

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2413341

基于磁场耦合的非接触式金属温度测量系统*

杨鸿滢¹, 翁婉莹¹, 王云峰², 吴建德¹, 何湘宁¹

(1. 浙江大学电气工程学院 杭州 310027; 2. 佛山市顺德区美的电热器制造有限公司 佛山 528311)

摘要:随着现代科学与工程技术的不断进步,金属温度测量在保证产品质量、优化生产过程和确保安全等方面的重要性日益突出。传统的金属温度测量方法在实际应用中常面临难以在线测量及测量精度较低的问题。基于此,提出了一种基于磁场耦合的非接触式金属温度测量传感系统设计方法。首先,分析了系统等效阻抗实部与金属温度之间的近似线性关系,进而将无法直接测量的温度变化量转化为可测量的系统阻抗值,为基于磁场耦合的非接触式金属温度测量提供了理论依据。其次,构建了非接触式金属温度测量系统的等效模型,并使用 Ansys Maxwell 软件进行三维有限元仿真验证,验证了系统模型的可行性。进一步,提出并比较了两种不同类型的电涡流传感器用于温度测量。其中,多线圈耦合的电涡流传感器具有较小的体积、更高的测量精度和较强的稳定性。基于上述理论分析和仿真验证,提出了基于多线圈耦合的非接触式金属温度测量系统设计方法,并进行了系统建模分析和实物测试。实验结果显示,该系统的绝对温度偏差 $<2^{\circ}\text{C}$,验证了系统的可靠性和稳定性。该系统能够在没有直接可视路径的情况下稳定工作,克服了对可视路径的依赖,提升了非接触式金属温度测量系统的适用性,能够在复杂环境下实现金属温度的实时精确测量。

关键词: 磁场耦合;非接触式温度测量;电涡流;系统建模

中图分类号: TH811 TM93 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4017

A non-contact metal temperature measurement system based on magnetic field coupling

Yang Hongyan¹, Weng Wanying¹, Wang Yunfeng², Wu Jiande¹, He Xiangning¹

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Foshan Shunde Midea Electric Heating Appliances Manufacturing Co., Ltd, Foshan 528311, China)

Abstract: With the continuous advancement of modern science and engineering technology, the importance of metal temperature measurement has become increasingly prominent for ensuring product quality, optimizing production processes, and ensuring safety. However, traditional metal temperature measurement methods often face challenges such as difficulty in online measurement and low measurement accuracy. To address these issues, this study proposes a non-contact metal temperature measurement method based on magnetic field coupling. First, the study analyzes an approximate linear relationship between the real part of the system's equivalent impedance and temperature, thereby transforming the unmeasurable temperature changes into measurable system impedance. It provides a theoretical foundation for non-contact metal temperature measurement based on magnetic field coupling. Next, an equivalent model of the non-contact metal temperature measurement system is formulated. Its feasibility is evaluated through a three-dimensional finite element simulation using Ansys Maxwell software. Furthermore, the study proposes and compares two different types of eddy current sensors for temperature measurement, highlighting the multi-coil coupled structure for its compact size, high accuracy, and great stability. Based on this, a non-contact metal temperature measurement system using multi-coil coupling is proposed. The system modeling analysis and physical testing are conducted. The experimental results show that the absolute temperature deviation of the non-contact metal temperature measurement system based on the multi-coil coupling model is less than 2°C , confirming the reliability and stability of the system. The system can operate stably without a direct visual path, overcoming the reliance on line-of-sight in traditional

收稿日期: 2024-10-07 Received Date: 2024-10-07

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(52350003)、佛山市顺德区科技创新项目(2230218004234)资助

non-contact temperature measurement techniques. This advancement significantly improves the system's performance and applicability, enabling precise, real-time measurement of metal temperature even in complex and obstructed environments.

Keywords: magnetic field coupling; non-contact temperature measurement; eddy current; system modeling

0 引言

随着现代科学和工程领域的不断发展,金属温度测量的重要性日益凸显^[1]。无论是特殊生产环境下的金属加工,如炼钢^[2]和铸铁^[3],还是家用电器中的温度监测,如电磁炉^[4],精确的温度控制都是保证产品质量和优化生产过程的关键。此外,在悬臂梁结构^[5]、电机^[6]、电磁线圈^[7]等关键部件中,高精度的实时温度监测技术也是确保安全的必要条件。

相较于传统的接触式测温技术,非接触式测温技术,在高温,高速,高致密环境中优势巨大^[8],不仅避免了物理接触可能导致的测量误差,还可以解决因为高温、高压或有毒环境带来的安全问题,适用范围更广^[9]。此外,非接触式测量方法还可以在没有直接视线路径的情况下进行,对难以观察到的区域进行温度测量。然而,非接触式测量存在受环境干扰大且非接触式传感器成本较高的缺点,限制了其应用范围。

随着温度测量技术的进步,电涡流传感器展现出其在温度测量方面的应用潜力。文献[10]指出线圈和被测导体系统的等效阻抗与环境温度、导体材料、几何形状、线圈的几何参数、激励电流频率以及线圈到被测导体间距离有关。在电涡流传感器中,当温度变化而其余参数保持不变的情况下,阻抗成为该变化参数的单值函数。文献[11]通过数值仿真定性分析了温度对电涡流传感器系统阻抗的影响规律,并设计了双探头差动补偿形式对测量线圈进行温度补偿,但并未将温度对阻抗的影响规律应用于温度检测。文献[12]运用 Ansys 仿真软件对电磁感应加热系统进行建模仿真,证实了通过建模仿真计算系统等效阻抗的可行性。

针对传统金属温度难以在线测量和测量精度低的问题,提出了一种基于磁场耦合的非接触式金属温度测量方法,将电涡流传感器原理应用于金属温度测量。首先分析了电涡流传感电路中系统等效阻抗实部与温度的关系,通过电磁场仿真得到有效验证。随后提出了两种不同的电涡流传感机构用于温度测量,并搭建一个基于多线圈耦合的非接触式金属温度测量系统。该系统对温度变化反应敏感,并结合准确快速的在线计算,能够实现金属温度的实时、高效和高精度在线测量。最后,通过搭建试验样机并进行实物实验,验证了所提方法的有效性和可行性。创新性地利用电涡流传感器原理进行高精度、高效率的温度测量,对金属材料的非接触式温度测量具有一定的参考价值和推广意义。

