

基于 FPGA 的轮对踏面电磁超声在线检测系统

米武军, 康磊, 王淑娟, 冯剑钊, 翟国富

(哈尔滨工业大学 军用电器研究所, 哈尔滨 150001)

摘要: 为了提高我国当前列车轮对的检测效率, 设计了一种基于 FPGA 的列车轮对踏面电磁超声在线检测系统。该系统将电磁超声检测技术与 FPGA 应用技术相结合, 采用基于 FPGA 的可编程片上系统技术, 实现了电磁超声信号发射/接收、数据采集、微弱信号检测以及存储显示等, 充分发挥了 FPGA 在运算速度和设计灵活性上的优势。试验表明, 系统具有较高的检测精度和检测效率, 可在列车运行速度 $< 20 \text{ km/h}$ 时成功检测出轮对踏面上深度 $> 2 \text{ mm}$ 的人工缺陷。

关键词: 轮对踏面; 电磁超声检测; 微弱信号检测

中图分类号: TP23; TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2010)07-0519-05

On-Line EMAT Detecting System for Wheelset Tread Based on FPGA

MI Wu-Jun, KANG Lei, WANG Shu-Juan, FENG Jian-Zhao, ZHAI Guo-Fu

(Military Apparatus Research Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: An on-line EMAT detecting system for wheelset tread based on FPGA was developed to improve the detecting efficiency of wheelset. Combining EMAT with SOPC technology based on FPGA, this system fully took advantage of FPGA in design flexibility and processing speed. It could achieve transmission and reception of the electromagnetic ultrasonic surface wave, data acquisition, weak signal detection, storage and display. Experiments showed that the system possessed high detecting accuracy and efficiency, which could detect an artificial defect that is deeper than 2 mm on wheelset tread when the train's speed was slower than 20 km/h.

Keywords: Wheelset tread's defects; Electromagnetic ultrasound testing; Weak signal detection

轮对是列车的重要部件, 在运行一段时间后, 轮对踏面会产生裂纹、剥离等缺陷。目前, 踏面检测主要包括静态检测和动态检测两种方式。静态检测(如涡流、磁粉等检测)效率低, 容易误判; 而现有的动态检测(如加速度传感器、位移传感器等)均无法有效检测轮对踏面及近表面的裂纹缺陷。

电磁超声换能器(Electromagnetic Acoustic Transducer, EMAT)无需声耦合剂, 无需对试件进行预处理, 能方便地产生用于轮对踏面检测的电磁超声表面波^[1]。现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)处理速度快, 开发

过程投资小、周期短, 可反复编程修改, 开发工具智能, 已成为当今硬件设计首选方案之一^[2]。因此, 将FPGA与EMAT相结合, 有望成功实现列车轮对踏面的在线检测。

目前, 国外已经研制出基于电磁超声技术的轮对踏面在线检测系统。1995年, 美国Clark等人利用500 kHz的电磁超声表面波, 可检测出轮对踏面长12 mm、深2 mm的人工缺陷, 受检列车速度可达25 km/h^[3]。IEM公司的WISE™系统可以对轮对的轮廓、踏面、无偏差灵敏点和圆度等方面进行检测^[4]。但多年来, 关于上述检测系统的应用报道较为少见。应用最成熟的是德国弗朗霍菲研究所的AUROPA系统。该系统通过超声探头, 在轮对踏面激发400 kHz的电磁超声表面波, 每个系统由四个探头及一个控制盒组成, 探头在铁轨上交错分布, 实现列车轮对踏面的动态检测。该系统适用于行驶

收稿日期: 2009-08-14

基金项目: 铁道部科技研究开发计划重点课题资助项目(2009G018-E)

作者简介: 米武军(1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事基于电磁超声的无损检测研究。

速度为 5~15 km/h 范围的列车在线检测,可检测出深度为 3 mm 的人工缺陷。目前该系统已经成功应用于俄罗斯、德国等十多个国家^[5],但其引进费用昂贵,列车速度和检测精度较低。

国内尚没有相关产品研制并应用成功的报道。哈尔滨工业大学、钢铁研究总院和西南交通大学都进行了该方面的研究工作。其中,哈尔滨工业大学赵再新等设计了 EMAT 探头及发射接收电路,但电路结构复杂,且无后续信号处理和缺陷识别;钢铁研究总院研制的电磁超声踏面检测系统报道较少^[6];西南交通大学与德国弗朗霍菲无损检测研究所合作引进了 AUROPA 系统,同时也在积极研制具有自主知识产权的电磁超声轮对踏面检测产品。但其目前研制的检测系统控制部分同时采用了 CPLD、DDS 芯片及 DSP,结构复杂,同时通过 DSP 软件实现相关算法,运算速度较慢^[7]。

