

基于遗传神经网络的真空绝热板 导热系数测量方法研究

黄俊 冯勇建*

(厦门大学 机电工程系 厦门 361005)

Novel Techniques for Thermal-Conductivity Measurement of Vacuum Insulation Panel

Huang Jun ,Feng Yongjian*

(Department of Mechanical and Electrical Engineering ,Xiamen University ,Xiamen 361005 ,China)

Abstract A novel technique was developed to rapidly and precisely measure the thermal conductivity of large-area vacuum insulated panel (VIP). In the newly-developed technique, the heat-flow sensors were embedded inside the VIP. The theoretically calculated, numerically simulated and experimentally evaluated results strongly support the new method. In measurement calibration, genetic algorithm and BP neural network were used to solve the nonlinear problems involved in dependence of VIP's thermal conductivity on frequency characteristics; and the non-linear compensation results in a precision better than 1%. When it comes to nonlinear compensation, genetic neural network outperforms the conventional least-square method in many ways, including smaller error, higher precision and better global optimization ability. The test results show that the novel technique is capable of measuring the VIP's thermal conductivity rapidly, precisely, easily and at a low cost.

Keywords VIP, Thermal conductivity, Rapid measurement, ANSYS, MATLAB, Genetic neural network

摘要 传统采用大平板热保护法测量真空绝热板(VIP)导热系数,该方法测量精度高,但检测速度慢。国外HC-120 VIP快速检测仪大大提高了检测速度,但价格昂贵。针对以上问题,本文提出了基于埋入式热流计法快速高精度测量VIP导热系数的方法。通过理论分析和仿真分析,证明了测量原理的可行性。在测量模型的标定中,针对VIP导热系数与频率变化特征值之间的非线性问题,巧妙结合遗传算法和BP神经网络,从而进行非线性补偿,使测量精度优于1%。与传统基于最小二乘法进行非线性补偿的方法相比,遗传神经网络具有误差小、精度高和全局寻优能力等优点。实际应用表明,本文提出的测量方法满足了高精度、低成本的测量要求,具有广泛推广的应用价值。

关键词 真空绝热板 导热系数 快速测量 ANSYS MATLAB 遗传神经网络

中图分类号: TP216 文献标识码: A doi: 10.13922/j.cnki.cjovst.2015.04.05

真空绝热板(Vacuum Insulation Panel, VIP)是当今世界上最先进的高效保温材料,其导热系数一般在 $4\text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 左右,相当于普通绝热材料的10倍甚至更高,而其厚度仅为普通绝热材料的 $1/7$,因此具有环保和高效节能的特性^[1]。VIP主要由芯部的隔热材料和封闭的隔气薄膜组成,主要依靠其内部

的真空度来提高绝热性能。VIP内部真空度越高,其导热系数则越低,保温效果则越佳^[2]。导热系数是表征真空绝热板导热性能的重要物理量。在生产制造VIP的过程中,对生产出低导热系数的VIP提出了较高的要求,因此必须精确测量VIP的导热系数。另外,VIP使用长久之后,气体会渗透到板内,

收稿日期: 2014-06-24

基金项目: 福建省重大科技计划项目(2010H6025)

* 联系人: Tel: 18959203150; E-mail: huangjun-huangjun@126.com

使板内真空度破坏,引起其导热系数提高,保温性能下降。因此,为了检测VIP的老化程度,也有必要精确测量VIP的导热系数。

目前国内主要采用大平板热保护法及其原理研制VIP导热系数测量装置。该装置是基于一维稳态导热下,采用热流量的方式计算出VIP的导热系数。该方法虽然测量精度高,但检测速度慢,很难满足大规模生产VIP的要求^[3]。若采用多台仪器同时检测,虽然提高了检测速度,但大大提高了检测成本。为了克服以上问题,对快速检测方法的研究也显得越来越重要。如EKO公司推出的HC-120 VIP快速检测仪,使检测时间缩短至6 min以内,真正实现了VIP板的快速检测。与传统的检测方法相比,快速检测方法大大提高了速度,但检测成本较高。