1 温度测量原理

1.1 电涡流检测原理分析

根据法拉第电磁感应定律,当导体中通以交变电流,或是导体被置于时谐电磁场中时,变化的磁场会在导体中激起感应电场和感应电流,即涡流^[13]。涡流产生的交变反磁场会改变测量线圈磁场,进而使测量线圈中的电流发生变化^[14]。利用涡流效应的原理,能够将非电量变化转化为线圈阻抗的变化,实现间接测量,如图1所示。

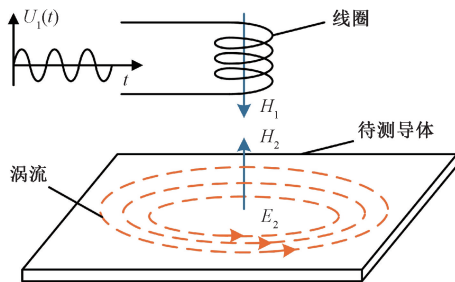


图1 涡流检测原理

Fig. 1 Principle of eddy current nondestructive measurement

然而,由于趋肤效应的存在,电磁场不能无限制地穿透导体^[15],而是仅作用于导体表面的一定径向范围内。其作用范围可用趋肤深度 δ 来表示,如式(1)所示。

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_0 \mu_r \sigma}} \quad (1)$$

据此,将受激励线圈影响而形成涡流的待测导体视为涡流短路环,其与激励线圈磁性相连。将涡流短路环表示为电阻和电感串联形成的回路,等效电路图如图2所示。

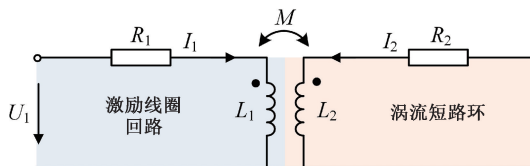


图2 单线圈电涡流传感器等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of the single-coil eddy current sensor

图2中, R_1 、 L_1 为激励线圈的等效电阻与等效电感; R_2 、 L_2 为待测导体的等效电阻与等效电感; M 为激励线圈与待测导体之间磁性相连的等效互感,当提离固定时,

M 为定值。通过测量激励线圈端的端口电压和电流,可以得到系统等效阻抗 Z_e , 其值可以表示为:

$$Z_e = \frac{U_1}{I_1} = \left(R_1 + \frac{\omega^2 M^2 R_2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} \right) + j\omega \left(L_1 - \frac{\omega^2 M^2 L_2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} \right) \quad (2)$$

1.2 温度对系统等效阻抗的影响

当温度发生变化时,系统等效阻抗随之改变。由于激励线圈匝数与系统阻抗具有强相关性,现分析线圈匝数对系统等效阻抗的影响。定义 U_i 为系统感应电压,是电场 E_φ 沿线圈投影方向上的积分。考虑到线圈的轴对称性,且线圈为 n 匝均匀分布,可以得到感应电压如式(3)所示。

$$U_i = - \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \frac{n}{S_{\text{coil}}} \int_{r_i}^{r_e} \int_0^t 2\pi r E_\varphi dz dr \quad (3)$$

式中: r_i 为线圈内径; r_e 为线圈外径; S_{coil} 表示线圈横截面积; n 为线圈匝数。

为参数化线圈匝数,对单匝线圈进行分析,取 $n=1$,可以得到单匝线圈的感应电压为:

$$U_{i,1} = - \frac{1}{S_{\text{coil}}} \int_{r_i}^{r_e} \int_0^t 2\pi r E_{\varphi,1} dz dr \quad (4)$$

由于单匝线圈的长度对应于线圈匝数的平均长度,则可以得到:

$$l_1 = \frac{1}{S_{\text{coil}}} \int_{r_i}^{r_e} \int_0^t 2\pi r dr dz = \pi(r_e + r_i) \quad (5)$$

假设介质是线性的,则有:

$$E_\varphi = nE_{\varphi,1} \quad (6)$$

由式(3)、(4)、(6)可以得到:

$$U_i = n \cdot n \left[- \frac{1}{S_{\text{coil}}} \int_{r_i}^{r_e} \int_0^t 2\pi r E_{\varphi,1} dz dr \right] = n^2 U_{i,1} \quad (7)$$

$$Z_e = n^2 Z_{e,1} = n^2 R_{e,1} + n^2 L_{e,1} \quad (8)$$

分析表明,线圈匝数对系统等效阻抗的影响可以由单匝线圈经式(8)折算得到,故温度改变时,线圈匝数 n 可进行参数化处理。

线圈电感 L_1 的表达式如式(9)所示。其感值主要与自身的材料、几何尺寸、匝数有关,与温度无直接关系。类比可得,待测导体的电感同样取决于几何尺寸,因此温度变化对系统电感的影响可以忽略不计。

$$L_1 = \mu_0 \mu_r \pi n^2 r^2 / l \quad (9)$$

在激励线圈与待测体间距离固定时,系统阻抗的变化与线圈电阻 R_1 、线圈的几何参数 γ_1 、待测导体等效电阻 R_2 、待测导体的几何参数 γ_2 以及激励频率 f 有关,即:

$$Z_e = F(R_1, \gamma_1, R_2, \gamma_2, f) \quad (10)$$

当待测导体温度改变时,由于金属的热膨胀系数极小,其几何参数变化微小,故 γ_2 可以忽略。而待测导体

温度变化不会引起激励线圈尺寸发生明显变化,几何尺寸参数 γ_1 也可以忽略。因此系统等效阻抗随温度变化的关系,主要由线圈电阻 R_1 与待测导体等效电阻 R_2 决定。

对于激励线圈,因趋肤效应引起的电阻随温度变化的关系如式(11)所示。

$$R_1 = \frac{l}{S} \left(\frac{\alpha}{2} \sqrt{\rho_0(1+\alpha t)} \pi f \mu_0 \mu_r + \frac{1}{4} \rho_0(1+\alpha t) + \frac{3}{32\alpha} \sqrt{\frac{\rho_0^3(1+\alpha t)^3}{\pi f \mu_0 \mu_r}} \right) \quad (11)$$