系统的检测速度对提高列车的检测效率具有重要的意义,而检测精度的提高可以实现列车轮对踏面缺陷的实时监测,为研究踏面缺陷的产生及发展机理提供有效的试验数据。因此笔者设计的轮对踏面缺陷检测系统将 EMAT 和 FPGA 相结合,提高了检测速度和检测精度,弥补了上述检测系统的不足,可以实现轮对踏面精确、实时在线检测。

1 轮对踏面电磁超声检测原理

1.1 电磁超声表面波产生原理

电磁超声表面波的激发原理如图 1 所示,主要包括曲折线圈、静磁场(由磁铁产生)和列车轮对 3 部分。发射过程中,通以高频大电流的发射线圈放置于轮对踏面,根据电磁感应定律,轮对中将感生出与线圈电流方向相反、频率相同的感应电流;在静磁场作用下,感应电流就会受到力的作用,并引发轮对表面微粒产生周期性的振动和弹性形变;发射线圈的导线间距严格等于表面波波长的 $1/2$,因此各条导线产生的振动将发生相长干涉;当该振动以波的形式在轮对上传播时就形成了电磁超声表面波。接收是发射的逆过程^[8]。

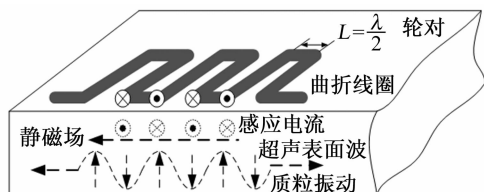


图 1 电磁超声表面波产生原理示意图

1.2 轮对踏面电磁超声检测原理

图 2 为轮对踏面电磁超声在线检测示意图。

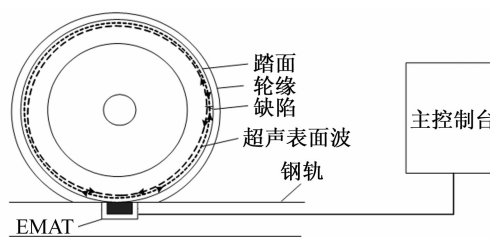


图 2 电磁超声轮对踏面检测示意图

当列车到来时,主控制台激励嵌入钢轨的 EMAT 在轮对中产生沿轮对踏面传播的电磁超声表面波。如果轮对表面或近表面存在缺陷,表面波的部分能量会因声阻抗变化而发生反射,其余能量则绕过缺陷继续沿轮对表面传播。主控制台对 EMAT 接收的反射信号、透射信号进一步处理,完成缺陷检测。利用脉冲反射法判断接收信号有无缺陷。

2 检测系统硬件设计

基于 FPGA 的轮对踏面电磁超声在线检测系统原理框图如图 3 所示,主要包括电磁超声换能器、电磁超声发射/接收电路、数据采集电路、数字信号处理模块、发射控制器及显示存储等几部分。其中,发射控制器、数字信号处理模块以及显示存储控制器等由 FPGA 来实现。

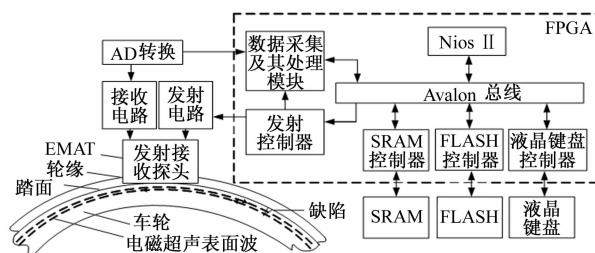


图 3 电磁超声检测系统原理框图

由图 3 可知,检测系统硬件包括电磁超声换能器、电磁超声发射/接收电路以及 FPGA 接口电路等几部分。

2.1 EMAT 设计

EMAT 包括磁铁、曲折线圈以及试件 3 部分。其中,磁铁选用剩磁为 1.2T 的钕铁硼永磁铁;线圈采用曲折线圈结构。系统在设计中先后采用了单匝单导线、单匝三导线等曲折线圈形式。图 4 为单匝三导线曲折线圈 PCB 图,其发射、接收效率均明显高于单匝单导线曲折线圈。

