽度应不小于被测电阻温度计直径的10倍,构建半径为150 mm、长度为800 mm的流体域。铂电阻温度计浸没深度为167.5 mm,确保铂电阻丝1/2置于流道中心,未浸入流体的部分设置为热绝缘,以

忽略与空气的对流换热和辐射换热。表1给出室温20℃时材料的热物性参数。

表1 材料热物性参数

Tab.1 Thermophysical parameters of materials

铂电阻部件	材质	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$c/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	$\lambda/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$
骨架	陶瓷	2200	730	1.40
感温元件	铂	21389	133	72
填充材料	氧化镁粉	3648	920	43
保护套管	不锈钢	7860	473	15
流体介质	水	998	4187	0.59

2.2 模型网格划分与网格无关性验证

采用适用性较好的非结构化四面体网格处理结构复杂的铂电阻温度计感温端,对于形状规则的延伸端则采用结构化的棱柱网格,以减少网格数量,提高计算效率。针对尺寸较小的铂电阻丝及温度梯度显著的感温区域,进行网格加密处理,以减少数值仿真中的离散误差。考虑到铂电阻温度计与流体接触的流热耦合面具有流动边界层和热边界层的特征,为了准确解析流体流动与热交换过程,采用精细的边界层网格数值求解。开展网格无关性验证,根据响应时间结果,180万~200万网格条件下响应时间偏差小于1%,因此,选取最大单元尺寸为0.2 mm,网格总数为180万,网格划分情况如图4所示。



图4 铂电阻温度计三维网格划分示意图

Fig.4 Schematic diagram of three-dimensional meshing of platinum resistance temperature detector

2.3 流动模型与边界条件

基于流体横掠圆柱体流动特性,计算雷诺数 Re 为5930,采用标准 $k-\epsilon$ 紊流模型^[23]。设置边界条件,将流体入口设置为速度入口,出口为压力出口,壁面条件设置为无滑移边界。采用内置的阶跃函数,对入口速度进行平滑处理,在较小时间跨度内实现物理量的递增,以避免入口端与边界条件初始值不一致。模型求解分为两步,首先对流体物理场进行稳态求解,再以稳定流场作为初始值进行瞬态研究,有效减少瞬态计算的收敛困难和数值震荡。根据NB/T 20069^[24]和NB/T 20148^[25]标准规定,LCSR法与浸入法相应的仿真工况如表2所示。

表 2 铂电阻温度计动态响应仿真工况

Tab.2 Dynamic response simulation working conditions of platinum resistance temperature detector

仿真方法	铂电阻温度/℃	水流温度/℃	$u/(m \cdot s^{-1})$	I/mA
LCSR法	20	20	1	50
浸入法	20	75	1	

在 LCSR 法瞬态研究中, 铂电阻温度计置于流速 1 m/s 的水流中, 二者初始温度均为 20 ℃。对于 LCSR 变热源模型, 铂电阻丝上端面为电流输入端, 下端接地, 外表面设置为电绝缘, 确保电流仅沿铂电阻丝缠绕方向传导, 初始时刻向铂电阻丝通入 50 mA 阶跃电流, 产生的焦耳热使铂电阻丝温度迅速上升。而在 LCSR 恒定热源模型中, 忽略内部铂电阻丝以简化电热耦合机制。通过计算, 在温度 20 ℃ 和电流 50 mA 条件下, 铂电阻丝产生的焦耳热功率为 0.269 W, 将其作为边界热源, 以阶跃信号的形式施加于陶瓷骨架外表面, 替代 LCSR 过程中的变焦耳热。在浸入法瞬态研究中, 铂电阻温度计初始温度设置为 20 ℃, 流体初始温度为 75 ℃, 并以 1 m/s 的流速横掠温度计进行对流换热, 模拟浸入法试验外部流体温度阶跃的产生。值得注意的是, LCSR 变热源模型与浸入法模型均监测铂电阻丝加权平均温度随时间的变化, 而 LCSR 恒定热源模型则监测陶瓷骨架外表面加权平均温度随时间的变化, 为保证计算结果的收敛性和平滑性, 时间步长 Δt 设定为 0.001 s, 间隔 0.01 s 存储一次结果。

3 转换关系式验证

研究电阻温度计的动态响应过程, 采用集总参数网格法求解传热方程。构造传递函数, 将内部温度阶跃变化的响应与外部温度阶跃变化的响应建立起关联, 实现 LCSR 法向浸入法的转换, 从而建立 LCSR 法响应时间的数据处理方法。