式中: l 为线圈导线的长度; S 为导线的横截面积; ρ_0 为导线材料在 0°C 时的电阻率; α 为导线材料电阻率的温度系数; t 为温度; f 为激励频率; μ_r 为导线材料的相对磁导率; μ_0 为真空磁导率。

由式(11)可知, R_1 随温度的变化而变化,当温度升高时, R_1 增大。为减小温度对系统等效阻抗测量的影响,可以对涡流传感器进行温度补偿,抵消温度对激励线圈造成的影响,从而降低误差。

综合上述分析,当激励频率 f 和提高固定时,系统等效阻抗 Z_e 仅为待测导体等效电阻 R_2 的单值函数,即:

$$Z_e = F(R_2) \quad (12)$$

在一定范围内,可对该单值函数进行线性化处理。定义系统等效阻抗的温度系数为 α_e , 当其他影响参数均固定时,可以得到系统等效阻抗 Z_e 随温度变化的近似计算式为:

$$Z_e = \alpha_e t + \beta_{re} + \beta_{imj} \quad (13)$$

式中: β_{re} 表示系统等效阻抗中不随温度变化的实部分量; β_{im} 表示系统阻抗中不随温度变化的虚部分量。

当测量系统固定,温度为唯一变量时,系统等效阻抗可视为温度的单值函数,阻抗实部与温度近似为线性关系。通过测量该系统阻抗实部的温度特性,能够间接得到待测导体温度值,实现温度测量。

1.3 三维有限元仿真

有限元法作为最有效的数值计算方法之一,在电磁问题求解中应用广泛。1.2节中对温度与等效阻抗的单值函数进行了讨论,为验证所提出的系统等效阻抗 Z_e 随温度变化的近似计算式,选用 Ansys Maxwell 作为有限元仿真工具进一步分析温度变化对阻抗的影响。

为减小趋肤效应的影响,选取感应加热系统中常见的利兹线圈作为激励线圈^[16], 不锈钢 430 圆盘作为待测导体,搭建单线圈电涡流传感器模型进行仿真。模型的材料属性如表 1 所示。根据待测导体的材料属性,温度变化主要对电导率产生影响,其函数关系式为:

$$\sigma_m = \frac{1}{\rho_{20}(1 + \alpha(t - 20))} \quad (14)$$

式中： σ_m 为待测导体电导率； ρ_{20} 为该导体在 20℃ 时的电阻率； α 为待测导体材料的温度系数。

表 1 模型的材料属性

Table 1 The material properties of the model

材料	相对磁导率	电导率/($\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$)
利兹线	1	5.8×10^7
铁氧体	1 000	0.01
不锈钢 430	800	1.67×10^6 (@ $t=20^\circ\text{C}$)

根据文献[17],紧密绕制的圆形线圈盘可以等效成铜圆盘进行仿真,搭建模型如图 3 所示,模型的具体参数如表 2 所示。

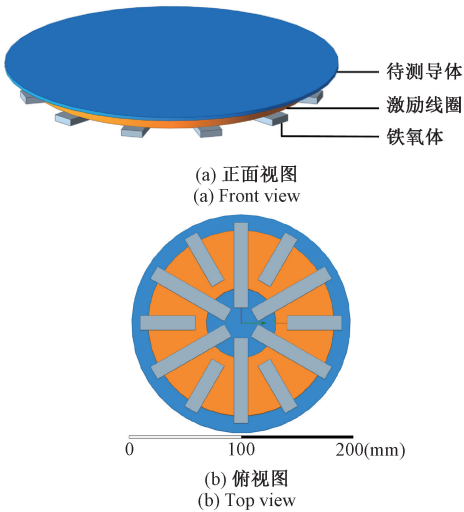


图 3 仿真模型

Fig. 3 Simulation model

表 2 模型的几何尺寸参数

Table 2 Geometric dimension parameters of the model

参数	值
待测导体半径/m	0.1
待测导体厚度/m	2×10^{-3}
待测导体与线圈垂直距离/m	5×10^{-3}
线圈内径/m	3.2×10^{-2}
线圈外径/m	8.5×10^{-2}
线圈高度/m	5×10^{-3}
线圈匝数	26
铁氧体 1 规格/m	$0.078\times0.013\times0.004$
铁氧体 2 规格/m	$0.05\times0.013\times0.004$

为了提升仿真结果的准确性,沿趋肤深度方向对待测导体进行自适应加密剖分。利用磁场仿真软件求解电

路等效电阻和电感时,其值与实际激励源大小无关,因此将仿真的激励电流设置为 1 A,在感应加热系统常用频率范围内选取 20、30 kHz 作为工作条件进行仿真。

仿真结果如图 4 所示。当温度改变时,阻抗实部随之发生变化,且二者呈正相关关系,符合 1.2 节对温度与阻抗实部关系的理论分析。

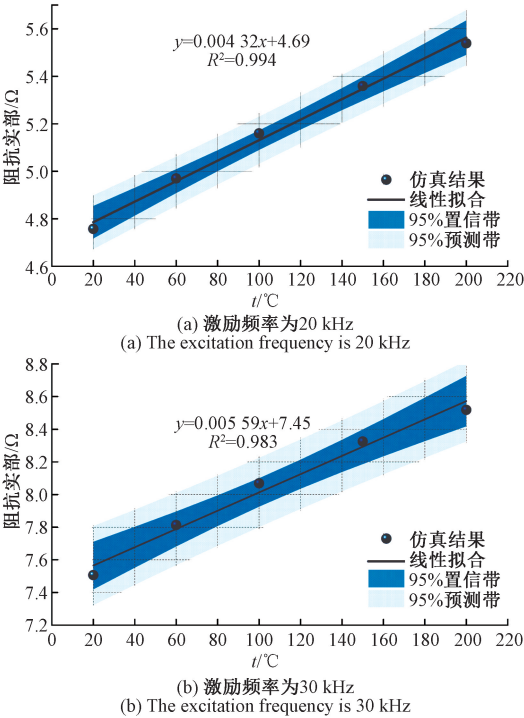


图 4 系统阻抗实部与温度的关系

Fig. 4 The relationship between the real part of impedance and temperature of the system

