

DOI:10.11918/201811156

改进极限学习机的真空绝热板导热系数测量方法

夏荣菲, 陈宜飞, 冯勇建

(厦门大学 航空航天学院, 福建 厦门 361005)

摘要: 针对目前真空绝热板导热系数测量时间较长、成本昂贵等问题, 提出一种埋入热流计快速测量真空绝热板(VIP)导热系数的方法. 首先应用 ANSYS 仿真证明了测量原理的可行性, 建立了 VIP 导热系数测量系统, 以获取内部压力不同 VIP 的输出信号频率变化值. 然后, 通过埋入真空绝热板内传感器因温度变化引起的输出信号频率变化与导热系数之间的关系, 对真空绝热板的质量和寿命作出评价. 最后, 利用基于岭回归方法改进了极限学习机的模型(RRELM), 提高了极限学习机(ELM)的泛化能力. 实验结果表明: 埋入热流计法可以实现 VIP 导热系数的快速测量, 且与传统极限学习机相比, 提出的 RRELM 模型通过修正导热系数与输出信号频率变化之间的关系, 具有更高的测量精度.

关键词: 真空绝热板; 导热系数; 热流计法; 极限学习机; 岭回归; 测量方法

中图分类号: TP216

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2020)03-0195-06

Measurement method of thermal conductivity of vacuum insulated panel based on improved ELM

XIA Rongfei, CHEN Yifei, FENG Yongjian

(School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China)

Abstract: In view of the problems existing in the measuring process of thermal conductivity of vacuum insulated panel (VIP), such as long test time and high cost, an embedded heat flow meter method for the thermal conductivity measurement of VIP was proposed. First, the feasibility of the measuring principle was verified by ANSYS, and the measurement systems for the thermal conductivity of VIP were established to obtain the output signal frequency change of VIP with different internal pressures. Then, the quality and service life of VIP was evaluated based on the relationship between output signal frequency change of oscillating circuit caused by temperature change and thermal conductivity. Finally, rigid regression was utilized to improve the extreme learning machine model (RRELM) and the generalization ability of extreme learning machine (ELM). Experiments show that the embedded heat flow meter method could realize the rapid thermal conductivity measurement of VIP. Compared with the traditional ELM, the proposed RRELM model could effectively amend the relationship between the thermal conductivity and output signal frequency change with higher precision.

Keywords: VIP; thermal conductivity; heat flow meter method; ELM; rigid regression; measurement method

真空绝热板是快速发展起来的一种新型绝热材料, 由填充芯材、气体阻隔膜以及吸气剂构成, 主要通过板内真空度来降低空气引起的热传递, 其导热系数可高达 $0.004 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 左右, 仅为传统保温材料的 $1/10$. 由于这些特性, VIP 已经广泛应用于建筑^[1]、交通运输业^[2]、家用电器^[3]等领域. 随着对 VIP 的需求量的不断增长, VIP 的质量和寿命检测变得至关重要. 导热系数是反应 VIP 性能的重要物理量, 对其精确检测有利于为设备的使用提供选择依据.

为了保证 VIP 的低导热系数, 在出厂前就需要

对 VIP 导热系数进行精确测量. VIP 导热系数受材料的结构、密度以及温度等因素的影响, 且 VIP 在长时间使用后, 或者遭到破坏时其真空度就会遭到破坏, 从而导致导热系数变大, 使 VIP 绝热性能受到影响. 因此, 为了检测 VIP 的老化程度, 也需要对 VIP 导热系数进行测量.

目前 VIP 行业主要通过平板热流计法检测其导热系数以实现 VIP 的性能检测. 该方法是基于热传导原理, 通过热流计的方法推导出 VIP 的导热系数, 具有检测精确度高, 检测周期长等特点^[4]. 采用该方法已经有比较成熟的检测仪器, 比如德国 NETZSCH 公司研发的面向真空绝热板 HFM436 系列的热流导热系数仪^[5], 其测量精确度可达 $\pm(1\sim 3)\%$, 重复性为 0.25% , 是基于平板热流计法中检测速度最快的测量方法, 样品测量时间短于

收稿日期: 2018-11-22

基金项目: 福建省重大科技计划项目(2010H6025)

作者简介: 夏荣菲(1990—), 女, 博士研究生;

冯勇建(1958—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 冯勇建, yjfeng@xmu.edu.cn

5 min. 查尔姆斯理工大学采用 TPS 传感器并建模, 在 40 s 内就可以测量出 VIP 的导热系数, 偏差可控制在 1.3% 以内^[6]. 此方法提高了测量速度, 但以提高成本为代价. 采用平板热流计法的仪器结构设计合适, 结果准确度高, 但是需要测试时间较长, 成本昂贵, 并不能满足大规模生产 VIP 的要求.

