文章编号:1671-4598(2025)02-0023-08

中图分类号:TP407

23

基于 GMR 传感器的国产伏羲芯片 表面缺陷检测系统设计

DOI:10.16526/j. cnki.11-4762/tp.2025.02.004

汪海涛¹,林永铨¹,陶雅华¹,许 健²

(1.中山市菊城电力有限公司,广东中山 528400;2.威胜信息技术股份有限公司,长沙 410012)

摘要:国产伏羲芯片组成结构较为复杂,为了加强对国产伏羲芯片的安全保护,确保芯片品质符合设计规格和标准,设计并开发了基于 GMR 传感器的国产伏羲芯片表面缺陷检测系统;加设 GMR 传感器和检波器,改装核心处理器、信号放大器、数据存储器和图像采集模块,完成硬件部分优化;利用 GMR 传感器获取伏羲芯片表面磁场反馈信号,拼接国产伏羲芯片表面图像数据,通过信号补偿、标准化以及图像增强等步骤,从磁场信号和图像数据两个方面,提取芯片表面特征,通过特征匹配确定当前芯片表面的缺陷状态,得出缺陷类型、位置以及面积的检测结果;实验结果证明:该系统对国产伏羲 2360 芯片表面缺陷位置检测误差比另两种传统检测系统分别降低 2 mm 和 1.5 mm,对国产伏羲 2420 芯片表面缺陷位置 检测误差比另两种传统检测系统分别降低 1.4 mm 和 1 mm;在 10 种芯片缺陷类型下,该系统表面缺陷面积检测误差明显较低。

关键词: GMR 传感器; 国产伏羲芯片; 芯片表面缺陷; 表面检测

Design of Surface Defect Detection System for Domestic Fuxi Chips Based on GMR Sensors

WANG Haitao¹, LIN Yongquan¹, TAO Weihua¹, XU Jian²

(1. Zhongshan Jucheng Electric Power Co., Ltd., Zhongshan 528400, China;

2. Willfar Information Co., Ltd., Changsha 410012, China)

Abstract: Domestic Fuxi chips have complex structures, in order to improve the safety protection of domestic Fuxi chips and ensure that the chip quality meets the design specifications and standards, a surface defect detection system for domestic Fuxi chips based on giant magneto resistive (GMR) sensors is designed and developed. Install the GMR sensors and detectors, modify the core processor, signal amplifier, data memory, and image acquisition module, and complete hardware optimization. Use the GMR sensors to obtain feedback signals on the surface magnetic field of Fuxi chips, splice the domestic Fuxi chip surface image data, extract the chip surface features from the magnetic field signals and image data through signal compensation, standardization, and image enhancement, determine current defect state on chip surface through feature matching, and obtain the detection results of defect types, positions, and areas. Experimental results show that compared with the other two traditional detection systems, the system reduces the surface defect detection errors of domestic Fuxi 2360 chips by 1.5 mm and 1.2 mm, the surface defect detection errors of domestic Fuxi 2380 chips by 2 mm and 1.5 mm , and the surface defect detection errors of domestic Fuxi 2420 chips by 1.4 mm and 1 mm. Among the 10 types of chip defects, the system significantly reduces the detection errors of surface defect area.

Keywords: GMR sensor; domestic Fuxi chips; chip surface defects; surface inspection

收稿日期:2023-12-04; 修回日期:2024-01-18。

基金项目:中山市菊城电力有限公司(JCDL-YPRH20221101)。

作者简介:汪海涛(1972-),男,硕士,高级工程师。

引用格式:汪海涛,林永铨,陶维华,等. 基于 GMR 传感器的国产伏羲芯片表面缺陷检测系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2025,33(2):23-30,70.

0 引言

为满足电网数字化、网络化发展对精密测试与控制 的要求,中国南方电网在国家重大研究计划的支持下, 以国产 CPU 内核与封装技术为核心,通过 5 年的开发 与多场景的测试,成功研制出我国第一款以国产内核及 国产指令架构为核心的电力系统主控制器"伏羲"。国 产伏羲芯片使用中国产的 Csky 指令系统,以国产的玄 铁系列核为运算中心,保证了该晶片具有自主知识产 权。在通用计算能力和融合服务的实时计算上,国产伏 羲芯片具有显著的性能优势,且功耗较低。国产自主研 制的伏羲芯片由于其生产过程的复杂性,在其生产过程 的各个环节均会产生各种缺陷,从而影响其功能及可靠 性。芯片表面缺陷的检测在芯片制造过程中至关重要, 它对提高芯片的生产质量和使用价值起着非常重要的 作用。