从仿真结果中可以看出,在 20~200℃ 的范围内,20 和 30 kHz 两激励频率下的系统阻抗实部与温度均具有较好的线性拟合关系。且激励频率的不同也会对系统等效阻抗的温度系数造成影响。

2 电涡流传感机构

电涡流传感机构是非接触式金属温度测量系统的核心。在以往研究的基础之上,本文提出并分析了两种测量模型:基于单线圈耦合的测量模型;基于多线圈耦合的测量模型。

2.1 基于单线圈耦合的测量模型

最简单的测量模型是基于单线圈耦合的测量模型,如图 5 所示。通过第 1 节的分析可知,温度对待测导体的影响可以转化为系统等效阻抗进行测量。为简化表达,系统等效阻抗可表示为由串联的电感 L_e 和电阻 R_e 组成,电阻 R_e 可分为线圈电阻 R_l 和负载电阻 R_{load} ,如

式(15)、(16)所示。

$$Z_e = R_e + j\omega L_e \quad (15)$$

$$R_e = R_1 + R_{\text{load}} \quad (16)$$

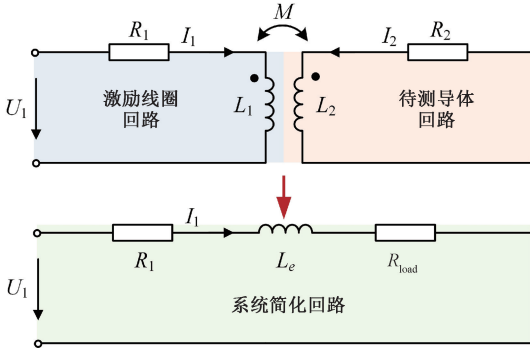


图5 单线圈电涡流传感器简化电路

Fig. 5 Simplified circuit of a single coil eddy current sensor

通过直接测量激励线圈端的电压与电流,可以计算出系统的等效阻抗,从而获得待测导体的温度信息。该方法无需增加额外测量装置,测量简单。但由于激励线圈电阻 R_1 远大于待测导体等效电阻 R_{load} ,在大数量级的信号中提取小数量级的信号变化时精确度会受到一定限制。同时,激励线圈本身的电阻温度系数对测量结果的影响较大,因此单线圈电涡流传感器的测量精度有限。

2.2 基于多线圈耦合的测量模型

为提高系统温度测量精度,在单线圈耦合的基础上增加一个测量线圈和一个补偿线圈,形成多线圈耦合电涡流传感模型,如图6所示。

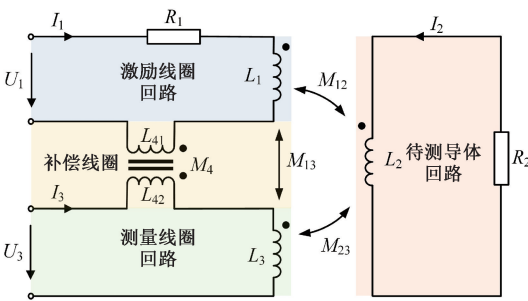


图6 多线圈无补偿耦合系统电路

Fig. 6 Circuit of the multi-coil uncompensated coupling system

其中, R_1 、 L_1 为激励线圈的等效电阻与等效电感; R_2 、 L_2 为待测导体的等效电阻与等效电感; L_3 为测量线圈的电感; L_{41} 和 L_{42} 为补偿线圈的电感; M_{12} 、 M_{23} 、 M_{13} 分别为激励线圈与待测导体、待测导体与测量线圈、测量线圈与激励线圈之间的互感; I_1 为原边激励线圈电流, I_2 为待测导体感应电流, I_3 为测量线圈上的电流。

为了分析方便,由基尔霍夫电流定律知,将同名端相连或异名端相连后,不会影响电路性能。因此将不含补

偿线圈的系统模型利用互感耦合模型进行解耦分析,得到解耦电路图如图7所示。

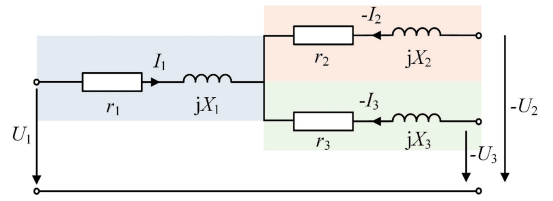


图7 多线圈耦合系统解耦电路模型

Fig. 7 Decoupling circuit model of the multi-coil coupling system

其中, X_1 、 X_2 、 X_3 分别为各支路等效电抗,有:

$$\begin{cases} X_1 = \omega(L_1 - M_{12} - M_{13} + M_{23}) \\ X_2 = \omega(L_2 - M_{12} - M_{23} + M_{13}) \\ X_3 = \omega(L_3 - M_{13} - M_{23} + M_{12}) \end{cases} \quad (17)$$

针对该模型进行电压计算,可以得到如下结果:

$$\begin{cases} U_1 = r_1 I_1 + j\omega L_1 I_1 + j\omega M_{12} I_2 + j\omega M_{13} I_3 \\ U_2 = -r_2 I_2 - j\omega L_2 I_2 - j\omega M_{12} I_1 - j\omega M_{23} I_3 \\ U_3 = -r_3 I_3 - j\omega L_3 I_3 - j\omega M_{13} I_1 - j\omega M_{23} I_2 \end{cases} \quad (18)$$

根据式(18)可知,3个线圈彼此耦合,测量线圈同样会受到激励线圈的影响。由于测量线圈的作用是接收涡流感应磁场,通过测量该线圈上的电压和相位得到涡流信号,从而获取实测温度,因此需要设计抵消激励线圈对测量线圈的影响。采用加入补偿线圈的方式进行抵消,并对电路进行解耦,得到补偿电感模型如图8所示。