鉴于目前国内对VIP导热系数快速检测方法的研究还不够成熟,本文致力于研究出一种基于埋入式热流计法快速高精度测量VIP导热系数的方法,其测量范围为1~15 mW/(m·K),测量误差小于1%,测量时间为60 s。根据美国ASTM C1484-01标准的规定,VIP的导热系数大于11.5 mW/(m·K)被认为失效^[4]。

1 VIP导热系数测量原理、仿真分析与系统设计

1.1 VIP导热系数测量原理

如图1所示为VIP导热系数与其内部气体压强的关系曲线。从图中可以看出,当内部气体压强高于10 kPa时,VIP导热系数维持为常数;当内部气体压强在 $10^3 \sim 1$ Pa之间,VIP导热系数随压强减小呈线性下降;当内部气体压强低于1 Pa时,VIP导热系数逐渐减小且趋于常数。因此,在生产VIP时,VIP内部气体压强通常在1 Pa以下^[5]。

$$E(T) = \sigma T^4 \quad (1)$$

式中 $E(T)$ 为黑体的辐射热流密度; $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ W/(m²·K⁴)称为黑体辐射常数; T 为黑体表面的热力学温度。由Stefan-Boltzmann定律可知,黑体的辐射热流密度随温度下降而迅速减小^[6]。

基于埋入式热流计法快速高精度测量VIP导热系数主要机理如下所述:

(1) 热量传递有导热、对流和热辐射三种基本方式。导热、对流这两种热量传递方式只有在有物质存在的条件下才能实现,而在真空环境下,物体以辐射方式传递热量最为有效^[7]。

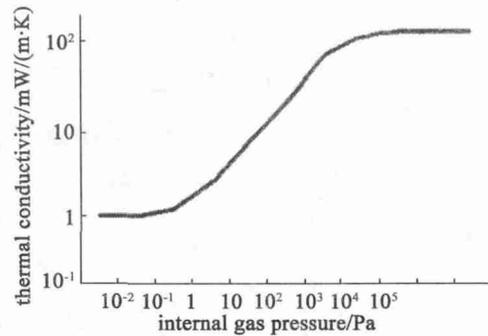


图1 VIP导热系数与内部气体压强的关系曲线

Fig. 1 Dependence of the VIP's thermal conductivity on the pressure

(2) 设一个电阻被内置于表面积为 A 的VIP内部中心位置,VIP处于温度为 T_{surr} 的环境中。当电阻被加热到温度 T_s 时,电阻与周围环境之间的净辐射传热量为

$$Q = \varepsilon \sigma A (T_s^4 - T_{\text{surr}}^4) \quad (2)$$

式中 ε 为电阻的表面发射率,取值范围为0~1,是描述电阻与黑体在发射热辐射能力上的差别的物理量^[8]。

(3) 取同样大小的电阻和热敏电阻分别埋在VIP内部中心位置。在相同温度、湿度的环境下,由于VIP内部气体压强不同,所以其导热系数存有差异。因此,当电阻被加热到温度 T_s 停止加热后,电阻在VIP内部的热辐射强度也不同。将热敏电阻接入RC振荡电路中,振荡电路输出信号频率的大小反映了VIP内部电阻热辐射强度的变化。

1.2 ANSYS仿真分析

为了验证VIP导热系数测量原理的可行性。在环境温度为25℃,加热电阻被加热到50℃时,VIP内部气体压强不同的情况下,对在加热电阻所处位置热辐射强度的变化情况进行ANSYS仿真分析。

本文选取内部气体压强为0.05 Pa(3.42 mW/(m·K))、0.5 Pa(4.16 mW/(m·K))的VIP,分别在15、30、45、60 s时,在加热电阻处热辐射过程中温度场分布等值线图如图2所示。

通过仿真分析可以得出以下结论:加热电阻停止加热后开始发生热辐射,温度场慢慢扩散。对于导热系数低的VIP板,温度场扩散比较慢;对于导热系数高的VIP板,温度场扩散比较快。也就是对于不同导热系数的VIP板,在板中的同一位置,温度场的变化是不同的。另外,对于同一块VIP板中,距离热源比较近的点,温度场变化比较明显。因此,仿真结果可以证明VIP导热系数测量原理具有可行性。