芯片表面缺陷检测是指利用机器视觉检测技术,确 认被测物体表面的斑点、凹坑、划痕、色差和缺陷等缺 陷。其中, 文献 [1] 主要针对波导污损缺陷对象小、 不同类型缺陷间尺度差异大等特点,基于 YOLOV3 的 特征抽取网络,并结合多尺度特点,提出4种基于特征 的多尺度检测模型,提高多尺度检测精度,采用 Kmeans 法,对样本进行聚类,选择最优的初始区,实现 对表面缺陷的有效检测。该方法系统具有实时性强、多 类物体识别的优势,但在处理小目标时,由于网络结构 的原理,会造成小尺寸缺陷的漏检。文献「2]提出系 统采用基于 DETR 的编码一解码结构对缺陷类别和位 置进行预测,该结构降低了参数量和计算复杂度,因 DETR 强大的全局特征学习能力,可从少量训练样本中 充分挖掘产品表面纹理特征,表面纹理连续缺陷检出率 高,将 Smooth-Ll 项与 GIoU 项相结合,进一步提升了 小尺寸缺陷的回归精度。该方法可以同时检测多类别的 目标,可以适应不同类型产品表面缺陷检测的需求,但 Smooth-DETR 算法较为复杂,需要较高的计算资源才 能实现检测速度和较高的准确性。文献[3]提出系统 基于扩展跨阶段局部网络算法和 YOLOv5s 模型,构建 可伸缩的、适应多种尺度网络的 YOLOv5s-P 序列模 型,通过对网络颈区域的 CSP 化,提升模型的特征提 取能力,利用 SoftPool 降采样技术,实现局部区域的 空间锥集池模块的结构与参数优化,并利用深度可分卷 积,在保证模型轻量级的前提下,降低模型的计算精 度。该方法对目标的感知能力更强,但涉及多层次特征 提取和处理,对于硬件资源的要求较高,这对于一些资 源受限的环境或设备来说可能存在限制。

整合以往研究成果,应用到国产伏羲芯片的表面缺 陷检测工作中,由于传统系统只能检测出芯片表面较为 明显的缺陷,无法检测出芯片表面的细微缺陷,因此引入 GMR 传感器。GMR 传感器即巨磁阻磁场传感器, 它是一个集磁性薄膜、半导体集成及纳米技术为一体的 高新技术产品,以此对国产伏羲芯片表面缺陷检测系统 进行优化设计,以期能够提升芯片表面缺陷的检测精 度,间接地提高国产伏羲芯片的应用质量。

1 国产伏羲芯片表面缺陷检测硬件设计

常规国产伏羲芯片表面缺陷检测系统的工作原理 为:利用机器视觉技术获取国产伏羲芯片表面图像,通 过对图像特征的分析,判断芯片表面是否存在缺陷,并 得出缺陷类型、缺陷位置等信息的检测结果。利用 GMR 传感器获取国产伏羲芯片表面反馈的磁场信号, 结合表面图像与反馈磁场信号两个部分,得出更为精准 的缺陷检测结果。优化系统分别从硬件和软件两个方面 进行设计,在传统系统的基础上,加设 GMR 传感器和 对应的检波器,并对部分元件进行改装,为国产伏羲芯 片表面缺陷检测功能的实现提供硬件支持。

1.1 GMR 传感器

GMR 传感器具有高灵敏度和高分辨率的特点,可 以精确地测量并区分不同位置和大小的缺陷。这有助于 提高检测的准确性和可靠性,在表面缺陷检测中具有以 下优势:

1) 高灵敏度: GMR 传感器对磁场变化非常敏感, 可以检测到微小的磁场改变。

2)非接触式检测:GMR 传感器是一种非接触式 传感器,不需要与被测样本直接接触。这使得它可以避 免对芯片表面造成损坏或干扰,并且减少了实验操作的 复杂性。

3)高速响应:GMR 传感器能快速地响应时间, 能够实时检测和捕捉表面缺陷的变化。

4) 高分辨率: GMR 传感器能够提供高分辨率的 磁场信号,从而可以更精确地定位和判断表面缺陷的位 置和尺寸。

GMR 传感器的基本结构是采用 4 个巨磁阻元件组 成惠斯登电桥,以降低外部环境对其稳定性的影响,提 高其灵敏度。利用惠斯通电桥,可以很好地解决磁电阻 材料中的温度漂移问题。在 GMR 传感器中引入 4 根 GMR 磁敏条,采用先进的集成电路制造工艺,在其内 部构建 4 根磁敏条,采用 NiFe 磁屏蔽层对其进行屏蔽, 形成惠斯通电桥,其中 R_2 和 R_4 被屏蔽后,不会受到外 部磁场的干扰,而未被屏蔽的 R_1 和 R_3 磁敏则在外部磁 场的作用下发生改变,使得惠斯通电桥输出电压也随之 改变。GMR 传感器的内部组成结构如图 1 所示。

GMR 传感探头是 GMR 传感器的核心元件,主要 采用线圈作为敏感元件,传感器可以在 3~20 V内正常



图 1 GMR 传感器内部结构图

工作,因为该传感器的输出频率相对较低,因此需要在 其供电端添加一个大的电容器来对其进行滤波,而 OUT-与OUT+则为该传感器的差分输出,并将其输出 至LM358 放大器。利用叠加定理分析电路,在外部磁 场发生变化时,若两个电阻没有变化,而另外两个的阻 值将会改变,形成差分输出电压。

