

基于磁性纳米颗粒的温度测量理论模型误差研究

张志锋^a,王丹丹^b,李娜娜^b,段莹莹^b,崔亚东^a

(郑州轻工业大学 a.软件学院;b.计算机与通信工程学院,郑州 450000)

摘要:磁性纳米颗粒温度测量技术是一种新型、非接触式磁学测温方法,可以实现肿瘤热疗法中的在体温度实时监测等极端条件下的温度测量,但该技术伴随的温度测量误差问题,严重制约其在更多领域的应用和推广.针对这一问题,从郎之万函数泰勒级数展开式的不同展开项、激励磁场幅值、信噪比三个方面,并通过仿真和实验,分析验证了不同项数的泰勒级数展开项数对温度误差的影响.结果表明,利用五项泰勒级数展开项数逼近郎之万函数,增加激励磁场强度,提高信噪比等方法,能够从理论上解决磁性纳米颗粒温度测量误差较大的难题.

关键词:磁性纳米颗粒;温度测量;模型误差;郎之万函数

中图分类号:TH811;TP23

文献标志码:A

温度无论是在工业应用领域还是医疗领域,乃至人类日常生活的方方面面,都是一个不可或缺的重要参数^[1-3].传统的温度测量技术虽然在社会发展中不断被完善,但新的测温需求也随着科技的进步显现出来,传统的测温技术已经不能满足新的测温需求,不断探索新的测温方法具有重要现实意义^[1-10].

磁性纳米颗粒测温法^[10-19]是一种新型、非接触式磁学测温方法,利用磁性纳米颗粒感知温度,通过磁化响应信息反演温度.WEAVER 等^[12-13]首次通过实验验证了磁性纳米颗粒的磁-温特性,并采用数据拟合的方式获取温度,测温误差为 0.3 °C.刘文中等^[14]随后在磁性纳米颗粒温度测量理论等相关方面进行了研究,提出在直流磁场激励下单点测温精度为 0.57 °C 的磁性纳米颗粒温度测量模型,为磁性纳米颗粒温度测量理论的发展做出了奠基性的贡献.MORAIS 等^[15]发现磁流体存在聚集分离现象,并提出单点测温精度提高到 0.3 °C 的磁性纳米颗粒温度测量修正模型.皮仕强博士^[16]针对粒径分布对于测温精度的影响提出磁性纳米颗粒温度测量优化改进模型,测温精度达到 0.2 °C.徐文彪博士^[17]采用 Shiomis 铁磁流体力学模型对温度测量模型进行修正,单点温度测量时间可以达到 0.01 s,测温精度达到为 1 °C.

目前已有的磁性纳米颗粒温度测量方法中,温度精度不能满足使用要求的问题较为突出,这仍然是困扰磁性纳米颗粒温度测量技术亟待攻克的瓶颈之一,分析研究影响温度精度的原因,寻找提高温度精度的方法刻不容缓.

针对该技术瓶颈,首先从郎之万顺磁性理论(Langevin Theory of Paramagnetism)模型入手,分析模型误差的来源,其次从通过对郎之万函数(Langevin Equation)泰勒级数展开的不同展开项、信噪比、激励磁场幅值等方面进行对比分析,研究和分析模型误差对于温度测量误差的影响.最后,通过 MATLAB 仿真和实验研究进行验证,进一步从模型误差的角度提出提高磁性纳米颗粒温度测量精度的方法.

1 磁性纳米颗粒测温模型

1.1 磁性纳米颗粒与郎之万函数

纳米级别成分为 Fe_3O_4 的磁性纳米颗粒材料,生物相容性良好,呈固态或磁流体状态.磁性纳米颗粒材

收稿日期:2019-09-17;修回日期:2020-03-03.

基金项目:国家自然科学基金(61975187)

作者简介(通信作者):.张志锋(1978—),男,河南郸城人,郑州轻工业大学副教授,研究方向为光谱诊断技术、深度学习、智能信息等,E-mail:zhangzhifeng@zzuli.edu.cn.

料的磁介质属性磁导率和饱和磁化强度都较高,而且具有低损耗的特性.这种磁性纳米材料在磁化过程中极易被磁化,其无矫顽力和无剩磁的特点较为理想,特别是表现出的超顺磁性特性最为突出.

根据经典的郎之万顺磁理论,在绝对温度 T 下,一个自由度具有的热能是 $k_B T/2$, k_B 是波尔兹曼常数,即 1.38×10^{-23} J/K.磁性纳米颗粒磁矩在外磁场作用下,其静磁能为 $M_s H$, M_s 为 N 个磁性纳米颗粒的有效饱和磁矩, H 为外部施加激励磁场.