目前导热系数的检测方法检测效率相对低下, 成本昂贵. 检测速度与检测成本之间的矛盾则是需要解决的另一重大问题. 为了解决以上问题, 本文的目标是研究一种快速、高精度的 VIP 导热系数快速检测方法. 该方法主要基于由埋入真空绝热板内传感器因温度变化引起的振荡电路输出信号频率变化与导热系数之间的关系. 在得到振荡电路输出信号频率之后, 如何与建立与导热系数之间的关系变得格外重要.

极限学习机 (ELM) 是由文献 [7] 提出的一种针对 SLFN (single-hidden layer feedforward neural network) 的新算法^[7]. 该算法中, 输入权重和偏置可以被随机赋值, 且相应输出权重可直接计算. ELM 已经广泛应用于函数逼近、分类、识别等领域^[8-10]. 但是 ELM 在新型模型中仍然存在扰动和多重共线性问题, 这将影响 ELM 的稳定性和泛化能力. 岭回归是一种改良的最小二乘估计方法, 用于有效解决在线性回归分析中自变量存在共线性问题^[11]. 本文的另一个目标是基于岭回归改进传统 ELM.

本文以平板热流计法为基础, 提出一种新的埋入热流计法检测真空绝热板导热系数的方法. 该方法可以快速检测 VIP 导热系数并且精度较高、成本低廉. 本文的主要创新点在于提出一种新型的埋入式热流计快速测量 VIP 导热系数的方法, 通过输出信号频率变化就可以反应出 VIP 导热系数的变化; 通过岭回归对 ELM 的改进提出了 RRELM 方法, 来修正导热系数与频率变化之间的关系. 实验证明该方法不仅可以快速检测 VIP 导热系数, 且与传统 ELM 相比具有较高的精度.

1 检测原理

VIP 导热系数随板内气压的变化而变化, 文献 [12] 展现了内部不同材料的真空绝热板的导热系数与气压之间的关系, 当压力大于 10 Pa 时, VIP 的导热系数随压力增加而增大. 本文提出的埋入热流计法快速检测真空绝热板导热系数方法的主要工作原理如下:

1) 热量传递包括导热、对流和热辐射 3 种基本方式. 真空绝热板内部气压很低, 基本上不存在空气流动. 电阻和 VIP 芯材紧密接触, 其在 VIP 内部

对流换热不是主导换热方式, 因此 VIP 的主要换算是辐射. 电阻与周围辐射换热计算公式为^[13]

$$\Phi = \varepsilon A \sigma (T_1^4 - T_2^4), \quad (1)$$

式中: T_1 为电阻温度; T_2 为环境温度; ε 为电阻发射率, 一般取值为 0~1; A 为电阻表面积; σ 为 Stefan-Boltzmann 常数.

2) 将相同的加热电阻和热敏电阻构建的传感器埋在不同真空绝热板内部的中心位置, 当环境温度和湿度等外部因素相同时, 因为 VIP 内部气体压力不同, 其导热系数也将不同. 因此, 当加热电阻被加热到温度 T 后, 加热电阻在 VIP 内部的散热速度也会不同, 其周围的温度热场变化速度也不同. 将热敏电阻接入振荡电路, 此时振荡电路输出端的频率将随热敏电阻阻值的变化而产生改变. 真空绝热板的导热系数越大, 温度场的扩散速度越快, 振荡电路输出频率的变化值也将越大, 因此振荡电路输出频率的变化就反映了 VIP 的导热系数.

2 ANSYS 仿真分析

为了验证埋入热流计法检测真空绝热板导热系数方法的可行性, 本文对内置电阻散热的变化过程进行了 ANSYS 仿真分析.

仿真的环境温度为 25 °C, 电阻初始温度为 50 °C, 在不同内部压力下对 VIP 内部的散热过程进行 ANSYS 仿真. 阻隔性铝箔膜隔气结构为多层复合材料, 本实验实际测量出的 VIP 阻隔性铝箔膜厚度为 0.1 mm, 图 1 为其模型的截面结构.