1.2 核心处理器

为了实现对传感信号与表面图像的同步处理,同时 保证信号数据的处理效率,需要对核心处理器进行改装 处理。选择 TMS320C6657 型号核心处理器和英特尔 Core i9-11900K 型号核心处理器进行对比,发现 Core i9-11900K采用了高性能的 8 核心/16 线程架构, 它的 功耗和发热量较高。这可能需要更强大的散热解决方案 来保持处理器的温度在可接受范围内,确保系统的稳定 性,并且在接口会面临一些限制。而 TMS320C6657 型 号核心处理器,具有高性能的浮点运算能力和专用的 DSP 指令集,采用多核架构,可以并行处理多个任务, 提高处理效率和性能,还具有硬件加速器,可以加速特 定的数据处理和通信操作,并针对低功耗应用进行了优 化,具有较低的功耗消耗,适合长时间运行或依赖电池 供电的场景。因此,选择 TMS320C6657 型号的核心处 理器代替传统处理器设备,该设备是一种同构的双核处 理器,在一个处理器上包括两个 Viterbi 协处理器和一 个 Turbo 协处理解码器,并支持 I2C、SPI、UART、 多通道缓存串行端口等通用接口^[4]。该系统采用了多核 SoC 结构的核心处理器,可以在完全激活整个核心处理 器的情况下,并行地完成任务。该架构通过特定应用的 处理器和接口,将精简指令系统 RISC 和高性能的 DSP 相结合。

1.3 信号放大器

当国产伏羲芯片表面缺陷程度较小时,GMR 传感 器输出的信号较小,影响芯片的检测与分析结果^[5]。信 号放大器由功率放大器、前置放大器和锁相放大器 3 个 部分组成,信号放大器的工作原理如图 2 所示。



图 2 信号放大器工作电路图

功率放大器采用单电源供电方式,前一级产生的正弦 波信号,经滤波器过滤后,输入至 LM1875 的 WAVE 1 管 脚,再经功放放大后,由 SIN WAVE 管脚输出。它的 前置放大器选用了高阻差分式 AD620 仪器放大器,仅 需外加电阻器即可实现不同的增益设定^[6]。此外,利用 锁相放大器可以有效地从背景噪声中提取出弱的目标信 号,并通过向敏感解调得到信号幅值、相位等信息。它 的主要部分是乘数和积分。该电路通常是开关型的,而 积分电路则以低通滤波器为主。

1.4 检波器

选择了 HSMS2822 型晶体管检波器,利用晶体管 二极管和 RC 低通滤波器构成检波电路。为实现从高频 信号到低频信号或直流信号的转换,将晶体二极管置于 终端短路的高频电场较大的位置^[7]。按其输入、输出的 相似性,检测电路可分为包络检波检测和同步检测两个 部分^[8]。所用的检波电路属于包络式检波电路,检波电 路输出电压略小于高频电压的峰峰值,其曲线形态类似 于高频电压,但其顶端会出现锯齿状的波纹,可被滤波 器滤除。

1.5 数据存储器

除了需要对图像数据进行处理与存储,还增加了对 GMR 传感信号的存储,因此需要对数据存储器进行扩 展处理。在传统数据存储器中加设一个 TMS320DM642 芯片,该芯片集成了一个 64 位的外置存储器^[9]。在 DM642 对外部存储器进行扩展时,将/CE0~/CE3 信 号用作空间片选择信号,这样就可以将外扩的存储器映 射到对应的空间。

1.6 芯片表面图像采集模块

为提高国产伏羲芯片表面缺陷的检测精度,需要对 芯片表面图像采集设备进行改装,芯片表面图像采集设 备选择了以电荷为信号的 CCD 图像传感器,其最大的 优势在于其成像质量好,不易受到外部环境的影响。在 图像采集器工作时,将 CCD 输出的图像设定成 PAL 模 式,并对其进行了译码,选择了与 DM642 兼容的译码 芯片 TVP5150^[10]。

2 国产伏羲芯片表面缺陷检测系统软件设计

在硬件的支持下,利用 GMR 传感器和图像采集设备获取国产伏羲芯片表面的磁场反馈信号和图像数据,从磁场信号和表面图像两个方面提取芯片表面特征,通过特征匹配判断国产伏羲芯片表面是否存在缺陷,并得出缺陷类型、缺陷位置等信息的检测结果,完成国产伏羲芯片表面缺陷检测功能设置。

2.1 伏羲芯片表面磁场反馈信号

GMR 传感器利用巨磁阻效应是指微弱的磁场变化 可以使得某些材料的电阻值发生明显变化。伏羲芯片表 面磁场检测的基本原理为:利用法拉第电磁感应理论, 将交流电源连接到导线上,通过导线流过的电流会在周 围产生交流磁场,将待测金属材料置于交流磁场中,将 会在待测金属材料中形成涡流¹¹¹。在被测物体中,所 产生的电涡流的大小变化,主要是由被测金属物体自身 的各种物理因素所决定的。因为电涡流的变化会导致磁 场强度的变化,电涡流在金属中流动时,会产生阻碍电 磁场的涡旋磁场, 这涡旋磁场与外部磁场相互作用, 并 导致了能量的损耗,使得磁场在金属内部衰减,并且电 涡流通过自感作用也会产生反电动势,这会导致磁场强 度发生变化,从而对激发线圈的阻抗等的变化产生影 响。因此,通过这种方法,可以对被测金属物体的状 态、缺陷进行检测。将高频交流电注入传感器的绕组 中,可在绕组中形成交流磁场,若被测金属物离开该磁 场区域,则该区域内的能量将得到充分的释放;当被测 的金属物体接近磁场区域时,在被测物体的表面或近表 面会出现一个漩涡状的电流,这就是电涡流^[12]。电涡 流还会在绕组的周围形成一个交流磁场,在任何时候, 这两个磁场都是相对的,这两个磁场之间的交互作用, 将导致绕组的有效阻抗发生改变。图 3 为 GMR 传感器 对国产伏羲芯片表面磁场反馈信号的采集原理。



