

控制与决策

Control and Decision

基于磁阻测量的硬质合金锯片焊缝缺陷检测

王宏民, 王盟

引用本文:

王宏民, 王盟. 基于磁阻测量的硬质合金锯片焊缝缺陷检测[J]. *控制与决策*, 2020, 35(9): 2292–2298.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1749>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于滑模学习神经网络的开关磁阻电动机位置控制

Position control of SRM based on sliding-mode-learning neural networks

控制与决策. 2017, 32(6): 1133–1136 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2016.0657>

基于支持向量机广义逆的直线永磁游标电机内模解耦控制

Internal model control of linear permanent-magnet vernier motor based on support vector machines generalized inverse

控制与决策. 2016, 31(8): 1419–1423 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2015.0912>

基于图像特征的锑浮选矿浆pH值预测控制

Predictive control of slurry pH based on froth characteristics for antimony flotation process

控制与决策. 2016, 31(11): 1973–1978 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2015.1335>

基于SVR的惯性/卫星组合导航系统故障诊断方法

Fault diagnosis method of integrated GPS/Inertial navigation system based on support vector regression

控制与决策. 2016, 31(10): 1889–1893 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2015.1106>

基于云PSO的RVM入侵检测

Intrusion detection using relevance vector machine based on cloud particle swarm optimization

控制与决策. 2015(4): 698–702 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2014.0112>

基于磁阻测量的硬质合金锯片焊缝缺陷检测

王宏民[†], 王 盟

(哈尔滨理工大学 自动化学院, 哈尔滨 150080)

摘要: 针对硬质合金锯片刀头焊缝体积小、耦合误差干扰较大的问题,提出一种硬质合金锯片磁阻测量的无损检测方法.以锯片基体、刀头和励磁组件所构成的磁阻检测回路构建有限元仿真模型,通过焊缝的性状对磁阻的影响进行缺陷识别;并采用改进的支持向量机,有效削弱磁阻测量回路耦合误差的干扰.测试分析表明,所提出方法可有效降低测量中耦合干扰误差,为小尺寸焊缝质量检测提供解决方法,实验测试正确率达97.25%.

关键词: 磁阻测量;改进的支持向量机;硬质合金锯片;焊缝检测;耦合误差

中图分类号: TP202 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2018.1749

引用格式: 王宏民,王盟.基于磁阻测量的硬质合金锯片焊缝缺陷检测[J].控制与决策,2020,35(9):2292-2298.

Weld defect detection of carbide saw blade based on reluctance measurement

WANG Hong-min[†], WANG Meng

(School of Automation, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: A nondestructive testing method for the reluctance measurement of carbide saw blades is proposed, aiming at the problems of small weld volume and large coupling deviation interference of carbide saw blade heads. The finite element simulation model is constructed by reluctance detection circuit composed of saw blade base, cutter head and excitation component. Defect recognition is proceeded by the influence of weld properties on reluctance. And an improved support vector machine is used to effectively reduce the interference of coupling deviation in reluctance measurement circuit. The test results show that this method effectively reduces the coupling interference deviation in the measurement, and provides a solution for the quality detection of small size welds. The accuracy of the experiment is 97.25%.

Keywords: reluctance measurement; improved support vector machine; carbide saw blade; weld detection; coupling deviation

0 引言

随着锯切行业的快速发展,锯片的需求与产量不断扩大.目前广泛应用的硬质合金锯片由基体与刀头通过镶嵌、钎焊、激光焊接等方法连接而成^[1],如何准确检测焊接质量尤为重要.

由于硬质合金锯片焊缝体积过小,导致耦合随机误差干扰较大,国内外尚没有任何方法和设备实现对硬质合金锯片产品的快速、全自动生产线上无损检测.国内生产商的检测工具主要为扭矩扳手,即在生产线下抽样,对刀头施加固定力矩的力,检查其损坏情况.这种检测方法不全面、具有破坏性、效率低下,产品一致性差且寿命短^[2].而传统无损检测方法对于锯片的焊缝检测存在局限性,例如,射线检测周期长,具有辐射伤害,显影定影液回收困难;液体渗透

只能检测表面缺陷,操作步骤繁琐,效率低下;磁粉检测要求被检表面光滑,需要打磨工件,且检测后必须退磁^[3-4].上述方法均不适用于大批量产品的生产线上检测.

为了提高焊接检测的能力,国内外学者在焊接检测领域进行了广泛而深入的研究.如 Anatoly 等^[5]采用金属磁记忆法对焊接零部件进行测试分析,实现了金属焊接材料生产初期的缺陷检测;梁子千等^[6]利用涡流信号二位阻抗图提取特征,训练FPGA加速的神经网络,实现了管道环焊缝的检测;Metwally 等^[7]提出了一种基于残余物反向聚焦和拓扑能量计算的超声无损焊缝检测技术,为各向异性介质匹配声穿透成像打下了理论基础;Gábor 等^[8]提出了一种基于系统测量和次要磁滞回线的自适应检测方法,实现了对点

收稿日期: 2018-12-21; 修回日期: 2019-04-08.