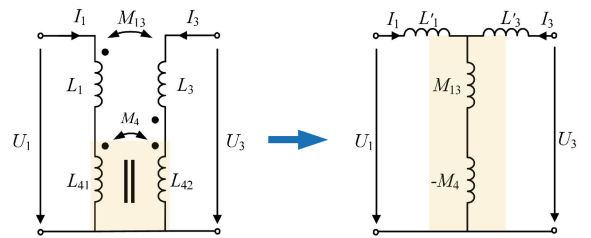


图8 补偿电感模型

Fig. 8 Model of compensation inductance

其中, I_1 为加入补偿电感后原边激励线圈电流; I_3 为加入补偿电感后测量线圈上的电流; U_1 为激励线圈两端电压; U_3 为测量线圈两端电压; 测量线圈与激励线圈间的互感 M_{13} 与补偿电感间的互感 M_4 可等效为异名端串联的两个电感,其共同作用等效电感记为 M , 即:

$$M = M_{13} - M_4 \quad (19)$$

从式(19)可见,利用测量线圈与激励线圈间的互感 M_{13} 与补偿电感间的互感 M_4 极性相反的特性,调整 M_4 的大小,可以使得补偿电感完全抵消激励线圈对测量线圈的影响,同时也避免了激励线圈内阻随温度变化而对测量造成影响。

在补偿后的多线圈耦合模型中,测量端电压 U_3 可表示为:

$$U_3 = j\omega(L_3 + L_{42})I_3 + j\omega M_{23}I_2 \quad (20)$$

测量端开路时,其电压为:

$$U_3 = j\omega M_{23}I_2 \quad (21)$$

由于金属材料可等效为闭合回路,因此有:

$$I_2 = \frac{j\omega I_1 M_{12}}{R_2 + j\omega L_2} \quad (22)$$

根据式(21)、(22),可得互阻抗 Z_e 为:

$$Z_e = \frac{U_3}{I_1} = \frac{-\omega^2 M_{12} M_{23}}{R_2 + j\omega L_2} \quad (23)$$

根据式(23),固定并测量 M_{12} 和 M_{23} ,在线测量 U_3 和 I_1 ,从而实现对阻抗实部和虚部的测量,进而间接获取温度值。

在上述多线圈耦合的电涡流传感模型中,通过增加测量线圈与补偿线圈,可以实时测量待测导体的温度值。无需额外增加温度传感器,从而减小了装置体积与成本。同时,避免了在大数量级中提取小数量级信号的问题,实现了较高的测量精度。

3 非接触式金属温度测量系统设计方法

3.1 系统工作流程

系统采用有限元仿真辅助验证、实物系统测量的方式进行测量。在测量系统参数(如线圈及激励频率)确定的条件下,搭建实验平台,用调理电路采集电压电流信号,并通过离散傅里叶分析计算系统等效阻抗的实部和虚部。同时,建立有限元模型进行仿真,分析阻抗与温度之间的实际关系,并通过对比实验测量结果与有限元仿真结果评估吻合性。在吻合较好的情况下,利用 MATLAB 对实验得到的等效阻抗数据进行线性拟合,在一定误差范围内求出温度系数,并根据拟合结果计算待测导体的实时温度。最后,将测量温度与实际温度进行对比,完成误差分析,从而验证非接触式金属温度测量系统的可靠性与准确性。

3.2 系统结构分析

以涡流传感机构为核心,建立非接触式金属温度测量系统。图9为非接触式金属温度测量系统能量传输示意图。该系统由控制电路、驱动及功率电路、电涡流传感机构、信号调理电路构成,其核心是电涡流传感机构,控制电路通过串口通信将信号传输至上位机。

控制电路生成高频方波信号作为初始激励信号,经驱动及功率电路放大后,信号进入涡流机构。激励信号耦合至待测导体端,待测导体端将含有温度信息的信号

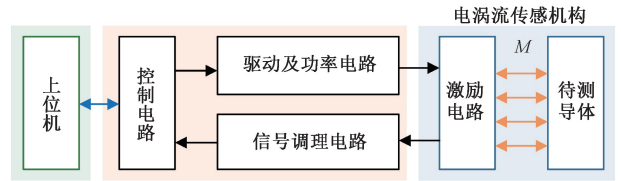


图9 非接触式金属温度测量系统能量传输

Fig. 9 Diagram of energy transfer in the non-contact metal temperature measurement system

耦合至测量电路中,该信号作为检测信号返回至信号调理电路,调理后反馈至控制电路进行数据处理与分析。上位机接收系统等效阻抗信号并实时显示温度测量结果。

3.3 激励信号生成电路设计

激励信号是非接触式金属温度测量系统中的关键组成部分,也是系统稳定运行的基础。在实际应用中,较高幅度的激励信号有助于提升温度测量的精度和准确性。为此,系统采用半桥逆变电路生成激励信号,并通过串联谐振方式驱动激励线圈,从而有效提高信号稳定性并降低驱动损耗。

激励信号的产生由驱动电路、功率电路和测量线圈3部分组成,如图10所示。控制电路输出高频方波信号,驱动电路对信号进行放大后作为功率电路的开关控制信号。功率电路采用半桥逆变结构,并通过选取合适的串联电容使电路工作在谐振状态,从而在较小的电源输入条件下实现较大的信号幅度输出。

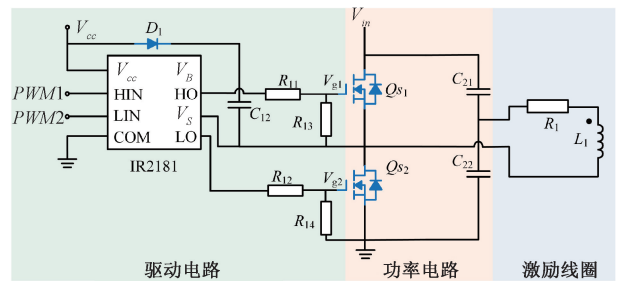


图10 激励信号产生电路

Fig. 10 Excitation signal generation circuit

功率电路中, C_{21} 和 C_{22} 为谐振电容,且 $C_{21} = C_{22}$ 。 C_{21} 、 C_{22} 与激励线圈 L_1 构成谐振回路,谐振频率为:

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{2L_1C_{21}}} \quad (24)$$

逆变电路的开关频率 f_s 被设计为接近谐振频率,以最大化电能转换效率,降低能量损失,同时增强信号的稳定性和测量精度,从而提升温度测量系统的整体性能。

4 实验验证

为验证基于磁场耦合的非接触式金属温度测量系统的正确性与有效性,搭建如图 11 所示的实验样机。

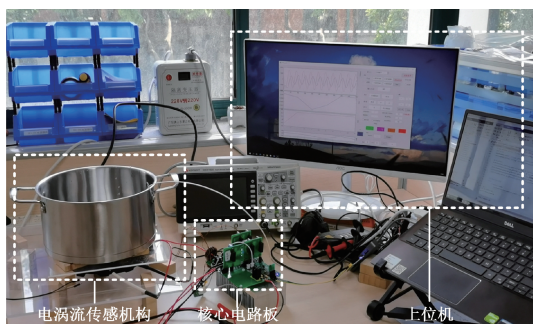


图 11 实验样机

Fig. 11 Experimental prototype

实验样机由电涡流传感机构、核心电路板和上位机组成,其中核心电路板包括控制电路、驱动及开关电路、信号调理电路,采用多线圈耦合的测量模型作为电涡流传感机构,核心电路板与上位机之间采用串口通信。选用不锈钢 430 材料进行实验验证。

4.1 激励信号验证

调节谐振电容大小与谐振电感匹配,使谐振频率达到 20 kHz。激励线圈两端波形如图 12 所示。

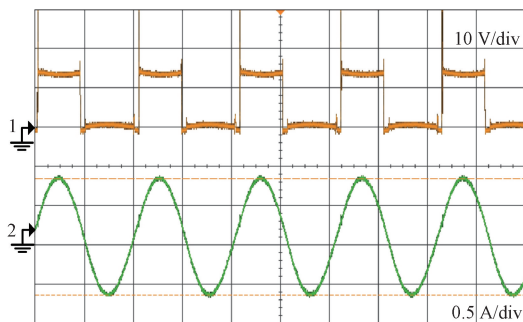


图 12 激励电压电流波形

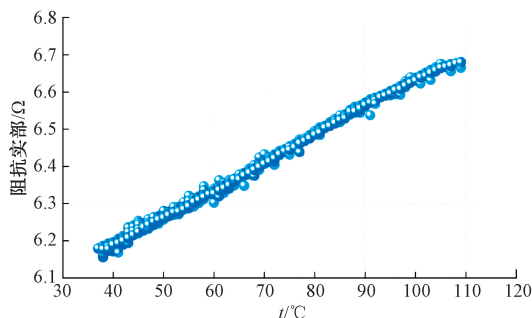
Fig. 12 Waveforms of the excitation signal

图 12 中,CH1 为半桥逆变电路输出的电压波形,CH2 为电流波形。从图中可以看出,电压波形为方波,电流波形为正弦波,电路处于谐振状态,且谐振频率符合设计要求。

4.2 温度测量结果分析

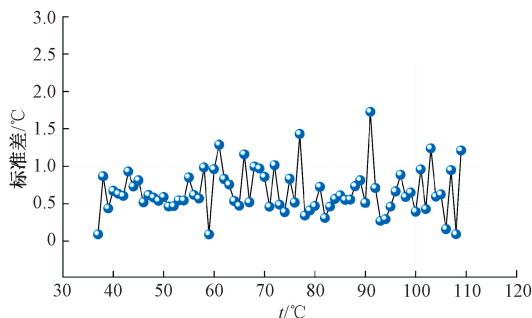
实验样机通过采集并计算阻抗的实部数据,实现对待测导体温度的实时获取,同时采用热电偶测量实际温度作为对比。为评估样机系统的测量精度,对待测导体在不同温度下的测量结果进行了多次重复实验,并计算

各温度下的标准差。最后,将测量结果和标准差结果分别绘制成图,如图 13 所示。



(a) 不同温度下阻抗实部的测量结果

(a) Real part of impedance values at different temperatures



(b) 不同温度下测量结果的标准差

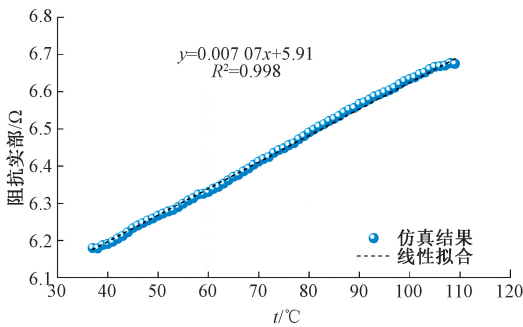
(b) Standard deviation of measurement results at different temperatures

图 13 不同温度下的测量数据及精度分析

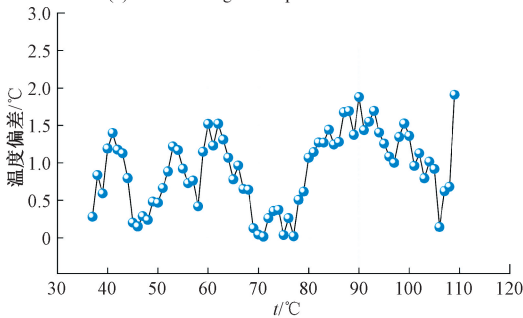
Fig. 13 Measurement data and precision analysis at different temperatures

从图 13(b)可以看出,在相同的待测导体温度下,所提出的温度测量系统在重复测量中表现出较小的离散性,具有良好的测量稳定性和可靠性。在实际温度测量过程中,系统测量精度主要受到以下因素的影响:首先,补偿电感无法完全抵消测量线圈与激励线圈之间的互感,其残余影响会降低测量精度;其次,被测物体暴露于空气中,与外界环境存在热交换过程,导致被测导体表面产生温度梯度,无法通过单一点的温度值准确表示整体温度;此外,测量位置的稳定性也是影响测量精度的重要因素,位置偏移会直接影响磁场耦合的均匀性,从而影响信号的稳定性和准确性。实验结果显示,该测量系统在重复测量中的最大标准差为 1.7°C,平均标准差为 0.7°C,验证了其在实际应用中的高稳定性和良好的测量精度。

为评估所提系统的准确度,对测量结果进行线性拟合,结果见图 14(a)。拟合结果表明,在测试温度范围内,数据结果呈现出良好的线性拟合度。基于阻抗实部得到测量温度值,并将其与实际温度值进行比较,得到温度偏差结果如图 14(b)所示。分析表明,实验系统测得的温度偏差最大为 1.9°C,平均温度偏差为 0.9°C,该系统具备较高的测量准确度。