图 3 芯片表面磁场反馈信号 GMR 传感器采集原理图

在 GMR 传感器的线性工作区满足如下关系:

$$\Delta R = \kappa_{\text{Linearity}} B \tag{1}$$

其中: $\kappa_{\text{Linearity}}$ 和 B 分别为芯片线性度的常数和磁感应强度, ΔR 为 GMR 传感器的电阻变化量。GMR 传感器的输出电压为:

$$U_{\rm out} = \frac{\Delta R}{2R_{\rm rated} + \Delta R} U_{\rm work} \tag{2}$$

其中: *R*_{rated}为 GMR 传感器的额定电阻,即固定电 阻, *U*_{work}为 GMR 传感器的工作电压,将公式(1)的 计算结果代入公式(2)中,即可确定 GMR 传感器的 输出电压值。国产伏羲芯片周围交变磁场在被测物体中 产生的电涡流呈现出如下的分布规律,从被测物体的表 面自上而下逐渐小,这种分布规律符合电涡流的趋肤效 应的原理,也就是在被测物体的表面上涡流密度比较 大,并且随着被测物体厚度的增加,涡流密度会成指数 形式规律的衰减^[13]。电涡流的趋肤深度的计算公式 如下:

$$d_{\rm Eddy \, Current} = \frac{1}{\sqrt{\pi U_{\rm out} f_{\rm incentive} \mu \sigma}} \tag{3}$$

其中: *f*_{incentive}为 GMR 传感器探头激励频率, μ 和 σ 分别为 GMR 传感器材料的磁导率和电导率^[14]。按照上 述 GMR 传感器的工作原理,得出国产伏羲芯片表面磁 场反馈信号的采集结果为:

 $r_{\text{magnetism}}(t) = U_{\text{out}} \times d_{\text{Eddy Current}} \times E_{\text{magnetic field}}(t)$ (4) 式中,_{magnetic field}(t)为t时刻国产伏羲芯片表面产生的磁场 强度,将公式(2)(3)的计算结果代入式(4)中,即 可得出伏羲芯片表面磁场反馈信号采集结果。

2.2 国产伏羲芯片表面图像数据拼接

利用芯片表面图像采集设备生成国产伏羲芯片表面 图像,将图像采集设备放置在国产伏羲芯片表面正上方 位置上,得出国产伏羲芯片表面图像数据拼接结果为:

$$\begin{cases} x = x_{chip} \times w \times \zeta \\ y = y_{chip} \times w \times \zeta \end{cases}$$
(5)

其中: w 和 ζ 分别为表面图像的成像物距和焦距, (x_{chip}, y_{chip})为国产伏羲芯片中各个位置的实际值^[15]。 按照上述方式可以得出国产伏羲芯片中任意位置上像素 点成像结果,分析芯片各个像素点之间的空间位置 关系。

2.3 国产伏羲芯片表面图像滤波

为保证国产伏羲芯片表面信号与图像的采集质量, 为表面缺陷检测提供有效的数据支持。磁场反馈信号的 预处理过程如下:

$$\begin{cases} r_{\text{compensate}} = \frac{r_{\text{magnetism}}(t-1) + r_{\text{magnetism}}(t+)}{2} \\ r = \frac{r_{\text{compensate}} - r_{\text{avg}}}{\sigma} \end{cases}$$
(6)

其中: $r_{\text{compensate}}$ 为国产伏羲芯片表面磁场反馈信号的 补偿处理结果, $r_{\text{magnetism}}(t-1)$ 和 $r_{\text{magnetism}}(t+1)$ 对应的是 前后时刻采集的表面磁场反馈信号, r_{avg} 为反馈信号的 平均值,σ为磁场反馈信号标准差^[16]。将采集的所有表 面磁场反馈信号代入公式(6)中,即可完成对国产伏 羲芯片表面磁场反馈信号的预处理,完成磁场信号的完 整性和准确性。另外,国产伏羲芯片表面图像的预处理 包括图像均衡化和滤波两个步骤,在图像均衡化处理过 程中,首先利用公式(7)求原始国产伏羲芯片表面图 像的直方图,得到每个灰度级的概率密度:

$$\rho(i) = \frac{n_i}{N} \tag{7}$$

其中: n, 和 N 分别为第 i 个灰度级的像素点数量和 采集表面图像中包含的像素点总数^[17]。在此基础上, 计算原始图像灰度级概率密度的累积,即新图像灰度级 的概率密度,并得出图像均衡化处理结果的灰度 值,即:

$$g = \sum_{i=1}^{N} \rho(i) \times 255 \tag{8}$$

将公式(7)的计算结果代入公式(8)中,即可完成对国产伏羲芯片表面图像的均衡化处理结果。国产伏羲芯片表面图像噪声的滤波处理主要是利用均值滤波器,将一个像素点的灰度值用相邻像素点的灰度值之和的平均值代替。在实际处理过程中,设置均值滤波模板为(2*M*+1)×(2*Q*+1),移动模板中心对应于某个像素,计算模板所覆盖的像素值总和,取像素值总和的均值作为该像素点的值^[18]。按照上述步骤,得出国产伏羲芯片表面图像滤波处理结果为:

$$I_{\text{filtering}}(x, y) = \frac{g}{2M + 2Q + 2} \sum_{i=-M_{j}=-Q}^{M} \sum_{i=-Q}^{Q} I(x_{i}, y_{i}) \quad (9)$$

最终将各个处理结果赋值给初始磁场反馈信号与表 面图像。

2.4 提取磁场反馈信号峰值与峭度特征提取

从磁场反馈信号和芯片表面图像两个方面,提取国 产伏羲芯片表面特征,磁场反馈信号特征的提取结 果为:

$$\begin{cases} \tau_{\text{signal-peak}} = max(r_{\text{magnetism}}) - min(r_{\text{magnetism}}) \\ \tau_{\text{signal-kurtosis}} = \frac{\sum_{i=1}^{N} (\tau_{\text{signal-peak}} r_{\text{magnetism}} - r_{\text{avg}})^{4}}{(I_{\text{filtering}}(x, y) N_{\text{signal}} - 1) r_{\text{absolute}}^{4}} \end{cases}$$
(10)

其中: max()和 min()分别为最大值和最小值的求解函数, N_{signal}为芯片磁场反馈信号量, r_{absolute}为绝

对平均值,公式(10)的提取结果^{*τ*signal-peak</sub>和^{*T*signal-kurtosis</sub> 分别为磁场反馈信号的峰值与峭度特征。国产伏羲芯片 表面图像的边缘特征提取结果为:}}

$$\tau_{\text{Image-Edge}} = \frac{\partial^2 I(x,y) \tau_{\text{signal-kurtosis}}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 I(x,y)}{\partial y^2} \quad (11)$$

式中, $\frac{\partial^2 I(x,y)}{\partial x^2}$ 和 $\frac{\partial^2 I(x,y)}{\partial y^2}$ 的计算过程为:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 I(x,y)}{\partial x^2} = I(x+1,y) + I(x-1,y) - 2I(x,y) \\ \frac{\partial^2 I(x,y)}{\partial y^2} = I(x,y+1) + I(x,y-1) - 2I(x,y) \end{cases}$$
(12

通过公式(11)和公式(12)的联立,输出的 $\tau_{Image-Edge}$ 为国产伏羲芯片表面图像边缘特征 τ_{signal} ,同理 可以得出图像其他特征的提取结果,标记为 τ_{Image} 。

2.5 基于特征匹配度的芯片表面缺陷状态确定

国产伏羲芯片表面缺陷包括:麻点、划痕、坑洼、 油污等多种类型,麻点在国产伏羲芯片表面呈现不规则 点状,划痕呈直而细的线状,坑洼存在一定深度,而油 污呈块状,具有一定的面积范围。根据不同类型缺陷下 芯片表面的实际特征,设置表面缺陷的标准特征,并采 用特征匹配的方式确定当前国产伏羲芯片表面是否存在 缺陷^[19]。当前芯片表面与标准特征之间的特征匹配度 可以表示为:

$$s = \frac{\tau_{\text{Image-Edge}} \cdot \tau_{\text{signal}} \cdot \tau_{\text{signal-standard}}}{\|\tau_{\text{signal}}\| \cdot \|\tau_{\text{signal-standard}}\|} \times \frac{\tau_{\text{Image-Edge}} \cdot \tau_{\text{Image}} \cdot \tau_{\text{Image-standard}}}{\|\tau_{\text{Image}}\| \cdot \|\tau_{\text{Image-standard}}}$$
(13)

其中: $\tau_{signal-standard}$ 和 $\tau_{Image-standard}$ 分别为表面缺陷状态下 信号与图像的标准特征,若公式(13)的计算结果高于 阈值 s_0 ,证明当前芯片表面存在缺陷,否则认为当前 芯片不处于表面缺陷状态。

2.6 国产伏羲芯片表面缺陷检测

针对处于表面缺陷状态的国产伏羲芯片,需要进一步确定缺陷类型、缺陷位置以及缺陷程度,按照公式 (13)的计算方式,将表面缺陷状态标准特征更换为某 一缺陷类型的标准特征,通过特征匹配度的计算以及阈 值匹配,确定当前国产伏羲芯片表面缺陷类型的检测结 果。从芯片表面图像中可以直接确定缺陷在图像中的位 置,那么最终得出缺陷位置的定位结果为:

$$\begin{cases} x_{\text{defect}} = \mathbf{s} \boldsymbol{\kappa}_{\text{mapping}} x_{\text{defect}-I} \\ y_{\text{defect}} = \mathbf{s} \boldsymbol{\kappa}_{\text{mapping}} y_{\text{defect}-I} \end{cases}$$
(14)