基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目(F201310).

责任编辑: 林志赞.

[†]通讯作者. E-mail: 13904810908@163.com.

焊的缺陷检测;郭浩然等^[9]提出了一种高亮表面缺陷识别的新方法,并完成了阈值的自适应调整.上述国内外学者均对焊接检测提出了新方法或改进了相关算法,但对于微小焊缝检测的研究,尚不够充分.

本文针对微小焊缝无损检测难度大、方法不佳、研究不足的问题,提出一种基于磁阻测量和改进的支持向量机的硬质合金锯片无损检测方法.检测系统与硬质合金锯片构成闭合磁路,探究不同焊接缺陷类型对总磁阻变化的影响,并采集相关特征数据,利用数据集对改进的支持向量机进行训练,使之可以克服一般工业耦合误差干扰的问题,实现对焊接缺陷的检测与分类.新方法可信度高,稳定性好,检测周期短,普适性强,有助于实现工业生产线上实时无损检测,且具有较高的准确率.

1 模型构建与问题分析

1.1 检测系统的模型构建

采用低磁阻材料和结构建立磁阻检测回路.检测系统由锯片基体、刀头及励磁组件构成,磁路剖面如图1所示.

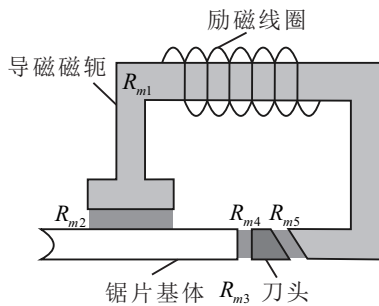


图1 闭合磁路剖面示意图

图1中,励磁组件包括励磁线圈和导磁磁轭,励磁线圈中通入频率为 f 的交流激励信号 $i(t)$,线圈周围将产生交变磁场,锯片基体和刀头之间的灰色部分为焊缝.未达到磁饱和状态时,磁通必然流经图1所示器件,形成闭合磁路^[10].

若锯片的焊缝存在缺陷,则焊接钎料的形态和体积将发生变化,钎料的填充不紧密、不规则,其内部或周围充斥着形状各异的空气介质,改变了相关物理属性,进而影响磁阻变化.由于硬质合金锯片焊缝体积和缺陷中气隙体积较小,认为气隙磁场是均匀的,可忽略磁路铁损^[11].为简化分析过程,使用分割磁场法^[12]将闭合磁路按磁通路径分割成5个简单形状的串联磁通管,总磁阻 R_m 表示为5个磁通管磁阻的总和,则磁路的磁阻表示为

$$R_m = R_{m1} + R_{m2} + R_{m3} + R_{m4} + R_{m5} =$$

$$\frac{l_1}{\mu_0 \mu_1 S_1} + \frac{l_2}{\mu_0 S_2} + \frac{l_3}{\mu_0 \mu_3 S_3} + \frac{l_\delta}{\mu_0 S_\delta} + \frac{l_4}{\mu_0 \mu_4 S_4} + \frac{l_5}{\mu_0 S_5} \quad (1)$$

其中: R_{m1} 、 R_{m2} 、 R_{m3} 、 R_{m4} 、 R_{m5} 分别为导磁磁轭、磁轭与锯片基体耦合间隙、基体与刀头、锯片焊缝、刀头与磁轭耦合间隙的磁阻, l_1 、 l_2 、 l_3 、 l_4 、 l_5 为对应的磁路长度, S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 、 S_5 为对应的截面积, l_δ 、 S_δ 分别为焊缝中缺陷的磁路长度和截面积. μ_0 为真空磁导率,其数值等于 $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$, μ_1 、 μ_3 、 μ_4 分别为导磁磁轭、锯片基体刀头、焊接钎料的相对磁导率.由于式(1)中变量较多,引入等效磁导率理论进行简化分析.将磁路等效为一个封闭铁芯线圈,磁路等效长度为 l ,等效截面积为 S ,等效的相对磁导率为 μ_e ^[13],则磁阻 R_m 可表示为

$$R_m = \frac{l}{\mu_0 \mu_e S} \quad (2)$$

由于介质的相对磁导率满足 $\mu_1 \gg 1$ 、 $\mu_3 \gg 1$ 、 $\mu_4 \gg 1$,将 μ_1 、 μ_3 、 μ_4 近似视为 μ_r ,则磁阻 R_m 等效表示为

$$R_m = \frac{1}{\mu_0 S} \left(\frac{l - l_\delta - l_2 - l_5}{\mu_r} + l_\delta + l_2 + l_5 \right) = \frac{1}{\mu_0 S} \frac{l + (l_\delta + l_2 + l_5)(\mu_r - 1)}{\mu_r} \quad (3)$$

因 $\mu_r \gg 1$,有

$$\mu_e = \frac{\mu_r}{1 + \frac{l_\delta + l_2 + l_5}{l} \mu_r} = \frac{l}{l_\delta + l_2 + l_5 + \frac{l}{\mu_r}} \quad (4)$$

根据等效磁导率理论,磁阻 R_m 可表示为

$$R_m = \frac{1}{\mu_0 S} \left(\frac{l}{\mu_r} + l_\delta + l_2 + l_5 \right) = \frac{1}{\mu_0} \left(\frac{l_\delta}{S_\delta} + \frac{l_2}{S_2} + \frac{l_5}{S_5} \right) + \varepsilon, \quad (5)$$

其中 $\varepsilon \ll 1$.