(a) 温度测量的线性拟合结果
(a) Linear fitting of temperature measurement



(b) 各温度点的温度偏差
(b) Absolute error at different temperatures

图 14 不同温度下的拟合结果及准确度分析
Fig. 14 Fitting results and accuracy analysis at different temperatures

针对不锈钢 430 材料的温度测量,实际测量结果与有限元仿真结果之间存在一定误差,其产生原因主要包括以下几个方面:首先,由于计算机内存和计算能力的限制,有限元模型的网格剖分无法做到足够精细,只能不断逼近实际情况,这在一定程度上影响了仿真精度。其次,在建立仿真模型时,对实际测量系统进行了简化处理,包括理想化边界条件和忽略次要因素,这些都会导致仿真结果与实际情况之间存在差异。此外,实际温度下不锈钢 430 材料的磁导率和电导率可能会偏离仿真中所采用的参考值,从而引入额外的误差。除了上述主要原因,还存在其他潜在的误差来源,例如测量设备的分辨率、信号采集系统的噪声和稳定性、外界环境的电磁干扰以及温度波动等。尽管上述因素给测量结果带来一定偏差,但实验数据验证了系统阻抗实部与温度之间的近似线性关系,并表明测量精度和误差均在可接受范围内,为系统的实际应用提供了重要依据。

4.3 方法对比分析

目前,多种温度测量方法已在工业生产和日常生活中得到广泛应用。表 3 总结了常用温度测量方法的特点,并针对关键性能指标进行了对比和分析。

传统的接触式温度测量方法,如热电偶法和热敏电阻法,需要与被测物体直接接触。尽管具有较低的系统

表 3 常见温度测量方法对比
Table 3 Comparison of common temperature measurement methods

方法	非接触式	复杂度	需要可视路径
热电偶测量法 ^[18]	否	低	否
红外测量法 ^[19]	是	高	是
激光测量法 ^[20]	是	高	是
热敏电阻法 ^[21]	否	中	否
磁场耦合法(本文)	是	低	否

复杂度,但在强腐蚀、高温等复杂环境中应用受限。红外测量法虽具备非接触式测量的优势,但由于其依赖清晰的可视路径,对测量场景提出了较高要求,在遮挡环境或复杂场景中适用性低。激光测温法以较高的测量精度和快速响应能力见长,但其系统复杂度高、设备成本昂贵,同样需要清晰的可视路径,这在一定程度上限制了其在工业领域的大规模应用。

采用磁场耦合方法通过测量阻抗实部与温度的线性关系,实现了金属温度的非接触式温度测量。与红外和激光测温法相比,本文方法不受可视路径限制,即使在遮挡或封闭环境中也能进行稳定测量,克服了传统非接触式方法的应用局限。实验结果表明,该方法具备较高的精度和准确度,绝对温度偏差<2℃。同时,系统支持在线实时测量,有效提升了实用性和灵活性。此外,该方法具有较低的系统复杂度,便于在多种工业和工程场景中推广应用。

5 结 论

本文针对非接触式金属温度测量方法,分析了系统等效阻抗与温度的关系,从磁场耦合的角度提出了 3 种线圈耦合的电涡流传感模型。并以不锈钢 430 材料为例,进行了系统建模分析与实物验证,得出如下结论:

- 1) 当测量系统固定且温度为唯一变量时,系统等效阻抗可视为温度的单值函数,阻抗实部与温度近似为线性关系,为基于电涡流效应的非接触式金属温度测量提供了理论依据。
- 2) 相较于单线圈耦合的电涡流传感模型,所提出的多线圈耦合的电涡流传感模型能够实现更高的测量精度与准确度。实验结果表明,基于多线圈耦合模型的非接触式金属温度测量系统的绝对温度偏差<2℃,验证了系统的可靠性和稳定性。
- 3) 该系统能够实时检测金属温度的变化,具有较高的测量精度与测量准确度。同时,该系统突破了传统非接触测温方法对可视路径的依赖,能够在遮挡或复杂环