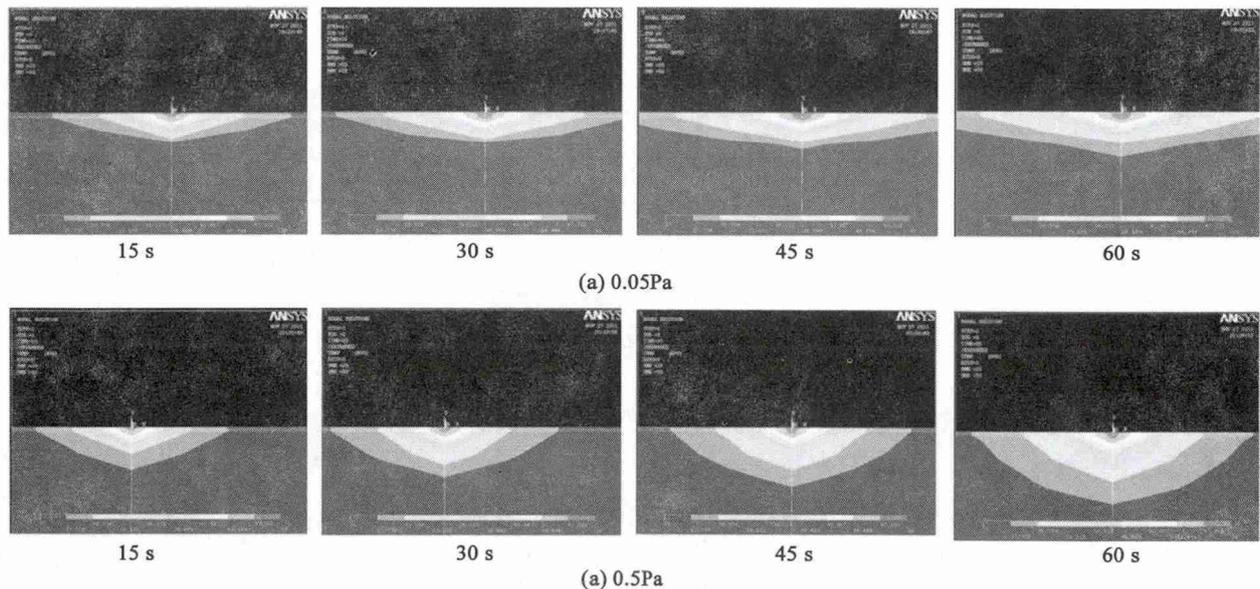


图 2 VIP 在不同内部气压下热辐射过程中温度场分布等值线图

Fig. 2 Contour-plot of VIP's temperature field distribution in thermal radiation at different pressures

1.3 测量系统的设计

VIP 导热系数测量系统的整体框图如图 3 所示。其中,外部测量模块中的无线供电发射电路基于磁耦合共振技术,将能量无线传送给内部测量组件中的无线供电接收电路。无线供电接收电路将接收到的高频交流电压,经整流、滤波、稳压输出 +5 V 电压,从而为内部测量组件中的其余电路供电。

当内部测量组件一上电,加热控制电路中的加热电阻便开始加热。温度检测电路用于检测加热电阻的温度。当温度检测电路检测到加热电阻达到预设的温度值时,加热控制电路便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、普通电阻、蜂鸣片和非门组成,其输出信号施加在蜂鸣片上。在整个加热和停止加热的过程中,热敏电阻一直在监测 VIP 内部温度场的变化。当加热时温度升高,热敏电阻的电阻阻值减小,输出信号频率增大;反之,当停止加热时温度降低,热敏电阻的电阻阻值增大,输出信号频率减小。

外部测量模块通过蜂鸣片感应内部测量模块中的蜂鸣片,获得微弱的电信号。该信号经信号调理电路放大、滤波、整形处理,从而检测到内部测量组件中输出信号频率的大小。本系统微处理器采用型号为 STC12C5A60S2 的单片机。单片机通过 232 串口通讯,将内部测量组件输出信号的频率值传送给