由外部流体温度变化导致电阻温度计动态响应的传递函数为^[26]

$$G_{\text{Plunge}} = \frac{1}{(s-p_1)(s-p_2)\cdots(s-p_n)} \quad (7)$$

由内部焦耳热导致电阻温度计动态响应的传递函数为

$$G_{\text{LCSR}} = \frac{(s-z_1)(s-z_2)\cdots(s-z_n)}{(s-p_1)(s-p_2)\cdots(s-p_n)} \quad (8)$$

式中: s 为拉普拉斯算子; p_n 为传递函数极点; z_n 为传递函数零点。

无论外部流体温度变化, 还是焦耳热引起的温度变化, 都以单位阶跃信号形式输入, 通过拉普拉斯逆变换即可得到对应的时域模态方程:

$$T_{\text{Plunge}}(t) = A_0 + A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} + \cdots + A_n e^{p_n t} \quad (9)$$

$$T_{\text{LCSR}}(t) = B_0 + B_1 e^{p_1 t} + B_2 e^{p_2 t} + \cdots + B_n e^{p_n t} \quad (10)$$

式中: T 为温度; t 为时间; A_n 、 B_n 为时域动态响应方程常数。常数值取决于动态特性研究方法本身的传热机理, 而极点值取决于电阻温度计本身的几何尺寸与热特性。因此, LCSR 动态响应方程与浸入法动态响应方程具有一致的极点。

其中:

$$A_0 = \frac{1}{(-p_1)(-p_2)(-p_3)(-p_4)\cdots(-p_n)} \quad (11)$$

$$A_1 = \frac{1}{(p_1)(p_1-p_2)(p_1-p_3)(p_1-p_4)\cdots(p_1-p_n)} \quad (12)$$

$$A_2 = \frac{1}{(p_2)(p_2-p_1)(p_2-p_3)(p_2-p_4)\cdots(p_2-p_n)} \quad (13)$$

.....

采用非线性方程(10)对 LCSR 动态响应曲线进行拟合, 获取其模态响应方程的 p_n , 代入方程(11)~(13), 计算得到 A_n 值。将上述计算得到的 p_n 与 A_n 代入方程(9)中, 即可获得由 LCSR 法向浸入法转换的等效模态方程和响应曲线, 进而计算出响应时间。由于 LCSR 法与浸入法的温升不一致, 为便于比较响应曲线的变化特征, 对数据进行归一化处理, 导入温度数据矩阵, 逐行进行归一化, 计算公式如下:

$$y = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (14)$$

式中: x_{\max} 和 x_{\min} 分别表示温度数据的最大值和最小值; x 为输入的温度值; y 为归一化后的输出值。图 5 给出了归一化后变热源 LCSR、恒定热源 LCSR 和浸入法的动态响应曲线。

如图 5 所示, 在浸入法动态响应初始阶段, 由于电阻温度计填充材料与保护套管的热惯性, 当外部温度阶跃变化时, 电阻丝的温度响应会出现一个短暂的延迟时间 (deadtime)。而 LCSR 法热量直接产生于感温元件上, 响应曲线在初始阶段更为陡峭, 并能更快地跟随外部温度的变化。两种方法因热量产生方式与传递方向的差异性, 呈现出不同的动态响应特征。根据动态响应曲线计

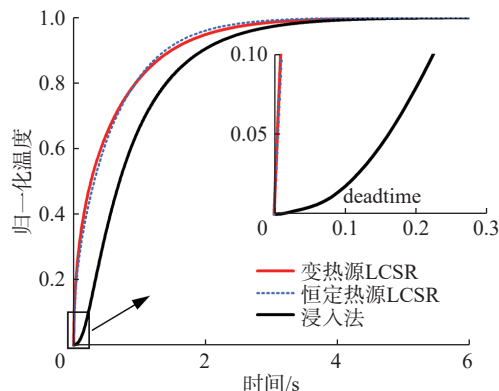


图5 变热源 LCSR、恒定热源 LCSR 和浸入法动态响应曲线

Fig.5 Dynamic response curves of variable heat source LCSR, constant heat source LCSR and plunge test

算可得, 变热源 LCSR、恒定热源 LCSR 和浸入法的响应时间分别为 0.475、0.520、0.929 s。为进一步探究 LCSR 法最佳转换阶数, 对变热源 LCSR 响应曲线进行二阶、三阶和四阶 ($n=2,3,4$) 转换, 并与浸入法响应曲线对比, 如图 6 所示。