由图1可知,可通过增大导磁磁轭截面积增大 S_2 ,即导磁磁轭与锯片基体的耦合磁阻 R_{m2} 在满足一定截面积的情况下,可忽略对总磁阻 R_m 的影响,检测系统的数学模型为

$$\begin{cases} R_m = \frac{1}{\mu_0} \left(\frac{l_\delta}{S_\delta} + \frac{l_5}{S_5} + \varepsilon' \right), \\ \varepsilon' = \frac{l}{\mu_r S} + \frac{l_2}{S_2} \ll 1. \end{cases} \quad (6)$$

其中: S_5 为定值; ε' 为影响因子,受 $\mu_r \gg 1$ 及 S_2 取值的限制, $\varepsilon' \ll 1$,对总磁阻 R_m 的作用被忽略.而磁路中焊缝缺陷、刀头与导磁磁轭耦合间隙共同决定了磁阻 R_m 的变化,所以削弱耦合间隙对磁阻的作用效果,对于实现高效、准确的检测至关重要^[14].

因为硬质合金锯片焊接过程的差异,使得个别锯片基体于刀头间焊缝存在缺陷,导致闭合磁路的相

关物理属性变化,进而改变了磁路磁阻 R_m ,所以通过对 R_m 的计算与分析,可以实现焊缝缺陷的检测与识别^[15].

1.2 耦合度的误差分析

本文使用 $\varnothing 184 \times 3/1.5 \times 16 \times 36$ T型号的硬质合金锯片作为研究对象,其焊缝宽度仅为 $0.2 \sim 0.5$ mm.由式(6)可知,焊缝缺陷 l_δ 、 S_δ 与耦合间隙 l_5 对磁阻 R_m 的作用效果相同,所以检测系统与硬质合金锯片的任何一处耦合不紧密,均可能导致有效数据被覆盖,使磁阻变化失去对检测结果的佐证力度.现有耦合器件基本无法达到微米级耦合效果,势必严重影响检测结果.故削弱磁阻测量耦合误差对准确检测有着重要的意义.分别对被分割的5个简单形状的串联磁通管进行研究,分析计算单个磁通管的磁阻在耦合条件变化时对总磁阻的影响.

图1中导磁磁轭的材料一般有锰锌铁氧体和取向硅钢,锰锌铁氧体的起始磁导率约为 $300 \sim 5000$,非常容易达到饱和磁化状态^[16],且在低频段的涡流损耗比较大;取向硅钢的相对磁导率约为 $7000 \sim 10000$,有效降低了低频段的涡流损耗,所以以取向硅钢作为导磁磁轭材料更为合适.取向硅钢的高磁导率,将有效增加导磁磁轭的束磁能力^[17],且由式(2)可知,其具有极小的磁阻值.综上所述,导磁磁轭的磁阻 R_{m1} 为可知磁阻,且 R_{m1} 的值非常小,对总磁阻 R_m 的作用可忽略.同理,基体与刀头材料为合金钢材,相对磁导率约为 4000 ,同样具有较小的磁阻值,故 R_{m3} 同样为可知磁阻,对总磁阻 R_m 的作用可忽略.

由于锯片基体表面光洁程度有限,导磁磁轭与其接触时很难达到理想的紧密贴合状态,以致 l_2 增大, R_{m2} 增大.由式(6)可知,通过增大截面积 S_2 ,可以有效限制影响因子 ε' 的取值,从而实现减小总磁阻 R_m 的目的^[18].为验证该理论的正确性,进行了相关实验测试,如表1所示.

表1 截面积对磁阻影响的实验结果

耦合间隙 l_2/mm	总磁阻 R_m/H^{-1}	接触面截面积 S_2/mm^2
0	3.818×10^6	64
0.05	3.818×10^6	26.1
0.1	3.821×10^6	50.9
0.2	3.820×10^6	102.8

由表1可知, l_2 由0增大至 0.2 mm, S_2 由 64 mm²增大至 102.8 cm²,可保证 R_m 近似不变,即增大截面积可削弱耦合间隙增大对总磁阻的作用效果,故 R_{m2} 为可控磁阻.