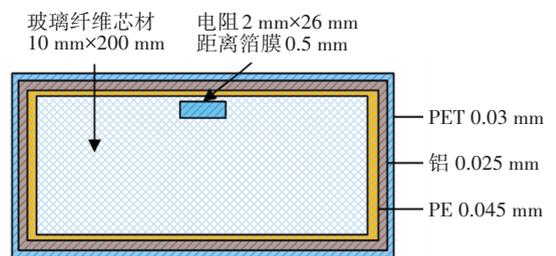


图 1 VIP 内部散热实验模型截面

Fig.1 Cross-sectional view of experimental module in VIP

本文选取内部压力分别为 0.5、50、100 Pa 时, 电阻和薄膜表面节点温度随时间变化的曲线, 如图 2 所示.

图中 TEMP2 为电阻表面节点, TEMP3 为薄膜表面节点. 从仿真结果可以看出, 在温度环境等外部条件相同的情况下, 内部气压越大, 电阻温度变化也越大, 因此可以说明本文提出的 VIP 导热系数测量原理具有可行性.

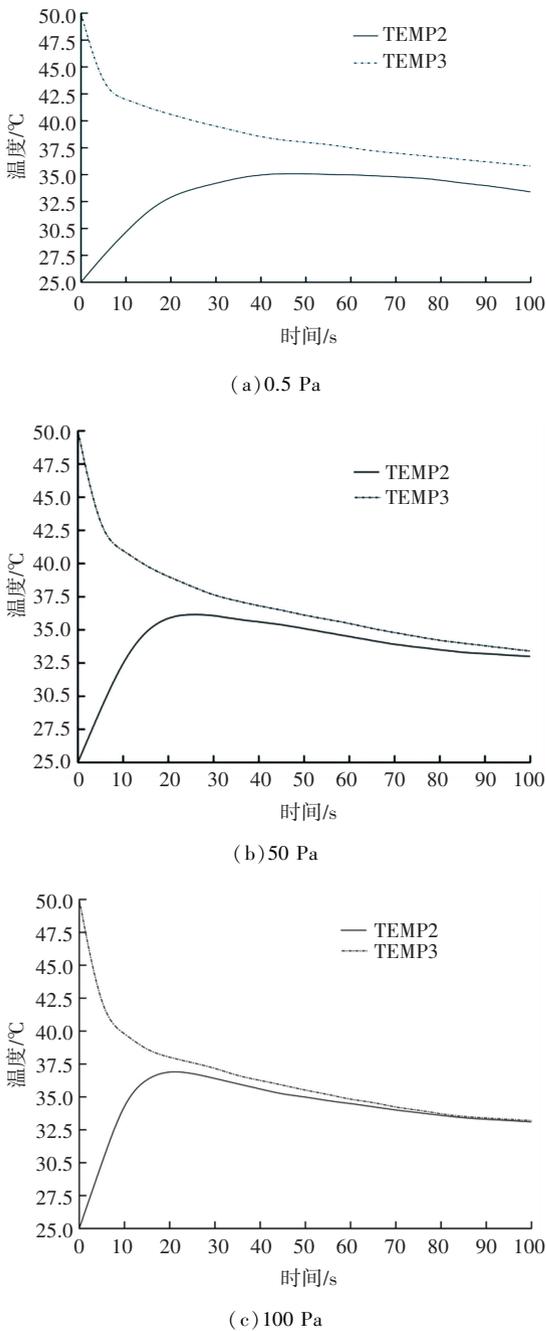


图2 VIP不同内部气压下电阻和薄膜表面节点温度随时间变化曲线

Fig.2 Temperature-time curve of resistance and membrane mode at different pressures

3 测量系统

根据提出的测量原理,VIP导热系数测量系统,主要包括外部供电模块、内部测量模块、外部测量模块,如图3所示。

外部供电模块主要由无线供电发射电路组成,将能量传送给内部测量组件中的无线供电接收电路。内部测量模块由加热控制电路、温度控制电路和RC振荡电路组成。振荡电路如图4所示,其中反相器采用74HC04D, R_2 为热敏电阻。当内部测量组