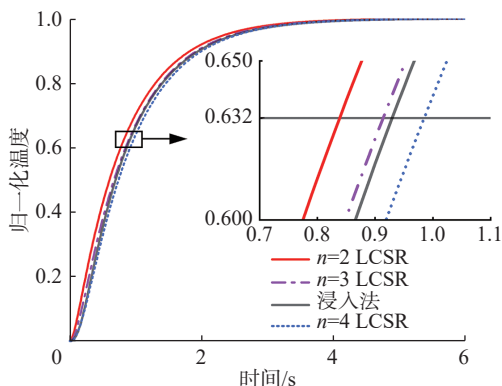


图6 浸入法和变热源 LCSR 转换动态响应曲线

Fig.6 Dynamic response curves of plunge test and transformed variable heat source LCSR

结果表明, $n=3$ 时, LCSR 经转换得到的动态响应曲线与浸入法动态响应曲线最为接近。由局部放大图可知, 两者响应时间分别为 0.915 s 和 0.929 s, 相对误差仅为 1.51%。相比之下, $n=2$ 和 $n=4$ 时, LCSR 经转换得到的动态响应曲线与浸入法动态响应曲线具有一定偏离, 响应时间分别为 0.841 s 和 0.985 s, 与浸入法响应时间相对误差高达 9.47% 和 6.03%。其原因为: 拟合方程(10)中项数过低, 无法捕捉原始数据中的复杂关系和动态变化; 而项数过高则导致原始数据噪声和异常值被放大。

4 LCSR 法响应时间影响因素分析

LCSR 法响应时间受内部因素和外部因素的影

响。内部因素主要为电阻温度计机械结构、材料性能和封装工艺; 外部因素则主要取决于流固边界的对流换热系数 h , 该值受流体介质物性参数和流体流速等影响。本节通过控制变量法分析流速和填充材料对 LCSR 法响应时间的影响, 为电阻温度计的性能优化和设计提供参考。

4.1 流速影响

根据 Nu 关联式, 流速是影响对流换热系数的主要因素, 温度和压力则通过改变流体物性参数间接影响对流换热过程。对于常见的测量介质水, 可忽略这一影响^[27]。选取 0.1 ~ 1 m/s 区间内 10 个工况点进行仿真分析, 覆盖了铂电阻温度计校准常用的流速范围。计算各个工况响应时间并通过幂函数拟合, 得到响应时间 $t_{0.632}$ 与流速 u 的关系式, 拟合相关性 R^2 为 0.997 3, 并绘制相应的变化关系曲线, 如图 7 所示。

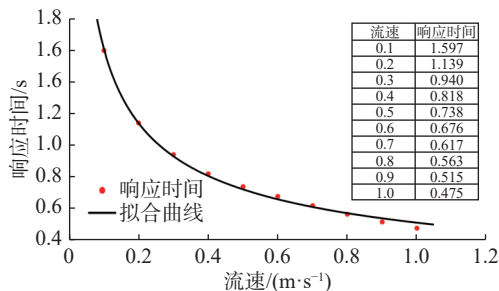


图7 响应时间随流速变化关系曲线

Fig.7 Response time versus flow rate curve

$$t_{0.632} = 0.510 1u^{-0.498 41} + 2.222 9 \times 10^{-14} \quad (15)$$

研究表明, LCSR 法响应时间随流速变化的规律可通过幂函数精确拟合, 基于集中参数法和一阶系统模型的简化, 理论推导出来的浸入法响应时间与流速变化关系式同样呈现幂函数形式。但是, 该拟合仅基于 0 ~ 1 m/s 流速范围内的 10 个工况点, 基于拟合关系的外推仍具有一定的不确定性。如图 7 所示, 随着流速的减小, 响应时间呈现逐渐增大的趋势, 在 0.5 ~ 1 m/s 高流速条件下, 流速每降低 0.1 m/s, 响应时间增长率不超过 10%; 而在 0 ~ 0.5 m/s 低流速条件下, 响应时间增长率大幅度增加, 当流速降至 0.1 m/s, 响应时间增长率高达 40.21%, 即低流速下流速变化对响应时间的影响更显著。从传热模型分析可知, 响应时间由内部导热热阻 R_{in} 与外部换热热阻 R_{out} 共同决定, 当毕渥数 ($Bi=hd/\lambda$) 较大时, R_{out} 在总热阻中占比较小, 流速变化对响应时间的影响较小。反之, 当 Bi 较小时, 响应时间更易受到流速变化