磁性纳米颗粒的磁化强度^[16]

$$M = NM_s \left[\coth(\psi) - \frac{1}{\psi} \right] = NM_s L(\psi), \quad (1)$$

其中, $\coth(\psi) - 1/\psi$ 即为郎之万函数,记为 $L(\psi)$, ψ 可表示为 $M_s H / (k_B T)$.

1.2 磁性纳米颗粒测温模型

当激励磁场为低频交变磁场(小于 1 kHz),假设交变激励磁场为: $H(t) = H_0 \sin(\omega t)$, H_0 为激励磁场幅值,则磁性纳米颗粒的磁化强度^[19] $M(t) \approx NM_s (\coth((M_s H_0 \sin(\omega t)) / (k_B T)) - (k_B T) / (M_s H_0 \sin(\omega t)))$.

磁性纳米颗粒具有独特的物理特性,即在直流激励磁场下其磁化响应服从郎之万函数,这种特性同样适用于低频交流激励磁场中,在低频交流激励场中磁化响应信号含有丰富的谐波幅值信息,通过测得谐波幅值信息可对温度信息 T 进行反演.

然而,利用郎之万函数直接进行温度反演非常困难,所以可以利用郎之万函数的离散表达式对磁性纳米颗粒温度进行反演.因此可以利用磁性纳米颗粒磁化强度的谐波幅值信息来对磁性纳米颗粒温度信息进行反演,即获取磁性纳米颗粒温度信息.

2 磁性纳米颗粒测温模型误差分析与仿真

2.1 郎之万函数的泰勒级数展开

由于郎之万函数 $L(\psi)$ 在 $H=0$ 处存在奇异点且连续可微.通过对(1)式中的郎之万函数进行泰勒级数展开整理得到

$$M = NM_s \left(\frac{1}{3} \psi - \frac{1}{45} \psi^3 + \frac{2}{945} \psi^5 - \frac{1}{4725} \psi^7 + \frac{2}{93555} \psi^9 - \frac{1382}{638512875} \psi^{11} \dots \right), \quad (2)$$

其中, $\psi = M_s H / k_B T$.当 $H = H_0 \sin(\omega t)$ 时,带入上式并整理,则(2)式可表示为 $M = c_1 \sin(\omega t) + c_3 \sin(3\omega t) + \dots$.其中,

$$c_1 = \frac{NM_s^2 H_0}{3k_B T} - \frac{NM_s^4 H_0^3}{60k_B^3 T^3} + \frac{NM_s^6 H_0^5}{756k_B^5 T^5} - \frac{NM_s^8 H_0^7}{8640k_B^7 T^7} + \frac{NM_s^{10} H_0^9}{95040k_B^9 T^9} - \frac{691NM_s^{12} H_0^{11}}{70761600k_B^{11} T^{11}} + \dots,$$

$$c_3 = \frac{NM_s^4 H_0^3}{180k_B^3 T^3} - \frac{NM_s^6 H_0^5}{1512k_B^5 T^5} + \frac{NM_s^8 H_0^7}{14400k_B^7 T^7} - \frac{NM_s^{10} H_0^9}{142560k_B^9 T^9} + \frac{691NM_s^{12} H_0^{11}}{9900662400k_B^{11} T^{11}} - \dots,$$

由于 N, M_s, k_B, H_0 已知,在磁性纳米颗粒的交流磁化强度中,由于磁化曲线的非线性特性,奇次谐波信息丰富.通过对在外加磁场激励下产生磁化响应中的一次谐波幅值 c_1 和三次谐波幅值 c_3 来反演温度,从而可以求出温度值^[18].

从上述过程中可以发现, ψ 值的取值范围的不同,会在郎之万函数泰勒级数展开时产生不同的误差,最终影响反演温度产生的测量误差.

2.2 MATLAB 仿真

通过仿真技术研究 ψ 的取值范围,以未离散的磁化响应 M 为理论值,计算利用不同展开项数逼近 M 的误差,仿真中激励频率为 375 Hz,温度为 315 K. ψ 从 0.000 1 到 1.2 增长过程中,对于利用三至六项的泰勒展开项数逼近磁化响应 M 与理论值误差,如图 1 所示.磁化响应 M 的泰勒展开项数越多,则其与理论值之间的相对误差越小,五项和六项展开的相对误差要远小于三项和四项展开的相对误差.且随着 ψ 值的逐渐增大,不同展开项数的相对误差都逐渐变大,五项和六项展开的相对误差随着 ψ 值增大的趋势较为缓慢,而

三项和四项展开的相对误差随着 ψ 值增大的速率较高,尤其是三项展开,当 ψ 值大于 0.8 时,呈指数式增大趋势.