其中: $\kappa_{mapping}$ 为映射系数,($x_{defect-I}$, $y_{defect-I}$)为图像中 缺陷位置坐标。此外,国产伏羲芯片表面缺陷面积的检 测结果为:

$$S_{\text{defect}} = L_{\text{length}}(x_{\text{defect}-I}, y_{\text{defect}-I}) \times L_{\text{width}}$$
(15)

其中: L_{length} 和 L_{width} 分别为芯片表面缺陷的长度和 宽度,若芯片表面缺陷为坑洼缺陷,则需要计算坑洼体 积,将坑洼缺陷深度测定结果与公式(15)的计算结果 相乘。最终将芯片缺陷状态、类型、位置、面积等参数 的检测结果通过硬件设备输出,完成国产伏羲芯片表面 缺陷检测功能设置。国产伏羲芯片表面缺陷检测系统软 件设计具体流程如图 4 所示。



图 4 国产伏羲芯片表面缺陷检测系统软件设计流程图

3 实例测试与结果分析

以测试优化设计基于 GMR 传感器的国产伏羲芯片 表面缺陷检测系统的检测功能为目的,采用对比测试的 方式,设计系统测试实验。此次实验的基本思路为:准 备国产伏羲芯片样本,采用人为破坏的方式在其表面生 成缺陷,以此作为判定系统检测功能的比对标准。在实 验环境下完成对优化设计检测系统的开发,得出国产伏 羲芯片表面缺陷的检测结果,反映出该系统在检测功能 方面的优势。

3.1 准备国产伏羲芯片检测样本

此次系统测试实验选择国产伏羲 2360 芯片、伏羲 2380 芯片和伏羲 2420 芯片作为检测样本,准备的芯片 样本总数量为300个,选择的国产伏羲芯片支持各种通 讯介面,包括吉比特以太网介面、USB2.0介面、SPI、 I2C、UART、CAN、I2S等。其丰富的外围设备资源 可直接满足多种应用场合对继电保护设备的存储和通讯 要求,同时可避免芯片外的复杂扩展²⁰⁰。伏羲芯片以 CK802为设计了一套密码安全性模块,可实现对真值 的保护,并可实现对各种密码算法的保护,如 SM2、 SM3、SM4、DES及AES等,满足了对电能数据保密 的需要。此外,选择的国产伏羲芯片还具有以太网卡, 可实现对 GOOSE、SV、MMS 等电源设备的控制,并 可实现滤波,提供低功率管理、微网控制、继电保护等 方面的应用。在系统测试实验开始之前,需要对选择的 检测样本芯片进行调试,保证初始状态下的芯片样本均 处于正常运行状态。

3.2 设定国产伏羲芯片缺陷状态

以选择的国产伏羲芯片检测样本为操作对象,采用 实际生产中具有缺陷的伏羲芯片和人为破坏的方式设置 划痕、坑洼、麻点及油污等多种不同类型的曲线状态。 国产伏羲芯片划痕缺陷状态的设定结果如图 5 所示。



图 5 国产伏羲芯片划痕缺陷设定实景

按照上述方式完成对系统测试实验中所有国产伏羲 芯片检测样本的缺陷设定,并记录各芯片的缺陷设定数 据。部分国产伏羲芯片缺陷参数的设定结果如表1所示。

表1 国产伏羲芯片缺陷参数

编号	缺陷类型	缺陷中心位置	缺陷面积/mm ²
1	划痕	(80,120)	0.9
2	划痕	(40,20)	1.2
3	划痕	(55,75)	0.6
4	坑洼	(163,144)	0.5
5	坑洼	(25,121)	0.7
6	坑洼	(104,55)	0.4
7	麻点	(69,66)	1.5
8	麻点	(84,124)	1.3
9	油污	(74,96)	1.8
10	油污	(88,119)	1.7

在国产伏羲芯片上构建坐标系,从而确定缺陷中心 位置的具体位置。按照上述方式得出所有国产伏羲芯片 缺陷参数的设定结果。

3.3 配置系统开发与运行环境

根据基于 GMR 传感器的国产伏羲芯片表面缺陷检 测硬件设计结果,将硬件设备安装在实验环境中,并对 硬件设备进行调试。以 GMR 传感器调试为例,对 GMR 传感器进行初始化,并通过对其内部寄存器组 态,经过测试,此管脚的输出均为正位,能正常工作。 编程使芯片产生一个正弦波, 启动 GMR 传感器输出相 应的信号采集结果,比对编程生成波形与传感器输出波 形之间的差异,根据差异检测结果对 GMR 传感器的工 作参数进行校正。同理能够完成对其他硬件设备的调 试。结合 GMR 传感器和国产伏羲芯片的放置位置,搭 建检测平台。在测量时,将电磁式探头固定于其上,并 在其上装有可调式测高仪,以调整测高仪的高度与方位。 该系统由两台步进马达构成,每一台步进电机都能在两 个平面上进行运动,从而实现了对芯片的 X、Y 方向的 运动。自动扫描台最高扫描量可达到每秒 50 mm/s,为 扫描小缺陷提供了良好的空间精度。基于 GMR 传感器 的国产伏羲芯片表面缺陷检测系统软件部分的开发工具 为 CCS,能够完成波形、图像等内容的绘制与显示,满 足系统软件的运行与开发要求。GMR 传感器具体参数 如表 2 所示。