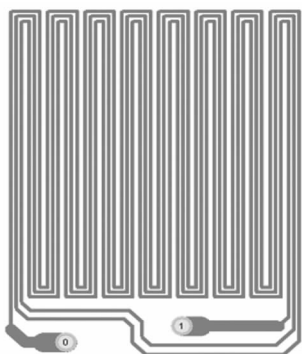


图 4 单匝三导线曲折线圈 PCB 图

2.2 电磁超声发射电路设计

发射线圈中发射电流是影响发射效率的关键因素。为了增大发射电流,系统发射电路采用 D 类功率放大器结构,其原理框图如图 5 所示,主要包括驱动电路和功率放大电路等几部分。

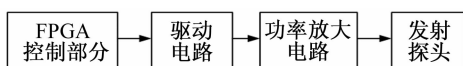


图 5 电磁超声发射电路原理框图

图 6 为与发射线圈串联的 $0.15\ \Omega$ 采样电阻上的电压信号。由该图可知,发射电流频率为 500 kHz,峰峰值为 122 A。

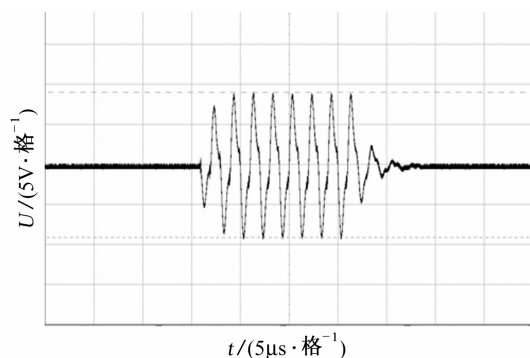


图 6 发射电流信号

2.3 电磁超声接收电路设计

为了提取超声回波,接收电路采用高增益放大和滤波电路对接收回波进行处理。其原理框图如图 7 所示,主要由转换开关、放大滤波电路等几部分组成。其中,放大电路采用 AD797 搭建的三级高增益放大电路;滤波电路采用 RC 高通滤波电路;转换开关用于切换发射、接收过程,实现发射、接收探头一



图 7 电磁超声接收电路原理框图

体化。

2.4 FPGA 接口电路设计

FPGA 的接口电路如图 8 所示,主要包括 AD 采集电路、串行配置芯片 EPCS16、SRAM、Flash、JTAG 接口和液晶接口等电路。系统需要对 500 kHz 信号进行采样,因此数据采集电路使用 AD9224,其 12 位的精度、最高 40MSPS 的最高采样率完全可以满足系统的检测要求。

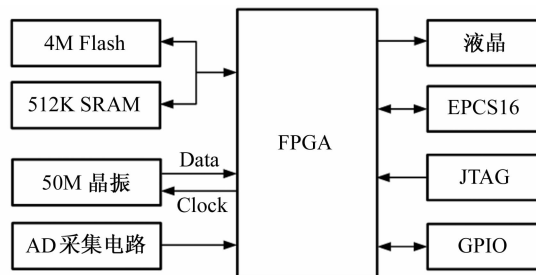


图 8 FPGA 接口电路原理框图

3 检测系统软件设计

3.1 SOPC 系统总体结构设计

基于 FPGA 的 SOPC 系统主要包括发射控制器模块、数据采集及处理模块、Flash 控制器模块、SRAM 控制器模块及 Nios II 核等部分。在 SOPC Builder 下,各部分通过 Avalon 总线相互连接,形成一个系统,实现整个检测系统的协调控制。基于 FPGA 的 SOPC 系统结构框图如图 9 所示。

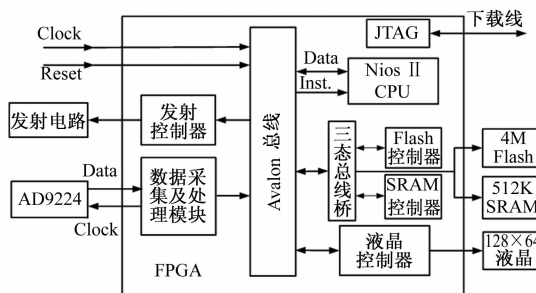


图 9 基于 FPGA 的 SOPC 系统结构框图

3.2 基于 FPGA 的硬件逻辑设计

基于 FPGA 的硬件逻辑的设计主要利用硬件描述语言,对 FPGA 内部硬件逻辑进行综合、布线及仿真。系统设计中主要是利用 Verilog HDL 编写发射控制器模块和数据采集及处理模块。

发射控制器模块主要用于控制发射电路,并触发数据采集模块开始工作。本模块对 FPGA 输入的 50MHz 时钟进行分频,得到两路完全反相的 500kHz 的脉冲信号,同时利用 Nios II 核控制该模