的影响。

4.2 填充材料影响

铂电阻温度计动态性能受保护套管厚度、骨架材料、铂丝纯度等内部因素影响, 其中填充材料的热特性和密实度尤为关键。鉴于粉末填充工艺的复杂性, 工业铂电阻温度计内部不可避免存在孔隙率。选取氧化镁粉、氧化铝粉和导热硅脂 3 种常用的填充材料进行仿真分析, 仿真过程中热物性参数随过程温度实时变化, 避免定物性参数的简化对仿真结果的影响^[28]。20 °C 时填充材料的热物性参数如表 3 所示。

表 3 填充材料热物性参数

Tab.3 Thermophysical parameters of filling materials

填充材料	$\rho / (\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$c / (\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	$\lambda / (\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	工艺加工性
氧化镁粉	3648	920	43	较难
氧化铝粉	3990	764	34	较难
导热硅脂	970	603	5	容易
空气	1.205	1005	0.026	

鉴于仿真对象与 LCSR 法的快速动态响应特性, 选择 0.2 m/s 低流速工况进行仿真分析。同时为了探究内部空气间隙对动态响应的影响, 在保护套管与氧化镁粉之间构建了 0.01 mm 的空气层。不同填充材料动态响应曲线如图 8 所示。

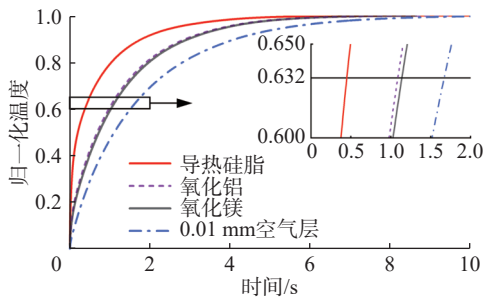


图 8 不同填充材料下的动态响应曲线

Fig.8 Dynamic response curves with different filling materials

比较 3 组仿真结果可知, 在感温元件与保护套管之间填充氧化镁粉和氧化铝粉时, 响应时间为 1.139 s 和 1.087 s, 二者差异不大。而填充凝胶状导热硅脂时, 响应时间降至 0.446 s, 动态响应速度大幅提升, 表明不同填充材料对响应速度的影响存在差异性。当保护套管与氧化镁粉之间存在 0.01 mm 空气层时, 响应时间从 1.139 s 增加至 1.668 s, 增长率高达 46.44%, 显著削弱了动态响应性能。基于热扩散系数 ($\alpha = \lambda / \rho c$) 探究填充材料热

物性参数对 LCSR 动态特性的影响。研究表明, 动态响应的稳态温度与导热系数成反比, 稳态时间与比热容和密度成正比, 而响应时间为输出信号达到稳定值的 63.2% 所需时间, 由于不同填充材料的稳态温度不同, 响应时间与热扩散系数不能通过简单的正反比关系描述, 这与浸入法有所不同。在浸入法中, 动态响应稳态温度始终与流体温度一致, 可得出浸入法响应时间与热扩散率成反比这一结论。因此, 为提升铂电阻温度计动态响应速度, 可选用球形氧化镁作为填充材料, 其独特结构有助于形成高效导热网格, 导热系数高达 40~60 W/(m·K)。此外, 将导热硅脂与氧化铝粉混合成浆状后进行封装的方法, 可减少空气间隙, 优化热传导过程, 并提高抗振性能。

5 动态响应试验验证

为验证动态响应仿真分析模型的准确性, 选取仿真对象 1E 级快响应铂电阻温度计开展试验, 进行 LCSR 法和浸入法响应时间测试, 测试装置如图 9 所示。浸入法试验需预先通过控制系统调节电机转速与水槽内壁面加热功率, 以达到试验条件下的恒温恒速状态, 待铂电阻温度计在 20 °C 恒温水槽中达到热平衡后, 通过机械臂快速插入 75 °C 的 1 m/s 旋转水槽中, 实现铂电阻外部温度阶跃变化。LCSR 法试验中, 首先将铂电阻温度计置于 20 °C 的 1 m/s 旋转水槽中, 通过测试机箱向其输入 1 mA 激励电流, 以消除内部显著的温度梯度, 待信号稳定后, 输入 50 mA 阶跃电流进行测试。两项试验均采用 NI USB-6212 数据采集卡, 以 1 kHz 采样率获取电压动态响应曲线。为确保记录铂电阻温度计动态响应全过程, 采集时间设置为响应时间的 5 倍以上, 通过自行开发程序进一步分析其动态性能特征^[29-30]。