计算机,最后通过 MATLAB 软件进行处理,计算得到 VIP 的导热系数。

由于整套测量系统采用电阻、电容、运放、非门和单片机等常用分立元件组成,故满足了低成本的测量要求。

2 测量模型的标定

模型的准确标定是获得高精度测量的关键。标定的主要步骤如下:

(1) 对同一块 VIP 板进行测量实验,分别采集 VIP 内部测量组件信号输出端的频率信号,记录下特定时间点的频率值,求出 VIP 板内的热敏电阻由于测量实验的热辐射环节造成的频率变化值。

(2) 重复 6 次步骤(1),然后将 6 次计算的热辐射频率变化值进行取算术平均值,当确定此算术平均值足够稳定,即方差足够小时,则将此数据作为这个特定导热系数下的 VIP 板在本测量实验中的频率变化特征值。

(3) 再取导热系数不同的 20 块 VIP 板作为实验标定板通过上述的步骤(1) - 步骤(2)进行测试,分别求出每一块 VIP 板在本测量实验中的频率变化特征值。

(4) 统计上述各种导热系数下 VIP 板的频率变化特征值,将其制成频率变化特征表。

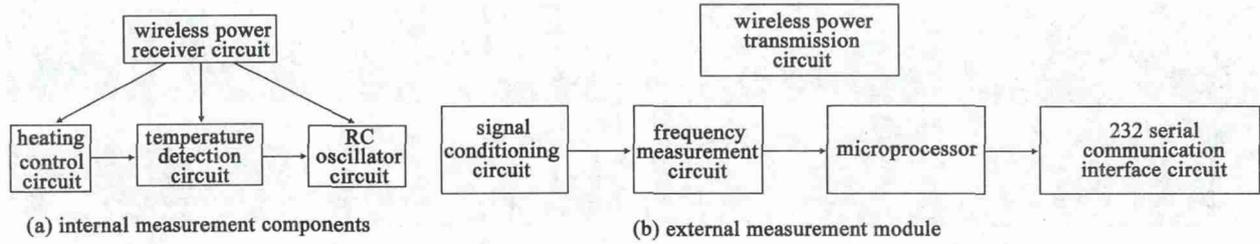


图3 VIP 导热系数测量系统整体框图

Fig. 3 Block diagram of the measurement setup

本文选择 20 块不同导热系数的 VIP 板进行测量实验。在出厂前,该 20 块 VIP 板已经过日本 EKO 公司的 HC-074-300 导热系数测定仪标定其导

热系数。然后通过上述实验步骤进行测试,得到 VIP 内部测量组件的频率变化特征值和其导热系数的关系如表 1 所示。

表 1 VIP 实验标准板的频率变化特征值及导热系数

Tab. 1 Frequency characteristics of VIP's standard plate and thermal conductivity

实验板导热系数 /mW/(m·K)	测量频率变化值/Hz						频率变化特征值/Hz
	1	2	3	4	5	6	
2.92	21.12	21.29	21.23	21.68	21.98	21.45	21.46
3.25	24.67	25.04	24.37	24.57	24.78	24.74	24.70
3.46	26.12	26.76	26.45	26.74	26.52	26.47	26.51
3.93	28.48	28.66	28.67	28.6	29.02	28.62	28.68
4.27	30.12	30.72	30.46	30.56	29.98	30.34	30.36
4.99	33.62	33.72	33.93	33.89	33.92	34.16	33.87
5.58	37.12	36.74	36.81	36.89	36.9	36.62	36.85
5.96	39.23	39.34	39.27	39.54	39.43	39.33	39.36
6.32	42.12	42.43	42.29	42.33	42.46	42.39	42.34
6.78	46.87	46.64	46.53	46.88	46.68	46.48	46.68
7.12	48.67	51.07	51.22	50.87	50.9	50.98	50.62
7.52	53.21	56.13	56.54	56.32	56.16	56.39	55.79
8.23	60.25	60.38	60.49	60.74	60.63	60.35	60.47
8.91	63.68	63.85	63.78	63.93	63.73	63.52	63.75
9.72	67.52	67.37	67.48	67.36	67.29	67.3	67.39
10.66	72.2	72.32	72.43	72.5	72.64	72.67	72.46
11.03	75.78	5.66	75.67	76.06	75.48	75.6	75.71
11.6	81.02	80.62	80.8	80.89	80.73	80.65	80.79
12.97	93.4	93.51	93.59	93.62	93.72	93.87	93.62
13.67	98.63	98.58	99.12	98.43	98.67	98.86	98.72