件上电时,加热控制电路中的加热电阻便开始加热;当温度控制电路检测到加热电阻达到预设的温度值时,加热控制电路将自动控制加热电阻停止加热。RC振荡电路由热敏电阻、瓷片电容、电阻、蜂鸣片和非门组成。在整个加热和停止加热过程中,热敏电阻将一直监测真空绝热板内的温度场变化。外部测量模块由信号采集电路、信号放大滤波处理、微处理器等模块组成,通过外部蜂鸣片来感应内部测量模块中的蜂鸣片,从而获得微弱的电信号。通过信号放大滤波等处理后,从而检测到内部测量组中输出信号频率的大小。

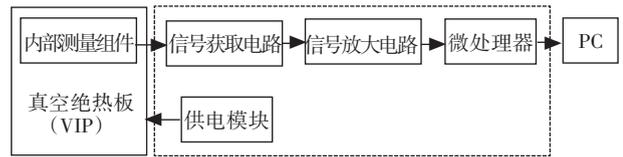


图3 VIP导热系数测量系统

Fig.3 Measurement system for thermal conductivity of VIP

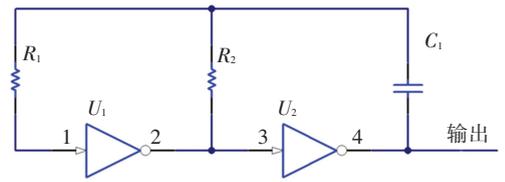


图4 RC振荡电路

Fig.4 RC oscillating circuit

4 模型建立

由上述测量系统可以测得内部压力不同VIP的输出信号频率变化值,为了建立VIP导热系数与输出信号频率变化值之间的关系,本文采用基于岭回归方法改进了极限学习机,从而有效提高了系统的检测精度。

4.1 极限学习机

ELM作为一种针对SLFN的新学习算法,其输入权重和偏置可随机赋值,并通过计算即可得到相应的输出权重。其优点是针对SLFN,相比传统的学习算法,其学习速度较快。对于一个单隐层神经网络,如果有 N 个任意样本 (x_i, y_i) , 对于一个由 M 个隐含层节点组成的单隐层神经网络可以表示为

$$o_j = \sum_{i=1}^M \beta_i g(W_i \cdot x_j + b_i), j = 1, \dots, N. \quad (2)$$

式中: $g(x)$ 为激活函数; W_i 为输入权重; β_i 为输出权重; b_i 为第 i 个隐层单元的偏置。

单隐层神经网络的最终目的是使输出误差最小,计算公式为

$$\sum_{j=1}^N \| o_j - y_j \| = 0. \quad (3)$$

即存在 β_i, W_i 和 b_i 使得

$$y_j = \sum_{i=1}^M \beta_i g(W_i \cdot x_j + b_i), j = 1, \dots, N. \quad (4)$$

用矩阵表示为

$$H\beta = Y. \quad (5)$$

$$H(W_1, W_2, \dots, W_M, b_1, b_2, \dots, b_p, x_1, x_2, \dots, x_Q) = \begin{bmatrix} g(W_1 \cdot x_1 + b_1) \cdots g(W_2 \cdot x_1 + b_2) \cdots g(W_m \cdot x_1 + b_p) \\ g(W_1 \cdot x_2 + b_1) \cdots g(W_2 \cdot x_2 + b_2) \cdots g(W_m \cdot x_2 + b_p) \\ \vdots \qquad \qquad \qquad \vdots \qquad \qquad \qquad \vdots \\ g(W_1 \cdot x_Q + b_1) \cdots g(W_2 \cdot x_Q + b_2) \cdots g(W_m \cdot x_Q + b_p) \end{bmatrix}_{Q \times p}, \quad (6)$$

$$E = \sum_{j=1}^N \left(\sum_{i=1}^M \beta_i g(W_i \cdot x_j + b_i) - Y_j \right)^2. \quad (7)$$

在 ELM 算法中,只要随机确定了输入权重和隐含层的偏置,隐含层的输出矩阵就会被唯一确定.输出权重可以被确定为

$$\hat{\beta} = H^+ Y. \quad (8)$$

式中 H^+ 为 H 的 Moore-Penrose 广义逆.