块每隔一定的时间产生 10 个周期、频率为 500kHz 的信号,控制发射电路产生发射信号。发射控制器在 Quartus II 中生成的模块如图 10 所示。

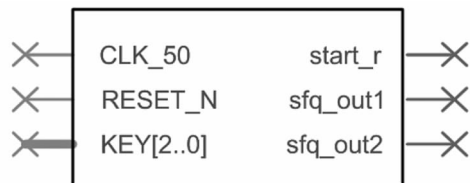


图 10 发射控制器顶层模块图

数据采集及处理模块主要负责对接收信号进行采集、处理和存储。对采集信号的处理主要是利用 DSP Builder 实现的数字滤波器以及互相关等算法实现信号的实时滤波和检波。设计中将处理结果直接存储到 FPGA 内部 FIFO 中。该模块顶层模块图如图 11 所示。

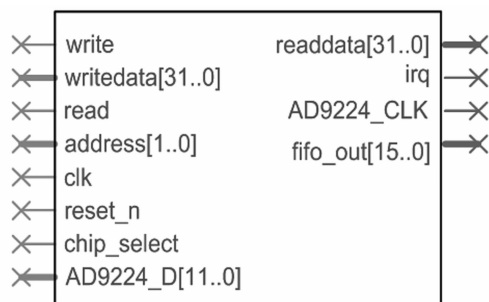


图 11 数据采集及处理顶层模块图

3.3 基于 Nios II 的程序设计

Nios II 主要负责系统启动、发射/接收控制、阈值选取判定以及显示等任务。Nios II CPU 的软件流程图如图 12 所示。检测中,将第一次透射波幅值的 10%作为判断缺陷是否存在的阈值。

4 基于 FPGA 的电磁超声微弱信号检测

上述电路对 EMAT 的接收信号进行了放大滤波和采集,然而由于 EMAT 换能效率低,同时环境中存在很强的电磁干扰和噪声,EMAT 回波信号仍存在严重的背景噪声^[10]。因此需要采用微弱信号检测方法对其进行信号处理。系统在设计中主要采用互相关方法对超声信号进行同步检波。互相关方法利用信号周期性和噪声随机性特点,提取微弱的电磁超声信号信息,可以有效判别和定位轮对踏面缺陷^[10]。

利用 Altera 提供的 DSP Builder 在 Simulink 环境下可以容易实现该互相关算法,其原理如图 13 所示。

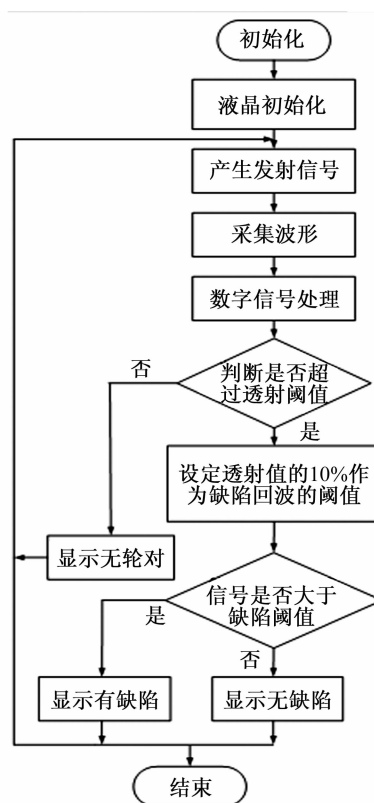


图 12 Nios II 软件流程图

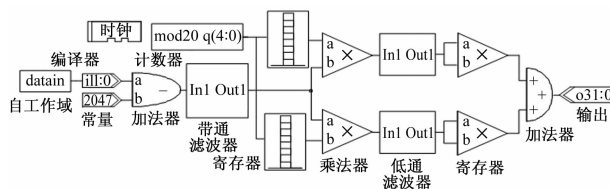


图 13 DSP Builder 下互相关原理图

5 试验结果分析

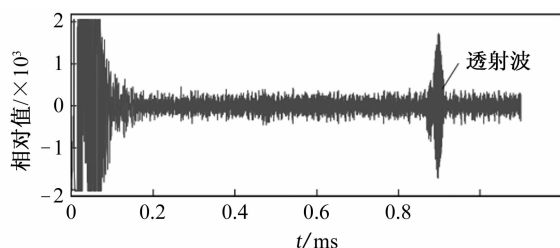
为了测试检测系统性能,在轮对踏面上加工了一个深 2 mm、长 15 mm 的人工缺陷,并在其运行速度为 20 km/h 时进行动态检测。检测系统实物如图 14 所示。检测及处理后的信号对比如图 15 所示。通过两者对比可知,处理后电磁超声信号具有很高的信噪比,且通过施加适当阈值即可判断轮对踏面是否存在缺陷。