R_{m4} 是本文的研究对象,为未知磁阻,将进行重点研究.由于焊接截面积 S_4 与耦合截面积 S_5 近似,二

者均可使总磁阻 R_m 增大,且难以区分作用效果.因耦合截面积固定,故无法通过增大 S_5 的方法减小磁阻 R_{m5} .实验表明, 0.01 mm的耦合间隙对总磁阻的作用效果将完全覆盖系统对焊缝的检测结果.综上所述,磁阻测量回路中的耦合误差,仅有耦合磁阻 R_{m5} 对检测结果的干扰影响较大,不能忽略,即磁阻 R_{m5} 为不可控磁阻.为保证检测结果的准确性,需设计一种锯片刀头耦合度随机误差修正模型以削弱误差干扰.

2 理论方法的实现

2.1 支持向量机

针对上述问题,建立改进的支持向量机模型,利用合格和存在焊接缺陷的硬质合金锯片进行大量随机耦合实验,获取数据集进行分析.支持向量机(support vector machine, SVM)在解决小样本、非线性及高维模式识别中具有较大的优势^[19],可以有效削弱耦合误差对检测结果的干扰,提高无损检测系统的稳定性.

设训练样本为 $\{x_i, y_i\}_{i=1}^k$,其中 x_i 是训练集中的第 i 个样本,样本个数为 k , y_i 为第 i 个训练集样本的标签.根据硬质合金锯片常见的焊接缺陷类型,SVM为一个五分类问题, $y_i \in \{-2, -1, 0, 1, 2\}$,分别表示硬质合金锯片合格、裂纹、气孔、未焊透、断齿共5种焊缝类型.选取工程中易于测得的物理属性作为SVM的训练特征,包括励磁线圈的电感 L 、磁路的磁感应强度 B_k 及耦合间隙 l_5 ,由于磁路截面积较小,认为磁感应强度均匀.SVM通过构造分类超平面做决策曲面,实现样本之间的划分,使数据集中正例和反例之间的隔离边缘被最大化^[20].SVM可转化为如下所示约束问题进行求解:

$$\begin{aligned} \max \text{dis} &= \min \frac{1}{2} \omega^T \omega + C \sum_{i=1}^k \xi_i; \\ \text{s.t.} &\begin{cases} y_i(\omega^T \cdot \varphi(x_i) + b) \geq 1 - \xi_i, \\ \xi_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, k. \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

其中: ω 为超平面的法向量; b 为超平面的常数项; C 为惩罚因子,表示对误差的宽容度; ξ_i 为松弛变量.由于实际问题多为非线性问题,不能单独用一个超平面分离训练样本,需将样本点映射至高维空间, $x \rightarrow \varphi(x)$,使得问题线性化^[21].引入拉格朗日乘子 α_i 和对偶理论将问题转化为

$$\begin{aligned} \max G(\alpha) &= \\ &\sum_{i=1}^k \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \alpha_i \alpha_j y_i y_j \varphi(x_i)^T \cdot \varphi(x_j); \end{aligned}$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{i=1}^k \alpha_i y_i = 0, \\ 0 \leq \alpha_i \leq C, i = 1, 2, \dots, k. \end{cases} \quad (8)$$

其中: $\varphi(x_i)^T \cdot \varphi(x_j)$ 表示 $\varphi(x_i)$ 与 $\varphi(x_j)$ 之间的内积, 高维空间中内积求解较为复杂, 采用高斯核函数进行内积计算^[22], 即

$$K(x_i, x_j) = e^{-\frac{\|x_i - x_j\|^2}{\gamma^2}}. \quad (9)$$

γ 表示核宽度, 表示支持向量间的相关程度.

2.2 基于模拟退火算法的参数优化

惩罚因子 C 和核宽度 γ 的取值直接影响 SVM 的分类精度, 针对参数的分散性和不确定性, 使用模拟退火算法能以较大的概率求得全局最优解, 具有较强的鲁棒性和全局收敛性. 其迭代更新可行解时, 以一定概率来接受恶化解, 可有效避免陷入局部最优解^[23], 适合解决参数 C 和 γ 的取值问题.

模拟退火算法包括加温、等温、冷却 3 个过程, 最优解为能量最低状态, 本文中分类误差达到最低. 目标函数即参数 C 和 γ 的误差为

$$\delta(C, \gamma) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (P_i - T_i)^2. \quad (10)$$

其中: P_i 为第 i 个样本的预测值, T_i 为第 i 个样本的真实值.

3 仿真建模

3.1 有限元模型的建立

为了验证磁阻测量方法的可行性, 使用 ANSYS Maxwell 电磁学有限元仿真软件对系统进行仿真设计. 仿真模型严格按照型号 $\varnothing 184 \times 3/1.5 \times 16 \times 36$ T 的硬质合金锯片尺寸设计, 仿真模型如图 2 所示.

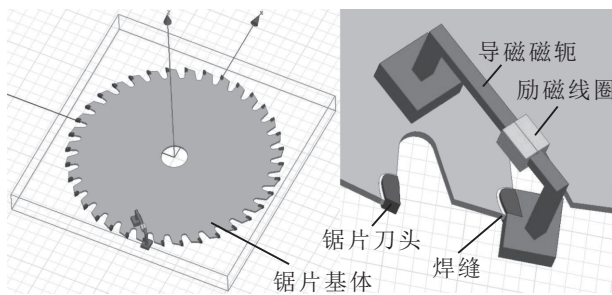


图 2 检测系统仿真模型

图 2 中, 基体与刀头的焊缝为被检测的部分, 励磁线圈距离被测锯片焊接表面高度为 12.85 mm, 导磁磁轭穿过励磁线圈并与锯片耦合, 磁轭总长 53.95 mm, 高 13.1 mm, 宽 27 mm.