2.1 基于最小二乘法的非线性补偿

最小二乘法(least square method,简称 LSM)是德国科学家高斯提出的参数估计算法,也是工程应用中最为广泛的参数估计算法之一。该估计的特点是算法简单,无需知道与被估计量与测量值相关的

任何统计信息^[9]。

取 x 的 n 个不全相同的值 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, 得到样本 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3), \dots, (x_n, y_n)$ 。

设线性函数

$$\hat{y} = a + bx \tag{3}$$

其中 a 和 b 是待估计常数。

则实验数据 y_i 与相应的线性函数值 \hat{y}_i 之间的误差平方和为 $\sum_{i=1}^n [y_i - \hat{y}_i]^2$

令误差平方和函数

$$Q(a, b) = \sum_{i=1}^n [y_i - \hat{y}_i]^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - a - bx_i]^2 \tag{4}$$

当误差平方和函数 $Q(a, b)$ 取最小值时, 获得的 \hat{a} 和 \hat{b} 称为最小二乘估计值。这种利用误差平方和最小的条件来选择参数 a, b 的方法称为最小二乘法。

取 Q 分别关于 a, b 的偏导数, 并令它们等于零, 得到方程组

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial a} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i) = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial b} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i) x_i = 0 \end{cases} \tag{5}$$

解上述方程组(3)得到 \hat{a} 和 \hat{b} 的最小二乘估计值为

$$\begin{cases} \hat{b} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \\ \hat{a} = \bar{y} - \hat{b}\bar{x} \end{cases} \tag{6}$$

其中 $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$ [10]。

令 VIP 的导热系数为 \hat{y} , 与其对应的频率变化特征值为 x 。根据表 1 中的数据, 经计算得到

$$\begin{cases} \hat{b} = 0.1411 \\ \hat{a} = 0.0377 \end{cases}$$

即

$$\hat{y} = 0.1411x + 0.0377 \tag{7}$$

通过 MATLAB 软件绘制出基于最小二乘法的非线性补偿模型, 如图 4 所示。

2.2 基于遗传神经网络的非线性补偿

2.2.1 BP 神经网络

在人工神经网络中应用最为广泛的是 BP 神经网络(BP Neural Networks, 简称为 BP NN)。由于它可以实现从输入到输出的任意非线性映射, 具有很强的非线性逼近能力, 故本文选用 BP 神经网络。它是一种前向网络, 通常由输入层、隐含层和输出层组成, 其拓扑结构如图 5 所示。图中, X_1, X_2, \dots, X_n 为 BP 神经网络的输入值, Y_1, Y_2, \dots, Y_m 为 BP 神经网络的输

出值, ω_{ij} 和 ω_{jk} 为 BP 神经网络权值。BP 神经网络的典型设计是隐含层采用 Sigmoid 函数作为传递函数, 而输出层则采用线性函数作为传递函数[11]。