测试结果如表 4 所示, 为确保试验工况与仿真工况一致, 进行了 3 次重复测试。在 1 m/s 流速条件下, LCSR 法测试结果平均值为 0.487 s, 与图 5 变热源 LCSR 和恒定热源 LCSR 仿真结果对比, 相对误差为 2.46% 和 6.78%, 这表明变热源模型在模拟实际情况时具有更高的精度和适用性。浸入法测试结果的平均值为 1.040 s, 与仿真结果相差 0.111 s, 偏差主要原因在于二者外部温度阶跃的实现方式不同。在试验过程中, 试验信号的



图9 电阻温度计响应时间测试装置

Fig.9 RTD response time test device

产生始于铂电阻温度计与流体接触瞬间，铂电阻温度计从接触流体至完全浸没期间，感温元件各部分受热并不均匀。而在仿真过程中，流体以一定速度横掠铂电阻温度计整个感温区域，热量以较为均匀的方式传递至感温元件，使得感温元件温度变化速率更快。

表4 LCSR法与浸入法响应时间测试结果

Tab.4 Response time test results of LCSR method and plunge test

测量方法	$u / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	单次响应时间/s		
LCSR法	0.2	1.164	1.175	1.170
	0.6	0.700	0.693	0.695
	1.0	0.487	0.490	0.485
LCSR转换	0.2	2.101	2.109	2.104
	0.6	1.485	1.479	1.481
	1.0	0.999	1.002	0.994
浸入法	0.2	2.166	2.153	2.172
	0.6	1.531	1.519	1.524
	1.0	1.031	1.050	1.039

经过计算，LCSR法和浸入法测试结果的相对标准偏差最大值为0.52%和0.92%，自主研发的测试系统在不同工况下表现出较好的重复性和稳定性。通过第3节关系式对LCSR法测试曲线进行转换，分别计算3种流速下LCSR法、LCSR转换和浸入法响应时间的平均值，如图10所示。结果表

明，LCSR转换后的响应时间与浸入法响应时间的相对误差分别为2.73%、2.82%、4.04%，均在5%范围内，优于相关标准中10%的指标要求，这表明转换关系式对试验数据具有较高的适用性。

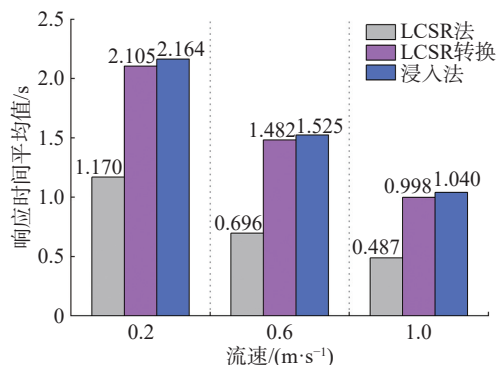


图10 不同流速下响应时间结果对比图

Fig.10 Comparison of response time results at different flow rates

6 结论

根据核电铂电阻温度计动态响应的技术要求，基于COMSOL Multiphysics多物理场耦合，开展了LCSR法动态响应过程数值研究和试验验证，结论如下：

a. LCSR仿真曲线经不同阶次关系式转换后，与浸入法仿真曲线对比，结果表明，三阶转换关系式具有较好的效果，相对误差仅为1.51%。

b. 在LCSR法响应时间影响因素分析中：低流速对响应时间的影响更为显著；空气间隙的存在会显著削弱动态响应性能；不同填充材料对响应时间的影响表现出较大的差异性。

c. 同步开展试验验证，结果显示，变热源LCSR仿真结果与试验结果的相对误差为2.46%，小于恒定热源LCSR模型的6.78%。将LCSR试验曲线通过关系式进行转换，与浸入法试验曲线相比，在3种流速条件下，响应时间相对误差均小于5%。这表明建立的转换关系式对试验数据具有较好的适用性。

参考文献：

- [1] 郎嘉琪, 谢远来, 宋士花, 等. 基于SIMATIC S7-300 PLC的核电厂保护系统设计[J]. 热能动力工程, 2018, 33(3): 105-111.
- [2] 胡芑, 陈则韶. 量热技术和热物性测定[M]. 2版. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009.