而在实际应用中 Y 通常会包含扰动,假设扰动为 $\delta, \hat{Y} = Y + \delta$, 故有

$$\hat{\beta} = H^+ \hat{Y}. \quad (9)$$

4.2 基于岭回归的极限学习机

虽然 ELM 具有快速学习的能力和好的泛化能力,但是仍然需要进一步改善. 已经有很多研究者对 ELM 进行了修改和改进^[14-16]. 虽然这些方法都改进了 ELM 的性能,但仍然存在很大的发展空间,比如在线性模型中的扰动和多重共线性问题. 在多重共线性情况下,原有的模型采用最小二乘 (OLS) 估计法计算输出权重,尽管最小二乘法估计对每个变量很公平,但差异较大,使得观测值远离真实值. 而且在样本量有限的情况下,最小二乘估计容易过拟合. 岭回归是一种用于存在多重共线性数据的有偏估计方法. 岭回归估计在评查误差的基础上计入了正则项,来降低标准误差.

根据式 (7),岭回归估计可以定义^[17]为

$$\hat{\beta}(k) = (H^+ H + K)^{-1} H^+ Y, K \geq 0. \quad (10)$$

式中: K 为一个 $p \times p$ 的对角矩阵; k 为岭参数,若 $k = 0$ 时,岭回归 $\hat{\beta}(0) = (H^+ H)^{-1} H^+ Y$ 为一种最小二乘估计. 无偏置的岭回归估计为

$$\hat{\beta}^*(k) = [I - (H^+ H + K)^{-2} K^2] \hat{\beta}(0). \quad (11)$$

假设岭参数是相同的,输出权重公式为

$$\hat{\beta}^*(k) = [I - k^2 (H^+ H + kI)^{-2}] \hat{\beta}(0). \quad (12)$$

从式 (10) 可以看出,岭参数 k 对于岭估计非常重要. 而且岭参数 k 不是唯一的,岭回归估计实际上

式中: H 为隐含层节点的输出; β 为输出权重; Y 为期望输出.

为了训练单隐层神经网络,希望得到 \hat{W}_i, \hat{b}_i 和 $\hat{\beta}_i$, 使得

是回归参数 β 的一个估计族.

本文采用 3 种不同的计算方法来计算 k 值,因此会得到 3 个不同的 RRELM 模型,并且将在进行模型训练时选取最优模型. 第 1 种选择是文献^[17]提出的估计值:

$$\hat{k} = \frac{p \hat{\sigma}^2}{\hat{\beta}(0)^T \hat{\beta}(0)}. \quad (13)$$

式中: $\hat{\beta}(0)$ 为最小二乘估计值; $\hat{\sigma}^2$ 为平均残差平方和,计算公式为

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - p}. \quad (14)$$

式中: y_i 为第 i 个观察变量; \hat{y}_i 为第 i 个预测值; n 为样本数量.

第 2 种是文献^[11]提出的估计值:

$$\hat{k} = \frac{p \hat{\sigma}^2}{\sum_{i=1}^p \lambda_i \hat{\alpha}_i^2}. \quad (15)$$

第 3 种是文献^[18]提出的估计值:

$$\hat{k} = \hat{\sigma}^2 \frac{\sum_{i=1}^p (\lambda_i \hat{\alpha}_i)^2}{\left(\sum_{i=1}^p \lambda_i \hat{\alpha}_i^2 \right)^2}. \quad (16)$$

式中: λ_i 为第 i 个相关矩阵的特征值; $\hat{\alpha}_i$ 为第 i 个最小二乘估计值.

5 实验

5.1 频率特征数据库

本文选择 100 块导热系数在 1~15 mW/(m·K) 之间的 VIP 板作为研究对象. 这些 VIP 板已由日本 EKO 公司生产的 HC-074-300 导热系数测定仪进行了测定. 由上述系统得到的 VIP 频率特征值与 HC-074-300 导热系数测定仪得出的导热系数构建了 VIP 频率特征数据库. 将数据库中随机选出 30 块板

作为测试集, 剩余 60 块板按照 0.2 的比例将数据库中的样本随机分为训练集和验证集. 数据库中频率特征值是所建立 VIP 导热系数测量系统对每一块板进行 100 次测量结果的均值.

5.2 测量结果与误差分析

由式 (13) ~ (16) 可以得到 3 个不同的 k 值. 在 3 个不同的 k 值下, 在验证集上寻找最优模型, 结果见表 1. 本文采用平均绝对误差 (MAD)、均方跟误差 (RMSE) 来进行不同模型的对比.