当磁化响应 M 存在误差时,则在温度反演时必然会导致一定的温度误差.为此仿真研究了当磁化强度 M 存在不同的误差时,对温度误差所造成的影响.仿真过程中,磁场激励频率为 375 Hz,理论温度为 315 K,根据图 1 的仿真结果,磁化响应 M 的相对误差范围设定为 0.001%~0.18%.如图 2 所示,随着磁化响应 M 的相对误差逐渐增加,温度误差也随之逐渐变大,当相对误差超过 0.06%时,温度误差迅速增加.一般认为,肿瘤热疗中在生物医学窗口温度范围 310 K~320 K 内的测温精度应达到 0.1 K.由图 2 可知,当磁化响应 M 的相对误差小于 0.02%时,才能保证温度误差小于 0.1 K.结合图 1 仿真结果,磁化响应 M 的相对误差小于 0.02%时, ψ 值小于 0.8.因此, ψ 值需要小于 0.8 才可以尽可能地减小郎之万函数展开时对磁化强度所引入的误差,以及最终导致的温度误差.

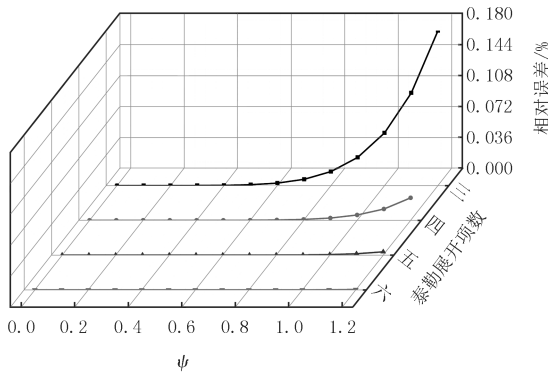


图1 磁化强度模型误差分析

Fig.1 Analysis of magnetization model error

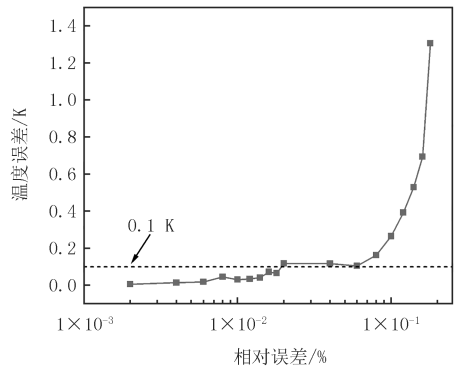


图2 磁化响应误差对温度误差的影响

Fig.2 Effect of magnetization response error on temperature error

在满足离散条件下对郎之万函数进行泰勒级数展开时,截取不同的展开项数,对模型会产生不同的截断误差,影响反演温度时的构建的矩阵系数,从而影响反演结果即温度的测量误差.对于理论模型中 ψ 值的主要影响因素有信噪比、激励磁场强度 H_0 的影响,为此通过仿真分析研究不同信噪比及激励磁场强度对不同展开项数导致的温度测量误差的影响.仿真过程中,激励磁场频率为375 Hz,激励磁场强度范围从0.000 5 T到 0.004 5 T,磁纳米粒子粒径为 15 nm,饱和磁化强度为 47.7 kA/m,理论温度为 315 K.

首先研究无噪声影响的理想状态下不同离散展开项数的温度误差情况.图 3 所示是无噪声条件下三至六项离散展开时,在不同激励磁场下引起的模型误差所导致的温度测量误差.从图 3 所示的仿真结果可以发现,在无噪声情况下随着激励磁场幅值的增加,三项展开引起温度测量误差迅速增加,这是由于在使用泰勒级数展开式时,三项展开选取的项数较少,即截断的项数较多,存在较大的截断误差,使得磁化响应的模型误差会随着激励磁场强度的增加而增大,从而导致较大的温度测量误差.当泰勒级数展开为四项时,温度误差明显小于三项展开时的误差,当通过五项和六项泰勒展开时,虽然也存在误差,但符合测量的 0.1 K 误差范围,且相对于三项、四项展开误差不明显.以上结果是测量系统在理想无噪声状态下的模拟仿真.