- 衣 4 GMK 医恐奋参数	表 2	GMR 传感器参数
-----------------	-----	-----------

参数名称	参数数据
规格	$100 \sim 400 \text{ mm}$
推力	200 N
工作电流	500~700 MA
温度范围	−10~85 °C
CAN 波特率	250 kpcs

3.4 描述系统测试实验过程

在配置的开发与运行环境中,启动国产伏羲芯片检测样品、硬件以及软件检测程序,通过信号采集、图像 采集、特征提取与匹配等步骤,输出国产伏羲芯片表面 缺陷的检测结果。1号国产伏羲芯片样本对应的缺陷检测结果如图6所示。



图 6 国产伏羲芯片表面缺陷检测系统输出界面

同理可以得出实验中所有国产伏羲芯片表面缺陷的 检测结果。实验中设置的对比系统分别为基于改进 YOLOV3的芯片缺陷检测系统^[1]和基于 Smooth-DETR 的产品表面小尺寸缺陷检测系统^[2],在相同的实验环境 下完成对比系统的开发,并输出国产伏羲芯片表面缺陷 的相应检测结果。

3.5 测试指标

为实现对国产伏羲芯片表面缺陷检测系统检测功能 的量化测试,设置芯片样本数为50个,缺陷类型检测 错误的芯片数量为10个,并设置缺陷类型误检率、缺 陷位置检测偏差和缺陷面积检测误差作为实验的测试指 标,其中缺陷类型误检率的数值结果为:

$$\eta_{\text{mistake}} = \frac{num_{\text{mistake}}}{num_{\text{all}}} \times 100\%$$
(16)

其中:变量 num mistake 和 num all 分别为缺陷类型检测

错误的芯片数量以及实验准备的芯片样本总数,缺陷类 型误检率的测试采用多次实验取平均值的方式,得出缺 陷类型误检率测试结果数据。缺陷位置检测偏差指标的 测试结果如下:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{position}} = \mid \boldsymbol{x}_{\text{defect}} - \boldsymbol{x}_{\text{set}} \mid + \mid \boldsymbol{y}_{\text{defect}} - \boldsymbol{y}_{\text{set}} \mid \qquad (17)$$

其中:(*x*_{defect},*y*_{defect})和(*x*_{set},*y*_{set})分别为表面缺陷位 置的检测结果与设定值。另外缺陷面积检测误差的测试 结果可以量化表示为:

$$\varepsilon_{\rm S} = \mid S_{\rm defect} - S_{\rm set} \mid \tag{18}$$

其中: S_{defeet} 和 S_{set} 为缺陷面积的监测值和设置值。 最终计算得出缺陷类型误检率、缺陷位置检测偏差和缺 陷面积检测误差取值越低,证明对应系统的检测功能 越优。

3.6 实验结果与分析

通过相关数据的统计,得出国产伏羲 2360 芯片、 伏羲 2380 芯片和伏羲 2420 芯片表面缺陷类型误检率的 测试结果,如表 3 所示。

表 3 表面缺陷类型误检率测试数据表

国产伏羲 芯片类型	基于改进 YOLOV3 的 芯片缺陷检 测系统错误 检测样本数 量/个	基于 Smooth- DETR 的产品 表面小尺寸缺 陷检测系统错 误检测样本数 量/个	基于 GMR 传 感器的国产伏 羲芯片表面缺 陷检测系统错 误检测样本 数量/个
国产伏羲 2360 芯片	6	5	2
伏羲 2380 芯片	5	4	1
伏羲 2420 芯片	4	3	1

将表 3 中的数据代入公式(16)中,计算得出 3 个 系统对国产伏羲 2360芯片表面缺陷类型误检率的平均 值分别为 12、10 和 4%,对国产伏羲 2380芯片表面缺 陷类型误检率的平均值分别为 10、8 和 2%,对国产伏 羲 2420芯片表面缺陷类型误检率的平均值分别为 8、6 和 2%。统计系统输出缺陷中心位置的检测数据,通过 公式(17)的计算,得出系统对芯片表面缺陷位置检测 误差的测试结果,如图 7 所示。

从图 7 中可以看出,与两种传统检测系统相比,优 化设计系统得出对国产伏羲 2360 芯片表面缺陷位置检 测误差比另两种传统检测系统降低 1.5 和 1.2 mm,对 国产伏羲 2380 芯片表面缺陷位置检测误差比另两种传 统检测系统降低 2 和 1.5 mm,对国产伏羲 2420 芯片表 面缺陷位置检测误差比另两种传统检测系统降低 1.4 和 1 mm。这是因为,传统的检测系统通常采用光学或机 械传感器进行表面缺陷检测,这种方法在定位和识别小 尺寸或微细的表面缺陷时可能出现较大误差,导致检测 精度较低,而本文方法采用 GMR 传感器是一种基于磁 阻效应的传感器,具有高灵敏度、高分辨率和宽测量范