表 1 不同 k 值下 RRELM 模型的表现

Tab.1 Performance of RRELM using different k

k	MAD	RMSE
0.19	0.170	0.032
0.26	0.151	0.024
0.43	0.174	0.034

表 2 RRELM 和传统 ELM 的测量结果

Tab.2 Measurement results obtained by RRELM and traditional ELM

实验板编号	标定导热系数/ $(\text{mW} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	实测导热系数/ $(\text{mW} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$		相对误差/%	
		RRELM	ELM	RRELM	ELM
1	3.36	3.49	3.52	3.86	4.76
2	3.66	3.77	3.81	3.01	4.09
3	3.83	3.64	3.58	4.96	6.52
4	4.52	4.3	4.17	4.86	7.74
5	5.15	4.96	4.87	3.68	5.43
6	6.30	6.15	6.09	2.38	3.33
7	7.80	7.68	7.63	1.53	2.17
8	9.38	9.23	9.19	1.59	2.02
9	11.39	11.53	11.57	1.22	1.58
10	13.76	13.65	13.55	0.79	1.52

从表 2 中可以看出, 不同实验板测试结果的相对误差波动较大, 这是因为: 1) 真空绝热板的导热系数越大, 其温度场的扩散速度也就越快, 传感器输出频率的变化值也越大, 对于导热系数较小的真空绝热板, 传感器输出频率的变化值较小, 由于传感器本身精度和分辨率问题导致导热系数较小的真空绝热板相对误差较大, 今后将改进硬件电路来提高传感器的输出精度和检测分辨率; 2) 样本数量有限, 导致真空绝热板的导热系数与传感器输出频率之间的关系没有得到更好的拟合, 使相对误差波动较大, 在今后的研究中可以加大样本数量.

另外, 从表 2 中还可以看出, VIP 导热系数的测

以训练集作为输入, 建立频率特征值与 VIP 导热系数之间的 RRELM 非线性补偿模型. RRELM 模型包含 3 层, 输入层为振荡电路输出频率, 输出层为 VIP 导热系数, 隐含层神经元个数为 10, k 值为 0.26. 为了验证 RRELM 非线性补偿模型的精度, 本文与传统 ELM 非线性补偿模型进行对比. RRELM 模型在测试集上的 MAD 为 0.155, RMSE 为 0.024; ELM 模型在测试集上的 MAD 为 0.203, RMSE 为 0.214.

另外, 为了进一步验证 RRELM 非线性补偿模型的精度, 本文另外选取 10 块 VIP 板进行分析. 该 10 块 VIP 板同样由日本 EKO 公司生产的 HC-074-300 导热系数测定仪进行了测定. 与传统 ELM 模型的测量结果进行对比具有较高的精度, 测量结果见表 2.

量值与实际值之间存在一定的误差, 但是提出 RRELM 非线性补偿模型明显优于传统 ELM 方法. 虽然 RRELM 非线性补偿模型具有较高的测量精度, 但是仍然存在一些误差, 这可能是由于以下原因造成的: 1) 样本数量有限, 建立的 RRELM 非线性补偿模型仍然存在一定的非线性误差; 2) 测量系统的外部测量模块中, 外部电路采集到的输出信号需要放大滤波处理, 在实际测量中会产生一定的误差.

6 结 论

1) 提出了一种埋入流量计的快速测量 VIP 导热系数的方法, 在不同内部压力下, 对 VIP 内部的

散热过程进行了 ANSYS 仿真,证明了埋入热流量计法测量原理的可行性.

2) 根据所提出的测量原理建立导热系数测量系统,以测量内部压力不同 VIP 的输出信号频率变化值.

3) 基于岭回归方法建立了 RRELM 非线性补偿模型,有效拟合了输出频率与导热系数之间的关系,且与 ELM 相比取得了较高的精度.

参考文献

[1] ALAM M, SINGH H, SURESH S, et al. Energy and economic analysis of Vacuum Insulation Panels (VIPs) used in non-domestic buildings[J]. Applied Energy, 2017, 188: 1. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.11.115

[2] 纪珺, 韩厚德, 阚安康, 等. 真空绝热板的热工性能及其在冷藏集装箱上的应用[J]. 化工学报, 2008, 59(增刊 2): 114
JI Jun, HAN Houde, KAN Ankang, et al. Thermal property of vacuum insulated panels and their application to refrigerated containers [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2008, 59 (S2): 114