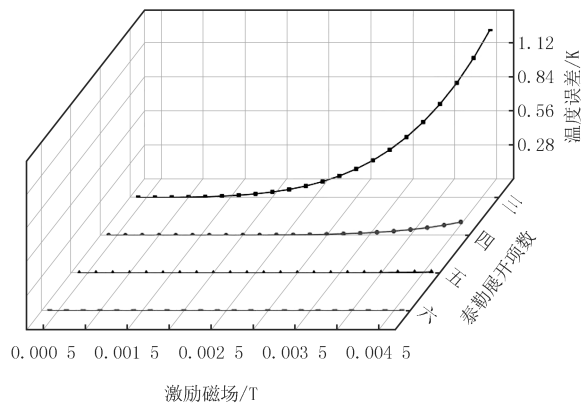


图3 无噪声下模型误差分析

Fig.3 Analysis of model error without noise

当泰勒级数展开为四项时,温度误差明显小于三项展开时的误差,当通过五项和六项泰勒展开时,虽然也存在误差,但符合测量的 0.1 K 误差范围,且相对于三项、四项展开误差不明显.以上结果是测量系统在理想无噪声状态下的模拟仿真.

在现实环境中使用磁性纳米颗粒温度计测量温度时,噪声在信号产生和传输过程中难以避免,这就需要考虑不同的信噪比对于温度测量误差的影响.为此,将高斯噪声引入到磁化响应信号中,引入高斯噪声后的磁化响应

$$M'(t) = M(t) + S_{NR}M_1G(t),$$

其中, S_{NR} 为信噪比, M_1 为磁化响应信号强度, G 为的高斯白噪声(期望为 0,方差为 1).

四组仿真信噪比分别取 40 dB,60 dB,80 dB,100 dB,每组仿真重复 10 次取均值,得到不同信噪比下各项展开时测得的温度误差.图 4 所示仿真是郎之万函数进行泰勒展开时在三至六项展开产生不同的截断误差在不同信噪比影响下的对温度测量误差的影响.

从图 4 不同信噪比下的误差仿真结果可以发现,在相同激励磁场下和五项到六项展开项数下,图 4(d)信噪比为 40 dB 时温度测量误差明显大于 0.1 K,当图 4(b)信噪比为 80 dB 和图 4(a)高于 80 dB 时温度测量误差趋于稳定,且小于 0.1 K.在相同激励磁场下,随着信噪比的提高,温度测量误差逐渐减小.在同一信噪比的仿真结果中,如图 4(c)信噪比为 60 dB 时,在泰勒级数三项、四项展开时比五项、六项展开,产生的温度误差大,其主要原因是在泰勒级数展开截断时,选取三项四项截断的有用项少于五项六项展开,其模型误差从理论上就大于五项、六项展开时的误差,使得温度反演时温度误差较大,系统的测量精度不够;在五项、六项展开时温度误差整体小于三项、四项截断时的误差,且六项展开的温度误差基本相同于五项展开的误差,主要是由于泰勒级数展开时,随着项数的增加,每一项系数的绝对值逐渐减小,在第六项展开时,项数的增加对于模型误差的影响,对于反演后温度测量的结果影响较小,可以基本忽略,并且六项展开相对于五项展开计算量更大,求解复杂程度增加,因此,在信噪比高于 40 dB 时,为了减小温度测量误差,保证温度测量精度,理论模型需要选取五项以及五项以上的泰勒级数展开才可满足要求,但是为了减少测量温度需要的测量时间,应在保证测量精度的基础上,尽量降低模型的计算难度和求解难度,因此选择五项展开项数逼近郎之万函数模型较优.