6 结论

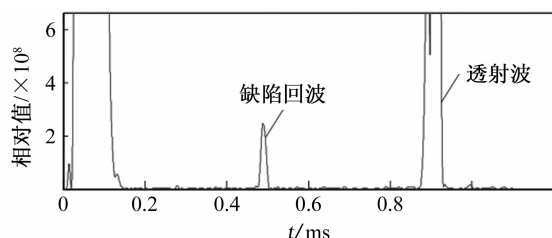
在深入研究国内外轮对踏面缺陷检测方法的基础上,研制了基于 FPGA 的轮对踏面电磁超声在线检测系统。该系统可以在轮对踏面激发和接收电磁超声表面波,克服了传统压电超声需要耦合剂的缺点。同时采用基于 FPGA 的 SOPC 技术大大简化了硬件电路设计,提高了信号处理的实时性。试验



图 14 轮对踏面电磁超声检测系统实物图



(a) 原始信号



(b) 互相关检波后信号

图 15 轮对检测信号及处理结果

结果表明,该系统可在轮对运行速度 $<20\text{ km/h}$ 时成功检测出轮对踏面中深度 $>2\text{ mm}$ 的人工缺陷,实现了列车轮对踏面缺陷高效、精确地在线检测。



(上接第 518 页)

检测是曲面工件对接焊接接头超声检测的一个重要应用。JB/T 4730.3—2005 对曲面工件对接焊接接头超声检测除了要求“可尽量按平板对接焊接接头的检测方法进行检测”外,另一个重要要求就是对对比试块的设计和制作要求。

根据管子的外径决定对比试块检测面的曲率半径,根据管子的壁厚决定对比试块的人工反射体类型和尺寸,按照标准关于“环缝检测时,对比试块的

参考文献:

- [1] MacLauchlan D, Clark S, Cox B. Recent advancements in the Application of EMATs to NDE[C]// 16th World Conference on NDT. Montreal, Canada: [s. n.], 2004.
- [2] 王红,彭亮,于宗光. FPGA 现状与发展趋势[J]. 电子与封装, 2007, 7(7): 32—37.
- [3] Clark A V, Schramm R E, Schaps S R. Safety assessment of railroad wheels through roll-by detection of tread cracks[C]// Proceedings of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers Conference on Nondestructive Evaluation of Aging Railroads. Oakland: [s. n.], 1995, 2458: 109—119.
- [4] Mian Z F, Peabody W, Haller T. Wheel Inspection System[P]. US: 6523411B1, 2003.
- [5] Salzburger H J, WANG L, GAO X R. In-motion ultrasonic testing of the tread of high-speed railway wheels using the inspection system AUROPA III[C]// 17th World Conference on Nondestructive Testing. Shanghai: [s. n.], 2008.
- [6] 范弘,孙邦明,沈明珠. 火车车轮超声探伤技术与开发[J]. 钢铁, 2000, 35(12): 60—63.
- [7] 彭建平,王黎,高晓蓉. 基于 EMAT 技术的轮对踏面探伤仪[J]. 仪表技术与传感器, 2009(1): 18—20.
- [8] 王淑娟,赵再新,翟国富. 基于电磁超声的火车车轮裂纹检测系统[J]. 仪表技术与传感器, 2005(11): 28—29.
- [9] 王淑娟,康磊,翟国富. 电磁超声换能器的微弱信号检测[J]. 无损检测, 2007, 29(10): 591—592.
- [10] Kang L, Mi M J, Wang S J. Research on weak signal detection technique for electromagnetic ultrasonic inspection system[C]// The 3rd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA 2008). Singapore: [s. n.], 2008.

曲率半径应为检测面曲率半径的 0.9~1.5 倍”、检测壁厚 4~6 mm 管道“对比试块的曲率应与被检管径相同或相近,其曲率半径之差不应大于被检管径的 10%”以及“如检测曲率半径 $R \leq W^2/4$ 时,应采用与检测面曲率相同的对比试块”等规定,正确设计人工反射体位置和数量、减少对比试块数量,形成系列化,方便应用。应用时应注意探头宽度 W 的选择。