境下稳定工作,提升了非接触式金属温度测量系统的适用性与性能。

本研究所提的基于磁场耦合的非接触式金属温度测量系统对于现有非接触式金属温度测量系统性能的提升具有指导意义。

参考文献

- [1] 崔刚,熊斌,李振国,等. 转子温度空间分布差异诱发永磁电机局部失磁特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2024,44(6):2437-2448.
- CUI G, XIONG B, LI ZH G, et al. Research on local demagnetization characteristics of permanent magnet motor induced by spatial distribution difference of rotor temperature[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(6): 2437-2448.
- [2] 周建新,郑日成,侯宏瑶. 改进鹈鹕算法优化 LSTM 的加热炉钢坯温度预测[J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(5):174-179.
- ZHOU J X, ZHENG R CH, HOU H Y. Improved pelican algorithm for optimizing LSTM based temperature prediction of reheating furnace billets[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(5): 174-179.
- [3] 颜国君,张欣昱,美小煜,等. 淬火、回火对连铸 QTNi4MoV 球墨铸铁组织和硬度的影响[J]. 材料热处理学报, 2024,45(4):140-151.
- YAN G J, ZHANG X Y, MEI X Y, et al. Effect of quenching and tempering on the microstructure and hardness of QTNi4MoV ductile iron prepared by continuous-casting[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2024, 45(4): 140-151.
- [4] 刘志赢,汪友华,刘成成,等. 基于多岛遗传算法与响应面法的横向磁通感应加热装置参数优化设计[J]. 电工技术学报, 2024, 39(10): 3180-3191.
- LIU ZH Y, WANG Y H, LIU CH CH, et al. Optimization design of parameters for transverse flux induction heating device based on multi-island genetic algorithm and response surface method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(10): 3180-3191.
- [5] 闫宇楠,刘智康,徐佳文,等. 基于 CBAM-CNN 和压电悬臂梁的温度解耦质量感知方法[J]. 仪器仪表学报, 2024,45(4):113-126.
- YAN Y N, LIU ZH K, XU J W, et al. Temperature decoupled mass sensing based on CBAM-CNN and piezoelectric cantilever beam[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(4): 113-126.
- [6] 陈茂雷,项四通,杨建国. 综合考虑“电磁-热-流”多场耦合的直驱式进给轴热误差建模方法[J]. 仪器仪表学报, 2023,44(12):34-43.
- CHEN M L, XIANG S T, YANG J G. Thermal error modeling method for a direct-drive feed axis under electromagnetic-thermal-flow coupling[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(12): 34-43.
- [7] 李茹瑶,杨文英,肖斌,等. 高压直流继电器线圈温度场数值算法[J]. 电工技术学报, 2018,33(S2):444-452.
- LI R Y, YANG W Y, XIAO B, et al. Numerical algorithm for temperature field of coils in high-voltage DC relays[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(S2): 444-452.
- [8] 宋诚,李文志,鲁杨,等. 非接触式密集型母线槽测温系统研究[J]. 电工电气, 2022(3):42-45,49.
- SONG CH, LI W ZH, LU Y, et al. Study on the non-contact dense bus temperature measuring system[J]. Electrotechnics Electric, 2022(3): 42-45, 49.
- [9] 贾镜材,钟业奎,张泽展,等. 集成电路制造过程中的晶圆温度监测技术[J]. 仪器仪表学报, 2021,42(1):15-29.
- JIA J C, ZHONG Y K, ZHANG Z ZH, et al. Wafer temperature monitoring technology in integrated circuit manufacturing process[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(1): 15-29.
- [10] 于亚婷,杜平安,李代生. 电涡流传感器线圈阻抗计算方法[J]. 机械工程学报, 2007(2):210-214.
- YU Y T, DU P AN, LI D SH. Computational methods of coil impedance of eddy current sensor[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007(2): 210-214.
- [11] 陈文彰,杨茜,解社娟,等. 涡流无损检测温度影响研究[J]. 实验力学, 2023,38(3):296-306.
- CHEN W ZH, YANG Q, XIE SH J, et al. Research on temperature influence of eddy current nondestructive testing[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2023, 38(3): 296-306.
- [12] 房紫璐,龚直,李玉玲,等. 基于 ANSYS 的电磁感应加热系统仿真与实验[J]. 实验技术与管理, 2021, 38(5):129-133.
- FANG Z L, GONG ZH, LI Y L, et al. Simulation and experiment of electromagnetic induction heating system based on ANSYS[J]. Experimental Technics and Management, 2021, 38(5): 129-133.
- [13] 黄曼,王婕,周伟,等. 单向 CFRP 表面缺陷的涡流检测与有限元仿真研究[J]. 电子测量技术, 2023, 46(19):182-187.
- HUANG M, WANG J, ZHOU W, et al. Eddy current detection and finite element simulation study of surface defects in unidirectional CFRP[J]. Electronic Measure-

- ment Technology, 2023, 46(19): 182-187.
- [14] 瞿金晨, 郭赫男, 李杰, 等. 基于电涡流的多周期双极直线位移传感器[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(5): 260-266.
QU J CH, GUO H N, LI J, et al. Multicycle bipolar linear displacement sensor based on eddy current[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(5): 260-266.
- [15] 牛国钰, 潘巧生, 万澳德, 等. 一种利用电涡流效应的微孔直径和深度测量方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(10): 123-133.
NIU G Y, PAN Q SH, WAN AO D, et al. Micro-hole diameter and depth measurement method utilizing eddy current effect[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(10): 123-133.
- [16] LOPE I, ACERO J, CARRETERO C. Analysis and optimization of the efficiency of induction heating applications with litz-wire planar and solenoidal coils[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(7): 5089-5101.
- [17] HAN W, CHAU K T, ZHANG ZH. Flexible induction heating using magnetic resonant coupling[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(3): 1982-1992.
- [18] JI J, YAN B, WANG B T, et al. Error of thermocouple in measuring surface temperature of blade with cooling film[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 1003912.
- [19] 张志强, 王萍, 于旭东, 等. 高精度红外热成像测温技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(5): 10-18.
ZHANG ZH Q, WANG P, YU X D, et al. Study on high accuracy temperature measurement technology of infrared thermal imager[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(5): 10-18.
- [20] 王鑫宇, 安保林, 章欣达, 等. 基于主动式激光辐射测温技术的黑体腔底真实温度测量研究[J]. 计量学报, 2024, 45(4): 514-519.
WANG X Y, AN B L, ZHANG X D, et al. Measurement of the true temperature at the bottom of a blackbody cavity based on active laser radiation thermometry[J]. Acta Metrologica Sinica, 2024, 45(4): 514-519.

- [21] ELANGOVA K, SONTAKKE B A, SREEKANTAN A C. Design, analysis, and hardware verification of a linearized thermistor-based temperature measurement system[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 2002709.

作者简介



杨鸿艳, 2023 年于浙江大学获得学士学位, 现为浙江大学硕士研究生, 主要研究方向为非接触测量技术及应用、电力电子控制与网络通信技术。

E-mail: hongyan_yang@zju.edu.cn

Yang Hongyan received her B.Sc. degree from Zhejiang University in 2023. She is currently a master student at Zhejiang University. Her main research interests include non-contact measurement technology and its applications, as well as power electronics control and network communication technology.



王云峰, 2021 年于华中科技大学获得硕士学位, 现为美的集团高级工程师, 主要研究方向为电磁感应加热及无线能量传输技术。

E-mail: wangyf11@midea.com

Wang Yunfeng received his M.Sc. degree from Huazhong University of Science and Technology in 2021. He is currently a Senior Engineer at Midea Group Co., Ltd. His main research interests include electromagnetic induction heating and wireless energy transfer technologies.



吴建德 (通信作者), 2012 年于浙江大学获得博士学位, 现为浙江大学副研究员、硕士生导师, 主要研究方向为电力电子控制, 分布式电力电子系统, 非接触式温度、位置测量技术。

E-mail: w94780101@126.com

Wu Jiande (Corresponding author) received his Ph.D. degree from Zhejiang University in 2012. He is currently an associate researcher and a master advisor at Zhejiang University. His main research interests include power electronics control, distributed power electronics system, as well as non-contact temperature and position measurement technology.