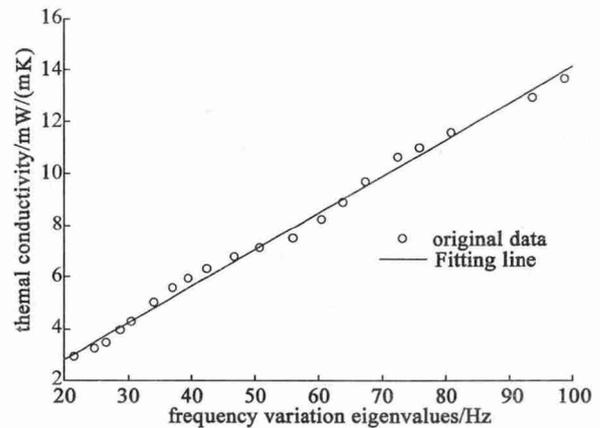


图 4 LSM 非线性补偿模型

Fig.4 Nonlinear compensation model based on LSM

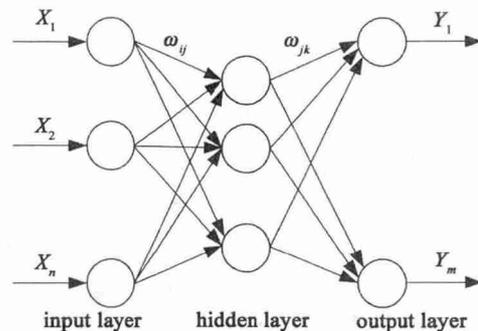


图 5 BP 神经网络的拓扑结构图

Fig.5 Schematic topology map of BP NN

BP 神经网络广泛应用于函数逼近、回归分析、模式识别等领域。MATLAB 软件提供了丰富的神经网络工具箱函数, 给神经网络的设计和应用带来了许多的便利。

本文将采集到的 VIP 内部测量组件的频率变化特征值作为 BP 神经网络的输入, 将与其对应的导热系数作为 BP 神经网络的输出。采用遗传算法优化 BP 神经网络的结构和参数, 从而得到基于遗传神经网络(Genetic Neural Network, 简称为 GNN)的非线性补偿模型。

2.2.2 遗传算法

遗传算法(Genetic Algorithms, 简称 GA)是 1962 年美国 Holland 教授提出的模拟自然界遗传机制和生物进化论而成的一种并行随机搜索最优化方法。

GA的基本操作分为:选择操作、交叉操作和变异操作。其具有高效启发式搜索、并行计算等优点,所以在函数优化、生产调度及组合优化等方面得到了广泛的应用^[12]。

2.2.3 遗传算法优化BP神经网络

遗传算法优化BP神经网络是用GA来优化BPNN的初始权值和阈值,使优化后的BPNN能够更好的预测输出。具体的实现步骤主要包括:问题的空间编码,初始种群的产生,适应度函数的选取,选择操作,交叉操作,变异操作^[13]。

在本文中,选用1个输入结点,1个输出结点,隐含层结点数待定的BP神经网络作为补偿网络模型。由表1中的频率变化特征值和对应的导热系数作为补偿网络的训练样本。训练样本时,初始化设置隐含层节点数为30,种群规模为50,交叉概率为0.5,变异概率为0.002。经过280次遗传迭代以后,得到网络的有效隐含层节点数为13,误差函数值为 2×10^{-6} 。图6为基于GA优化BPNN的非线性补偿模型。

比较图4和图6,不难发现:基于遗传算法优化BP神经网络建立的非线性补偿模型明显优于基于最小二乘法建立的非线性补偿模型。

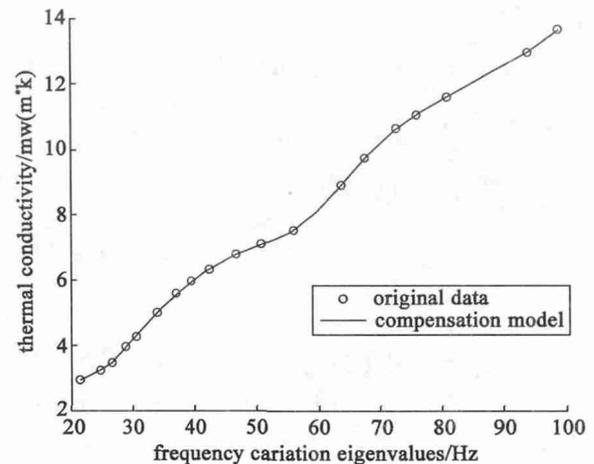


图6 GNN非线性补偿模型

Fig.6 Nonlinear compensation model based on GNN

3 应用实例与误差分析

本文另外选择10块VIP板进行测量试验,从而比较上述两种非线性补偿模型的测量精度。该10块VIP板在出厂前同样已经过日本EKO公司的HC-074-300导热系数测定仪测定其实际导热系数,其测量结果如表2所示。