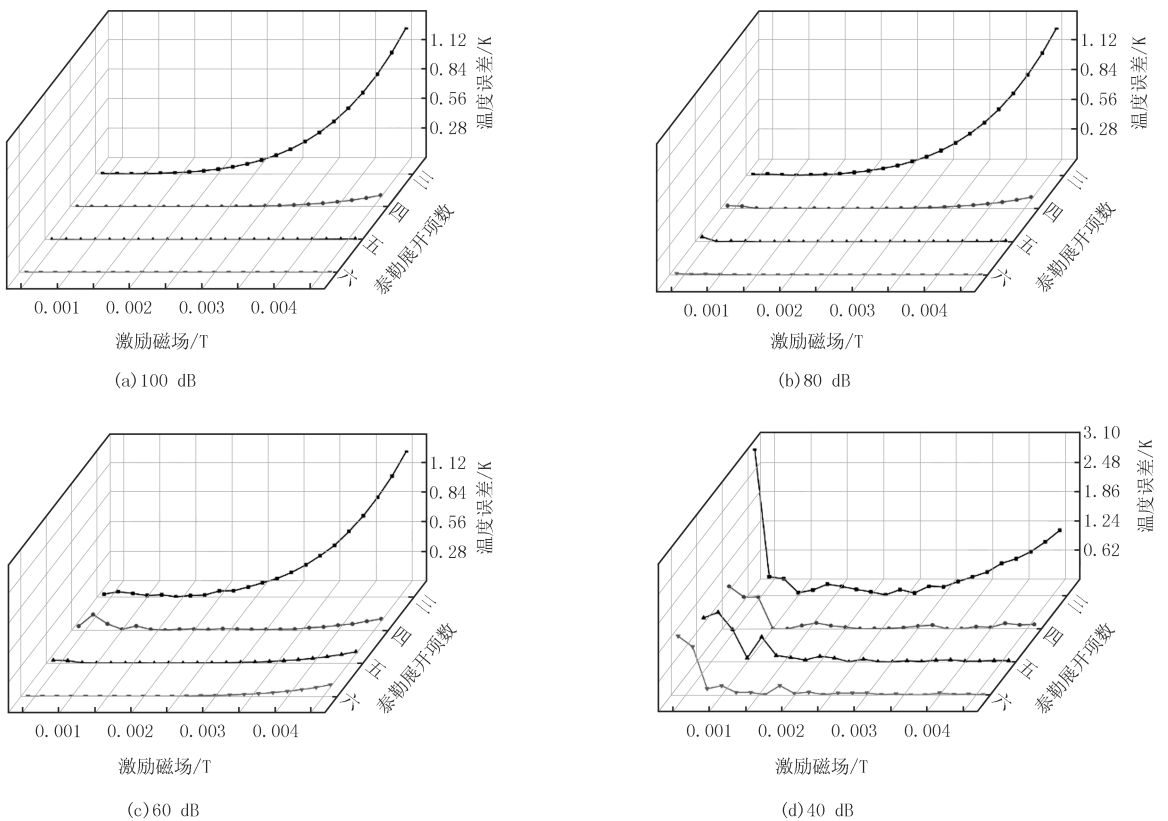


图4 不同信噪比下模型误差分析

Fig.4 Analysis of model error at different signal-to-noise ratios

又由图 4 可知,当信噪比低于 80 dB 时,激励磁场幅值从 0.000 5 T 逐渐增加到 0.001 5 T 的时候,温度误差逐渐减小,当激励磁场幅值 0.001 5 T 逐渐增加到 0.002 5 T 的时候,温度误差较小且趋于平稳.当激励磁场幅值大于 0.002 5 T 的时候,反演温度的测量误差随着激励磁场的增强逐渐增大,在三项展开时现象最为明显,温度误差高于 0.1 K.所以无论泰勒展开式从三项还是到六项展开,需要选取较优的激励磁场,在 0.001 5~0.002 5 T 时,温度误差趋势稳定且较小,所以在实验过程中可以选取 0.001 5~0.002 5 T 的激励磁场作为较优的激励磁场.

由仿真结果可知,为了使温度测量误差满足 0.1 K 精度要求,当信噪比较小且展开项数比较少时,由图 4(d)可知,在激励磁场的强度在 0.000 5~0.001 5 T,三至六项展开式都无法满足 0.1 K 的温度测量误差.在激励磁场的强度大于 0.002 5 T 时三项展开式的温度测量误差不断增大,但四至六项展开式的温度测量误差呈缓慢上升趋势并随着项数的增加趋于稳定且小于 0.1 K.例如当信噪比为 40 dB 且三项展开的时候,需要在小于 0.001 5 T 激励磁场时提高激励磁场强度,可以在大于 0.002 5 T 激励磁场,通过增加泰勒展开项数减小温度误差.

磁性纳米颗粒温度测量系统在实际应用中,样品的磁化响应信号和谐波幅值信号会受到样品种类和样品浓度的影响,在同一条件下不同种类和浓度的样品信噪比不同.当信噪比较高时,测得样品的磁化响应信号较强,在激励磁场强度较低时可以选择减少展开项数,以避免给系统增加不必要的运算压力,减少系统的复杂程度.当信噪比较低时,需要在小于 0.001 5 T 时提高激励磁场强度,或者在激励磁场大于 0.002 5 T 时增加泰勒展开的项数,才能提高温度的反演精度.