根据硬质合金锯片常见的焊接缺陷类型, 在仿真软件中建立相应缺陷模型, 如图 3 所示.

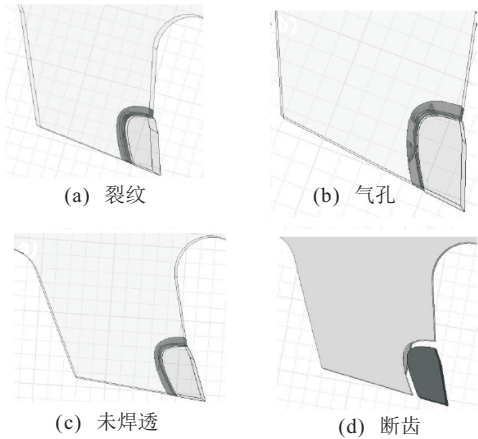


图 3 4种焊接缺陷的仿真模型

为满足实际工程中焊接缺陷多样性与随机性的特点, 构造多组检测模型, 参照中华人民共和国国家标准 GB/T14388-2010 中对焊接质量的要求, 对模型中缺陷的体积、长度遍历取值. 裂纹、气孔、未焊透、断齿的缺陷体积依次为 $0.05 \sim 0.25 \text{ mm}^3$ 、 $0.1 \sim 1.1 \text{ mm}^3$ 、 $0.8 \sim 2 \text{ mm}^3$ 、 $2.6 \sim 3.26 \text{ mm}^3$, 缺陷长度依次为 $1 \sim 5.2 \text{ mm}$ 、 $0.4 \sim 1.2 \text{ mm}$ 、 $0.5 \sim 4 \text{ mm}$ 、 $4.5 \sim 5.2 \text{ mm}$. 同时调整缺陷的形态及位置, 使焊接缺陷样本充分, 保证仿真结果的有效性.

3.2 激励源参数选取

向励磁线圈中施加交流信号, 为保证微小缺陷检测的高效性, 激励信号幅值 A 和频率 f 的选取需使得不同焊缝缺陷的检测结果有较大的差异. 由于使用取向硅钢做导磁磁轭, 激励信号频率 f 应小于 1 kHz, 磁路的磁滞损耗大小约为 $10^{-10} \sim 10^{-8}$, 且气隙体积较小, 故忽略铁损影响.

设激励信号的频率 f 遍历 $0 \sim 1 \text{ kHz}$, 幅值 A 遍历 $0 \sim 100 \text{ mA}$, 测得每组条件下磁路磁阻的数值如图 4 所示.

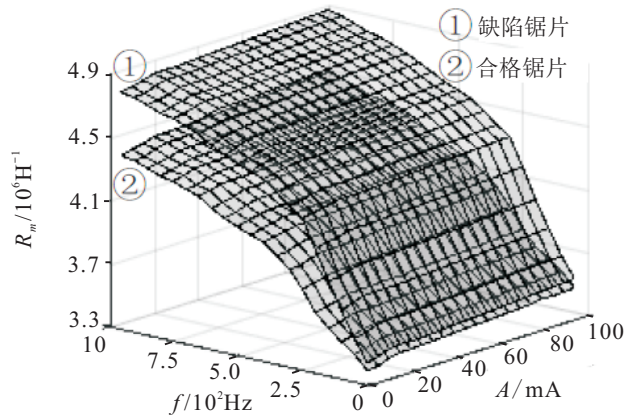


图 4 有无缺陷锯片磁阻变化对比

由图 4 可知, 频率遍历 $0 \sim 300 \text{ Hz}$ 区间, 两类锯片磁阻变化差异显著, $f = 300 \text{ Hz}$ 时, 磁阻差最大, 约为

$0.6 \times 10^6 \text{ H}^{-1}$. 幅值约 $0 \sim 20 \text{ mA}$ 区间内磁阻变化率相对较大, 其他区间磁阻变化平缓. 综上所述, 设置激励信号为 $i(t) = 0.02 \times \sin(600\pi t)$. 同时, 查阅相关资料^[24], 设置自适应计算参数如表2所示.

表2 自适应参数取值及说明

自适应计算参数	数值	说明
最大迭代次数	10次	运算停止的条件
求解收敛误差	2%以内	运算停止的条件
迭代加密剖分比例	30%	不满足收敛误差时, 网格单元加密的比例
求解域	模型外各方向5%	模型求解范围

4 系统的实验测试

根据式(6)构建的数学模型, 按照自适应参数的设置进行有限元仿真实验, 网格划分如图5所示.