表2 LSM补偿模型与GNN补偿模型测量结果对比表

Tab.2 Measured results with LSM and GNN compensation models

测试板编号	实际导热系数 /mW/(m·K)	LSM法测量结果 /mW/(m·K)	LSM法相对误差 (LSM法测量精度)	GNN法测量结果 /mW/(m·K)	GNN法相对误差 (GNN法测量精度)
1	3.41	3.52	3.23%	3.44	0.88%
2	3.72	3.67	-1.34%	3.74	0.54%
3	3.98	4.08	2.51%	3.95	-0.75%
4	4.66	4.69	0.64%	4.68	0.43%
5	4.67	4.76	1.93%	4.64	-0.64%
6	5.98	6.08	1.67%	6.03	0.84%
7	7.8	7.61	-2.44%	7.86	0.77%
8	9.38	9.62	2.56%	9.47	0.96%
9	11.39	11.81	3.69%	11.44	0.44%
10	13.76	13.12	-4.65%	13.72	-0.29%

注:相对误差=(测量值-实际值)/实际值×100%

从表2中不难发现,VIP导热系数的测量值与实际值之间存在一定的误差,但基于GNN非线性补偿模型的测量精度可达±1%,明显优于基于LSM非线性补偿模型的测量精度。其测量精度非常适合替代昂贵的进口导热系数测量设备,满足高精度测量导热系数的要求。

导致VIP导热系数测量值存在误差的原因:在测量模型的标定中,虽然基于GNN非线性补偿模型明显优于基于LSM非线性补偿模型,但仍然存在一定的非线性误差;在外部测量模块中,本文采用STC12C5A60S2单片机为主控芯片,测量VIP内部测量组件的频率变化特征值,使整套系统的成本大

大降低,但频率测量精度偏低;另外,VIP内部测量组件中电子元器件的参数误差同样会导致系统存在一定的误差,尤其是热敏电阻的精度极大地影响了本实验的测量精度。

4 结论

本文通过理论分析、仿真分析和实验,证明了基于埋入式热流计法快速高精度测量VIP导热系数方法的可行性。在测量模型的标定中,针对VIP导热系数与频率变化特征值之间的非线性问题,提出了应用遗传神经网络实现非线性补偿的方法。与基于最小二乘法的非线性补偿方法相比,该方法具有误差小、精度高和全局寻优能力等优点。最后通过实际应用举例,证明了本文所提方案的可行性和实用性。

参 考 文 献

- [1] 温永刚,王先荣,杨建斌,等.真空绝热板技术及其发展[J].低温工程,2008,(6):35-39
- [2] Fricke,Heinemann,Ebert HP. Vacuum Insulation Panels from Research to Market [J]. Vacuum,2008,82:680-690
- [3] 王少杰,冯勇建,黄元庆,等.基于热红外的真空绝热板真空度检测研究[J].真空科学与技术学报,2013,33(11):1074-1079
- [4] ASTMstandard: C1484-01,Standard Specification for Vacuum Insulation Panels [S] 2002
- [5] 阚安康,韩厚德,曹丹,等.真空绝热板绝热性能的研究[J].绝缘材料,2006,(2):20-23
- [6] 赵镇南.传热学[M].北京:高等教育出版社,2008:14-15
- [7] 杨世铭,陶文铨.传热学[M].北京:高等教育出版社,2004:2-5
- [8] Younes Shabany.传热学:电力电子器件热管理[M].北京:机械工业出版社,2013:48-50
- [9] 程鹏,王艳东.现代控制理论基础[M].北京:北京航空航天大学出版社,2010:165-167
- [10] 盛骤,谢式千,潘承毅.概率论与数理统计[M].北京:高等教育出版社,2008:246-248
- [11] 陈明,等. MATLAB神经网络原理与实例精解[M].北京:清华大学出版社,2013:156-158
- [12] Yu A-Long. Numeral Eddy Current Sensor Modelling Based on Genetic Neural Network [J]. Chinese Physics,2008,B17(3):878-882
- [13] 王小川,史峰,郁磊,等. MATLAB神经网络43个案例分析[M].北京:北京航空航天大学出版社,2013:20-22