3 实验分析

3.1 实验系统结构

磁性纳米颗粒温度测量系统的结构如图 5 所示.系统主要有三部分:第一部分是激励磁场的产生装置,由数据采集卡(NI USB 6356)输出正弦信号,经功率放大器后,驱动螺线管产生稳定、均匀的交变激励磁场,包括线性功率放大器(AE 7224)、功率电阻和螺线管;第二部分是弱磁检测装置,检测磁性纳米颗粒样品产生的磁化响应信号,包括差分探测线圈、带通滤波器、前置放大器和选频放大器;第三部分是软件,主要进行信号调理,温度反演,包括采用数字相敏检波算法(digital phase-sensitive detector, DPSSD)用以提取各次谐波的幅值, PID 算法,软件消除剩磁等.磁性纳米颗粒的磁化响应信号,由螺线管中的差分探测线圈探测,经过滤波和放大后,传输到信号采集卡,通过信号采集卡存储到计算机平台,然后通过数字相敏检波算法(DPSSD)处理样品的磁化响应信号,进而计算出样品的磁化响应的谐波幅值信息,最终在计算机平台的 LABVIEW 中进行数字信号处理和温度

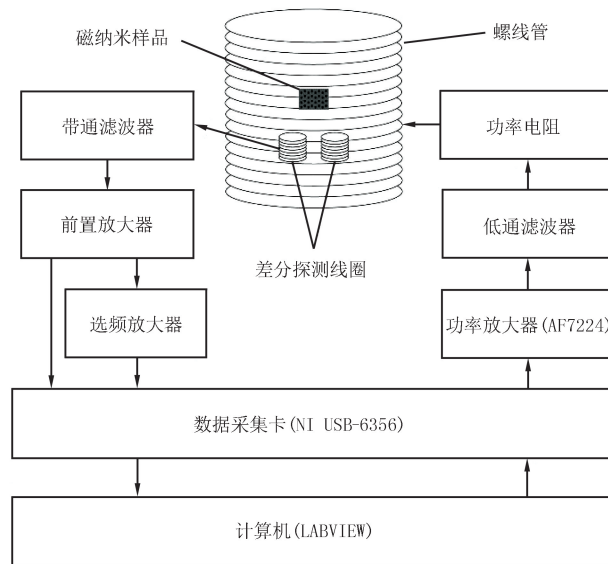


图5 硬件系统结构框图

Fig.5 The block diagram of hardware system

反演.磁性纳米颗粒的磁化响应信号,由螺线管中的差分探测线圈探测,经过滤波和放大后,传输到信号采集卡,通过信号采集卡存储到计算机平台,然后通过数字相敏检波算法(DPSSD)处理样品的磁化响应信号,进而计算出样品的磁化响应的谐波幅值信息,最终在计算机平台的 LABVIEW 中进行数字信号处理和温度

反演.

3.2 实验

利用上述磁性纳米颗粒温度测量系统进行弱磁场强度下的模型误差实验.本次实验使用的磁性纳米颗粒样品是 Ferrotec 公司的 EMG1300(10 nm,360 kA/m)样品.首先由数据采集卡产生激励频率为 375 Hz 的正弦信号,经线性功率放大器放大后驱动线圈产生强度为 0.001 5 T 的交变激励磁场,并将插入 PT100 温度计的磁性纳米颗粒样品置于试管中水浴加热至 330 K,然后将含有磁纳米样品的试管放入螺线管中心位置然冷却至室温.在整个降温过程中,磁性纳米颗粒温度测量系统与 PT100 温度计^[17]被同时用来记录磁性纳米颗粒样品的温度变化.并以 PT100 所测温度为基准计算磁性纳米颗粒温度测量系统的测量温度误差,实验结果如图 6 所示.

由图 6 可知,在磁性纳米颗粒样品温度的变化过程中,三至六项的模型下所测得温度与 PT100 温度计的测量结果产生的误差不大,说明了磁性纳米颗粒温度计温度测量的正确性.又观察可知,三项、四项截断的温度误差明显高于五项、六项的温度误差,随着展开项数的增加,温度误差逐渐减小.本次实验结果与仿真结果吻合.

在固定温度(315 K)下重复上述实验步骤,激励磁场幅值从 0.001 5 T 逐渐增加到 0.005 T,步长为 0.000 5 T.实验结果如图 7 所示.

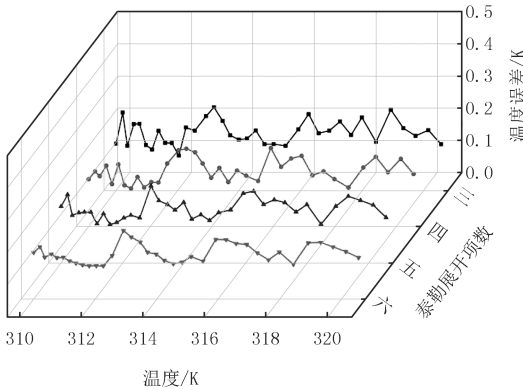


图6 0.001 5 T下不同温度的模型误差
Fig.6 The model error of different temperature at 0.001 5 T