[3] 谭维, 杨祖华, 游飞越, 等. 真空绝热板在直冷冰箱冷冻室部位的应用研究[J]. 家电科技, 2006(5): 49
TAN Wei, YANG Zuhua, YOU Feiyue, et al. The application study of vacuum insulation panels in freezer compartment of refrigerators [J]. China Appliance Technology, 2006(5): 49

[4] 朴明珠. 测量建筑材料导热系数的一种方法[J]. 辽宁师范大学学报(自然科学版), 1997, 20(1): 75
PIAO Mingshu. A way to measure the thermal conductivity of building material [J]. Journal of Liaoning Normal University (Natural Science Edition), 1997, 20(1): 75

[5] 朱万平. 真空绝热板内压检测设备的研发[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015
ZHU Wanping. Research and development on the device for testing the internal pressure of Vacuum Insulation Panel (VIP) nondestructively[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015

[6] JOHANSSON P, ADL-ZARRABI B J, HAGENTOFT C E. Using

transient plane source sensor for determination of thermal properties of vacuum insulation panels [J]. Frontiers of Architectural Research, 2012, 1(4): 334. DOI:10.1016/j.foar.2012.09.004

[7] HUANG G B, ZHU Q Y, SIEW C K. Extreme learning machine: theory and applications [J]. Neurocomputing, 2006, 70(1/2/3): 489

[8] DEO R C, SAHIN M. Application of the extreme learning machine algorithm for the prediction of monthly Effective Drought Index in eastern Australia [J]. Atmospheric Research, 2015, 153: 512

[9] YUAN Qi, ZHOU Weidong, LI Shufang, et al. Epileptic EEG classification based on extreme learning machine and nonlinear features [J]. Epilepsy Research, 2011, 9(1/2): 29

[10] MOHAMME A A, MINHAS R, WU Q M J, et al. Human face recognition based on multidimensional PCA and extreme learning machine [J]. Pattern Recognition, 2011, 44(10): 2588

[11] LAWLESS J F, WANG P. A simulation study of ridge and other regression estimators [J]. Communications in Statistics, 2010, 5(4): 307

[12] HEINEMANN U, CAPS R, FRICKE J. Radiation-conduction interaction; an investigation on silica aerogels [J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 1996, 39(10): 2115

[13] 陶文铨. 传热学 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2006
TAO Wenquan. Heat transfer theory [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2006

[14] HUANG Guangbin, CHEN Lei. Enhanced random search based incremental extreme learning machine [J]. Neurocomputing, 2008, 71(16): 3460

[15] HAN Fei. Improved extreme learning machine for function approximation by encoding a priori information [J]. Neurocomputing, 2006, 69(16): 2369

[16] CHEN Kai, LÜ Qi, LU Yao, et al. Robust regularized extreme learning machine for regression using iteratively reweighted least squares [J]. Neurocomputing, 2016, 230: 345

[17] HOERL A E, KENNAR R W. Ridge regression: biased estimation for nonorthogonal problems [J]. Technometrics, 2000, 42(1): 80

[18] HOCKING R, SPEED F M, LYNN M J. A class of biased estimators in linear regression [J]. Technometrics, 1976, 18(4): 425. DOI: 10.1080/00401706.1976.10489474

(编辑 魏希柱)

封面图片说明

封面图片来自本期论文“龙卷风原理的吸尘装置结构设计及流场仿真分析”, 图片包含龙卷风发生原理图, 剖面设计图, 速度、压力仿真云图, 流场计算模型以及实物模型图. 根据龙卷风强大的卷吸能力, 探索性地利用龙卷风原理设计了一种可实现高性能清扫的新型吸尘装置, 首先建立了包括环流通道、导流孔、总进气管道、吸嘴和排尘口的几何模型, 根据模型抽取了包含内部流体域和外部扩展域的计算流体域, 采用控制变量法和 ANSYS FLUENT 对各个几何参数进行了计算流体力学仿真分析, 然后分别从模型的结构参数和扩展域参数两部分分析其对内部流场和吸尘效果的影响, 根据仿真结果提出了新型的吸尘装置的原理与设计, 最后使用 3D 打印机制作了实物模型. 仿真结果表明: 这种吸尘装置通过设置合适的结构参数, 能够形成高稳定性与强吸尘效果的类龙卷风流场, 可实现高效清扫效果.

(图文提供: 刘晓静, 章易程, 刘凡, 等. 中南大学交通运输工程学院; 广州汽车集团股份有限公司)