图 7 芯片表面缺陷位置检测误差测试结果

围等优点,使其能够更准确地定位和识别芯片表面的 缺陷。

根据表1参数,通过3个系统对国产伏羲芯片表面 缺陷面积检测误差的测试,对比分析本文方法是否确保 产品质量和可靠性,结果如表4所示。

表 4 国产伏羲芯片表面缺陷面积检测误差测试数据表

国产伏 羲芯片 编号	基于改进 YOLOV3 的芯片 缺陷检测系统输 出缺陷检测面 积/mm ²	基于 Smooth- DETR 的产品表 面小尺寸缺陷检 测系统输出缺陷 检测面积/mm ²	基于 GMR 传感器 的国产伏羲芯片表 面缺陷检测系统输 出缺陷检测面 积/mm ²
1	0.96	0.94	0.91
2	1.24	1.22	1.20
3	0.68	0.65	0.62
4	0.55	0.51	0.50
5	0.62	0.65	0.68
6	0.44	0.43	0.40
7	1.57	1.52	1.50
8	1.22	1.27	1.29
9	1.86	1.83	1.81
10	1.76	0.66	1.70

将表4中的数据代入公式(18)中,计算得出两种 传统系统缺陷面积平均检测误差分别为0.07 mm²和 0.04 mm²,而优化设计系统对芯片表面缺陷面积检测误 差的平均值为0.01 mm²,说明本文方法可以确保产品质 量和可靠性。

4 结束语

在芯片制造过程中,表面缺陷的存在可能会导致芯 片性能下降甚至故障,需要一种可靠且高效的表面缺陷 检测方法,因此提出了基于 GMR 传感器的国产伏羲芯 片表面缺陷检测系统设计。通过利用机器视觉技术获取 国产伏羲芯片表面图像,利用 GMR 传感器获取国产伏 羲芯片表面反馈的磁场信号,结合表面图像与反馈磁场 信号两个部分,得出更为精准的缺陷检测结果。利用 GMR 传感器和图像采集设备获取国产伏羲芯片表面的 磁场反馈信号和图像数据,通过特征匹配判断国产伏羲 芯片表面是否存在缺陷,完成国产伏羲芯片表面缺陷检 测功能设置。由实验可知,所提方法使缺陷类型误检率 降低、缺陷位置检测误差减小。该研究具有广泛的实际 前景,它将提升质量控制、降低生产成本、推动技术创 新、打造自主品牌和促进产业升级,为芯片制造行业带 来实际的利益和价值。

参考文献:

- [1] 周天宇,朱启兵,黄 敏,等. 基于改进 YOLOV3 的载 波芯片缺陷检测 [J]. 激光与光电子学进展,2021,58 (12):86-93.
- [2] 张乃雪,钟羽中,赵 涛,等. 基于 Smooth-DETR 的产品表面小尺寸缺陷检测算法 [J]. 计算机应用研究, 2022,39 (8):2520-2525.
- [3] 曹桢森,吉卫喜,苏 璇,等.基于扩展跨阶段局部网络的表面缺陷检测 [J]. 计算机集成制造系统,2022,28
 (8):2399-2407.
- [4] 郑安义,曾祥进.芯片表面气泡瑕疵检测方法 [J]. 计算 机应用,2021,41 (s1):255-258.
- [5] 魏鸿磊, 蒋志留, 徐家恒, 等. 芯片载带缺陷的机器视觉 检测方法 [J]. 包装工程, 2022, 43 (11): 183-188.
- [6] 朱 林, 王 鹏, 陈 敏, 等. 飞行吸附式储罐表面损伤 缺陷检测系统 [J]. 机械设计, 2021, 38 (11): 19-23.
- [7] 王新宇, 蒋三新. 应用于产品表面缺陷检测的神经网络 IBS-Net [J]. 仪表技术与传感器, 2022 (11): 101 -107.
- [8]李 可,吴忠卿,吉 勇,等.改进U-Net芯片X线图 像焊缝气泡缺陷检测方法[J].华中科技大学学报(自然 科学版),2022,50(6):104-110.
- [9] 赵朗月,吴一全.基于机器视觉的表面缺陷检测方法研究 进展[J].仪器仪表学报,2022,43(1):198-219.
- [10] 廉家伟,何军红,牛 云,等.基于多尺度压缩卷积神 经网络模型的表面缺陷快速检测[J].计算机集成制造 系统,2022,28 (11):3624-3631.
- [11] 罗忠兵,李飞龙,苏慧敏,等. CFRP 复杂几何结构超 声表面契合法缺陷检测 [J]. 机械工程学报,2022,58 (20):312-318.
- [12] 吕思航,丁红昌,向 阳,等.基于迈克耳孙干涉仪的表面焊接缺陷检测 [J].激光与光电子学进展,2021,58 (19):207-212.
- [13] 黄梦涛,连一鑫. 基于改进 Canny 算子的锂电池极片表 面缺陷检测 [J]. 仪器仪表学报,2021,42 (10):199 -209.
- [14] 李馥颖,朱振杰,杜付鑫.基于快速选区卷积神经网络 模型的工业产品表面缺陷检测 [J]. 济南大学学报(自 然科学版),2021,35(5):417-422.

(下转第70页)