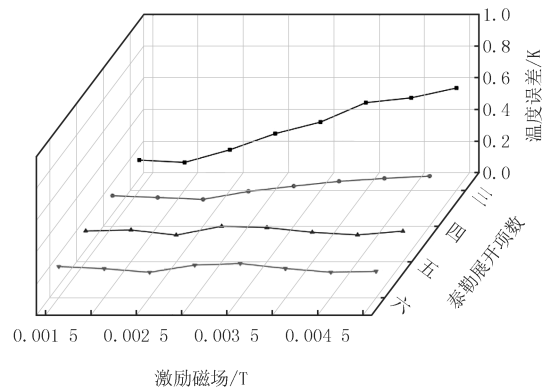


图7 315 K下不同激励磁场下的模型误差
Fig.7 The model error of different applied magnetic field at 315 K

3.3 测温误差分析

激励磁场在 0.001 5 T 至 0.005 T 的增长过程中,温度误差也是随着激励磁场变化而变化的,三项、四项展开时随着激励磁场的增大,温度误差逐渐增大,而五项、六项展开时温度误差基本一致,且相对于三项、四项展开较小,与仿真结果相同.

当泰勒展开式截取项数逐渐增加时,温度的测量误差会随着项数的增加为减小,这是由于泰勒展开式的项数越多,使得测量的得到的磁化响应信息的模型误差减小,进而使测得的谐波幅值误差减小,最终影响温度的反演结果减小测量误差.由实验可知选取五项及以上的项数展开可以减少温度测量误差,但是由于展开项数的增加,测量系统中的计算量和运算时间就会不断增加,如谐波测量时间和温度反演的计算时间都会增加,这就降低了磁性纳米颗粒温度测量系统的时间分辨率,同时增大了磁化响应信号和谐波幅值测量的难度,对硬件系统的精度要求较高,实现困难.虽然,随着泰勒展开时截取的有用项减少,计算量会逐渐减少,但由于截断带来的模型误差会逐渐增大,温度测量误差也会增大,要保证温度测量精度前提下,郎之万函数的展开项数不能低于五项.因此在磁性纳米颗粒温度测量系统中,对于测量模型的泰勒展开,选择五项展开项数逼近郎之万函数模型较优,既可以满足 0.1 K 的精度要求又可以满足时间分辨率为 1 s.

4 结 论

本文通过仿真和实验可知,利用泰勒级数逼近郎之万函数的展开项数问题是引起模型误差的关键,进而会引起磁性纳米颗粒温度测量系统的测量误差.因此为了提高温度的求解精度,由仿真和实验结果可知,最好采用五项展开的模型作为最终选择.

在研究模型误差时也需要考虑激励磁场强度,激励磁场频率等因素,如增加激励磁场强度,信号信噪比增加,但在较大激励磁场下,磁性纳米颗粒也会有尼尔弛豫现象,产生热量,影响温度测量精度,而且系统产生噪声,搭建困难,所以在仿真和实验中采用的磁性纳米颗粒粒径小,而且交变激励磁场频率低,尼尔弛豫很小,发热效应可以忽略不计^[19].而在实验中,在降温过程中磁纳米温度计与参考铂电阻温度计之间温度差产生波动,可能由于磁纳米粒子位置与参考铂电阻的相对位置及在降温过程中热流和热阻导致的两侧温传感器存在理论温度差.在较优的激励磁场范围内增加激励磁场强度,可以提高信噪比,从而提高温度测量精度,减小温度测量误差,在后续研究中的将继续考虑其他因素优化温度测量模型.