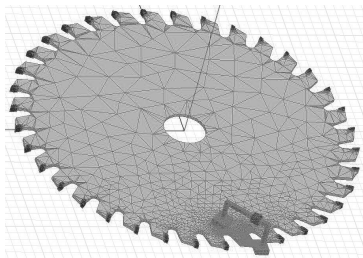


图5 仿真模型网格划分

由图5可知, 3D模型对计算资源开销较大, 为节约资源, 软件在当前检测焊缝处网格划分紧密, 其余焊缝处稀疏, 有效提高了计算效率. 参量磁感应强度 B_k 对于削弱耦合误差有着重要意义. 有限元仿真中对 B_k 间隔采样, 对比磁感应强度变化, 不同耦合间隙下模型磁感应强度的峰值如图6所示.

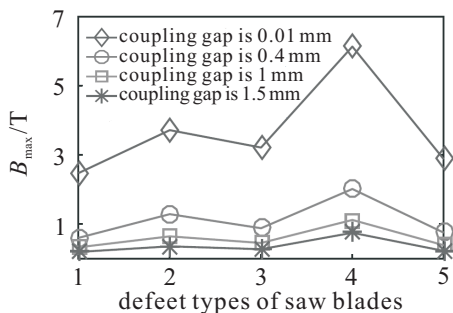


图6 不同耦合间隙下模型磁感应强度的峰值对比

实验设置耦合间隙分别为 0.01 mm 、 0.4 mm 、 1 mm 、 1.5 mm , 横坐标锯片缺陷类型 $1 \sim 5$ 分别表示合格、未焊透、气孔、断齿、裂纹. 由图6可知, 4种耦合间隙下, 磁感应强度峰值差异明显, 但变化具有规律. 当耦合间隙为 0.01 mm 时, 5类缺陷模型的磁感应强度峰值分别为 2.476 T 、 3.719 T 、 3.216 T 、 6.137 T 、 2.882 T , 耦合间隙为 0.4 mm 、 1 mm 、 1.5 mm 时, 磁感应强度峰

值的变化具有相似的趋势. 说明不同耦合间隙下, 磁感应强度变化趋势不受耦合间隙影响, 表现出一定的客观规律性. 同时, 磁感应强度大小变化明显, 易于区分耦合间隙大小, 适合用作模型特征参数.

在理想的严密耦合状态下, 利用有限元仿真软件计算不同焊缝缺陷的电感 L 和总磁阻 R_m , 由仿真结果可知, 焊缝合格的锯片总磁阻 $R_{s1} \approx 3.81 \times 10^6 \text{ H}^{-1}$, 励磁线圈电感值 $L_1 \approx 262.5 \text{ mH}$; 裂纹焊缝锯片总磁阻 $R_{s2} \approx 3.83 \times 10^6 \text{ H}^{-1}$, 电感值 $L_2 \approx 261.1 \text{ mH}$; 气孔焊缝锯片总磁阻 $R_{s3} \approx 3.84 \times 10^6 \text{ H}^{-1}$, 电感值 $L_3 \approx 260.3 \text{ mH}$; 未焊透锯片总磁阻 $R_{s4} \approx 3.95 \times 10^6 \text{ H}^{-1}$, 电感值 $L_4 \approx 252.4 \text{ mH}$; 断齿焊缝锯片总磁阻 $R_{s5} \approx 4.27 \times 10^6 \text{ H}^{-1}$, 电感值 $L_5 \approx 234.1 \text{ mH}$. 结果表明, 缺陷体积较大的磁路, 总磁阻较大, 励磁线圈的电感值较小; 反之, 缺陷体积较小的磁路, 总磁阻较小, 励磁线圈的电感值较大. 焊缝缺陷导致磁路中相关物理属性变化, 进而改变了磁路磁阻, 这与理论论证完全相符.

根据仿真的相关参数, 搭建硬质合金锯片无损检测系统, 如图7所示.

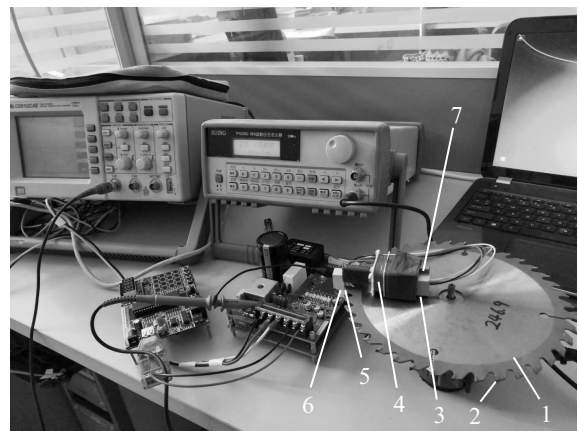


图7 硬质合金锯片无损检测实验系统

图7中, 1为锯片基体, 2为锯片刀头, 二者磁阻之和为 R_{m3} ; 3为磁轭与锯片基体耦合间隙, 磁阻为 R_{m2} ; 4为励磁线圈, 由直径为 $\phi = 0.11 \text{ mm}$ 的铜制漆包线紧密缠绕在导磁磁轭上构成, 缠绕匝数 $N = 1000$, 且保持漆包线缠绕方向一致; 5为锯片焊缝, 即本文的研究对象, 磁阻为 R_{m4} ; 6为刀头与磁轭耦合间隙, 磁阻为 R_{m5} ; 7为导磁磁轭, 磁阻为 R_{m1} .