- [3] MONTALVO C, GARCÍA-BERROCAL A, BERMEJO J A, et al. Advanced surveillance of resistance temperature detectors in nuclear power plants[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2014, 65: 35–40.
- [4] IEC 61224—1993, Nuclear reactors-response time in resistance temperature detectors (RTD)-in situ measurements[S]. Geneva: IEC, 1993.
- [5] HASHEMIAN H M. Maintenance of process instrumentation in nuclear power plants[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006.
- [6] 江勇, 张发启. 一种热电阻动态特性原位校准方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2004, 5(4): 76–79.
- [7] 居滋培, 华闰祺, 白凌. 无线传感器网络节点的硬件设计[J]. 上海理工大学学报, 2009, 31(6): 609–612.
- [8] HASHEMIAN H M. On-line monitoring applications in nuclear power plants[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2011, 53(2): 167–181.
- [9] NB/T 20338—2015, 核电厂安全重要电阻温度计响应时间原位测量[S]. 2015.
- [10] RUPNIK K, KUTIN J, BAJSIĆ I. Identification and prediction of the dynamic properties of resistance temperature sensors[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2013, 197: 69–75.
- [11] 蔡宛睿, 何忱, 汤亮. LCSR 响应时间原位测量方法影响因素研究[J]. 电子技术应用, 2023, (S1): 152–155.
- [12] KLEBBA M, FRĄCZ A, BRODZICKI M, et al. Time constant as the main component to optimize the resistance temperature sensors' calibration process[J]. *Sensors*, 2024, 24(2): 487.
- [13] 白鸽. 航空发动机进气总温传感器测温误差研究[J]. 测控技术, 2020, 39(3): 76–83.
- [14] 张磊, 彭艳, 王曦. 航空机载镍电阻温度传感器仿真及优化设计[J]. 航空动力学报, 2021, 36(2): 440–448.
- [15] 高爱民, 戈建军, 于国强, 等. PT100 热电阻动态特性试验研究与分析[J]. 传感技术学报, 2016, 29(9): 1395–1399.
- [16] 宋延勇. LCSR 法响应时间原位测量装置的设计与实现[J]. 自动化仪表, 2017, 38(8): 83–86,91.
- [17] 曾永春, 谢海洋, 尹娜, 等. 铂电阻温度传感器热响应时间及其影响因素的分析[J]. 工业计量, 2023, 33(2): 25–27.
- [18] 刘波, 郑伟, 王志远, 等. 铠装热电偶动态响应校准过程数值研究[J]. 计量学报, 2022, 43(12): 1593–1597.
- [19] 朱杰, 郭涛. 一种 Pt100 温度传感器的动态热响应模型[J]. 传感技术学报, 2013, 26(1): 73–77.
- [20] 陶文铨. 传热学[M]. 5 版. 北京: 高等教育出版社, 2019.
- [21] GB/T 30121—2013, 工业铂热电阻及铂感温元件[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [22] IEC 60751—2022, Industrial platinum resistance thermometers and platinum temperature sensors[S]. Geneva: IEC, 2022.
- [23] 蘧鑫晨, 高洋洋, 刘彩, 等. 不同雷诺数下三维圆柱绕流数值模拟[C]//第十八届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(上). 舟山: 中国海洋学会海洋工程分会, 2017: 247–256.
- [24] NB/T 20069—2012, 核电厂安全重要仪表通道性能监督试验[S]. 2012.
- [25] NB/T 20148—2012, 核电厂安全重要仪表电阻温度计[S]. 2013.
- [26] HASHEMIAN H M. Sensor performance and reliability[M]. Geneva: ISA-The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2005.
- [27] 王源, 郭伟, 熊国华, 等. 水介质下的温度计响应时间仿真与试验研究[J]. 自动化仪表, 2023, 44(9): 27–31.
- [28] FROEHLICH T, 张洪军, AUGUSTIN S, 等. 过程温度传感器的温度动态特性[J]. 中国计量学院学报, 2015, 26(1): 7–11.
- [29] 宋延勇, 苏明旭, 王子安. 核电厂电阻温度计响应时间测量方法比对研究[J]. 核科学与工程, 2022, 42(6): 1317–1324.
- [30] HASHEMIAN H M. Response time testing of temperature sensors using loop current step response method[J]. AIP Conference Proceedings, 2013, 1552(1): 949–957.

(编辑: 董伟)