参 考 文 献

- [1] 刘兴晨,饶云江,冉增令,等.高频 CO₂ 激光脉冲写入的掺硼长周期光纤光栅温度应变特性[J].河南师范大学学报(自然科学版),2011,39(3):43-46.
LIU X C, RAO Y J, RAN Z L, et al. Temperature and Strain Characteristic of Long Period Fiber Grating(LPFG) Induced by High Frequency CO₂ Laser Pulses[J]. Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition), 2011, 39(3): 43-46.
- [2] 路立平,鹿晓力,高巍.不依赖于传感器静态特性的温度传感器热时间常数测试方法研究[J].河南师范大学学报(自然科学版),2012,40(6):36-38.
LU L P, LU X L, GAO W. Measurement Method of Temperature Sensor's Thermal Time Constant not Depending on the Sensor's Static Characteristic[J]. Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition), 2012, 40(6): 36-38.
- [3] HEDAYATNASAB Z, ABNISA F, DAUD W M A W. Review on magnetic nanoparticles for magnetic nanofluid hyperthermia application [J]. Materials & Design, 2017, 123: 174-196.
- [4] KOK H P, WUST P, STAUFFER P R, et al. Current state of the art of regional hyperthermia treatment planning: a review[J]. Radiation Oncology, 2015, 10(1): 196.
- [5] SHETAKE N G, KUNAR A, GAIKWAD S, et al. Magnetic nanoparticle-mediated hyperthermia therapy induces tumour growth inhibition by apoptosis and Hsp90/AKT modulation[J]. International Journal of Hyperthermia, 2015, 31(8): 909-919.
- [6] ROSS-PINNOCK D, MAROPOULOS P G. Review of industrial temperature measurement technologies and research priorities for the thermal characterisation of the factories of the future[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2016, 230(5): 793-806.
- [7] MUKHOPADHYAY S C. Wearable sensors for human activity monitoring: A review[J]. IEEE sensors journal, 2015, 15(3): 1321-1330.
- [8] SANZ B, CALATAYUD M P, TORRES T E, et al. Magnetic hyperthermia enhances cell toxicity with respect to exogenous heating[J]. Biomaterials, 2017, 114: 62-70.
- [9] BING C, NOFIELE J, STARUCH R, et al. Localised hyperthermia in rodent models using an MRI-compatible high-intensity focused ultrasound system[J]. International Journal of Hyperthermia, 2015, 31(8): 813-822.
- [10] RIZZITELLI S, GIUSTETTO P, FALETTO D, et al. The release of Doxorubicin from liposomes monitored by MRI and triggered by a combination of US stimuli led to a complete tumor regression in a breast cancer mouse model[J]. Journal of Controlled Release, 2016, 230: 57-63.
- [11] LAWRENCE D A, LIPMAN A T, GUPTA S K, et al. Undetected intraocular metallic foreign body causing hyphema in a patient undergoing MRI: A rare occurrence demonstrating the limitations of pre-MRI safety screening[J]. Magnetic Resonance Imaging, 2015, 33(3): 358-361.
- [12] WEAVER J B, RAUWERDINK A M, HANSEN E W. Magnetic nanoparticle temperature estimation[J]. Medical Physics, 2009, 36(5): 1822-1829.
- [13] LU J W, YANG F, KE Q F, et al. Magnetic nanoparticles modified-porous scaffolds for bone regeneration and photothermal therapy against tumors[J]. Nanomedicine: nanotechnology, biology, and medicine, 2018, 14(3): 811-822.
- [14] HE L, LIU W Z, XIE Q, et al. A fast and remote magnetonanothermometry for a liquid environment[J]. Measurement Science and Technology, 2015, 27(2): 025901.
- [15] FELIX L L, COAQUIRA J A H, MARTINEZ M A R, et al. Structural and magnetic properties of core-shell Au/Fe₃O₄ nanoparticles[J]. Scientific reports, 2017(7): 41732.

- [16] PI S, LIU W, WEI K, et al. AC magnetic nanothermometry: an investigation of the influence of size distribution of magnetic nanoparticles [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 53(3): 1-7.
- [17] XU W, LIU W, ZHANG P. Nanosecond-resolved temperature measurements using magnetic nanoparticles [J]. Review of Scientific Instruments, 2016, 87(5): 054902.
- [18] DU Z Z, SUN Y, SU R J, et al. Harmonic detection and noise suppression in a magnetic nanoparticle thermometer [C] // 2017 Chinese Automation Congress (CAC), [S.l.]: IEEE Press, 2017: 473-478.
- [19] DU Z Z, SUN Y, SU R J, et al. The phosphor temperature measurement of white light-emitting diodes based on magnetic nanoparticle thermometer [J]. Review of Scientific Instruments, 2018, 89(9): 094901.

Theoretical model error of temperature measurement based on magnetic nanoparticles

Zhang Zhifeng^a, Wang Dandan^b, Li Nana^b, Duan Yingying^b, Cui Yadong^a

(a. Software Engineering College; b. School of Computer and Communication Engineering,
Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: Magnetic nanometer temperature measurement technology is a new and non-contact magnetic temperature measurement method, which can realize temperature measurement under extreme conditions such as real-time monitoring of body temperature in cancer thermotherapy. However, the error of temperature measurement accompanied by this technology seriously restricts its application and promotion in more fields. To solve this problem, the influence of Taylor series expansion terms of different terms on temperature error is analyzed and verified through simulation and experiment from three aspects of Taylor series expansion terms of Langevin function, excitation magnetic field amplitude and signal-to-noise ratio. The results show that the method of approximating Langevin function with five Taylor series expansion terms, increasing the intensity of exciting magnetic field and improving signal-to-noise ratio can solve the problem of large error in magnetic nanometer temperature measurement theoretically.

Keywords: magnetic nanoparticles; temperature measurement; model error; Langevin function

[责任编辑 杨浦 王凤产]