耦合间隙 l_5 在 $0.01 \sim 1.50 \text{ mm}$ 范围内等间隔取值, 随机对不同类型焊缝缺陷的硬质合金锯片进行测试实验, 共采集 5100 组数据集合, 以此训练改进的 SVM. 并利用训练好的模型测试 400 组数据集合, 改进的 SVM 分类结果如表3所示.

表3 改进的SVM分类结果

序号	缺陷类型	l_5/mm	L/mH	B_k/T	分类结果	实际结果	正确与否
1	气孔	0.01	244.790	0.250	1	1	是
2	合格	0.6	107.150	0.082	1	-2	否
3	未焊透	0.12	173.495	0.154	-1	-1	是
4	气孔	0.4	123.123	0.119	1	1	是
5	裂纹	0.1	185.934	0.138	0	0	是
6	断齿	0.03	202.057	0.587	2	2	是
7	合格	1	91.764	0.053	-2	-2	是
8	断齿	0.15	155.145	0.196	2	2	是
9	未焊透	0.06	201.802	0.276	-1	-1	是
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
396	气孔	0.05	214.173	0.176	1	1	是
397	断齿	0.2	145.713	0.171	2	2	是
398	裂纹	0.3	133.830	0.080	1	0	否
399	未焊透	1.5	82.510	0.041	-1	-1	是
400	合格	0.48	115.129	0.058	-2	-2	是

表3中,400组测试数据集中仅有11组判断错误,正确率达到97.25%。5类模型各有80组测试数据,其中合格焊缝、裂纹焊缝、未焊透焊缝、气孔焊缝锯片分别出现4组、3组、2组、2组分类错误,断齿焊缝锯片未出现分类错误。出现错误的分类,多数是将合格焊缝锯片判断为存在缺陷锯片,原因是被测的硬质合金锯片样本焊缝附近基体由于高温焊接出现了细微次生灼伤,对检测数据产生了影响,但不影响实际使用。同时,实验室检测器械精度有限,共同导致了小部分检测结果错误。后期将把焊接次生灼伤的影响纳入研究范围,对灼伤进行建模分析、定量研究,使检测系统更加准确。尽管检测系统对样本的分类存在少部分错误,但对整体检测效果影响甚微,尤其未出现缺陷锯片漏检的情况,为安全生产提供了保障。

5 结论

本文针对硬质合金锯片焊缝质量检测难度大的问题,提出了一种基于磁阻测量和改进的SVM特征分析的无损检测方法。通过建立磁阻测量模型,进行焊缝缺陷的检测和识别,并利用改进的SVM有效削弱了耦合随机误差的干扰,得出了以下结论。

1) 裂纹、气孔、未焊透、断齿对磁阻变化的作用依次增大,呈现非线性变化规律。

2) 此方法能有效克服一般工业耦合误差干扰的问题,具有检测周期短、稳定性高的特点,同时实现了焊缝检测和缺陷类型的自动分类。

3) 此方法的检测正确率达到97.25%,与文献[6]提出的基于二维阻抗特征的大尺寸焊缝缺陷检测方法相比,同样具有较高的正确率,并且实现了毫米级焊缝缺陷检测。

参考文献(References)

- [1] 王超, 丛正, 王凯, 等. 基于双频数据融合的电涡流焊接缺陷检测[J]. 焊接学报, 2018, 39(5): 18-20.
(Wang C, Cong Z, Wang K, et al. Eddy current defect detection on welds based on dual-frequency data fusion[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(5): 18-20.)
- [2] 吴绍民, 吴恩启, 任龙, 等. 大型圆锯片检测仪机架有限元分析及优化设计[J]. 现代制造工程, 2014(11): 112-113.
(Wu S M, Wu E Q, Ren L, et al. Finite element analysis and optimization design of large circular saw blade detector frame[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2014 (11): 112-113.)
- [3] Mirala A, Sarraf Shirazi R. Detection of surface cracks in metals using time-domain microwave non-destructive testing technique[J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2017, 11(4): 564-565.
- [4] 何洪波, 张思. 焊接检测技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2016: 52-54.
(He H B, Zhang S. Welding Detection Technology[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2016: 52-54.)
- [5] Anatoly Dubov, Alexandr Dubov, Sergey Kolokolnikov. Application of the metal magnetic memory method for detection of defects at the initial stage of their development for prevention of failures of power engineering welded steel structures and steam turbine parts[J]. Welding in the World, 2014, 58(2): 225-236.
- [6] 梁子千, 玄文博, 王婷, 等. 基于二维阻抗特征的管道环焊缝缺陷涡流检测[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(9): 2138-2145.
(Liang Z Q, Xuan W B, Wang T, et al. Eddy

- current NDT for the cracks of pipes based on 2D impedance characteristics[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(9): 2138-2145.)
- [7] Metwally K, Lubeigt E, Rakotonarivo S, et al. Weld inspection by focused adjoint method[J]. Ultrasonics, 2018, 83: 80-87.
- [8] Gábor Vertesy, Tomas I. Nondestructive magnetic inspection of spot welding[J]. Ndt & E International, 2018, 98: 95-100.
- [9] 郭皓然, 邵伟, 周阿维, 等. 全局阈值自适应的高亮金属表面缺陷识别新方法[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(11): 2797-2804.
(Guo H R, Shao W, Zhou A W, et al. Novel defect recognition method based on adaptive global threshold for highlight metal surface[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(11): 2797-2804.)
- [10] Nam J, Lee W, Jung E, et al. Magnetic navigation system utilizing a closed magnetic circuit to maximize magnetic field and a mapping method to precisely control magnetic field in real time[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(7): 5674-5675.
- [11] 黄松岭, 孙燕华, 康宜华. 现代漏磁无损检测[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017: 98-102.
(Huang S L, Sun Y H, Kang Y H. Modern magnetic flux leakage nondestructive testing[M]. Beijing: China Machine Press, 2017: 98-102.)
- [12] 郑永成, 王洋, 何建国, 等. 基于磁场分割的磁导计算与磁路设计[J]. 机械与电子, 2006, 24(7): 11-12.
(Zheng Y C, Wang Y, He J G, et al. Permeance calculation and magnetic circuit design based on magnetic field segmentation[J]. Machinery & Electronics, 2006, 24(7): 11-12.)
- [13] 官瑞杨, 魏新劳, 王永红, 等. 铁心电抗器气隙边缘效应计算及影响因素[J]. 电机与控制学报, 2018, 22(4): 83-84.
(Guan R Y, Wei X L, Wang Y H, et al. Calculation and influence factors of air-gap edge effect of iron-core reactor[J]. Electric Machines and Control, 2018, 22(4): 83-84.)
- [14] Kermadi M, Moussaoui S, Brahimi A. Defect localization and characterization in eddy current nondestructive testing by change detection and global optimization[J]. COMPEL The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 2018, 37(2): 956-958.
- [15] 翁玲, 曹晓宁, 徐行, 等. 带磁芯励磁线圈的阻抗匹配[J]. 传感技术学报, 2017, 30(9): 1331-1332.
(Weng L, Cao X N, Xu H, et al. Impedance matching of magnetic core excitation coil[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2017, 30(9): 1331-1332.)
- [16] Pham H Q, Trinh Q T, Doan D T, et al. Importance of magnetizing field on magnetic flux leakage signal of defects[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 54(99): 3-4.
- [17] Ege Y, Coramik M. A new measurement system using magnetic flux leakage method in pipeline inspection[J]. Measurement, 2018, 123: 165-166.
- [18] Deng Z Y, Sun Y H, Yang Y, et al. Effects of surface roughness on magnetic flux leakage testing of micro-cracks[J]. Measurement Science and Technology, 2017, 28(4): 045003.
- [19] Zhu L, Ikeda K, Pang S. Merging weighted SVMs for parallel incremental learning[J]. Neural Networks, 2018, 100: 29-33.
- [20] 郭明玮, 赵宇宙, 项俊平, 等. 基于支持向量机的目标检测算法综述[J]. 控制与决策, 2014, 29(2): 193-200.
(Guo M W, Zhao Y Z, Xiang J P, et al. Review of object detection methods based on SVM[J]. Control and Decision, 2014, 29(2): 193-200.)
- [21] Gaudioso M, Gorgone E, Labbé M, et al. Lagrangian relaxation for SVM feature selection[J]. Computers & Operations Research, 2017, 87: 138-140.
- [22] Loosli G, Canu S, Ong C S. Learning SVM in krein spaces[J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 2015, 38(6): 45-46.
- [23] 何庆, 吴意乐, 徐同伟. 改进遗传模拟退火算法在TSP优化中的应用[J]. 控制与决策, 2018, 33(2): 219-220.
(He Q, Wu Y L, Xu T W. Application of improved genetic simulated annealing algorithm in TSP optimization[J]. Control and Decision, 2018, 33(2): 219-220.)
- [24] 顾巍, 伍永刚, 胡斌奇. 混合单变量边缘分布算法及其仿真应用[J]. 控制与决策, 2013, 28(5): 746-752.
(Gu W, Wu Y G, Hu B Q. Hybrid univariate marginal distribution algorithm and its application[J]. Control and Decision, 2013, 28(5): 746-752.)

作者简介

王宏民(1962—), 男, 教授, 博士, 从事电子信息与嵌入式检测技术等研究, E-mail: 13904810908@163.com;

王盟(1994—), 男, 硕士生, 从事检测技术的研究, E-mail: 1015425521@qq.com.

(责任编辑: 孙艺红)